SUR LE FILTRAGE DU CHATOIEMENT DANS LES IMAGES RADAR SAR POLARIMÉTRIQUES : ÉTUDE DES RÉGIONS D'ALGER ET D'ORAN.

Lynda BOUCHEMAKH[*], Souhila BOUTARFA, Youcef SMARA, Boularbah SOUISSI

Laboratoire de Traitement d'Images et Rayonnement, Faculté d'Électronique et d'Informatique, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene.
B.P. 32, El Alia, Bab Ezzouar, 16111, Alger, Algérie.
Téléphone : (+213-21)247 950, poste 806 ; Télécopieur (FAX) : (+213-21) 247 187
Courriel : bouchemakh@gmail.com, lbouchemakh@usthb.dz, s.boutarfa@hotmail.fr, yousmara@yahoo.com

Soumis le 8 janvier 2010 ; accepté le 4 mars 2011 - © *Revue Télédétection*, 2011, vol. 10, n^{os} 2-3, p. 113-127

Résumé

Dans cet article, nous présentons différentes méthodes de filtrage de données SAR polarimétriques en mettant en relief les caractéristiques de chaque méthode. L'opération de sommation cohérente lors de la mesure des données SAR entraîne l'apparition d'un bruit multiplicatif, appelé chatoiement, qui perturbe fortement les traitements des données radar ainsi que l'interprétation de leurs résultats. Nous proposons dans cet article une étude comparative de différentes méthodes de filtrage de chatoiement dans les images radar à synthèse d'ouverture polarimétriques (PolSAR). Ces méthodes de filtrage PolSAR sont évaluées sur des images dans le cas totalement polarimétrique pour la zone d'Alger, Algérie, sur les trois composantes polarimétriques de la zone d'Oberpfaffenhofen située à Munich en Allemagne, et dans le cas de double polarisation pour des images ASAR du satellite ENVISAT de la région d'Oran en Algérie. Les critères de comparaison sont : le lissage des zones homogènes, la préservation de contours et la conservation de l'information polarimétrique.

Mots clés - Filtrage de Chatoiement, polarimétrie, filtre de Lee adaptatif, ASAR, PWF, ESDPWF.

ON SPECKLE FILTERING IN POLARIMETRIC RADAR SAR IMAGES: STUDY OF ALGIERS AND ORAN REGIONS

Abstract

In this paper, we present various filtering methods in polarimetric synthetic aperture radar images (PolSAR). Coherent summation operation in SAR data measure leads multiplicative noise appearance, named Speckle which disturb strongly radar data treatments and their results interpretation. We propose in this paper a comparative study of Speckle filtering methods in polarimetric synthetic aperture radar images. These filtering methods are evaluated on images in the case of totally polarimetric data in Algiers images, Algeria, on the three polarimetric components of the Oberpfaffenhofen area, in Munich, Germany, and in the case of dual polarisation ASAR images of Envisat satellite for Oran, west town in Algeria. The comparison criterions are: the polarimetric information conservation, the edge preservation and the smoothing of homogeneous areas.

Keywords - Speckle filtering, polarimetry, adaptive Lee filter, ASAR, PWF, ESDPWF

1. INTRODUCTION

L'imagerie radar est devenue aujourd'hui un outil indispensable pour la surveillance de l'environnement terrestre. Le radar est un système de mesure qui permet d'observer les zones terrestres quelque soient les conditions météorologiques du fait de la pénétration des ondes électromagnétiques à travers le couvert nuageux. En outre, les capteurs micro-ondes ont leur propre source d'illumination (système actif), ils sont donc indépendants de l'illumination du soleil et peuvent fonctionner aussi bien la nuit que le jour. La dernière décennie a vu le développement d'une nouvelle génération de radars multi fréquentiels et multi polarisations aéroportés et spatioportés comme ENVISAT / ASAR (ESA, 2002), ALOS/PALSAR (NASDA, 2006), RADARSAT II (CSA, 2007) voire TerraSAR X-L (Astrium DLR, 2007) qui sont utilisés pour l'observation de la terre depuis l'espace afin d'étudier et suivre l'évolution environnementale terrestre. Ces

différents capteurs fournissent une information qui se révèle efficace pour une meilleure caractérisation des interactions entre l'onde électromagnétique et le milieu naturel en comparaison avec les systèmes radars satellitaires mono fréquence et mono polarisation.

L'opération de sommation cohérente lors de la mesure des données SAR entraîne l'apparition d'un bruit multiplicatif (Lee, 1981), appelé chatoiement. Celui-ci perturbe fortement les traitements des données radar ainsi que l'interprétation de leurs résultats. Il se présente sous une forme granulaire de bruit qui affecte les images radar et se manifeste sous forme de variations aléatoires. La présence du chatoiement est due aux interférences aléatoires des ondes réfléchies par de nombreux diffuseurs élémentaires sur une cellule de résolution de la surface d'objet illuminée.

Dans cet article, nous proposons une étude comparative de différentes méthodes de filtrage de données SAR polarimétriques. Les Filtres de Novak, Novak amélioré et le filtre de Lee sont évalués sur trois types d'images : dans le cas totalement polarimétrique pour la zone d'Alger, Algérie, sur les trois composantes polarimétriques de la zone d'Oberpfaffenhofen située à Munich en Allemagne, et dans le cas de double polarisation pour des images ASAR du satellite ENVISAT de la région d'Oran en Algérie.

Novak et Burl (Novak and Burl, 1990) ont développé un filtre polarimétrique blanchisseur (PWF : Polarimetric Whitening Filter) en utilisant de façon optimale les éléments de la matrice de covariance polarimétrique pour construire une image intensité avec un minimum de chatoiement. En 2007, Nan and al. (Nan and al, 2007) ont amélioré ce filtre en introduisant un détecteur de contours. Un algorithme plus performant appelé ESDPWF (Enhanced Structure Detection Polarimetric Whitening Filter) a été ainsi obtenu. Cet algorithme réduit le chatoiement de façon optimale en préservant les éléments structuraux de l'image tels que les lignes et les frontières entre les régions ainsi que les propriétés polarimétriques de l'image.

Le deuxième filtre qui a été proposé pour l'étude comparative est le filtre de Lee (Lee and al, 1999a). Ce filtre adaptatif tient compte des propriétés statistiques du chatoiement du premier et du second ordre. Cette approche s'appuie sur la préservation des propriétés polarimétriques et les corrélations statistiques entre les canaux, afin de ne pas introduire d'interférences entre ces derniers, et ne pas dégrader la qualité de l'image. Nous l'avons appliqué sur des images SAR de la zone d'Oberpfaffenhofen située aux environs de Munich (Allemagne) et sur les images d'Alger (Algérie) (Bouchemakh *et al*, 2008). Dans (Boutarfa *et al*, 2009), nous avons présenté le filtre de Lee dans le cas de double polarisation des images ASAR du satellite ENVISAT et nous avons modifié l'algorithme de manière à ce qu'il soit adapté à ce type d'images. Cette nouvelle approche est basée sur le calcul du coefficient de filtrage adaptatif et sur le choix de la fenêtre sélectionnée pour la détection de contours.

2. ETAT DE L'ART SUR LE FILTRAGE DE CHATOIEMENT

Comme pour les images SAR mono polarisation, les images SAR polarimétriques sont affectées par un bruit granulaire, de type poivre et sel, communément appelé chatoiement (Goodman, 1985). L'effet du chatoiement sur l'estimation des paramètres polarimétriques a été en premier étudié par Goodman en optique sur les lasers (Goodman 1963 ; 1975 ; 1985). Jusqu'en 1999, la recherche des effets du chatoiement sur les paramètres statistiques polarimétriques a été un champ d'études dans le domaine de l'imagerie SAR (Barakat 1985 ; Eom and Boerner 1991 ; Lee and al 1994 ; Lopes and al 1992 ; Murza 1978 ; Quegan and Rhodes, 1995 ; Sarabandi, 1992 ; Touzi and Lopes 1991 ; 1996 ; Touzi and al. 1999 ; Vachula and Barnes 1983)

Murza(1978) et Vachula and Barnes (1983) ont été les premiers à utiliser la distribution de Wishart pour décrire les statistiques des paramètres polarimétriques des images SAR. La distribution de Wishart a été largement utilisée pour estimer l'effet du chatoiement multilook sur les outils polarimétriques (Lopes *et al*. 1992 ; Lee *et al*,1994a Touzi *et al*., 1999) et comme base d'algorithmes de classification et de segmentation (Lee *et al*, 1994b ; 1999b, Ferro-Famil *et al*, 2001 ; Beaulieu and Touzi 2004) et aussi pour des techniques de détection de contours (Shou *et al*, 2003).

Le filtrage de chatoiement d'images SAR polarimétriques a également été un thème de recherche durant plusieurs années (Novak end Burl, 1990 ; Lee *et al*, 1991 ; Touzi and Lopes, 1994 ; Shou and Skriver, 2001). Touzi and Lopez (1994) ont été les premiers à montrer que l'utilisation d'un filtre conventionnel mono polarisation (Lee, 1981 ; Lee *et al*, 1994a ; Touzi 2002) ne préserve pas l'information polarimétrique et que le filtrage de chatoiement doit être appliqué sur les éléments de la matrice de covariance et non uniquement sur les éléments de la matrice de diffusion. Divers filtres fournissant une matrice de covariance filtrée, ou matrice de Muller filtrée, ou matrice de cohérence filtrée, ont été développés (Touzi and Lopes, 1994 ; Lee *et al* 1994b ; Lee and Grues 2000, Shou and skriver 2001)

Durant la dernière décennie, Lee *et al* (Lee and al. 2006) ont introduit un nouveau concept dans le filtrage de chatoiement des images PolSAR qui permet de préserver le mécanisme de diffusion dominant de chaque pixel filtré. Les résultats présentés par Lee ont été confirmés par Touzi (Touzi 2007). Les travaux de Lopez-Martinez (Lopez and al 2005, Lopez-Martinez and Pottier 2007) ont permis d'évaluer l'influence du chatoiement de la matrice de cohérence sur l'estimation des valeurs utilisées dans la décomposition H/A/Alpha. Il a également montré que le bruit pour les éléments hors diagonale de la matrice de covariance n'est pas uniquement multiplicatif, mais qu'un bruit additif était

également présent (Lopez-Martinez et Pottier 2007). D'autres travaux ont également vu le jour, en se basant sur la décomposition multi-échelles, tels que ceux développés par Lopez Martinez *et al* en 2005 (Lopez and al 2005) et par Farage et Foucher les années suivantes (Farage 2007, Foucher and al 2006, Foucher 2007)

3. FILTRE POLARIMÉTRIQUE BLANCHISSEUR (PWF) DE NOVAK ET SA VERSION AMELIORÉE ESDPWF

Le filtre polarimétrique blanchisseur PWF (Novak and Burl 1990), (Belhadj 1995) utilise les trois composantes polarimétriques complexes (HH, HV, VV) d'une image mono vue. Il démarre avec l'hypothèse que HV (et VH) sont non corrélées avec HH et VV. Un vecteur polarimétrique G formé des trois signaux complexes HH, HV, VV traverse un filtre dit blanchisseur construit à partir de la matrice de covariance comme montré à la figure 1, où $\Sigma^{-1/2}$ est donnée par :

$$\Sigma^{-1/2} = \frac{1}{\sqrt{\sigma_{HH}}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} & 0 \\ \frac{-\rho^*}{\sqrt{1-|\rho|^2}} & 0 & \frac{1}{\sqrt{\gamma(1-|\rho|^2)}} \end{pmatrix} \tag{1}$$

$$\text{avec } \sigma_{HH} = E\left\{|S_{HH}|^2\right\},\ \varepsilon = \frac{E\left\{|S_{HV}|^2\right\}}{E\left\{|S_{HH}|^2\right\}}\ ;\ \gamma = \frac{E\left\{|S_{VV}|^2\right\}}{E\left\{|S_{HH}|^2\right\}}\ ;\ \rho = \frac{E(S_{HH} \cdot S_{VV}{}^*)}{\sqrt{E\left\{|S_{HH}|^2\right\}E\left\{|S_{VV}|^2\right\}}}$$

A la sortie du filtre de Novak, on obtient une image intensité scalaire Pce, donnée par l'équation 2, formée d'une combinaison des trois images HH, HV et VV.

$$Pce = |S_{HH}|^2 + \left|\frac{S_{HV}}{\sqrt{\varepsilon}}\right|^2 + \left|\frac{S_{VV} - \rho^* \sqrt{\gamma}\, S_{HH}}{\sqrt{\gamma\left(1-|\rho|^2\right)}}\right|^2 \tag{2}$$

$$\text{Où :} \begin{cases} \varepsilon = \dfrac{E\left\{|S_{HV}|^2\right\}}{E\left\{|S_{HH}|^2\right\}} \\ \gamma = \dfrac{E\left\{|S_{VV}|^2\right\}}{E\left\{|S_{HH}|^2\right\}} \\ \rho = \dfrac{E\left(S_{HH} \cdot S_{VV}{}^*\right)}{\sqrt{E\left\{|S_{HH}|^2\right\}E\left\{|S_{VV}|^2\right\}}} \end{cases} \tag{3}$$

Afin d'améliorer le filtre de Novak, une méthode adaptative basée sur la détection de contours a été introduite par Nan *et al*. en 2007 (Nan *et al*, 2007)

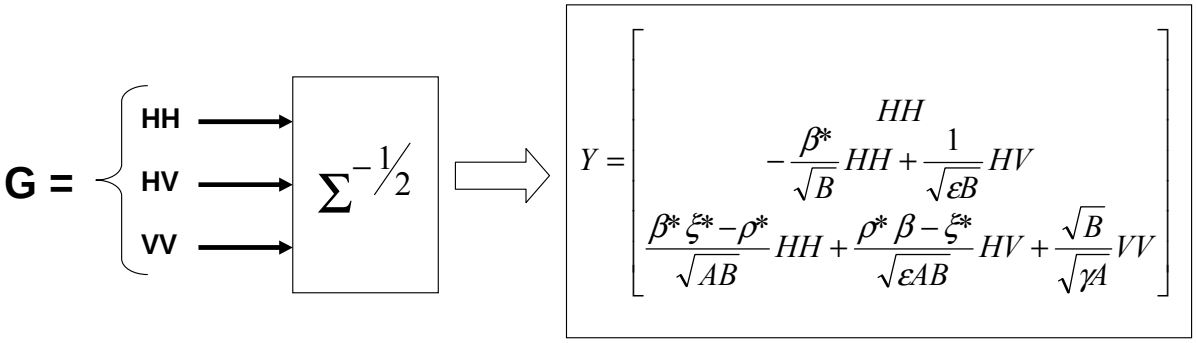


Figure 1 : Principe du filtre PWF de Novak. *Principle of PWF Novak filter*

4. FILTRAGE ADAPTATIF AMÉLIORÉ DU FILTRE PWF DE NOVAK (ESDPWF)

Un algorithme plus performant que le PWF et appelé ESDPWF (Nan *et al*, 2007) est obtenu en ajoutant une méthode de détection de structures à l'algorithme du filtre PWF en utilisant de façon optimale les éléments de la matrice de covariance polarimétrique afin de construire une image intensité avec un minimum de chatoiement. Cette nouvelle approche a pour but de réduire le chatoiement dans les images PolSAR tout en préservant les éléments structuraux de l'image, les caractéristiques statistiques entre les canaux ainsi que les propriétés polarimétriques de l'image. Quand l'une des structures : bords, lignes ou fort diffuseur est présente dans l'image, divers rapports de détection de contours géométriques sont nécessaires. Les fenêtres de détection de ces structures sont données dans les figures 2 et 3. La figure 4 donne le schéma synoptique du filtre ESDPWF.

La fenêtre de traitement est composée de deux types de régions texturées, région blanche et région noire. Soit *r* le rapport opérateur définit comme suit :

$$r = \min(I_1/I_2, I_2/I_1) \tag{4}$$

Où I_1 et I_2 sont les moyennes des valeurs d'intensité dans les deux sous-régions respectivement.

Si les zones locales de texture sont très complexes, alors des rapports de détection de contours avancés sont proposés. Dans les figures 2a, 2b et 3a, une partie du processus de changement progressif des fenêtres de détection de bords est montré. Les fenêtres de détection des lignes peuvent être déduites de la même manière. Les figures 2c et 3.b montrent le mode de détection de forts diffuseurs.

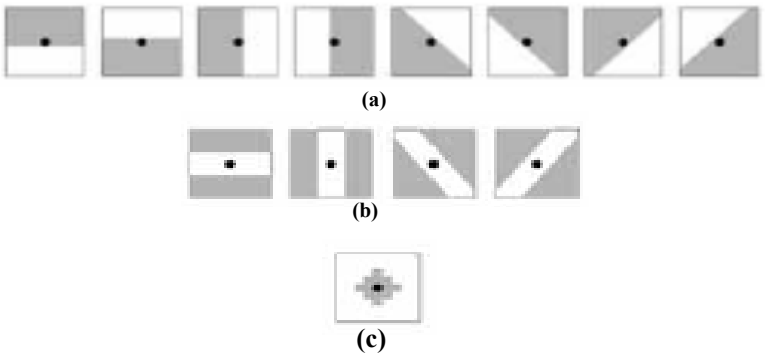


Figure 2 : Fenêtres de détection de contours géométriques pour le filtre SDPWF. (a) Bords, (b) Lignes, (c) Fort diffuseur.
Geometries of the step edge windows (a) edges, (b) lines, (c) strong scatter

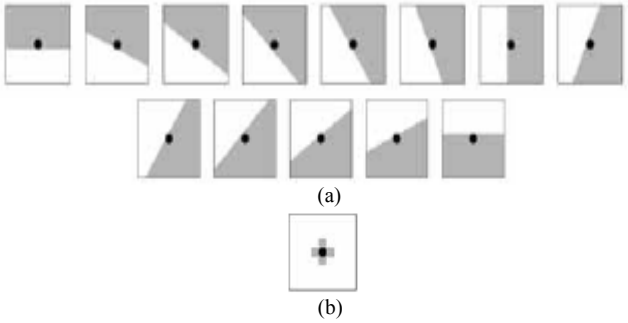


Figure 3 : Fenêtres de détection de contours géométriques pour le filtre ESDPWF. (a) Bords, (b) Fort diffuseur.
Part of the gradual change process of edge-ratio-detector (a) Edges (b) Strong scatter

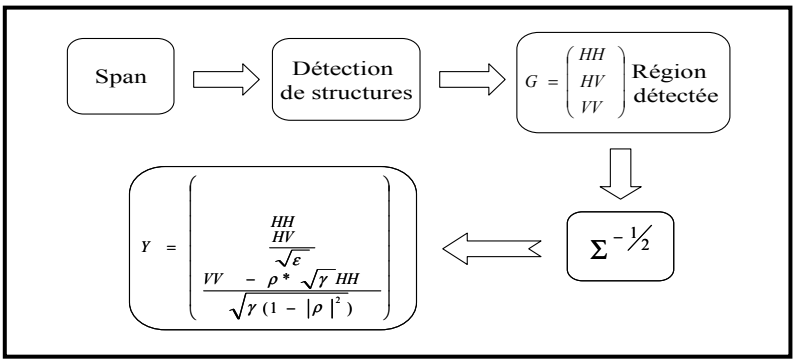


Figure 4 : Schéma bloc du filtre ESDPWF
Block diagram of ESDPWF filter

5. FILTRE DE LEE ADAPTATIF (TRIPLE OU QUADRI POLARISATION)

Le filtre de Lee (Lee and al 1999a) est un filtre adaptatif basé sur le critère d'erreur quadratique moyenne minimale (EQMM), et sur le calcul des paramètres statistiques de l'image. Il considère le chatoiement comme étant un bruit multiplicatif statistiquement indépendant de la scène. La méthode du filtre de Lee adaptatif consiste à définir 8 fenêtres comme montrées à la figure 6. Une fenêtre est sélectionnée pour filtrer le pixel central. La partie blanche de chaque fenêtre est utilisée dans le calcul du filtrage. Cette méthode filtre tous les éléments de la matrice de covariance C (équation 5) et l'image puissance *SPAN* (équation 6) donnés par :

$$C = k_s . k_s^{*t} \tag{5}$$

où $k_s = \left[S_{hh} \quad \sqrt{2}S_{hv} \quad S_{vv}\right]^t$ représente le vecteur de diffusion.

$$SPAN = k_s^{*t}\ k_s = \left|S_{hh}\right|^2 + 2\left|S_{hv}\right|^2 + \left|S_{vv}\right|^2 \tag{6}$$

Ce filtre est basé sur le filtrage de l'image SPAN (équation 6) afin d'obtenir les deux paramètres principaux de filtrage : la fenêtre sélectionnée et un paramètre noté b (Lee and al 1999a). Ces deux paramètres sont utilisés pour filtrer toutes les images formant les éléments de la matrice de covariance.

Afin de vérifier que le chatoiement est caractérisé par un modèle multiplicatif, on examine les caractéristiques des éléments de la matrice de covariance en calculant l'écart type en fonction de la moyenne dans des fenêtres 5x5 de l'image.

Les figures 5.a, 5.b et 5.c montrent les caractéristiques du bruit multiplicatif présent dans les éléments diagonaux de la matrice de covariance alors que les figures 5.d et 5.e montrent un bruit qui n'est ni multiplicatif ni additif pour les éléments hors diagonale. En 2007, Lopez Martinez and Pottier proposent de modéliser le bruit comme une combinaison d'un bruit multiplicatif et d'un bruit additif. Un filtrage a été proposé pour réduire le chatoiement dans les images PolSAR. Malgré tout, le filtrage des éléments hors diagonale reste actuellement un problème posé.

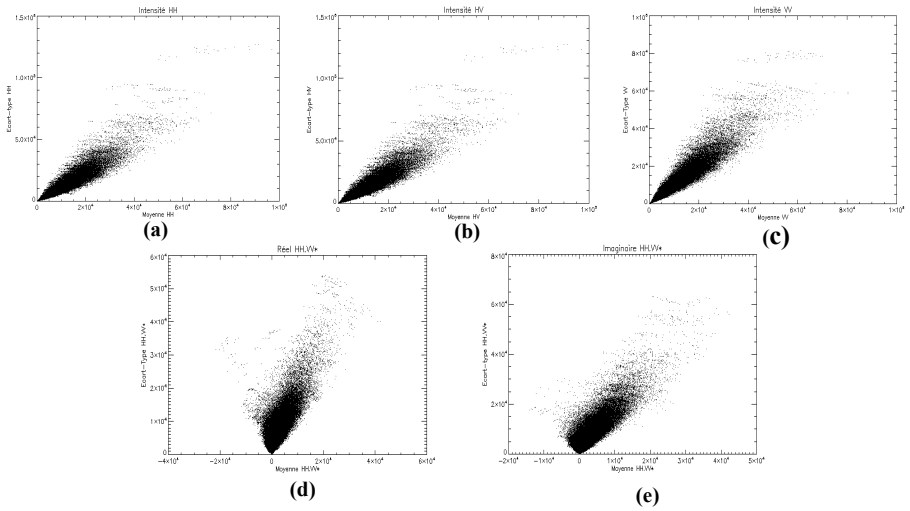


Figure 5 : Tracé de la diffusion de l'écart-type en fonction de la moyenne.

(a) $|HH|^2$, (b) $|HV|^2$, (c) $|VV|^2$. Le tracé montre bien que le bruit dans ces images est bien multiplicatif (d) Partie réelle de (VV.HH*), (e) Partie imaginaire de (VV.HH*). Le bruit présent dans ces deux dernières images est plus difficile à caractériser car c'est une combinaison de bruit additif et multiplicatif.

Scatter plots of standard deviation versus mean (a) $|HH|^2$, (b) $|HV|^2$, (c) $|VV|^2$, The noise in these images has characteristics of multiplicative noise as indicated (d) real part of (VV.HH) (e) imaginary parts of(VV.HH*). The noise in these two images is more difficult to characterize, it is a combination of multiplicative and additive noise*

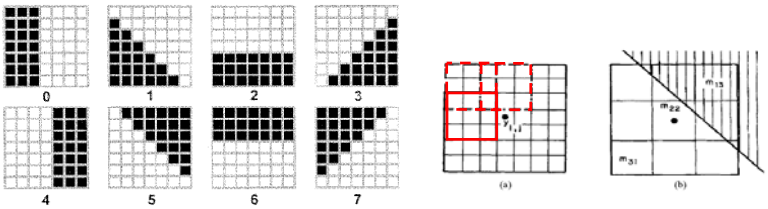


Figure 6 : (a) Les huit fenêtres à bords alignés. Selon la direction du bord, l'une des huit fenêtres doit être sélectionnée. Les Pixels blanc sont utilisés dans le calcul du filtrage, (b) Les 9 sous- fenêtres 3×3 (en rouge) formées à l'intérieur de la fenêtre mobile 7×7.
(a) Eight edge-aligned windows. Depending on the edge direction, one of the eight windows is to be selected. White pixels are used in the filtering computation.(b) The 9-under 3by3windows (red) formed inside the sliding 7by7window

6. FILTRE DE LEE ADAPTATIF DANS LE CAS DE DOUBLE POLARISATION DES IMAGES ASAR DU SATELLITE ENVISAT

L'instrument ASAR du satellite ENVISAT est configuré pour acquérir des données en bande C selon un des modes de Polarisation Alternée (PA). Contrairement aux dispositifs SAR polarimétriques classiques qui effectuent l'acquisition de quatre canaux polarimétriques, le capteur ASAR émet des signaux sur un seul canal de polarisation (H ou V) tandis que la réception est effectuée sur un ou deux polarisations orthogonales (H et/ou V). Les différentes configurations possibles sont : PP1 (HH-HV), PP2 (VH-VV) et PP3 (HH-VV), où PP représente la polarisation partielle (Ferro-Famil 2007). Les équations (7), (8) et (9) correspondant aux différentes configurations sont décrites comme suit :

$$E_{PP1} = \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{hh} \\ S_{vh} \end{bmatrix} \tag{7}$$

$$E_{PP2} = \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{hv} \\ S_{vv} \end{bmatrix} \tag{8}$$

$$E_{PP3} = \begin{matrix} [S_{hh} & S_{hv}] \\ [S_{vh} & S_{vv}] \end{matrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{hh} \\ S_{vv} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Nous avons adapté le filtre de Lee de sorte à filtrer les éléments de la matrice de covariance et le SPAN des deux canaux polarimétriques complexes selon la configuration PP choisie (Boutarfa *et al* 2009). Nous avons utilisé les mêmes fenêtres de la figure 6 à bords alignés pour la détection de contours et les mêmes paramètres statistiques sont calculés pour filtrer le pixel central.

Dans cet article, nous proposons une étude comparative de différentes méthodes de filtrage de données SAR polarimétriques. Les Filtres de Novak, Novak amélioré et le filtre de Lee sont évalués sur trois types d'images : dans le cas totalement polarimétrique pour la zone d'Alger, sur les trois composantes polarimétriques de la zone d'Oberpfaffenhofen située à Munich, et dans le cas de double polarisation pour des images de la région d'Oran.

7. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

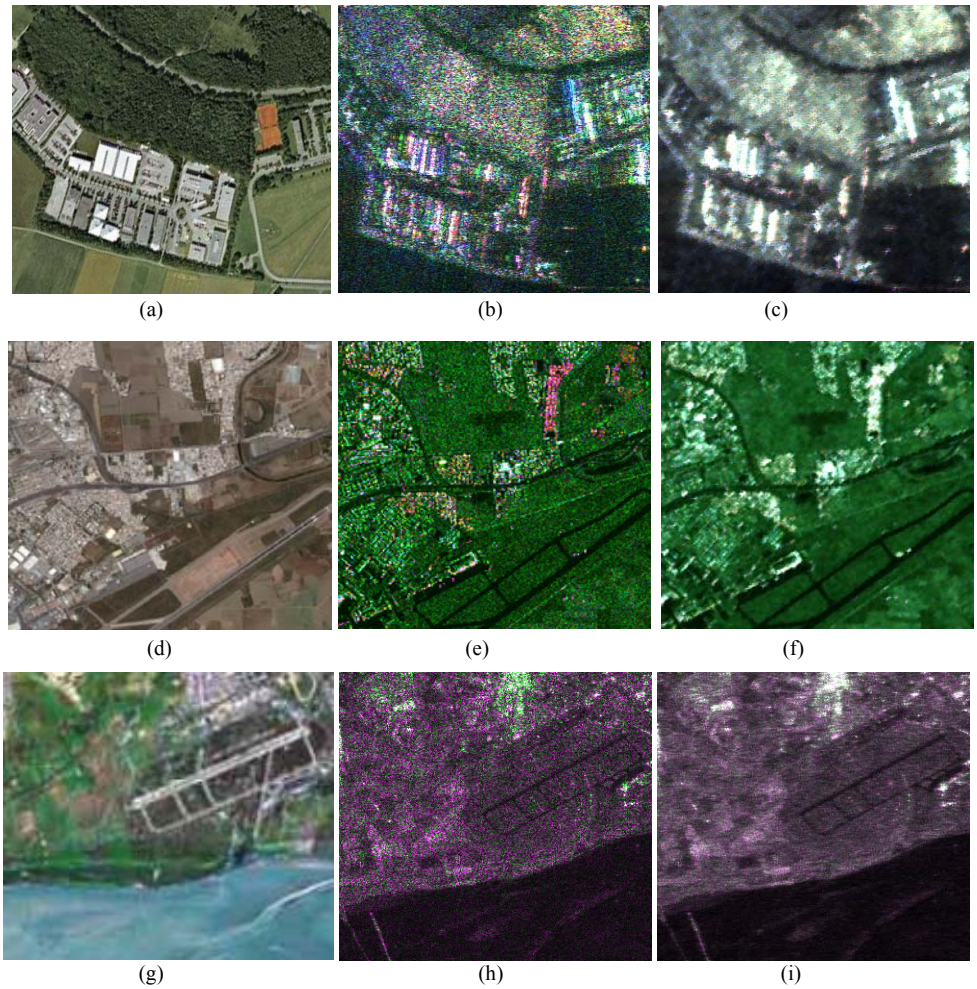


Figure 7 : Composition colorée d'images de taille (500x500) filtrée par le filtre de Lee. (a) Image optique d' Oberpfaffenhofen (Google Earth), (b) et (c) Image d' Oberpfaffenhofen, originale et filtrée, (d) Image optique d'Alger, (e) et (f) Alger originale et filtrée en PP3, ($|HH|^2$=Rouge, $|HV|^2$ +$|VH|^2$ =Vert, $|VV|^2$=Bleu). (g) Image optique d'Oran, Algérie, (h) et (i) Oran originale et filtrée en PP3. ($HH|^2$= Rouge, $|VV|^2$ =Vert, $|HH|^2$=Bleu)

Color composed Lee filtered images of size (500x500) pixels. (a) Optic image of Oberpfaffenhofen area in Germany (Google Earth), (b) and (c) Original and filtered Oberpfaffenhofen image, (d) Optic image of Algiers, (e) and (f) Original and PP3filtered Algiers image with red for $|HH|^2$, Green for $|HV|^2$ +$|VH|^2$ and blue for $|VV|^2$.(g) optic image of Oran, Algeria, (h) et (i) Original and PP3filtered Oran image with red for $|HH|^2$, Green for $|VV|^2$ and blue for $|HH|^2$.

Les tests des filtres sont effectués sur deux images SAR complexes mono-vue, l'une est aéroportée de taille (2300x925) pixels correspondant à la région Oberpfaffenhofen en Allemagne (figure7.b) acquise par le capteur ESAR en 2001, en bande P et l'autre est de dimension (6239x3644) pixels correspondant à la zone d'Alger en Algérie (figure7.e), acquise par Radarsat2 en avril 2009, en bande C. Dans le cas du capteur ASAR du satellite ENVISAT, nous avons utilisé des images polarimétriques de la zone d'Oran (Algérie) (figure7.h) de type SLC, en configuration PP3 (HH-VV) et de dimensions (710x3550) pixels.

L'évaluation des filtres repose sur les critères principaux suivants :

- leur capacité à lisser les zones homogènes.
- leur aptitude à préserver les contours.
- et leur aptitude à préserver l'information polarimétrique.

D'après la figure 7, on constate que le filtre de Lee présente un bon lissage et une grande aptitude à préserver les contours et les détails fins. Plus on diminue la valeur de la variance du chatoiement, plus on préserve les contours avec moins de lissage sur les zones homogènes.

La comparaison entre les images SLC en composition colorée (figure 8), montre que le filtre ESDPWF permet d'obtenir un bon compromis entre le lissage des zones homogènes et la préservation de contours.

Dans la figure 9, la comparaison a été faite entre l'image de puissance Pce (équation 2), et la composante HH non filtrée en amplitude. On remarque que pour l'image filtrée par le filtre PWF, nous avons un léger lissage des zones homogènes, l'aspect granulaire du chatoiement a diminué, les zones hétérogènes et les structures fines ont été préservées surtout dans les zones contenant du bâti. On constate aussi que l'image filtrée par le filtre ESDPWF présente un fort lissage par rapport au filtre PWF et une meilleure préservation des contours présents dans l'image.

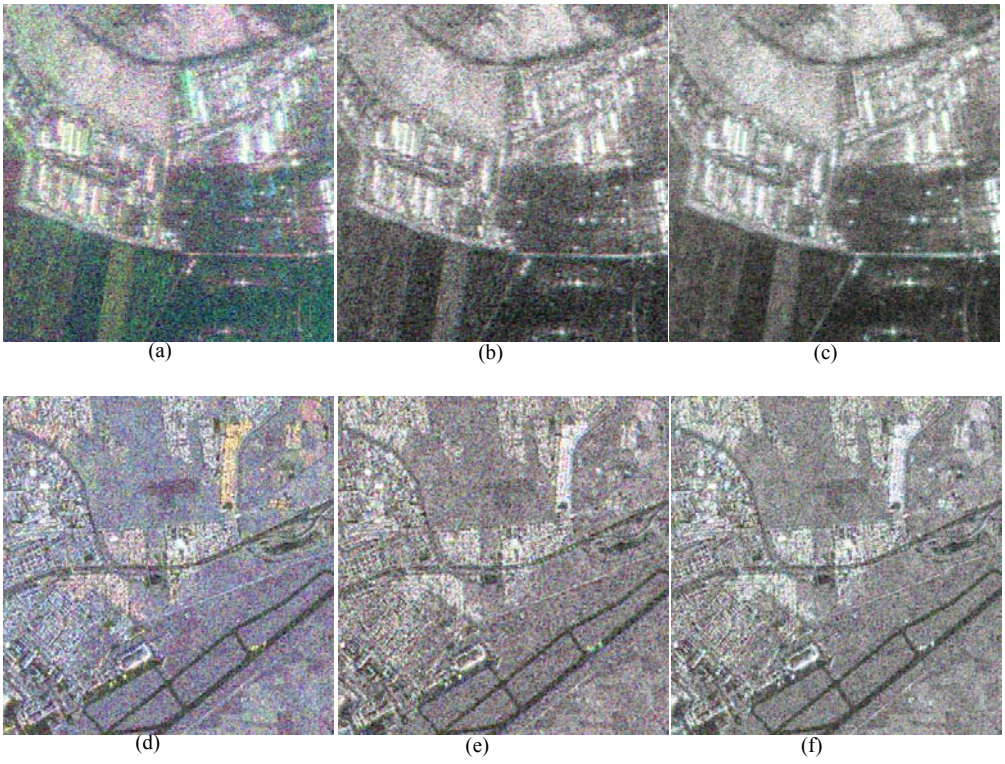
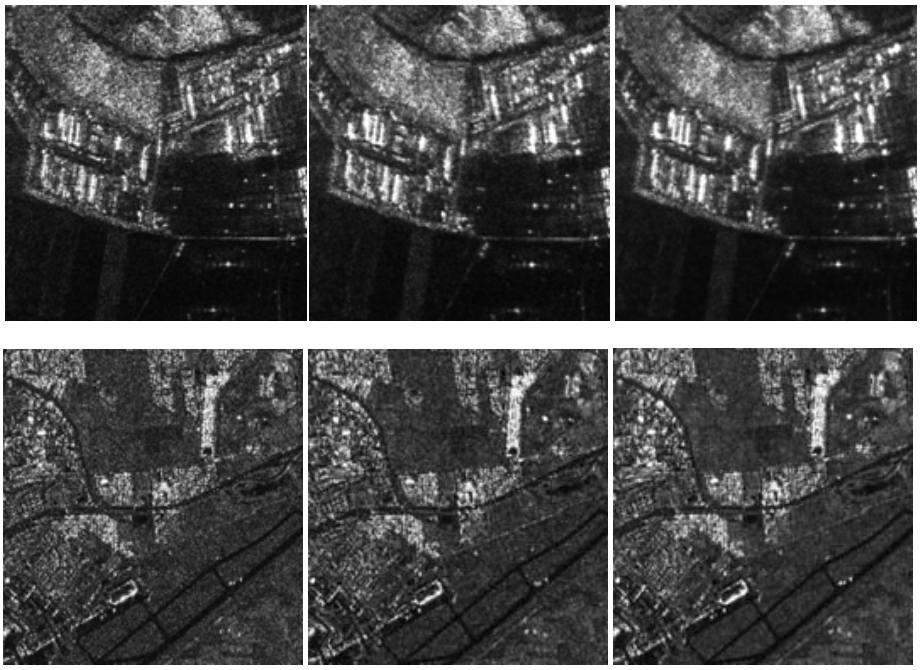


Figure 8 : Images SLC en composition colorée. (a) Image SLC originale d'Oberpfaffenhofen, (b) Image filtrée Oberpfaffenhofen (PWF), (c) Image filtrée Oberpfaffenhofen (ESDPWF), (d) Image originale (Alger), (e) Image filtrée Alger (PWF), (f) Image filtrée Alger (ESDPWF). (HH=Rouge, VV=Bleu, HV=Vert).

Color composed SLC images (a) SLC Original image of Oberpfaffenhofen, (b)Filtered SLC image of Oberpfaffenhofen by PWF filter, (c) Filtered SLC image of Oberpfaffenhofen by ESDPWF filter, (d) SLC Original image of Algiers, (e) Filtered SLC image of Algiers by PWF filter, (f) Filtered SLC image of Algiers by ESDPWF filter. (HH=Red, VV=Blue, HV=Green).



(d) (e) (f)

Figure 9 : (a) Image originale d' Oberpfafenhoffen , Allemagne, (b) Image Pce filtrée Allemagne (PWF), (c) Image Pce filtrée Allemagne (ESDPWF), (d) Image $|HH|^2$ originale (Alger). (e) Image Pce filtrée Alger (PWF), (f) Image Pce filtrée Alger (ESDPWF).

(a) Original image of Oberpfafenhoffen , Germany, (b) Filtred Pce image by PWF filter, (c) Filtred Pce image by ESDPWF filter, (d) |HH|2 original image of Algiers,Algeria, (e) Filtred Pce Algiers image by PWF filter, (f) Filtred Pce Algiers image by ESDPWF filter

Evaluation statistique

Pour évaluer la performance des filtres, nous avons effectué des calculs statistiques sur trois zones homogènes de taille (20x20) pixels extraites à partir de l'image à filtrer (figure 10) :

$$\textit{Ecart-type}: \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{N_w-1}\sum_{j=0}^{N_w-1}\left(y(i,j)-\mu\right)^2}{N_w \times N_w}} \tag{10}$$

$$\textit{Moyenne}: \quad \mu = \frac{\sum_{i=0}^{N_w-1}\sum_{j=0}^{N_w-1} y(i,j)}{N_w \times N_w} \tag{11}$$

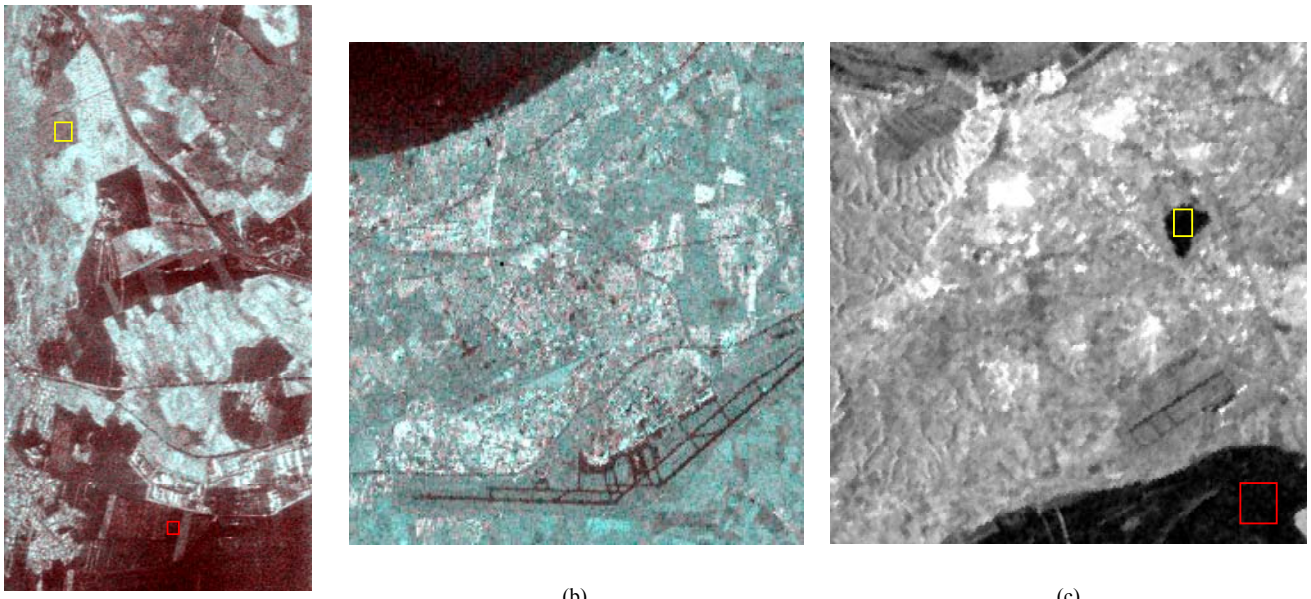
$$\textit{Coefficient de variation}: \quad C_V = \frac{\sigma}{\mu} \tag{12}$$

$$\textit{Nombre équivalent de vues}: \quad ENL = \left(\frac{1}{C_V}\right)^2 \tag{13}$$

$$\textit{Résolution de radiation [8]}: \quad RR(dB) = 10\log\left[10 + \left(\sigma / \mu\right)\right] \tag{14}$$

$$\textit{Coefficient de préservation de contours :}\quad IPC = \frac{\sum_{i=0}^{Nw-1}\sum_{j=0}^{Nw-1}\left|y(i,j)-y(i-1,j+1)\right|}{\sum_{i=0}^{Nw-1}\sum_{j=0}^{Nw-1}\left|x(i,j)-x(i-1,j+1)\right|} \qquad (15)$$

Où y est le pixel original et x est le pixel filtré.



(a) (b) (c)

Figure 10 : Images SLC filtrée par le filtre de Lee, zone 1 (rouge), zone 2 (jaune), (a) Oberpfafenhoffen, (b) Alger, (c) Oran
SLC images filtered by the Lee filter, Zone 1 (red), Zone 2 (yellow), (a) Oberpfafenhoffen, (b) Algiers, (c) Oran

Un bon filtrage dans les zones homogènes est assuré par une valeur de coefficient de variation Cv faible, une diminution de la valeur de l'écart-type σ , une conservation globale de la moyenne μ, une augmentation de la valeur de l'ENL et une diminution de la valeur de la radiation de résolution *RR*.

Dans les régions hétérogènes, les contours doivent être préservés. Pour cela, nous calculons le coefficient de préservation de contours IPC (Index Preservation Contour). Celui-ci doit avoir une valeur proche de 1. Les résultats sont donnés dans le tableau 1.

Tableau 1: Calcul de l'Index de Préservation de Contours pour les trois types d'images radar : bi-polarisée, tri et quadri polarisées, filtrées par trois types de filtres : Lee, Novak(Pwf) et Novak amélioré (ESDPWF). *Calculation of the Edge Preservation Index for the three types of radar images: dual-polarized, tri and quad-polarized polarized, filtered by three types of filters: Lee, Novak (PWF) and Novak improved (ESDPWF)*

Filtres	**IPC**		
	Bi-polarisation PP3-Oran	Triple polarisation- Allemagne	Quadri-polarisation-Alger
Lee	1.219	0.684	1.262
PWF	_	0.555	0.430
ESDPWF	_	1.083	0.742

Nous remarquons que pour les filtres de Lee et ESDPWF, l'IPC est proche de 1, donc grande aptitude à préserver les contours. De ce fait, les filtres étudiés correspondent bien aux critères statistiques mentionnés plus haut.

Les résultats statistiques du filtrage sur les différentes images sont résumés dans les tableaux 2-6.

Tableau 2: Évaluation statistique de l'image SPAN des trois composantes filtrée par le filtre de Lee par rapport à l'image SPAN originale (Oberpfaffenhofen, Allemagne). *Statistical evaluation of the three SPAN image components filtered by Lee filter over the original image SPAN (Oberpfaffenhofen, Germany).*

	Image SPAN Originale				
Zones	**σ**	**μ**	**Cv**	**ENL**	**RR**
Z1	1399.94	2036.61	0.68	2.11	23.69
Z2	15758	21896.1	0.72	1.93	23.72
Z3	28345	34754.7	0.81	1.50	23.81
	Image SPAN Filtrée (Lee)				
Zones	**σ**	**μ**	**Cv**	**ENL**	**RR**
Z1	880.174	2032.33	**0.43**	5.33	23.45
Z2	10289.9	22113	**0.46**	4.62	23.48
Z3	19601.4	34514.1	**0.56**	3.10	23.58

Tableau 3: Évaluation statistique de l'image SPAN des trois composantes filtrée par le filtre de Lee par rapport à l'image SPAN originale (Alger, Algérie). *Statistical evaluation of the three SPAN image components filtered by Lee filter over the original image SPAN (Algiers, Algeria).*

	Image SPAN Originale				
Zones	**σ**	**μ**	**Cv**	**ENL**	**RR**
Z1	3051740	4636760	0.65	2.30	23.66
Z2	598870	608945	0.98	1.03	23.96
Z3	11682900	14683700	0.79	1.57	23.79
	Image SPAN Filtrée (Lee)				
Zones	**σ**	**μ**	**Cv**	**ENL**	**RR**
Z1	1897400	4611620	**0.41**	5.90	23.42
Z2	424156.	603725.	**0.70**	2.02	23.7048
Z3	7670190	14703700	**0.52**	3.67	23.53

Tableau 4: Évaluation statistique de l'image SPAN filtrée par le filtre de Lee en configuration PP3 par rapport à l'image SPAN originale (Oran, Algérie). *Statistical evaluation of image SPAN filtered by PP3 Lee filter configuration from the original SPAN image (Oran, Algeria).*

	Image SPAN Originale				
Zones	**σ**	**μ**	**Cv**	**ENL**	**RR**
Z1	1438.87	2126.41	0.67	2.18	23.68
Z2	8331.53	11352.8	0.73	1.85	23.73
Z3	1167.14	1602.83	0.72	1.88	23.73
	Image SPAN Filtrée				
Zones	**σ**	**μ**	**Cv**	**ENL**	**RR**
Z1	904.226	2117.21	**0.42**	5.48	23.44
Z2	5392.56	11261.1	**0.48**	4.36	23.49
Z3	752.778	1606.48	**0.47**	4.55	23.48

Tableau 5: Évaluation statistique de l'image Pce filtrée par les filtres PWF, ESDPWF par rapport à l'image Pce originale (Oberpfaffenhofen ,Allemagne). *Statistical evaluation of Pce image filtered by the PWF and ESDPWF filters compared to the original Pce image (Oberpfaffenhofen, Germany).*

	Image Pce Originale				
Zones	**σ**	**μ**	**Cv**	**ENL**	**RR**
Z1	1387.35	1947.67	0.712	1.97	23.71
Z2	15565.6	20627.6	0.754	1.75	23.75
Z3	27994.8	32838.7	0.852	1.37	23.84
	Image Pce Filtrée (PWF)				
Zones	**σ**	**μ**	**Cv**	**ENL**	**RR**
Z1	887.158	1337.33	0.663	2.27	23.66
Z2	20443.5	28256.3	0.723	1.91	23.72
Z3	41720	54797.9	0.661	1.72	23.76
	Image Pce Filtrée (ESDPWF)				
Zones	**σ**	**μ**	**Cv**	**ENL**	**RR**
Z1	**822.38**	1383.82	**0.59**	2.83	23.6
Z2	18739.1	28232.2	**0.66**	2.27	23.67
Z3	40632.8	56989.7	**0.71**	1.96	23.71

Tableau 6: Évaluation statistique de l'image Pce filtrée par les filtres PWF, ESDPWF par rapport à l'image Pce originale (Alger, Algérie). *Statistical evaluation of Pce image filtered by the PWF and ESDPWF filters compared to the original Pce image (Algiers, Algeria).*

	Image Pce Originale				
Zones	**σ**	**μ**	**Cv**	**ENL**	**RR**
Z1	2908730	4134510	0.70	2.02	23.70
Z2	598461	586126	1.02	0.95	23.99
Z3	11616500	13793700	0.84	1.40	23.83
	Image Pce Filtrée (PWF)				
Zones	**σ**	**μ**	**Cv**	**ENL**	**RR**
Z1	6255020	7659150	0.81	1.49	23.81
Z2	731249	827595	0.88	1.28	23.87
Z3	19032700	24739000	0.76	1.68	23.76
	Image Pce Filtrée (ESDPWF)				
Zones	**σ**	**μ**	**Cv**	**ENL**	**RR**
Z1	4235110	6296800	**0.67**	2.21	23.67
Z2	424844	635735	**0.66**	2.23	23.67
Z3	12600200	19561800	**0.64**	2.41	23.65

D'après les tableaux 5 et 6, on remarque que pour le filtre ESDPWF, il y a eu une diminution plus importante du coefficient de variation C_v par rapport au filtre PWF, ainsi que l'augmentation du nombre équivalent de vues (ENL ; Equivalent Number of Look), ce qui révèle un bon filtrage dans les zones homogènes.

L'évaluation statistique des résultats a montré une grande aptitude de préservation de contours et un bon lissage des zones homogènes.

Le tracé de la signature polarimétrique, nous informe sur l'aptitude de ces filtres à conserver l'information polarimétrique (Centre canadien de télédetection 2009). Pour cela, nous avons comparé les signatures polarimétriques (Ouarzeddine *et al* 2006) des images filtrées dans les zones homogènes (forêt, lac, Sebkha) comme montrées dans la figure 10.

La préservation de la signature polarimétrique en général est encourageante dans la mesure où nous avons la même allure pour la signature co-polarisée (figures 11-12-13) et seulement quelques différences existent dans la signature en polarisation croisée (figures 11-12).

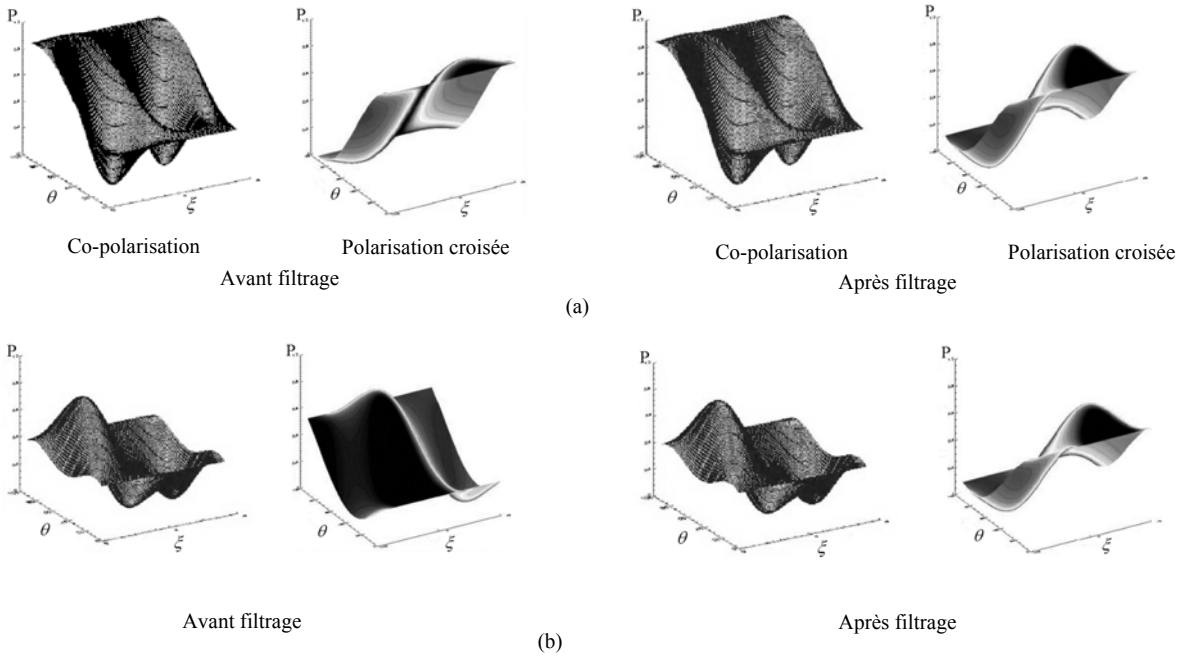


Figure 11 : Signatures polarimétriques pour les images d'Oberpfaffenhofen avant et après filtrage de Lee (P : Puissance reçue, θ : angle d'orientation, ξ : angle d'ellipticité). (a) Image Pauli (HH-VV=Rouge, 2HV=Vert, HH+HV=Bleu) d'une région agricole (zone 1 : champ), (b) composition colorée (HH =Rouge, VV=Vert, HV=Bleu) d'une région homogène (zone 2 : forêt). *Polarization Signatures of Oberpfaffenhofen images before and after Lee filtering (P: Power received, θ: orientation angle ξ: Ellipticity angle). (a) Pauli Image (HH-VV = Red, 2HV =Green, HH + HV = Blue) in an agricultural area (zone 1: field), (b) color composite (HH = Red, VV = Green, HV = Blue) of a homogeneous region (zone 2: forest)*

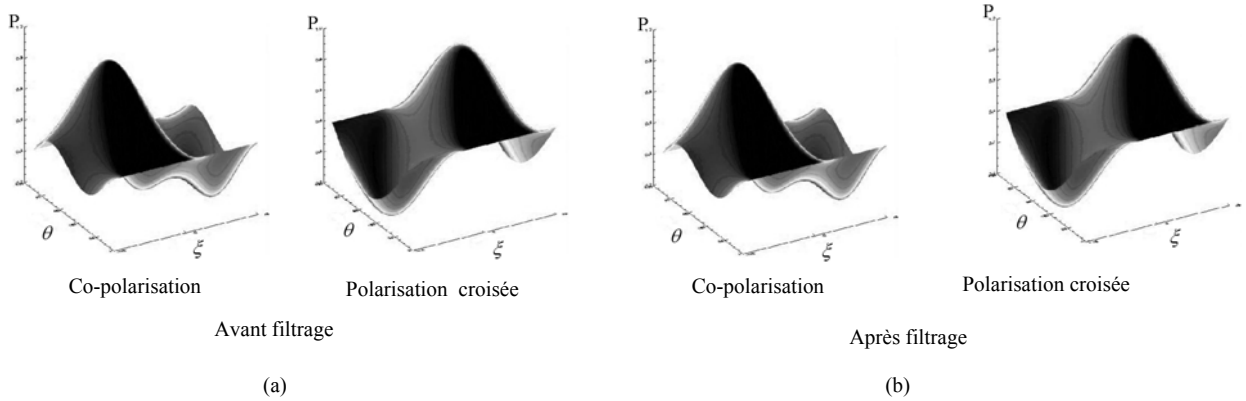


Figure12 : Signatures polarimétriques des images d'Alger avant et après filtrage de Lee (P : Puissance reçue, θ : angle d'orientation, ξ : angle d'ellipticité). Image Pauli (HH-VV=Rouge, HV+VH=Vert, HH+HV=Bleu) d'une zone contenant des herbes sauvages (zone 1) *Polarization signatures of Algiers images before and after Lee filtering (P: Power received, θ: orientation angle, ξ: Ellipticity angle). Pauli Image (HH-VV = Red, HV + VH = Green, HH + HV = Blue) from an area containing wild grasses (zone 1)*

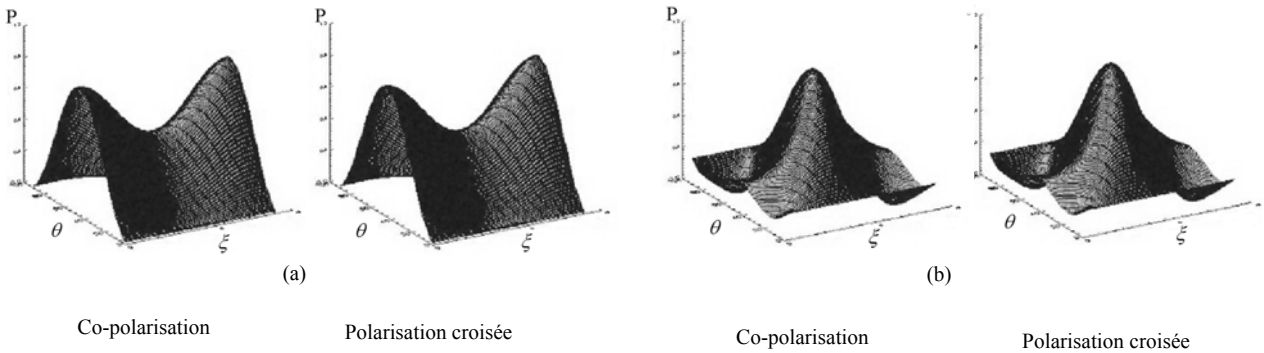


Figure13 : Signatures polarimétriques en co-polarisation pour les images d'Oran. P : Puissance reçue, θ : angle d'orientation, ξ : angle d'ellipticité. (a) Image Pauli de la sebkha d'Oran avant et après filtrage de Lee (zone 1), (b) Image Pauli d'un lac avant et après filtrage de Lee (zone 2). *Co-polarization signatures of Oran image with P: Power received, θ: orientation angle ξ: Ellipticity angle. (a) Pauli Image of the Oran sabkha before and after Lee filtering (zone 1), (b) Pauli Image of a lake before and after Lee filtering (Zone 2).*

8. CONCLUSION

Le filtre de Lee adaptatif repose sur le calcul du coefficient de filtrage adaptatif et sur le choix de la fenêtre sélectionnée pour la détection de contours. Le filtre PWF de Novak estime les paramètres ρ, ε, γ de la matrice de covariance polarimétrique afin d'obtenir une seule image intensité filtrée. Une méthode d'amélioration de réduction de chatoiement appelée ESDPWF est proposée. Comme produit de combinaison de la méthode de détection de contours avec l'algorithme de filtrage polarimétrique blanchisseur (PWF), le filtre ESDPWF possède beaucoup d'avantages. D'une part, c'est un filtre optimal de réduction de chatoiement; d'autre part, il permet une amélioration des paramètres statistiques, une préservation de la résolution spatiale et des caractéristiques structurales des images.

L'évaluation statistique et visuelle montre un bon lissage et une bonne préservation des contours et des textures fines, de même le bruit est bien réduit et les images sont plus nettes, ce qui permet de bien interpréter les données et d'extraire les informations. Le filtrage dans les deux cas : de bipolarisation et tripolarisation d'ENVISAT a permis d'avoir de bons résultats.

L'évaluation par le tracé des signatures polarimétriques est un moyen efficace pour montrer la préservation de l'information polarimétrique. Nous avons montré que la préservation de la signature polarimétrique en général est encourageante dans la mesure où nous avons le même graphe pour les signatures co-polarisées.

Les images ainsi filtrées pourront être utilisées dans diverses applications telles que la classification, segmentation, élaboration d'interférogrammes, création de MNT (Module Numérique du Terrain), etc.

Remerciements

Nous tenons à remercier l'agence spatiale canadienne pour la mise à disposition des données polarimétriques Radarsat2 de la région d'Alger (Algérie), bande C du 11 Avril 2009, ainsi que la compagnie privée Aerosensing pour la mise à disposition des données polarimétriques aéroportées de la zone de Munich, ESAR bande P de 2001. Nous remercions également l'Agence Spatiale Européenne ESA pour la mise à disposition des données bipolarisées ASAR (ENVISAT) de la zone d'Oran (Algérie) en bande C dans le cadre du projet AOE 703.

Références

Barakat, R. 1985. The statistical properties of partially polarized waves. Journal of the optical Society of America, Vol. 32, N°3. pp. 295-312

Belhadj Z.(1995). Apport de la polarimétrie multifréquence pour la classification en télédétection radar. (1995). Thèse de doctorat de l'Université de Nantes, IRESTE, Septembre 1995.

Beaulieu, J.M., and Touzi, R. (2004). Segmentation of textured scenes using polarimetric SARs, IEEE Transactions on Geoscience and remote Sensing.

Bouchemakh, L., Smara, Y. , Boutarfa, S. and Hamadache, Z. (2008). A Comparative Study of Speckle Filtering In Polarimetric Radar SAR Images. Proceeding IEEE, ICTTA conference, 07-11 April 2008, Damascus, Syria.

Boutarfa, S., Smara, Y., Bouchemakh, L. and Hamadache, Z. (2009) Etude comparative de méthodes de filtrage du speckle dans les images radar SAR polarimétriques. CGE'06, 13 - 14 Avril 2009, Alger, Algérie

Centre canadien de télédétection. (2009) Tutoriel: La polarimétrie radar - Signatures polarimétriques. http://cct.rncan.gc.ca/resource/tutor/polarim/chapter5

Eom, H.J, and Boerner, W.M. (1991). Statistical properties of phase difference between two orthogonally-polarized SAR signals. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing. Vol. 29, N°11, pp. 182-184.

Farage, G., Foucher, S., and Benie, G.B., (2007). PolSAR Image filtering based on featured detecting unsing the wavelet transform. In IGARSS'07. Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium.

Ferro-Famil, L., Pottier, E. and Lee, J.S. (2001). Unsupervised classification of multifrequency and fully polarimetric SAR images on the H/A/Alpha-Wishart classifier. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Vol. 39 N°11, pp. 2332-2342

Ferro-Famil, L.(2007). Envisat/ASAR dual polarization case. Tutorial on SAR Polarimetry, 2007

Foucher, S., Farage, G.., and Benie, G.B., (2006). SAR image filtering based on the stationary contourlet transform. In IGARSS'06. Proceeding of the international Geoscience and Remote Sensing Symposium. Denver, pp. 4021-4024, July 2006.

Foucher, S.(2007). Multiscale filtering of SAR images using scale and space consistency. In IGARSS'07. Proceeding of the international Geoscience and Remote Sensing Symposium. Barcelone, Spain.

Goodman, J.W. (1963). Statistical analysis based on a certain multivariate complex distribution ; an introduction. Annals of mathematical statistics. Vol. 34, N°152, pp. 152-180

Goodman, J.W. (1975). Statistical properties of laser speckle patterns. In Laser speckle and related phenomena. Edited by J.C Dainty. Springer-Verlag. New York. pp. 10-75.

Goodman, J.W. (1985). Statistical optics, John Wiley and sons Incorporation. New York.

Guoqing, L., Shunji, H., Hong, X., Torre, A., Rubertone, F. (1999). Study on speckle reduction in multilook polarimetric SAR image. Journal of Electronics (China). Springer Verlag. Vol.16 N°1. Janvier 1999.

Lee, J.S. (1981). Refined filtering of image noise using local statistics. Computer graphics and Image Processing. Vol. 15. pp. 380-389

Lee, J.S., Grues, M.R, and Mango, S.A. (1991). Speckle reduction in multipolarization multifrequency SAR imagery. IEEE Transactions on Geoscience and remote sensing. Vol. 29. N°4. pp. 535-544.

Lee, J.S., Hoppel, K.W., Mango, S.A. and Miller, A.R. (1994a). Intensity and phase statistics of multilook polarimetric and interferometric SAR imagery. IEEE Transactions on science and Remote Sensing. Vol. 32, N°5, pp. 1017-1028.

Lee, J.S., Jurkevich, I., Dewaele,P., Wambacq,P. and Costerlinck, A. (1994b). Speckle filtering of synthetic aperture radar images: a review. Remote Sensing Reviews. Vol. 8. pp. 311-340.

Lee, J.S., Shuler, D.L., Lang, R.H. and Ranson, K.J. (1994c). K-distribution for multilook processed polarimetric SAR imagery. In IGARSS''94. Proceeding of the 1994 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 8-12 August 1994. Pasadena, California. IEEE, New York, pp.2179-2181.

Lee, J.S, Grunes, M.R. and De Grandi, G. (1999a) Polarimetric SAR speckle filtering and its implication for classification. IEEE Transactions on Geoscience and remote sensing, Vol. 37, N°5.

Lee, J.S., Grues, M.R, Ainsworth, T.L., Du, L., Shuler, D.L., and Cloude, S.R. (1999b). Unsupervised classification of polarimetric SAR images by applying target decomposition and complex Wishart distribution. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Vol. 37, N°5. pp. 2249-2258.

Lee, J.S., and Grunes, M.R. (2000). Polarimetric SAR speckle filtering and terrain classification- an overview. In Information processing for remote sensing. Edited by C.H. Chen. World Scientific publishing Co., Singapore. pp. 113- 138.

Lee, J.S., Grunes, M.R., Shuler, D.L., Pottier, E. and Ferro-Famil, L., (2006). Scattering-model-based speckle filtering of Polarimetric SAR data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Vol. 44, N°1. January 2006, pp. 176-187.

Lopes, A., Mougin, R.E., Baudoin, A., Goze. S., Nezry, E., Touzi, R., and Karam, M. (1992). Phase difference statistics related to sensor and forest parameters. In IGARSS'92. Proceeding of the international Geoscience and Remote Sensing Symposium. 26-29 May 1992. Houston. Tex. IEEE. New York. pp. 779-781

Lopez-Martinez, C., Fabregas, X . and Pottier, E.(2005). Wavelet transform based interferometric SAR coherence estimator. IEEE Transactions on Signal Processing, vol.12 (2005), pp. 831-834.)

Lopez-Martinez, C., Pottier, E. and Cloude, S. R. (2005). Statistical assessment of eigenvector-based target decomposition theorems in radar polarimetry, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 43 (2005), pp. 2058-2074

Lopez-Martinez, and Pottier, E., (2007). On the extension of multidimensional speckle noise model from single-look to multi-look SAR imagery, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 45 (2007), pp. 305-320

Murza, L.P. (1978). The noncoherent polarimetry of noise like radiation. Radio engineering and Electronic Physics. Vol. 23, pp. 57-63.

Nan, S., Bingchen, Z. and Yanfei. W. (2007) Structural adaptive and optimal speckle filtering in multilook full polarimetric SAR images. P.217-222. ScienceDirect, Journal of Systems Engineering and Electronics, Vol. 18, No. 2. December 2007.

Novak, L.M. and Burl. M.C. (1990). Optimal Speckle Reduction in Polarimetric SAR Imagery.. IEEE Transactions On Aerospace and Electronic Systems, Vol.26, N°2. pp.293-305

Ouarzeddine, M., Souissi, B. and Belhadj-Aïssa, A. (2006).Target Detection and Characterization using H/alpha Decomposition and Polarimetric Signatures. Information and Communication Technologies. ICTTA'06, Vol. 1, 2006.

Ouegan, S. and Rhodes, I., (1995). Statistical models for polarimetric data consequences, testing and validity. International Journal of Remote Sensing. Vol. 16. N°7. pp. 1183-1210.

Sarabandi, K. (1992). Derivation of phase statistics from the Mueller matrx. Radio Science. Vol. 27. pp. 553-560.

Shou, J. and Skriver, H., (2001). Restoration of polarimetric SAR images using simulated annealing. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Vol. 39. N°9, pp. 2005-2016.

Shou, J., Skriver, H., Nielsen, A.A., and Conradsen, K. (2003). CFAR edge detector for polarimetric SAR images . IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Vol.34. N°5. pp. 1210-1221.

Touzi, R. and Lopes, A. (1991). Distribution of the Stokes parameters and the phase difference in polarimetric SAR data. In IGARSS'91, Proceeding of the international Geoscience and Remote Sensing Symposium. 3-6 June 1991. Espoo, Finland. IEEE. New York .

Touzi, R., and Lopes, A. (1994). The principle of speckle filtering in polarimetric SAR imagery. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Vol. 32. pp. 1110-1114.

Touzi, R., and Lopes, A. (1996). Statistics of the stokes parameters and of the complex coherence parameters ine one-look and multilook speckle fields. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Vol. 34. pp. 519-531.

Touzi, R., Lopes, A., Bruniquel, J., and Vachon, P.W., (1999). Coherence estimation for SAR imagery. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Vol. 37. pp. 135 - 149

Touzi, R. (2002). A review of SAR image speckle filtering. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Vol. 40. pp. 2392-2404.

Touzi, R. (2007). Speckle effect on polarimetric target scattering decomposition of sar imagery, Canadian Journal of Remote Sensing, 33 (2007), pp. 60-68.

Vachula, G.M., and Barnes, R.M. (1983). Polarization detection of a fluctuating radar targets. IEEE Transactions on Aerospace and Electronics Systems. Vol. AES-19. N°2. pp.250-257.