الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Département : Génie électrique Et Informatique Industrielle

Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme

d'Ingénieur d'Etat

Spécialité

Systèmes de Télécommunications et Réseaux

- Thème -

Méthodes d'Evaluation des Filtres Polarimétriques

Réalisé par

BALLAH Radia & YOUCEF Chaimaa

Les membres de Jury :

M. ATROUZ Brahim – Maître Assistant A (Docteur)	Président
Mme. BOUTARFA Souhila - Maître de Conférences B	Promotrice
M. CHERABIT Nouredine - Maître Assistant A	Examinateur
Mme. CHOUAF Saloua - Maître Assistante A	Examinatrice

Alger, le 06/07/2022

Année universitaire 2021 – 2022

Dédicace 1

J'ai l'honneur de dédier ce mémoire :

***A** mes très chers parents **YOUCEF Belarbi** et **BENALI Aicha**, qui m'ont soutenu toute ma vie, je suis ici aujourd'hui grâce à vous, je vous dois tout. Qu'**ALLAH** vous protège pour moi.*

***A** mes adorables sœurs **Rabab** et **Ilhem**.*

***A** mon frère **Walid**.*

***A** ma très chère tante **Amina** et tous mes oncles.*

***A** ma cousine **Nadia** et tous mes cousins.*

***A** toute la famille **YOUCEF**.*

***A** mon binôme **BALLAH Radia**, tu es plus qu'un binôme, tu es ma sœur pour toujours.*

***A** tous mes amis, spécialement : **Nesrine**, **Jeloul**, **Meriem**, **Amine**, **Kenza**, **Soulef**, **Meriem**, **Aya**, je vous apprécie.*

***A** mes collègues de la spécialité Système de Télécommunication et réseaux.*

***A** tous ceux et celles qui m'ont enseignée tout au long de ma vie scolaire.*

A tous ceux et celles qui m'ont aidée.

Shaimaa

Dédicaces 2

Du profond de mon cœur, je dédie ce travail à tous ceux qui me sont chers:

À mes très chers parents, **Khedidja** et **Mohammed**, aucune dédicace ne saurait exprimer mon amour. Vos sacrifices et votre soutien furent une lumière dans mon parcours. Je mets entre vos mains, le fruit de longues années d'études loin de votre tendresse. Puisse Dieu, le Très Haut, vous accorder santé, bonheur et longue vie,

À la plus merveilleuse sœur : **Nermine**, À mon cher frère : **Sidahmed**,

À ma chère **Grand-Mère** et mes très chères tantes : **Khaltou**, **Fatima Zohra**, **Dalila**, **Fella**, **Hamida**, **Fatma**, **Aicha**, **Khedidja**, **Mebrouka** et **Meriama** qui m'ont encouragée toute ma vie de près ou de loin,

À mes belles cousines : **Nadjlaa** et **Menat-Allah Fadoua**,

À mes chers cousins : **Zakaria**, **Abdelmoundji**, **Takieddine Noufal**, **Amineddine Ahmed** et le petit **Madjdeddine** et tous mes cousins,

À tous mes proches de la famille **Ballah**,

À mon adorable binôme **Youcef Chaimaa** avec qui j'ai passé d'inoubliables et agréables moments de bonheur, Je vous souhaite de tout cœur une vie pleine de succès,

À tous mes chers amis, Particulièrement : **Noubi**, **Lella Meriem**, **Youmna** et **Tiny** je les remercie pour le soutien moral,

À toute ma promotion de la spécialité **Système de Télécommunication et réseaux**,

À tous ceux et celles qui m'ont enseignée et qui m'ont aidée tout au long de ma vie scolaire.

Radia

Remercîments

Ce projet de fin d'études a été réalisé au sein du Département Génie Electrique et Informatique Industrielle (GEII) de l'Ecole Nationale Supérieure de Technologie (ENST) à Alger, Algérie.

Nous remercions premièrement le Dieu tout puissant qui ne cesse de nous protéger.

Nous tenons à remercier énormément notre promotrice Mme BOUTARFA Souhila, Maitre de conférences au département de GEII à l'ENST, pour son aide et sa disponibilité du début à la fin de ce travail. Nous sommes très reconnaissantes envers elle pour tous ce qu'elle a fait pour nous.

Nous remercions également les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer notre travail.

Nous exprimons nos sincères remerciements à tous les enseignants de l'ENST, et toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Table des matières

Table des figures ..... **I**
Table des tableaux ..... **III**
Liste des abréviations ..... **IV**
Liste des symboles ..... **V**

Introduction générale **2**

Chapitre I : Généralités sur l'Imagerie PolSAR

Introduction **5**
I.1 Utilisation des hyperfréquences dans les systèmes radars 5
I.2 Radar à synthèse d'ouverture (RSO) 7
I.3 Polarimétrie radar 8
I.1.1 Information polarimétrique 11
I.4 Notion de speckle 12
I.5 Filtrage polarimétrique 13
Conclusion **14**

Chapitre II : Méthodes d'évaluation des filtres polarimétriques

Introduction **16**
II.1 Evaluation visuelle 16
II.1.1 Image Span 16
II.1.2 Décomposition de Pauli 16
II.1.3 Classification non supervisée 19
II.1.3.1 Classification K-Means 20
II.1.3.2 Classification ISODATA 21
II.2 Evaluation statistique 21
II.2.1 Lissage des zones homogènes 22
II.2.1.1 Moyenne locale 22
II.2.1.2 Ecart-type 22

II.2.1.3 Coefficient de variation 23
II.2.1.4 Nombre équivalent de vues 23
II.2.1.5 Résolution de radiation 23
II.2.2 Préservation de contours 23
II.2.2.1 Coefficient de variation globale 24
II.2.2.2 Indice de préservation de contours 24
II.2.3 Préservation de l'information polarimétrique 24
II.2.3.1 Moyenne locale du vecteur de Pauli 24
II.2.3.2 Amplitude et phase de la matrice de cohérence 24
II.2.3.3 Image speckle 25
II.3 Signature polarimétrique 25
II.4 Décomposition H/A/α 26
Conclusion 29

Chapitre III : Résultats et discussion

Introduction 32
III.1 Présentation des donnés 32
III.2 Résultats des méthodes de l'évaluation visuelle 35
III.2.1 Image Span 35
III.2.2 Décomposition de Pauli 36
III.2.3 Classifications ISODATA et K-Means 40
III.3 Résultats des méthodes de l'évaluation statistique 43
III.3.1 Lissage des zones homogènes 44
III.3.2 Conservation de contours 45
III.3.3 Préservation de l'information polarimétrique 46
III.3.3.1 Moyennes des éléments diagonaux et hors diagonaux de la matrice de cohérence 46
III.3.3.2 Image Speckle 46
III.4 Signature polarimétrique 47
III.5 Résultats de la décomposition H/A/α 53
Conclusion 54

Conclusion générale 57
Références bibliographiques 60

Table des figures

Chapitre I : Généralités sur l'Imagerie PolSAR

Figure I.1 Le spectre électromagnétique 5
Figure I.2 Gamme des hyperfréquences du spectre électromagnétique [URL6]. 6
Figure I.3 Principe de fonctionnement du RSO (a) décrivant le concept de synthèse d'ouverture (b) termes importants liés aux radars [9] [11]. 8
Figure I.4 Polarisation d'une onde électromagnétique (H : horizontale, V : verticale) [9]. 9
Figure I.5 Représentation des quatre combinaisons de polarisation HH, HV, VH et VV [12]. 9
Figure I.6 Composantes polarimétriques HH, HV et VV en bande C, d'une zone agricole dans une composition colorée RVB. [9] 10
Figure I.7 Formation du speckle [10]. 13
Figure I.8 Effet du chatoiement dans une image SAR amplitude en polarisation HH de la région d'Alger (aéroport) (capteur RADARSAT-2). (a) Image radar SAR, (b) zoom d'une région de même texture affectée par le speckle (effet poivre et sel). [7] 13

Chapitre II : Méthodes d'évaluation des filtres polarimétriques

Figure II.1 : Mécanismes de diffusions [1]. 18
Figure II.2 : Code couleur RVB de la décomposition de Pauli. 19
Figure II.3 : Schéma blocs de la décomposition de Pauli [20]. 19
Figure II.4 Organigramme de l'algorithme K-Means [URL15]. 21
Figure II.5 : Exemple d'une signature polarimétrique de co-polarisation et polarisation croisée[URL14]. 25
Figure II.6 : Schéma blocs de la décomposition H/A/α [20]. 29

Chapitre III : Résultats et discussion

Figure III.1 Représentation des données polarimétriques en amplitude. (a) Composante HH. (b) Composante HV. (c) Composante VH (d) Composante VV. 33
Figure III.2 Images en amplitudes des trois composantes de Pauli, (a) |SHH + SVV| (b) |SHH -SVV| (c)$|S_{HV} + S_{VH}|$. 34
Figure III.3 Image optique et images Span en amplitudes de la région d'Alger ; originale et filtrées. 36
Figure III.4 Image optique (Google Earth) (a) et image PolSAR originale (b) en composition colorée de Pauli avec leurs zooms en rouge (c) et (d) respectivement. 37
Figure III.5 Image optique et images PolSAR en composition colorée de Pauli (a) originale et filtrés par (b) Boxcar 3 (c) Boxcar 5 (d) Boxcar 7 (e) Boxcar 9 (f) RLF. 38

Figure III.6 Image optique et images zooms PolSAR en composition colorée de Pauli (a) originale filtrés par (b) Boxcar 3 (c) Boxcar 5 (d) Boxcar 7 (e) Boxcar 9 (f) RLF. 40
Figure III.7 Images Span avant et après filtrage classifiées par la méthode K-means..... 41
Figure III.8 Images Span classifiées avant et après filtrage par la méthode ISODATA..... 42
Figure III.9 Image Span de trois zones homogènes en jaune et trois zones hétérogènes en cyan. 43
Figure III.10 Image Span de deux zones homogènes : la mer et gazon. 47
Figure III.11 Graphes 3D de la signature polarimétrique originale en co-polarisation (a) et en polarisation croisée (b). 48
Figure III.12 Graphes 3D de la signature polarimétrique filtré par boxcar 3 en co-polarisation (a) et en polarisation croisée (b). 48
Figure III.13 Graphes 3D de la signature polarimétrique filtré par boxcar 5 en co-polarisation (a) et en polarisation croisée (b). 48
Figure III.14 Graphes 3D de la signature polarimétrique filtré par boxcar 7 en co-polarisation (a) et en polarisation croisée (b). 49
Figure III.15 Graphes 3D de la signature polarimétrique filtré par boxcar 9 en co-polarisation (a) et en polarisation croisée (b). 49
Figure III.16 Graphes 3D de la signature polarimétrique filtré par Lee adaptatif en co-polarisation (a) et en polarisation croisée (b). 49
Figure III.17 Graphes 3D de la signature polarimétrique originale en co-polarisation (a) et en polarisation croisée (b). 50
Figure III.18 Graphes 3D de la signature polarimétrique filtré par boxcar 3 en co-polarisation (a) et en polarisation croisée (b). 50
Figure III.19 Graphes 3D de la signature polarimétrique filtré par boxcar 5 en co-polarisation (a) et en polarisation croisée (b). 50
Figure III.20 Graphes 3D de la signature polarimétrique filtré par boxcar 7 en co-polarisation (a) et en polarisation croisée (b). 51
Figure III.21 Graphes 3D de la signature polarimétrique filtré par boxcar 9 en co-polarisation (a) et en polarisation croisée (b). 51
Figure III.22 Graphes 3D de la signature polarimétrique filtré par Lee adaptatif en co-polarisation (a) et en polarisation croisée (b). 51
Figure III.23 Images Span des trois zones homogènes en jaune. 53

Table des tableaux

Chapitre I : Généralités sur l'Imagerie PolSAR

Tableau I.1 tableau détaillant les bandes de fréquences des micro-ondes [URL5]..... 6

Chapitre III : Résultats et discussion

Tableau III.1 Valeurs de σ, μ, CV, ENL et RR des Span en intensité avant et après filtrage par les méthodes : boxcar 3, boxcar 5, boxcar 7, boxcar 9 et RLF. 44
Tableau III.2 Valeurs de C_{VG} et EPI des Span en intensité après filtrage par les méthodes : boxcar 3, boxcar 5, boxcar 7, boxcar 9 et RLF. 45
Tableau III.3 Valeurs des moyennes des éléments diagonaux et hors diagonaux avant et après filtrage par les méthodes : boxcar 3, boxcar 5, boxcar 7, boxcar 9 et RLF..... 46
Tableau III.4 Moyennes du paramètre SP après filtrage. 47
Tableau III.5 Moyennes des puissances en co-polarisation et en polarisation croisée avant et après filtrages. 52
Tableau III.6 Moyennes des paramètres de la décomposition H/A/α. 54

Liste des abréviations

2D	Deux dimensions
3D	Trois dimensions
ENVI	Environnement for Visualizing Image
ENL	Equivalent Number of Look
H	Horizontale
HH	Transmission et réception horizontales
HV	Transmission horizontale et réception verticale
IDL	Interactive Data Language
ISODATA	Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique
ISRO	Indian Space Research Organisation
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NISAR	NASA-ISRO Synthetic Aperture Radar
PolSAR	Polarimetric synthetic aperture radar
P-Sig.Pol.	Puissence de Signature Polarimétrique
RADAR	Radio Detecting And Ranging
RADARSAT	Radar Satellite
RLF	Refined Lee Filter
RSO	Radar à Synthèse d'Ouverture
RVB	Rouge, Vert et Bleu
SAR	Synthetic Aperture Radar
SP	Speckle Picture
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
V	Verticale
VH	Transmission verticale et réception horizontale
VV	Transmission et réception verticales

Liste des symboles

×	Opération de multiplication
*	Fonction du conjugué d'une variable complexe
$\sum$	Somme
i	Indice de lignes
J	Indice de colonnes
U	Numéro de colonne
v	Numéro de ligne
n	Nombre d'éléments
S	Matrice de diffusion ou matrice de Sinclar
S_{HH}	Composante complexe HH
S_{HV}	Composante complexe HV
S_{VH}	Composante complexe VH
S_{VV}	Composante complexe VV
K	Vecteur de diffusion
K_p	Vecteur de diffusion dans la base de Pauli ou vecteur de Pauli
C	Matrice de covariance
P	Matrice de passage
T	Matrice de cohérence polarimétrique
$Span$	Puissance totale de l'onde rétrodiffusée
E[.]	Espérance mathématique
$[.]^t$	Opérateur de transposition
$\|.\|^2$	Intensité
$\|.\|$	Amplitude
a	Image initiale
g	Image non-bruitée
b	Bruit speckle
σ_b	Variance du bruit
y	Pixel originale
x	Pixel filtré
Nw	Taille de la zone concernée
H	Entropie polarimétrique
A	Anisotropie polarimétrique
α	Angle polarimétrique
a	Composant de diffusion à simple rebond,
b	Composant de diffusion à double rebond
c	Composant de diffusion à double rebond tournée de 45°
$SS_{distances}$	Distance intra-cluster
$M(x)$	La moyenne du cluster x
N	Nombre de pixels
f	Nombre de clusters
E	Nombre de bandes spectrales.
MSE	Mean Square Error
μ	La moyenne
Σ	Ecart-type
EPI	Edge Preservation Index
RR	Résolution de radiation
Cv	Coefficient de variation

log(.)	Logarithme népérien
Cvg	Coefficient de variation globale
Q	Nombre de zones hétérogènes
SP	Speckle picture
Ψ	Angle d'orientation de la cible
X	Angle d'ellipticité
[K]	Matrice de Kennaugh
[R]	Matrice de transformation
[W]	Matrice de Wishart
P_{co}	Puissance normalisée pour une co-polarisation
P_{cr}	Puissances normalisées pour une polarisation croisée
J_r	Vecteur normalisé de Stokes pour la polarisation reçue
J_t	Vecteur normalisé de Stokes pour la polarisation transmise
Cos(.)	Fonction cosinus
Sin(.)	Fonction sinus
$e^{(.)}$	Fonction exponentielle
Arcos(.)	Arc cosinus
$<.>$	La moyenne locale d'une matrice
p_i	Pseudo-probabilités
λ_i	Valeur propre
$\boldsymbol{\Sigma}$	Matrice des valeurs propres

Introduction générale

Introduction générale

La télédétection spatiale est un domaine scientifique moderne de haute technologie qui a été développé et qui se développe continuellement pour mieux répondre aux plusieurs besoins, c'est le processus de détecter et de superviser des caractéristiques physiques d'une zone en mesurant son rayonnement réfléchi et émis à distance. La télédétection est utilisée dans de nombreux domaines, notamment la géographie, l'arpentage et la plupart des disciplines des sciences de la Terre (par exemple, l'hydrologie, l'écologie, la météorologie, l'océanographie, la glaciologie, la géologie) [1], elle a également des applications militaires [URL1].

Le terme "télédétection", dans l'usage habituel, fait en générale référence à l'utilisation de la technologie des capteurs satellitaires ou aéronautiques pour détecter et classer des objets sur Terre [URL2]. Ces objets peuvent comprendre la surface, l'atmosphère et les océans. La télédétection se divise en deux, l'une est "passive", lorsque la réflexion de la lumière du soleil est détectée par le capteur, et l'autre est "active", lorsqu'un signal est émis par un satellite ou un avion vers l'objet et sa réflexion détectée par le capteur.

Par conséquent, Le radar à synthèse d'ouverture et le RSO polarimétrique (PolSAR : Polarimetric Synthetic Aperture Radar) sont des outils indispensables pour produire des images afin de faciliter l'observation des cibles, ils sont largement utilisés pour fournir grâce à leur télédétection par micro-ondes qui englobe ses avantages de fournir des images sans nuages, par tous les temps et des images du jour et de la nuit. Les systèmes SAR ont une géométrie d'imagerie latérale [2]. Le radar transmet des impulsions électromagnétiques avec haute puissance et reçoit les échos du signal rétrodiffusé d'une manière séquentielle.

La polarimétrie est la technique d'analyse de la combinaison des polarisations [URL3], qui se définissent par l'orientation du champ électrique de l'onde électromagnétique, qui se compose de deux composantes orthogonales ; horizontale (H) ou verticale (V).

Les images radar présentent l'inconvénient d'être affectées par le bruit speckle [3]. Ce bruit complique le problème d'interprétation des images SAR en réduisant l'exactitude de l'information. Pour éliminer l'effet du speckle, un filtrage est nécessaire afin d'améliorer la qualité de l'image [4]. Mais, comme il existe tant de filtres polarimétriques pour réduire ce bruit, il est difficile parfois de décider lequel est le plus efficace. Encore, due à l'existence de plusieurs méthodes d'évaluation de ces filtres [5] [6], une étude comparative est nécessaire. Dans notre étude, nous devons considérer les trois critères suivants : lissage des zones homogènes, conservation des contours et préservation de l'information polarimétriques, ainsi, nous nous demandons souvent, quelle sont les meilleures méthodes d'évaluation, et encore quelle méthode est la plus optimale pour chaque critère. En notant que l'évaluation d'un filtre PolSAR est plus délicate, où la polarisation est multiple, contrairement au filtre SAR où on a une seule polarisation.

Ce travail a pour objectif de répondre à cette problématique. Il vise à étudier le principe de l'acquisition d'une image radar SAR, la formation et la réduction du bruit speckle, ensuite, il consiste à développer les méthodes d'analyse des filtres polarimétriques afin d'évaluer leurs performances, effectuer une étude comparative et appliquer les méthodes d'évaluation étudiées

sur les images PolSAR avant et après filtrage. Dans notre étude, nos images correspondent à la zone d'Alger en Algérie, acquises par le satellite RADARSAT-2 en 2009.

Ainsi, ce mémoire est composé de trois chapitres et est structuré comme suit :

- Le premier chapitre se concentre sur les principes généraux du système radar PolSAR et ses principales caractéristiques, telles que les bases de la mesure de polarisation, le bruit de speckle et son effet sur les images radar, et le filtrage polarimétrique.
- Dans le deuxième chapitre, nous présenterons les méthodes d'évaluation principales pour chaque critère. Lesquelles nous allons appliquer sur nos images originales et filtrés. Ces méthodes se composent des méthodes visuelles et des méthodes statistiques. Ainsi que les techniques d'analyses qui concernent la vérification de la conservation de l'information polarimétriques.
- Le dernier chapitre est consacré à l'évaluation, l'étude comparative et les interprétations des résultats.
- Pour finir, nous clôturons notre mémoire par une conclusion générale englobant tous les résultats abordés et les perspectives.

Chapitre I :

Généralités sur l'Imagerie PolSAR

Introduction

Le RADAR (RAdio Detection And Ranging) initialement inventé pour répondre à des besoins militaires durant la seconde guerre mondiale. Aujourd'hui, les systèmes radar sont indispensables dans plusieurs autres applications telles que la surveillance aérienne, maritime ou bien civiles, la caractérisation des surfaces géologiques ainsi que la prévision météorologique.

Cependant, les images issues de ces systèmes ne sont pas parfaites, elles sont affectées par un bruit inhérent appelé speckle qui diminue la qualité d'information, ce qui rend difficile leur exploitation. Donc, un prétraitement doit nécessairement être appliqué.

Ce premier chapitre s'intéresse aux principes généraux d'un système radar PolSAR et ses caractéristiques principales, tels que les notions de base de : la polarimétrie, le filtrage polarimétrique, le bruit speckle et son effet sur les images radar [7] [8].

I.1 Utilisation des hyperfréquences dans les systèmes radars

Le spectre électromagnétique est la combinaison de tous les types de lumière, y compris ceux que nous ne pouvons pas voir. En fait, la majeure partie de la lumière dans l'univers est invisible à nos yeux.

La lumière qui peut être visible par les êtres humains, consiste des couleurs individuelles de l'arc-en-ciel, ne prend qu'une très petite plage du spectre électromagnétique. Les autres types de lumière comprennent les ondes radio, les micro-ondes, le rayonnement infrarouge, les rayons ultraviolets, les rayons X et les rayons gamma, qui sont tous imperceptibles à l'œil humain. Toute la lumière, ou rayonnement électromagnétique, voyage dans l'espace à 300 000 kilomètres par seconde - la vitesse de la lumière [URL4].

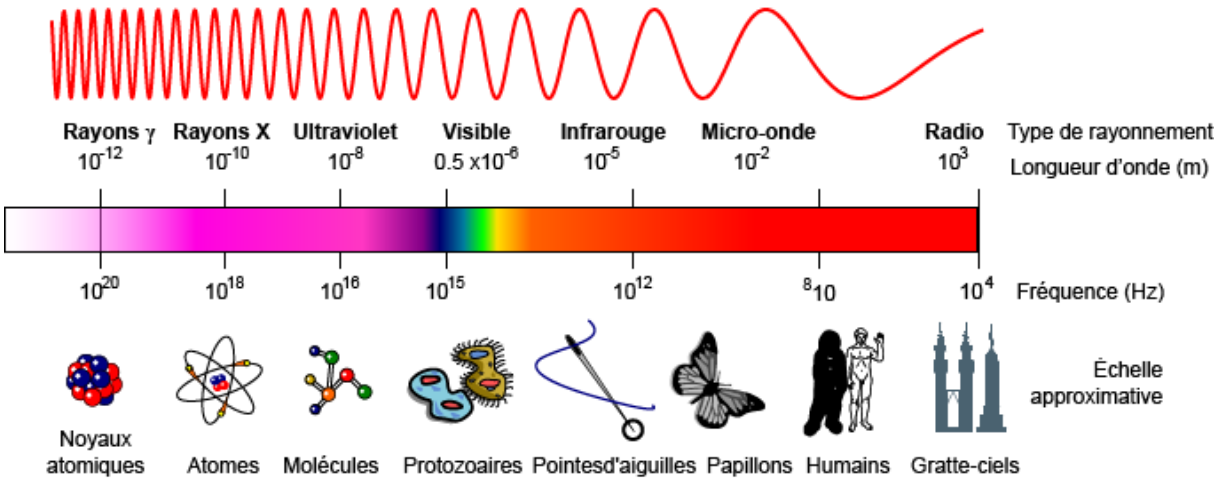


Figure I.1 Le spectre électromagnétique

Depuis quelque temps, la région des micro-ondes (figure I.1) suscite un grand intérêt pour la télédétection. Cette région comprend les plus grandes longueurs d'onde utilisées en télédétection, allant d'environ 1 mm à 1 m (les fréquences qui s'étendent de 0,3 GHz à 300 GHz).

À différents intervalles de longueurs d'onde correspondent des bandes désignées de façon arbitraire par des lettres. Les bandes les plus fréquemment utilisées pour l'imagerie radar sont : X, C, S, L et P. Toutes les bandes existantes sont mentionnées dans le tableau ci-dessous [9] :

Tableau 0.1 tableau détaillant les bandes de fréquences des micro-ondes [URL5].

Bande	Fréquence	Longueur d'onde	Application typique
Ka	27–40 GHz	1.1–0.8 cm	Rarement utilisé pour le SAR (surveillance des aéroports).
K	18–27 GHz	1.7–1.1 cm	Rarement utilisé (mesure de l'absorption H_2O).
Ku	12–18 GHz	2.4–1.7 cm	Rarement utilisé pour le SAR (satellite altimétrie)
X	8–12 GHz	3.8–2.4 cm	SAR haute résolution (surveillance urbaine ; glace et neige, faible pénétration dans la couverture végétale ; déclin rapide de la cohérence dans les zones végétalisées).
C	4–8 GHz	7.5–3.8 cm	Cartographie globale ; détection des changements ; surveillance des zones à pénétration faible à modérer ; cohérence plus élevée; glace, navigation maritime océanique.
S	2–4 GHz	15–7.5 cm	Utilisation faible mais croissante de l'observation de la Terre ; surveillance de l'agriculture (satellite NISAR : NASA-ISRO Synthetic Aperture Radar).
L	1–2 GHz	30–15 cm	SAR moyenne résolution (surveillance géophysique ; cartographie de la biomasse et de la végétation ; forte pénétration).
P	0.3–1 GHz	100–30 cm	SAR haute résolution (Biomasse ; cartographie et évaluation de la végétation).

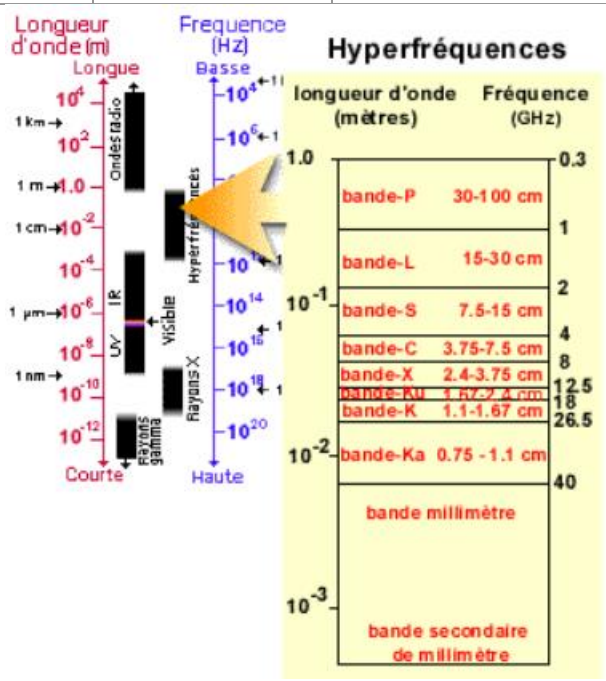


Figure I.2 Gamme des hyperfréquences du spectre électromagnétique [URL6].

La pénétration de la pluie par le signal radar, la couche de surface ou bien n'importe quel obstacle, augmente proportionnellement avec la longueur d'onde. Les radars qui utilisent des signaux dont la longueur d'onde dépasse 2 cm sont peu affectés par les effets de couverture nuageuse, alors que la pluie peut altérer les signaux dont la longueur d'onde est inférieure à 4 cm. Donc, le choix de la longueur d'onde doit être compatible avec la région que l'on souhaite étudier [9].

I.2 Radar à synthèse d'ouverture (RSO)

L'émetteur du système radar se déclenche périodiquement (par exemple, toutes les millisecondes) pour émettre un signal très court (par exemple, durée de 1 microseconde), en fréquence donnée (correspondant à la longueur d'onde qui varie en fonction de l'application, entre quelques mètres et quelques millimètres). Ce signal est émis dans une seule direction : l'antenne du radar est exploitée comme un projecteur, accumule les émissions dans une région très limitée d'espace, soit dans un cône avec une ouverture horizontale mince (environ 1 degré), ou verticale (également de l'ordre de 1 degré). Ils sont tellement illuminés, s'affaiblissant à mesure qu'ils deviennent de plus en plus loin de la cible dans le champ de l'antenne. Ces cibles reflètent le signal reçu, et l'antenne capte l'écho avec un décalage par rapport au signal émis [URL7].

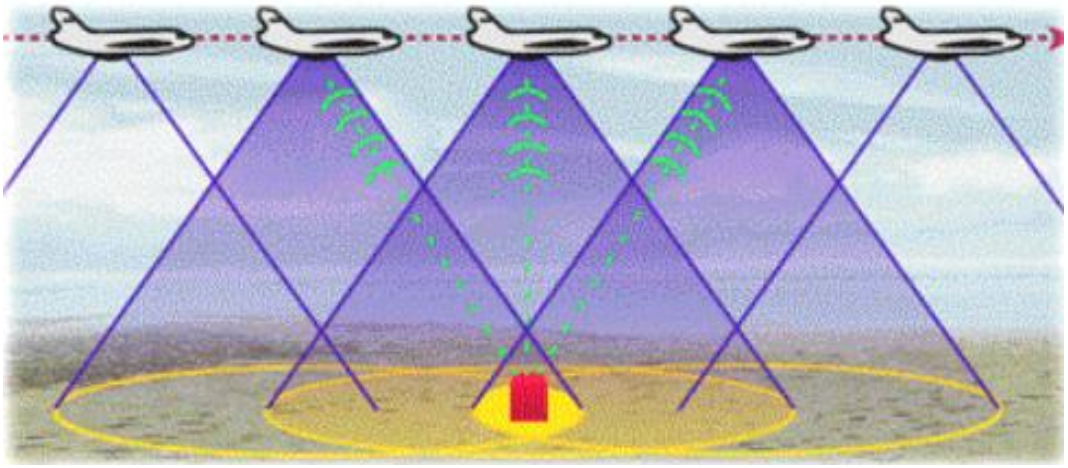
Si deux cibles sont à la même distance de l'émetteur, le signal a besoin du même temps pour parcourir cette distance et ces deux cibles peuvent donc être confondues pour le récepteur : le radar travaille en distance [URL7].

RSO est l'acronyme de Radar à Synthèse d'Ouverture (ou SAR : Synthetic Aperture Radar en anglais). L'imagerie SAR est une technique bien développée de la télédétection cohérente des hyperfréquences pour fournir des images à grande échelle en deux dimensions (2D) à haute résolution spatiale de la réflectivité de la surface de la terre.

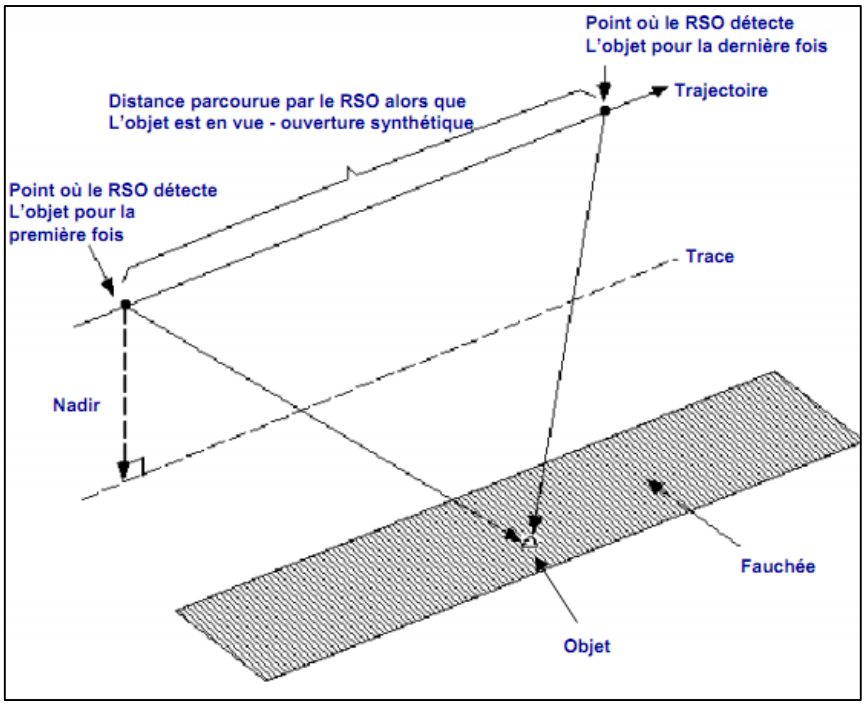
Le système d'imagerie SAR est un système radar actif fonctionnant dans la région des micro-ondes du spectre électromagnétique, généralement entre la bande P et la bande Ka, comme présenté dans le tableau (I.1). Il est toujours monté sur une plate-forme mobile (avion, UAV (Unmanned Aerial Vehicle), navette spatiale ou satellite) et fonctionne dans une géométrie latérale avec un éclairage perpendiculaire à la direction de la ligne de vol. Un tel système illumine la surface de la terre avec des impulsions micro-ondes et reçoit le signal électromagnétique rétrodiffusé par le terrain éclairé [10].

Le principe du radar RSO à visée latérale est l'accumulation des données d'images le long de sa trajectoire (son azimut), tout en synthétisant une ouverture plus longue que celle du l'antenne physique réelle afin de produire une image radar à haute résolution. Donc, on utilise le déplacement de l'antenne pour concevoir une antenne "de synthèse" de dimension plus remarquable, et alors d'une résolution angulaire plus supérieure que la même antenne.

Ainsi, tout au long de la trajectoire, le RSO capte une succession d'images (figure I.3 (a)) qui vont être combinées par un traitement pour fournir une image finale [9].



(a)



(b)

Figure I.3 Principe de fonctionnement du RSO (a) décrivant le concept de synthèse d'ouverture (b) termes importants liés aux radars [9] [11].

La direction perpendiculaire à la trajectoire du radar se définit par la portée. La trace du radar situant directement sous ce dernier se nomme le nadir. La fauchée correspond à toute la partie observée par le radar (figure I.3, (b)). La direction parallèle à la trajectoire du radar est appelée l'azimut. Il existe deux résolutions radar selon les deux directions, en portée et en azimut.

I.3 Polarimétrie radar

La polarisation est un aspect assez important dans l'emploi des hyperfréquences, elle se définit par l'orientation du champ électrique oscillant. Tant que la longueur du vecteur représente l'amplitude et que la vitesse de rotation du vecteur correspond à la fréquence de

l'onde. Il existe également un champ magnétique composant l'onde électromagnétique en phase avec le champ électrique et perpendiculaire à la fois au champ électrique et à la direction de propagation.

Les radars SAR ont été destinés de façon à émettre etdes micro-ondes avec une seule polarisation (figure I.4) ; linéaire verticale V ou linéaire horizontale H. Ils ont pour caractéristiques : la différence de phase et l'amplitude [7].

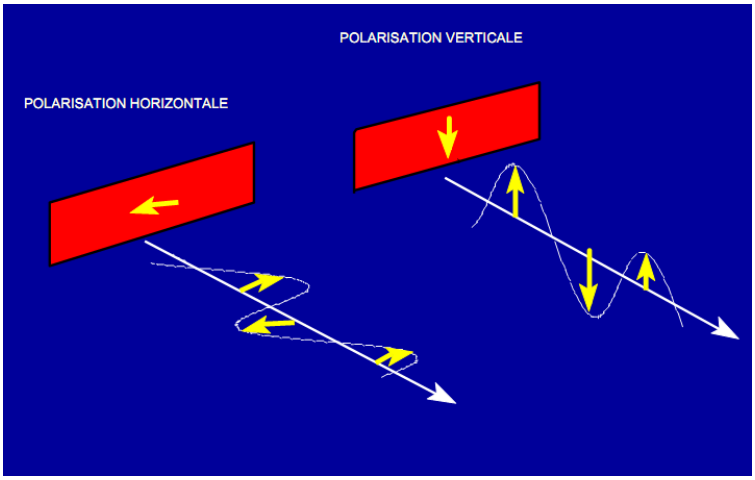


Figure I.4 Polarisation d'une onde électromagnétique (H : horizontale, V : verticale) [9].

Mais, certains radars peuvent émettre et recevoir les deux, dans ce cas, on parle de radar PolSAR. On peut donc obtenir quatre combinaisons de polarisations de transmission et de réception :

- HH - émission horizontale, réception horizontale.
- VV - émission verticale, réception verticale.
- HV - émission horizontale, réception verticale.
- VH - émission verticale, réception horizontale.

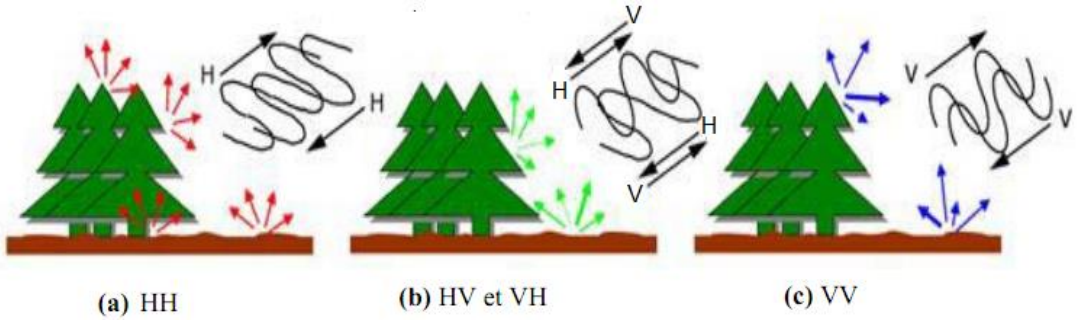


Figure I.5 Représentation des quatre combinaisons de polarisation HH, HV, VH et VV [12].

Les deux premières combinaisons sont nommées polarisations parallèles et les deux dernières sont connues comme les polarisations croisées [URL8]. Des différents degrés de complexité concernant la polarisation peuvent caractériser un système radar [7] :

- La polarisation double (HH et HV, VV et VH ou HH et VV),
- La polarisation triple (HH, HV et VV),
- La polarisation quadruple (HH, HV, VH et VV).

En double polarisation, la polarisation d'émission est fixe et l'antenne de réception collecte des polarisations orthogonales (par exemple, l'émetteur émet une onde polarisée horizontalement et le récepteur collecte les polarisations verticale et horizontale à la fois).

En triple polarisation (radar monostatique), l'émetteur de l'onde incidente et le récepteur de l'onde réfléchie sont situés au même endroit, les deux polarisations croisées sont égales, HV=VH ; on obtiendra les trois polarisations suivantes : HH, HV et VV.

Par contre, la polarisation quadruple (radar bistatique ou complétement polarimétrique) consiste que l'émetteur change les transmissions de polarisations orthogonales et le récepteur collecte simultanément deux polarisations orthogonales [7].

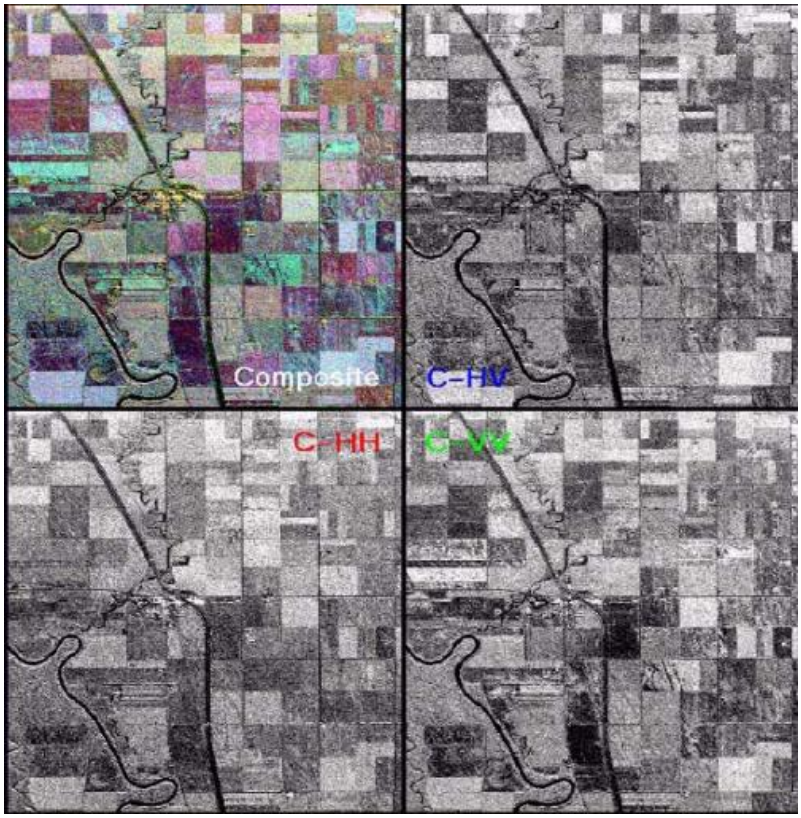


Figure I.6 Composantes polarimétriques HH, HV et VV en bande C, d'une zone agricole dans une composition colorée RVB. [9]

Lorsqu'une onde incidente d'un radar rencontre la surface qu'on désire examiner, sa polarisation peut être modifiée, dépendant les caractéristiques de cette surface. Cette modification apporte un certain nombre d'informations, telles que, la nature des matériaux qui entre dans la construction de la cible, son orientation et parfois sa composition chimique. On parle alors de la polarimétrie radar.

La polarimétrie radar permet d'analyser les propriétés polarimétriques des ondes électromagnétiques et de ses diffusions. Lors de l'interaction entre une onde électromagnétique incidente et une surface, l'onde réfléchie diffère en général dans les propriétés polarimétriques de celles de l'onde incidente [13]. Ces changements de propriétés, plus précisément ceux qui concernent la polarisation vont être employés pour caractériser ou identifier la cible. Ainsi, la polarimétrie (polarisation multiple) permet d'offrir beaucoup plus d'informations que l'imagerie SAR (polarisation simple ou monopolarisation). Donc, par rapport à l'image optique, l'image SAR et particulièrement l'image PolSAR reflète mieux l'hétérogénéité des surfaces [7].

I.1.1 Information polarimétrique

Lorsqu'on veut analyser les données radar PolSAR, on peut calculer certains paramètres qui ont une interprétation physique importante.

On définit les matrices de covariance et de cohérence pour représenter les propriétés diffusantes de l'énergie électromagnétique d'une cible. On parle également de la matrice de diffusion ou la matrice Sinclar. C'est une matrice carrée 2×2 obtenue à l'aide de la mesure des quatre signaux polarimétriques (S_{HH}, S_{VV}, S_{HV}, S_{VH}) qui correspondent à la transformation de la polarisation d'une onde illuminant un diffuseur en polarisation de l'onde rétrodiffusée. Cette matrice est composée de quatre nombres complexes comme suit [12] :

$$\boldsymbol{S} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{S_{HH}} & \boldsymbol{S_{HV}} \\ \boldsymbol{S_{VH}} & \boldsymbol{S_{VV}} \end{bmatrix} \quad \text{(eq. I.1)}$$

Le vecteur de diffusion noté K se définit comme le représentant de l'information polarimétrique :

$$\boldsymbol{K} = [\boldsymbol{S_{HH}} \;\; \boldsymbol{S_{HV}} \;\; \boldsymbol{S_{VH}} \;\; \boldsymbol{S_{VV}} \;]^{\boldsymbol{t}} \quad \text{(eq. I.2)}$$

Où *t* est la transposée du vecteur.

En se basant sur ce vecteur, on introduit la matrice de covariance C définit comme suit :

$$\boldsymbol{C} = \boldsymbol{K}.\boldsymbol{K}^{*\boldsymbol{t}} = \begin{bmatrix} |\boldsymbol{S_{HH}}|^2 & \boldsymbol{S_{HH}S_{HV}}^* & \boldsymbol{S_{HH}S_{VH}^*} & \boldsymbol{S_{HH}S_{VV}^*} \\ \boldsymbol{S_{HV}S_{HH}}^* & |\boldsymbol{S_{HV}}|^2 & \boldsymbol{S_{HV}S_{VH}}^* & \boldsymbol{S_{HV}S_{VV}}^* \\ \boldsymbol{S_{VH}S_{HH}}^* & \boldsymbol{S_{VH}S_{HV}}^* & |\boldsymbol{S_{VH}}|^2 & \boldsymbol{S_{VH}S_{VV}}^* \\ \boldsymbol{S_{VV}S_{HH}}^* & \boldsymbol{S_{VV}S_{HV}}^* & \boldsymbol{S_{VV}S_{VH}}^* & |\boldsymbol{S_{VV}}|^2 \end{bmatrix} \quad \text{(eq. I.3)}$$

Où l'exposant (*) se réfère au conjugué complexe.

Si la matrice de diffusion est symétrique (radar monostatique), alors le vecteur de diffusion peut représenter l'information polarimétrique comme suit :

$$\boldsymbol{K} = \left[\boldsymbol{S_{HH}} \;\; \sqrt{\boldsymbol{2}}\boldsymbol{S_{HV}} \;\; \boldsymbol{S_{VV}} \;\right]^{\boldsymbol{t}} \quad \text{(eq. I.4)}$$

Dans ce cas, la matrice de covariance devient :

$$\boldsymbol{C} = \boldsymbol{K}.\boldsymbol{K}^{*\boldsymbol{t}} = \begin{bmatrix} |\boldsymbol{S_{HH}}|^2 & \sqrt{\boldsymbol{2}}\boldsymbol{S_{HH}S_{HV}}^* & \boldsymbol{S_{HH}S_{VV}^*} \\ \sqrt{\boldsymbol{2}}\boldsymbol{S_{HV}S_{HH}}^* & |\boldsymbol{S_{HV}}|^2 & \boldsymbol{S_{HV}S_{VV}}^* \\ \boldsymbol{S_{VV}S_{HH}}^* & \sqrt{\boldsymbol{2}}\boldsymbol{S_{VV}S_{HV}}^* & |\boldsymbol{S_{VV}}|^2 \end{bmatrix} \quad \text{(eq. I.5)}$$

La matrice C est considérée symétrique conjuguée, elle est constituée de neuf éléments, dont trois éléments diagonaux représentent l'intensité des réflexions dans les trois canaux HH, HV, VV, ainsi que trois corrélations complexes qui représentent la relation entre ces trois canaux. La somme de ces intensités diagonales constitue la puissance totale de l'onde rétrodiffusée. Cette puissance est définie par le vecteur noté Span [7] [12] :

$$\boldsymbol{Span} = |\boldsymbol{S_{HH}}|^2 + |\boldsymbol{S_{HV}}|^2 + |\boldsymbol{S_{VH}}|^2 + |\boldsymbol{S_{VV}}|^2 \quad \text{(eq. I.6)}$$

L'expression du Span dans le cas monostatique :

$$\boldsymbol{Span} = |\boldsymbol{S_{HH}}|^2 + \mathbf{2}|\boldsymbol{S_{HV}}|^2 + |\boldsymbol{S_{VV}}|^2 \quad \text{(eq. I.7)}$$

En mettant en vecteur la matrice de diffusion à l'aide des éléments des matrices de spin de Pauli, on obtient la matrice de cohérence T de la même manière que la matrice de covariance [12] :

Vecteur de diffusion dans la base de Pauli (ou vecteur de Pauli) :

$$\boldsymbol{K_p} = \frac{\mathbf{1}}{\sqrt{\mathbf{2}}}\begin{bmatrix} \boldsymbol{S_{HH}} + \boldsymbol{S_{VV}} \\ \boldsymbol{S_{HH}} - \boldsymbol{S_{VV}} \\ \mathbf{2}\boldsymbol{S_{HV}} \end{bmatrix} \quad \text{(eq. I.8)}$$

$$\boldsymbol{T} = \boldsymbol{K_p}.\boldsymbol{K_p^{*t}} \quad \text{(eq. I.9)}$$

$$= \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{2}}\begin{bmatrix} |\boldsymbol{S_{HH}} + \boldsymbol{S_{VV}}|^2 & (\boldsymbol{S_{HH}} + \boldsymbol{S_{VV}}).(\boldsymbol{S_{HH}} - \boldsymbol{S_{VV}})^* & \mathbf{2}(\boldsymbol{S_{HH}} + \boldsymbol{S_{VV}}).\boldsymbol{S_{HV}}^* \\ (\boldsymbol{S_{HH}} - \boldsymbol{S_{VV}}).(\boldsymbol{S_{HH}} + \boldsymbol{S_{VV}})^* & |\boldsymbol{S_{HH}} - \boldsymbol{S_{VV}}|^2 & \mathbf{2}(\boldsymbol{S_{HH}} - \boldsymbol{S_{VV}}).\boldsymbol{S_{HV}}^* \\ \mathbf{2}\boldsymbol{S_{HV}}.(\boldsymbol{S_{HH}}.\boldsymbol{S_{VV}})^* & \mathbf{2}\boldsymbol{S_{HV}}.(\boldsymbol{S_{HH}} + \boldsymbol{S_{VV}})^* & \mathbf{4}|\boldsymbol{S_{HV}}|^2 \end{bmatrix}$$

Comme la matrice de covariance, la somme des éléments diagonaux de la matrice de cohérence représente la puissance totale des ondes diffusées. Ces deux matrices sont hermitiennes et semi-définies positives, ce qui implique que leurs valeurs propres sont réelles et positives. Ils ont les mêmes valeurs propres et sont utilisés pour la décomposition des cibles et la classification d'images. Ils sont reliés par la formule de transfert suivante [12] :

$$\boldsymbol{C} = \boldsymbol{P}.\boldsymbol{T}.\boldsymbol{P^{*t}} \quad \text{(eq. I.10)}$$

Où P est la matrice de passage exprimée comme suit :

$$\boldsymbol{P} = \frac{\mathbf{1}}{\sqrt{\mathbf{2}}}\begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \sqrt{\mathbf{2}} \\ \mathbf{1} & -\mathbf{1} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad \text{(eq. I.11)}$$

I.4 Notion de speckle

Le majeur inconvénient dans l'interprétation visuelle ou automatique des images radar SAR est le phénomène de chatoiement ou speckle (en anglais). C'est est un effet de bruit qui affecte la lisibilité de ces images.

Lorsque le radar illumine une surface rugueuse à l'échelle de la longueur d'onde du radar, le signal renvoyé consiste en des ondes réfléchies par de nombreux diffuseurs élémentaires dans une cellule de résolution, comme illustré dans l'image de gauche de la figure (I.7). Les distances entre les diffuseurs élémentaires et le récepteur radar varient en raison du caractère aléatoire des diffuseurs. Par conséquent, la distance entre les diffuseurs et le radar est aléatoire. Les ondes reçues de chaque diffuseur, bien que cohérentes en fréquence, ne le sont plus en phase. Un signal fort est reçu, si les ondes s'additionnent relativement de manière constructive ; un signal faible, si les ondes sont déphasées. La somme des ondes renvoyées est mieux illustrée sur le côté droit de la figure (I.7) avec une somme vectorielle dans le plan complexe [10].

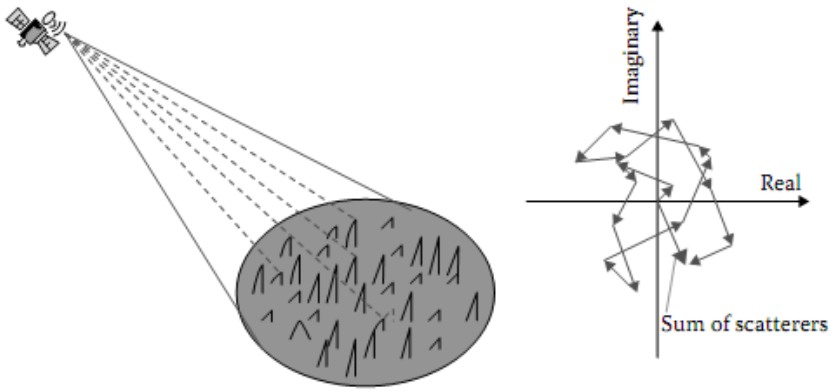


Figure I.7 Formation du speckle [10].

La différence de phase entre les ondes reçues entraine des interférences provenant de la diffusion multiple qui se produit dans chaque cellule de résolution, cela produit des zones claires (signaux forts) et d'autres sombres (signaux faibles) aléatoires dans l'image (fig. I.8).

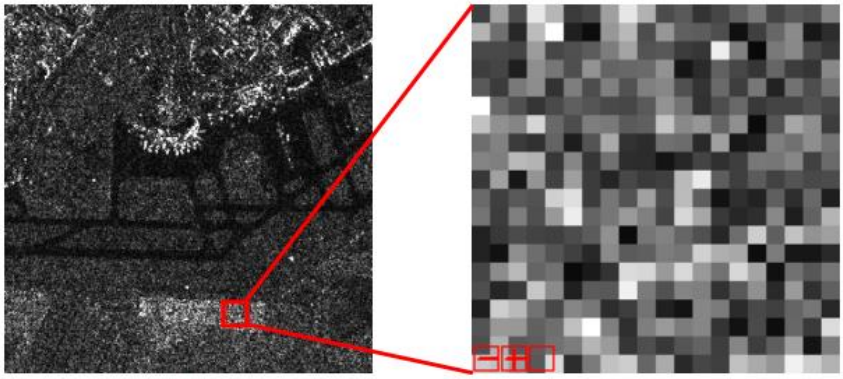


Figure I.8 Effet du chatoiement dans une image SAR amplitude en polarisation HH de la région d'Alger (aéroport) (capteur RADARSAT-2). (a) Image radar SAR, (b) zoom d'une région de même texture affectée par le speckle (effet poivre et sel). [7]

Afin de bien exploiter l'image SAR, l'interpréter et extraire tous ses information utiles, l'élimination de ce genre de bruit est une nécessité, donc, l'emploi d'un filtre l'est également.

I.5 Filtrage polarimétrique

Le speckle ou le chatoiement est de nature multiplicative statistiquement indépendant du signal. L'équation suivante peut décrire son modèle :

$$\boldsymbol{a(i,j) = g(i,j).b(i,j)} \quad \text{(eq. I.11)}$$

Où i, j représentent respectivement la ligne et la colonne du pixel concerné. *a* représente l'image initiale, *g* l'image non-bruitée et *b* le bruit speckle qui est caractérisé par une moyenne (E[b] = 1) et d'une variance σ_b .

Un filtre parfait est caractérisé par une élimination du chatoiement et une récupération idéale de l'information originale. Cependant cela dépend des caractéristiques de la surface observée. Ainsi, on peut distinguer trois types de régions sur l'image à traiter : zone homogène, zone hétérogène et une zone très hétérogène [14].

Le filtrage polarimétrique du speckle doit satisfaire les critères suivants proposés par Lee [15] :

- Le filtrage polarimétrique doit être appliqué sur la matrice de covariance C (eq. I.3) ou la matrice de cohérence T (eq. I.8), il ne peut pas être appliqué directement sur la matrice de diffusion S (eq. I.1). Les parties réelles et imaginaires des éléments hors diagonaux de type complexe de la matrice C ou T sont filtrés d'une manière séparée, ensuite ils sont recombinés pour former les images complexes non bruités.
- Le filtrage de tous les termes de la matrice de covariance ou de cohérence doit être appliqué par la même procédure pour préserver les propriétés polarimétriques de l'image PolSAR.
- Pour éliminer les interférences entre les canaux de polarisation causés par certains filtres, chaque élément de la matrice de covariance ou de cohérence doit être filtré indépendamment dans le domaine spatial.
- Pour préserver les caractéristiques de diffusion, les bords et les diffuseurs forts, le filtrage doit être adaptatif et les pixels adjacents doivent être sélectionnés pour réduire le speckle.

Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons introduit les notions de base concernant le radar, commençant par les hyperfréquences, la polarisation et la polarimétrie, continuant par le principe du radar SAR et PolSAR et terminant par introduire la notion du bruit speckle. Ainsi, nous avons abordé les notions les plus importantes relatives au radar SAR et l'imagerie radar.

Grace à ce dernier, plusieurs obstacles concernant la télédétection ont été résolus. Cependant, l'apparence du phénomène du chatoiement a rendu l'exploitation de cette technologie difficile vu que l'interprétation des images radar est une tache assez compliquée en soi, donc l'extraction d'informations peut paraître une mission impossible.

En revanche, l'élaboration des méthodes de filtrage polarimétrique pour éliminer ce bruit est devenue une nécessité. Afin de choisir le filtre le plus adapté à une application donnée, il est primordial d'évaluer les performances du filtre. L'étude des différentes techniques d'évaluation des filtres polarimétriques fera l'objet du chapitre suivant.

Chapitre II :

Méthodes d'évaluation des filtres polarimétriques

Introduction

Les images acquises par un radar polarimétrique à synthèse d'ouverture (PolSAR) se caractérisent par le bruit multiplicatif appelé speckle. Il corrompt ces images extraites, ce qui complique l'interprétation des données, dégrade les performances de segmentation et réduit la détectabilité de la cible. Par conséquent, nous devons prétraiter les images par les méthodes de filtrage adaptatif avant leur analyse. Mais, due à l'existence de plusieurs méthodes d'élimination du speckle, on se demande souvent laquelle est la plus efficace. Pour cela, il est nécessaire d'évaluer leurs performances.

Dans ce chapitre, nous allons présenter les méthodes d'évaluation de ces filtres selon trois critères : lissage des zones homogènes, préservation de contours et conservation de l'information polarimétrique. Nous allons commencer par définir les techniques de l'évaluation visuelle des images Span, puis, les images colorées de la décomposition de Pauli, ensuite, les deux méthodes de classifications non-supervisée ISODATA et K-means. Par la suite, nous allons décrire les différentes techniques de l'évaluation statistique dont les paramètres classiques utilisés pour ce type de traitement, tels que le coefficient de variation, la moyenne et l'écart type, ainsi que plusieurs d'autres paramètres nécessaires à l'évaluation des images PolSAR afin de vérifier les deux critères du lissage des zones homogènes et la conservation de contours. En dernier, Nous allons présenter les procédures de vérification de la préservation de l'information polarimétrique, qui sont : la moyenne des éléments du vecteur de Pauli, l'amplitude et la phase de la matrice de cohérence, la technique d'analyse de l'image speckle la signature polarimétrique, et la décomposition H/A/α [12].

II.1 Evaluation visuelle

Pour effectuer l'évaluation visuelle, nous avons trois techniques, l'image Span, la décomposition de Pauli, et les deux méthodes de classification non supervisée (ISODATA et K-Means) :

II.1.1 Image Span

Pour vérifier les critères demandés, on visualise les images Span (eq.I.6) avant et après filtrage. On rappelle que le Span est une puissance totale des intensités des canaux polarimétriques, ainsi, l'image Span contient un niveau de speckle inférieur à celui des intensités des polarisations individuelles. D'autre part, les canaux polarimétriques possèdent des caractéristiques de diffusion différentes, donc, la rétrodiffusion qui peut apparaître différemment dans chaque canal de polarisation peut se manifester dans une seule image du Span [1] [5].

II.1.2 Décomposition de Pauli

De plus de l'image Span, one peut aussi évaluer visuellement l'image RVB (Rouge, Vert, Bleu) de la décomposition de Pauli (fig2) avant et après filtrage. Cette décomposition exprime la matrice de diffusion S (eq, I.1) comme la somme complexe des matrices, où un mécanisme de diffusion élémentaire (Figure II.1) est associé pour chaque matrice de base (figure II.2) [5] [15],

Avec :

$$\boldsymbol{S} = \frac{\boldsymbol{a}}{\sqrt{\mathbf{2}}}\begin{bmatrix}\mathbf{1} & \mathbf{0}\\ \mathbf{0} & \mathbf{1}\end{bmatrix} + \frac{\boldsymbol{b}}{\sqrt{\mathbf{2}}}\begin{bmatrix}\mathbf{1} & \mathbf{0}\\ \mathbf{0} & -\mathbf{1}\end{bmatrix} + \frac{\boldsymbol{c}}{\sqrt{\mathbf{2}}}\begin{bmatrix}\mathbf{0} & \mathbf{1}\\ \mathbf{1} & \mathbf{0}\end{bmatrix} \quad \text{(eq. II.1)}$$

$$\boldsymbol{S} = \frac{\boldsymbol{a}}{\sqrt{\mathbf{2}}}[\boldsymbol{S}]_{\boldsymbol{a}} + \frac{\boldsymbol{b}}{\sqrt{\mathbf{2}}}[\boldsymbol{S}]_{\boldsymbol{b}} + \frac{\boldsymbol{c}}{\sqrt{\mathbf{2}}}[\boldsymbol{S}]_{\boldsymbol{c}} \quad \text{(eq. II.2)}$$

Où *a*, *b* et *c* sont des complexes qui vont décrire les diffusions et sont donnés par :

$$\boldsymbol{a} = \frac{\boldsymbol{S_{HH}} + \boldsymbol{S_{VV}}}{\sqrt{\mathbf{2}}};\ \boldsymbol{b} = \frac{\boldsymbol{S_{HH}} - \boldsymbol{S_{VV}}}{\sqrt{\mathbf{2}}};\boldsymbol{c} = \frac{\boldsymbol{S_{HV}} + \boldsymbol{S_{VH}}}{\sqrt{\mathbf{2}}} \quad \text{(eq. II.3)}$$

L'application de la décomposition de Pauli à des cibles déterministes peut être considérée comme la composition cohérente de trois mécanismes de diffusion (Figure II.1):

- La première étant la diffusion simple à partir d'une surface plane (diffusion simple ou simple rebond ou impair), décrite par le coefficient et sa matrice $[S]_a$.
- La deuxième étant la diffusion di-plane (diffusion double ou double rebond). C'est une réflexion sur un bâtiment, représentée par le coefficient complexe *b* et sa matrice $[S]_b$.
- Le troisième élément est appelé la diffusion de volume ou diffusion volumique, et est typiquement présent dans la végétation [5] [15].

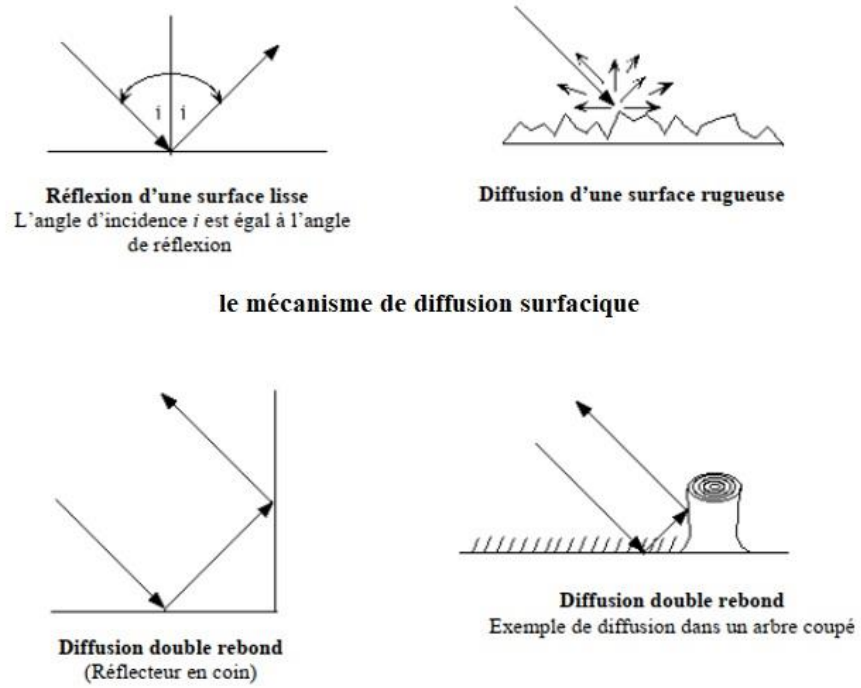


Figure II.1 : Mécanismes de diffusions [1].

La décomposition de Pauli va nous être utile pour représenter l'information polarimétrique afin d'effectuer une bonne évaluation visuelle sur les images PolSAR. Chacun des amplitudes des coefficients complexes précédemment mentionnés (|a|, |b| et |c|) désigneront un canal de couleurs qui composent les images RVB, ainsi, la codification comme suit [20] :

- ✓ R : représente l'amplitude $|S_{HH} - S_{VV}|$ et il correspond au mécanisme de diffusion double rebonds.
- ✓ V : représente l'amplitude $|S_{HV} + S_{VH}|$ et il correspond au mécanisme de diffusion volumique.
- ✓ B : s'agit de l'amplitude $|S_{HH} + S_{VV}|$ et il correspond au mécanisme de diffusion simple rebond.

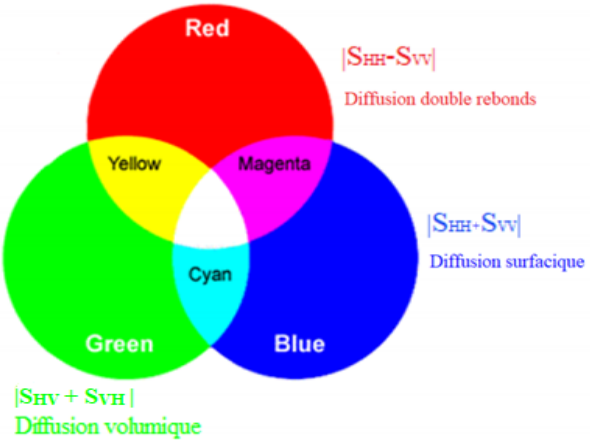


Figure II.2 : Code couleur RVB de la décomposition de Pauli.

L'algorithme de la décomposition de Pauli est résumé dans le schéma bloc suivant :

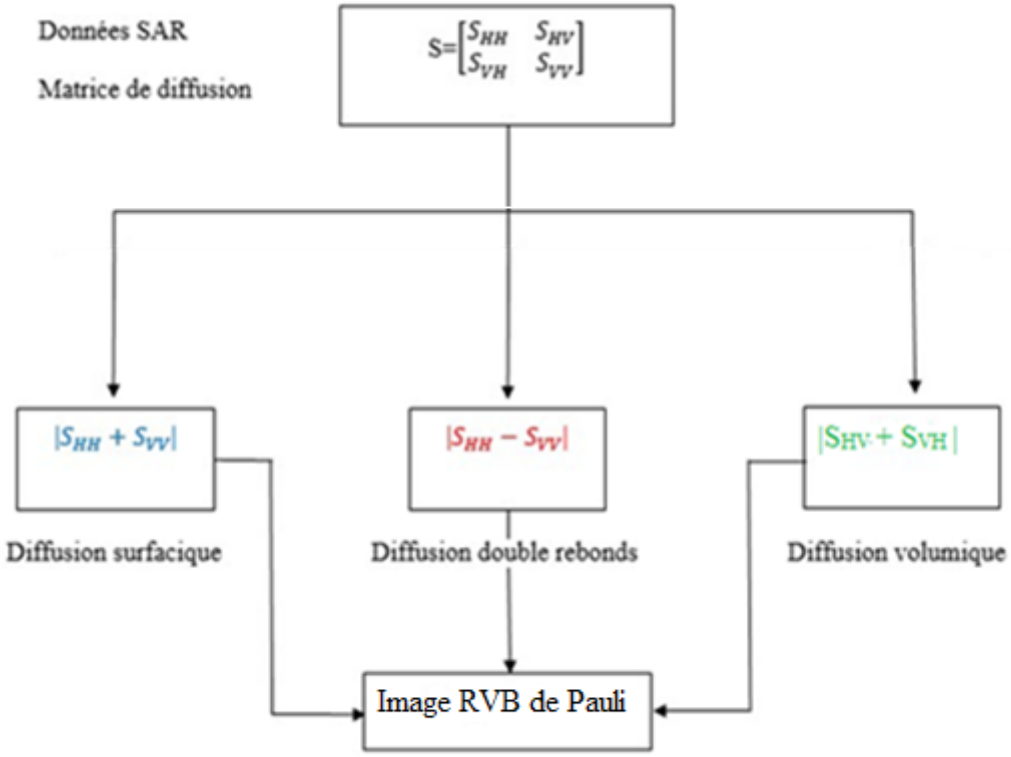


Figure II.3 : Schéma blocs de la décomposition de Pauli [20].

La conservation des couleurs après le filtrage permet de donner une bonne appréciation sur le critère de la préservation de l'information polarimétrique [28].

II.1.3 Classification non supervisée

La classification consiste généralement à diviser un ensemble d'objets en groupes ou classes de telle sorte que les objets appartenant à une même classe soient plus similaires entre eux que ceux appartenant aux d'autres classes. Le but de la classification non supervisée est de séparer automatiquement les pixels d'une image de télédétection en groupes de caractère spectral similaire. La classification est effectuée à l'aide de l'une des nombreuses routines

statistiques généralement appelées "clustering" où des classes de pixels sont créées en fonction de leurs signatures spectrales partagées. Dans notre étude, nous allons utiliser deux méthodes de classification, ISODATA et K-Means. Ces algorithmes sont de nature itérative [22]. Généralement, dans les deux méthodes, la première étape est l'affectation de valeurs initiales arbitraires à cluster. Ensuite, classer chaque pixel dans le cluster voisin. La troisième étape est le calcul de la moyenne de tous les pixels d'un cluster. La répétition de la deuxième et la troisième étape se poursuit jusqu'à ce que le changement entre les itérations soit petit.

II.1.3.1 Classification K-Means

K-Means est un algorithme de classification non supervisé qui regroupe les objets en k clusters en fonction de leurs caractéristiques. Le regroupement est effectué en minimisant la somme des distances entre chaque objet et le centre de gravité du cluster. La distance habituellement utilisée est la distance quadratique ou euclidienne [URL11].

L'objectif de l'algorithme est de minimiser la variabilité intra-cluster. La sommation des distances au carré appelées erreurs, entre chaque pixel et son attribué centre du cluster est minimisé et déclaré comme la fonction objective. Cette fonction est donnée par [22] :

$$\boldsymbol{SS_{distances}} = \sum_{\forall \boldsymbol{i}} [\boldsymbol{i} - \boldsymbol{M(i)}]^2 \qquad \text{(eq. II.4)}$$

Où $M(x)$ est la moyenne du cluster auquel le pixel i est assigné.

Minimiser les $SS_{distances}$ équivaut à minimiser le MSE (mean squared error) qui est une mesure de la variabilité intra-cluster, il est représenté par :

$$\boldsymbol{MSE} = \frac{\sum_{\forall \boldsymbol{i}} [\boldsymbol{i} - \boldsymbol{M(i)}]^2}{(\boldsymbol{N} - \boldsymbol{c})^{\boldsymbol{e}}} = \frac{\boldsymbol{SS_{distances}}}{(\boldsymbol{N} - \boldsymbol{c})^{\boldsymbol{e}}} \qquad \text{(eq. II.5)}$$

Où N est le nombre de pixels, c indique le nombre de clusters et e le nombre de bandes spectrales.

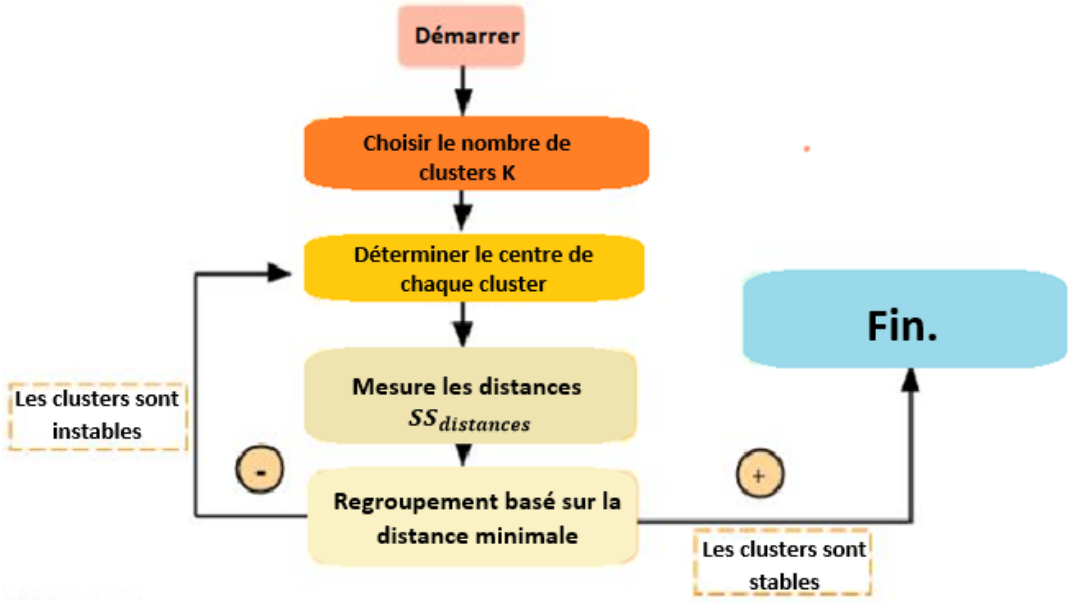


Figure II.4 Organigramme de l'algorithme K-Means [URL15].

II.1.3.2 Classification ISODATA

ISODATA, " Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique Algorithm" comme le suggère la dérivation du nom, est une collection de techniques itératives. Son principe consiste à comparer la valeur radiométrique de chaque pixel avec un nombre prédéfini d'attracteurs de cluster, agrège les pixels en clusters et décale les valeurs moyennes de groupe de telle sorte que la majorité des anciens pixels agrégés appartiennent à un groupe. L'utilisateur interagit avec la procédure au début en indiquant le nombre de clusters prédéfinis à créer et les itérations à effectuer et à la fin, où il décide quel cluster représente quel objet d'occupation du sol de surface et fusionne ou rejette les classes avec des représentants non réalistes [18] [19].

L'algorithme ISODATA est similaire à l'algorithme k-means avec la différence distincte que l'algorithme ISODATA permet un nombre différent de clusters tandis que le K-Means suppose que le nombre de clusters est connu a priori [URL12].

La classification, dans notre étude, sera utilisée une méthode pour vérifier la capacité des filtres à séparer les classes, ce qui implique leur capacité à identifier les cibles.

II.2 Evaluation statistique

Pour étudier les performances des filtres, nous allons réaliser une évaluation statistique comparative par le calcul des grandeurs statistiques sur l'image Span afin de vérifier les critères requis. Dans ce qui suit, nous présenterons les paramètres statistiques utilisés pour la vérification des deux premiers critères : lissage des zones homogènes et préservation des contours. Concernant le dernier critère, la vérification de la conservation de l'information polarimétrique, elle sera présentée dans la dernière section.

II.2.1 Lissage des zones homogènes

Les calculs statistiques sont effectués sur des zones homogènes de taille 20×20 pixels ou de 30×30 pixels (selon l'étendue de la zone homogène) extraites à partir des images Span avant et après filtrage.

Pour assurer un bon filtrage dans ces zones, les critères suivants doivent être vérifiés [1] :

- Une conservation de la moyenne μ.
- Une diminution de la valeur de l'écart-type σ.
- Une valeur de coefficient de variation Cv faible.
- Une valeur de l'ENL élevée.
- Une diminution de la valeur de la résolution de radiation RR.

Le principe des paramètres statistiques utilisés dans l'évaluation de la qualité du lissage sont présentées ci-dessous :

II.2.1.1 Moyenne locale

La moyenne est définie comme l'avarie de toutes les valeurs données. Cela signifie que la somme de toutes les valeurs données divisée par le nombre total de valeurs données. La moyenne est un indicateur statistique qui est utilisé pour juger de la performance d'une action grâce à ses gains sur une période de temps [URL5].

La moyenne est la plus fondamentale de toutes les mesures statistiques. Les moyennes sont souvent utilisées en géométrie et en analyse ; un large éventail de moyens a été développés à ces fins. Dans le cadre de traitement d'image, le filtrage utilisant la moyenne est classé comme filtrage spatial et utilisé pour la réduction du bruit. De même, La moyenne est la somme des valeurs de pixel divisée par le nombre total de pixel souvent notée par μ [URL6].

On peut calculer la moyenne par l'expression suivante :

$$\boldsymbol{\mu = \frac{\sum_{i=0}^{Nw-1}\sum_{j=0}^{Nw-1} y(i,j)}{Nw \times Nw}} \qquad \text{(eq. II.6)}$$

Où Nw × Nw représente la taille de la zone homogène ; *y* est le pixel concerné et (i, j) est sa position (i : la ligne, j : la colonne).

II.2.1.2 Ecart-type

L'écart type est une statistique qui mesure essentiellement la distance par rapport à la moyenne et est égal à la racine carrée de la variance (eq. II.7). Un écart-type faible indique que les valeurs ont tendance à être proches de la moyenne (également appelée valeur attendue) de l'ensemble, tandis qu'un écart-type élevé indique que les valeurs sont réparties sur une plage plus large [URL5].

Dans le traitement d'image, une image est une collection de points de données sur l'intensité lumineuse, l'écart type de l'image implique une mesure brute de l'imprécision par rapport à la variation de la valeur cible de l'intensité lumineuse, à chacun de ces points de données [URL7].

L'écart type est plus souvent représenté dans les textes mathématiques et les équations par la lettre grecque minuscule sigma σ comme montre l'expression suivante :

$$\boldsymbol{\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{Nw-1}\sum_{j=0}^{Nw-1}(y(i,j)-\mu)^2}{Nw \times Nw}}} \quad \text{(eq. II.7)}$$

II.2.1.3 Coefficient de variation

Le coefficient de variation est une mesure statistique de la dispersion des points de données dans une série de données autour de la moyenne. Il représente le rapport de l'écart type par apport à la moyenne, et c'est une statistique utile pour comparer le degré de variation d'une série de données à une autre [URL8], même si les moyennes sont radicalement différentes les unes des autres [URL9].

Il est donné par l'expression suivante :

$$\boldsymbol{Cv = \frac{\sigma}{\mu}} \quad \text{(eq. II.8)}$$

II.2.1.4 Nombre équivalent de vues

En tant que paramètre essentiel dans les images radar à synthèse d'ouverture (SAR), le nombre équivalent de vues (ENL : Equivalent Number of Looks en anglais) indique le niveau de bruit de speckle dans les images SAR. Plus la valeur de l'ENL est petite plus le niveau du bruit est élevé [13].

L'ENL est un paramètre de diverses distributions utilisé pour modéliser les données SAR multilook. Il a donc une influence sur l'exactitude des informations extraites par des méthodes basées sur la modélisation statistique. L'ENL est un paramètre nécessaire à d'importants algorithmes de classification et de détection de changement pour les données SAR polarimétriques [14].

Dans une image intensité, L'ENL peut être estimé par son expression suivante :

$$\boldsymbol{ENL = \frac{1}{Cv^2}} \quad \text{(eq. II.9)}$$

C'est l'inverse carré du coefficient de variation (eq.II.8).

II.2.1.5 Résolution de radiation

Un bon filtrage est caractérisé par une diminution de la valeur de la résolution de radiation, qui est exprimée en dB par la formule suivante :

$$\boldsymbol{RR = 10\log(10 + Cv)} \quad \text{(eq. II.10)}$$

Où log(.) est le logarithme décimal.

II.2.2 Préservation de contours

Les paramètres utilisés dans la vérification du critère de la préservation de contours sont calculés sur des zones hétérogènes de taille 10×10 pixels extraites à partir de l'image Span après

filtrage afin de comparer les performances des filtres et trouver le meilleur filtre qui conserve les détails.

II.2.2.1 Coefficient de variation globale

D'un point de vue préservation de contours, on évalue le meilleur filtre par le plus grand coefficient de variation globale. C'est une mesure de la moyenne des coefficients de variation de Q zones hétérogènes de taille 10×10 pixels, par la formule suivante :

$$\boldsymbol{Cvg} = \frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{Q}} \sum_{\boldsymbol{i}}^{\boldsymbol{Q}} \boldsymbol{Cvi} \qquad \text{(eq. II.11)}$$

Q représente le nombre de zones hétérogènes [27].

II.2.2.2 Indice de préservation de contours

On peut également prendre en considération l'EPI (Edge Preservation Index) comme une méthode d'évaluation. Cette indice mesure la capacité à conserver les détails de l'image. Pour qu'un filtrage soit bon, l'EPI ne doit pas dépasser 1 et plus la valeur de l'EPI est élevée plus le filtre est bon [23].

L'EPI est calculé par la formule suivante :

$$\boldsymbol{EPI} = \frac{\sum_{\boldsymbol{i}=\mathbf{0}}^{\boldsymbol{Nw}-\mathbf{1}} \sum_{\boldsymbol{j}=\mathbf{0}}^{\boldsymbol{Nw}-\mathbf{1}} |\boldsymbol{x}(\boldsymbol{i}-\mathbf{1},\boldsymbol{j}-\mathbf{1}) - \boldsymbol{x}(\boldsymbol{i}+\mathbf{1},\ \boldsymbol{j}+\mathbf{1})|}{\sum_{\boldsymbol{i}=\mathbf{0}}^{\boldsymbol{Nw}-\mathbf{1}} \sum_{\boldsymbol{j}=\mathbf{0}}^{\boldsymbol{Nw}-\mathbf{1}} |\boldsymbol{y}(\boldsymbol{i}-\mathbf{1},\boldsymbol{j}-\mathbf{1}) - \boldsymbol{y}(\boldsymbol{i}+\mathbf{1},\ \boldsymbol{j}+\mathbf{1})|} \qquad \text{(eq. II.12)}$$

Où x(i, j) représente le pixel filtré et y(i, j) le pixel original à la position (i, j).

II.2.3 Préservation de l'information polarimétrique

Dans ce qui suit, les paramètres introduits sont utilisés dans la vérification du critère de la préservation de l'information polarimétriques.

II.2.3.1 Moyenne locale du vecteur de Pauli

Egalement, La conservation de la moyenne des trois intensités du vecteur de Pauli (eq. I.8) avant et après filtrage, peut donner une indication sur la préservation de l'information polarimétrique et permet ainsi de fournir une mesure quantitative de la conservation des couleurs dans l'image RVB de Pauli (section II.1.2).

II.2.3.2 Amplitude et phase de la matrice de cohérence

Encore, la moyenne de l'amplitude et la phase d'un des éléments complexes hors diagonaux de la matrice T (eq. I.9) renseigne sur certaines informations utiles, on parle de l'interférométrie SAR (InSAR). Le principe de base de l'interférométrie repose sur le fait que la phase des images SAR est une mesure équivoque (modulo 2π) de la distance capteur-cible. La variation de distance, et donc la variation du sol observé, peut être déterminée en calculant pixel par pixel le déphasage (phase interférométrique) relatif à deux images SAR [24]. Par conséquent, dans notre étude, nous proposons que la moyenne de l'amplitude et de la phase de l'élément choisi $T_{12} = (\boldsymbol{S_{HH}} + \boldsymbol{S_{VV}}).(\boldsymbol{S_{HH}} - \boldsymbol{S_{VV}})^*$ (eq. I.9) dans une zone homogène doit rester invariable avant et après filtrage.

II.2.3.3 Image speckle

Le speckle des images radar SAR est de nature multiplicative. Donc, le paramètre SP (Speckle Picture) représente, le rapport de l'image d'origine (bruitée) *y* et de l'image filtrée *x* est en fait une image qui permet d'estimer l'amplitude du speckle :

$$SP = \frac{y}{x} \qquad \text{(eq. II.13)}$$

Des statistiques, telle que sa moyenne, peuvent être calculées pour ce rapport ou cette image de speckle. Idéalement, l'histogramme de l'image de speckle aurait une distribution normale avec une moyenne autour de 1. La moyenne de l'image de speckle est un bon indicateur de la capacité d'un filtre à conserver les valeurs moyennes d'origine d'une image : plus la moyenne est proche de 1, meilleure est la capacité du filtre à conserver le contenu de l'image et ainsi une meilleure conservation de l'information polarimétrique [23]. Nous proposons d'adapter cette méthode pour analyser les images PolSAR en calculant la moyenne de zones homogènes après filtrage du Span et des intensités de Pauli.

II.3 Signature polarimétrique

La signature polarimétrique est une représentation tridimensionnelle 3D (trois-dimension) des informations polarimétriques sur diverses bases de polarisation. Les deux premières dimensions sont des éléments géométriques d'ellipse, le premier étant l'angle d'orientation (ψ) de la cible par rapport au visé du radar qui varie entre 0° et 180°, le deuxième est l'angle d'ellipticité (χ), qui vaut 0° pour les polarisation linéaires et 45° pour les circulaires, donc, cet angle varie de -45° à 45°. La réponse de la diffusion de la cible correspond à la troisième dimension, c'est-à-dire la puissance reçue fournit par la matrice de diffusion. La signature polarimétrique décrit le mécanisme de diffusion dominant la réponse de la cible, étant une diffusion surfacique, double rebonds ou volumique [17].

Les graphes de la signature polarimétrique d'une cible observée à différents instants devraient se ressembler en cas d'absence d'action avant et après filtrage, et ils peuvent s'afficher en deux manières, la première en considérant la co-polarisation et la deuxième en prenant la polarisation croisée comme illustré dans la figure (Figure II.4)

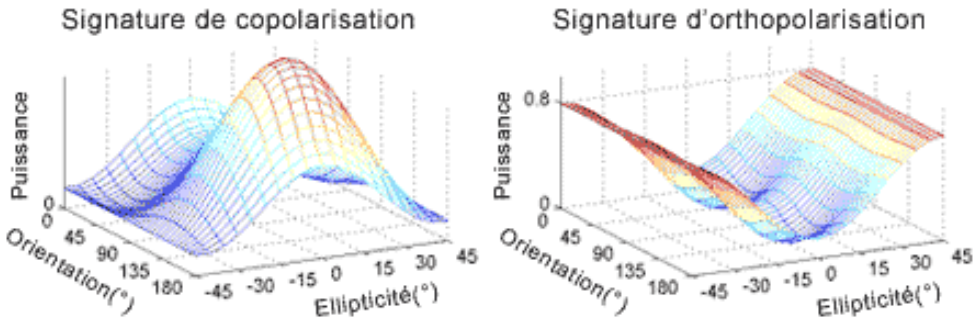


Figure II.5 : Exemple d'une signature polarimétrique de co-polarisation et polarisation croisée[URL14].

La signature polarimétrique permet de décrire le coefficient de diffusion en fonction de tous les cas possibles de polarisation (linéaire, circulaires et elliptique) des antennes et des réceptions. Pour cela la matrice de diffusion est convertie en une matrice 4×4 de Kennaugh, notée K. Cette matrice est un élément essentiel pour fournir les informations nécessaires sur la

puissance reçue en tenant compte des caractéristiques de polarisation de l'antenne d'émission et de réception selon les formules suivantes [21] :

$$\boldsymbol{P_{co} = 2.\pi.J_r.K.J_t} \quad \text{(eq. II.14)}$$

$$\boldsymbol{P_{cr} = 2.\pi.(J_r.J_t - J_r.K.J_t)} \quad \text{(eq. II.15)}$$

Où P_{co} et P_{cr} sont respectivement les puissances normalisées pour une co-polarisation et polarisation croisée.

J_r et J_t sont respectivement les vecteurs normalisés de Stokes pour les polarisations reçues et transmises définit comme :

$$\boldsymbol{J = [1 \quad \cos(2\psi)\cos(2\chi) \quad \sin(2\psi)\cos(2\chi)\sin(2\chi)]} \quad \text{(eq. II.16)}$$

La matrice de Kennaugh K est définie comme suit :

$$\boldsymbol{[K] = [R]^*.[W].[R]^{-1}} \quad \text{(eq. II.17)}$$

Où [R] est la matrice de transformation donnée par :

$$\boldsymbol{[R] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & j & j & 0 \end{bmatrix}} \quad \text{(eq. II.18)}$$

[W] est la matrice de Wishart donnée par :

$$\boldsymbol{[W] = \begin{bmatrix} S_{VV}S_{VV}^* & S_{VH}S_{VH}^* & S_{VH}S_{VV}^* & S_{VV}S_{VH}^* \\ S_{HV}S_{HV}^* & S_{HH}S_{HH}^* & S_{HH}S_{HV}^* & S_{HV}S_{HH}^* \\ S_{HV}S_{VV}^* & S_{HH}S_{VH}^* & S_{HH}S_{VV}^* & S_{HV}S_{VH}^* \\ S_{VV}S_{HV}^* & S_{VH}S_{HH}^* & S_{VH}S_{HV}^* & S_{VV}S_{HH}^* \end{bmatrix}} \quad \text{(eq. II.19)}$$

Encore, dans notre étude, nous allons exploiter la signature polarimétrique afin d'examiner la préservation de l'information polarimétrique avant et après filtrage.

De plus des tracés, pour mieux évaluer le critère de la conservation de l'information de polarisation, nous proposons de calculer la moyenne de la puissance de la signature polarimétrique pour une cible donnée, en co-polarisation $\boldsymbol{P_{co}}$ et polarisation croisée $\boldsymbol{P_{cr}}$, avant et après filtrage. La conservation de cette moyenne implique une conservation de l'information polarimétrique.

II.4 Décomposition H/A/α

Cloude et Pottier ont développé une méthode d'extraction des paramètres à partir des données polarimétriques appelée la décomposition H/A/α pour la caractérisation des différents mécanismes de diffusion. En utilisant les valeurs propres par une analyse des vecteurs propres de la matrice de cohérence T (eq, I.9) [5].

Les vecteurs propres et les valeurs propres de la matrice de cohérence hermitienne T 3×3 (eq. I.9) peut être calculée pour générer une forme diagonale de la matrice de cohérence

qui peut être interprétée physiquement comme une indépendance statistique entre un ensemble de cibles.

On écrit la matrice de cohérence sous la forme suivante :

$$< \boldsymbol{T} >= \boldsymbol{U\Sigma U^{-1}} \quad \text{(eq. II.20)}$$

Où $<.>$ représente la moyenne locale, Σ est une matrice diagonale 3x3 avec des éléments diagonaux réels non négatifs représentant les valeurs propres [5] :

$$\boldsymbol{\Sigma} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\lambda_1} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{\lambda_2} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{\lambda_3} \end{bmatrix} \quad \text{(eq. II.21)}$$

Avec $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$

Et U est une matrice unitaire 3×3 correspondant aux trois vecteurs propres orthogonaux unitaires :

$$\boldsymbol{U} = [\boldsymbol{U_1} \quad \boldsymbol{U_2} \quad \boldsymbol{U_3}] \quad \text{(eq. II.22)}$$

$$\boldsymbol{U} \quad \text{(eq. II.23)}$$

$$= \begin{bmatrix} \boldsymbol{\cos(\alpha_1)} & \boldsymbol{\cos(\alpha_2)} & \boldsymbol{\cos(\alpha_3)} \\ \boldsymbol{\sin(\alpha_1)\cos(\beta_1)e^{j\delta 1}} & \boldsymbol{\sin(\alpha_2)\cos(\beta_2)e^{j\delta 2}} & \boldsymbol{\sin(\alpha_3)\cos(\beta_3)e^{j\delta 3}} \\ \boldsymbol{\sin(\alpha_1)\cos(\beta_1)e^{j\gamma 1}} & \boldsymbol{\sin(\alpha_2)\cos(\beta_2)e^{j\gamma 2}} & \boldsymbol{\sin(\alpha_3)\cos(\beta_3)e^{j\gamma 3}} \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{U_i} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\cos(\alpha_i)} \\ \boldsymbol{\sin(\alpha_i)\cos(\beta_i)e^{j\delta i}} \\ \boldsymbol{\sin(\alpha_i)\cos(\beta_i)e^{j\gamma i}} \end{bmatrix} \quad \text{(eq. II.24)}$$

Le but de la décomposition H/A/α sert à estimer les trois paramètres ; l'entropie (H), l'anisotropie (A) et l'angle alpha (α).

Le premier paramètre étant l'entropie H, définit dans l'intervalle compris entre 0 et 1. H représente les mécanismes de diffusion. Lorsque H s'approche de 0, il existe un seul mécanisme de diffusion en question. Lorsqu'elle s'approche de 1, la cible est caractérisée par un mécanisme de diffusion multiple. [URL10].

L'entropie est calculée comme suit :

$$\boldsymbol{H} = -\sum_{\boldsymbol{i=1}}^{\boldsymbol{3}} \boldsymbol{p_i log_3(p_i)} \quad \text{(eq. II.25)}$$

Avec

$$\boldsymbol{p_i} = \frac{\boldsymbol{\lambda_i}}{\sum_{\boldsymbol{j=1}}^{\boldsymbol{3}} \boldsymbol{\lambda_j}} \quad \text{(eq. II.26)}$$

Où $\boldsymbol{p_i}$ correspondent aux pseudo-probabilités obtenues à partir des valeurs propres.

Le deuxième paramètre est la valeur d'anisotropie A, définie comme la variabilité de la diffusion, complémentaire à H et est donné par :

$$\boldsymbol{A = \frac{\lambda_{2_}\lambda_3}{\lambda_2 + \lambda_3}} \qquad \text{(eq. II.27)}$$

A varie également de 0 à 1. Elle reflète l'importance relative des deuxièmes et troisièmes valeurs propres. Lorsque H augmente, les types d'objets au sol reconnus deviennent moins nombreux. Par conséquent, l'utilisation de H seule sera inadéquate. Ensuite, A peut aider à la reconnaissance du type d'objet. Donc, une combinaison des paramètres A et H aide grandement à résoudre les problèmes de diffusion de polarisation.

L'angle de diffusion est le troisième paramètre ; cela caractérise le type de mécanisme de diffusion dominant. Cet angle est défini comme suit :

$$\boldsymbol{\alpha = \sum_{i=1}^{3} p_i \times \alpha_i} \qquad \text{(eq. II.28)}$$

Les $\alpha_i$sont déduits à partir des vecteurs propres.

Lorsque α s'approche de π/4, cela représente la diffusion volumique ; lorsque α est égale à π/2, cela représente la composante de diffusion dièdre ou double rebond, et quand il vaut 0, cela représente la composante de diffusion surfacique [1].

Les étapes de la décomposition H/A/α sont illustrées dans la figure suivante :

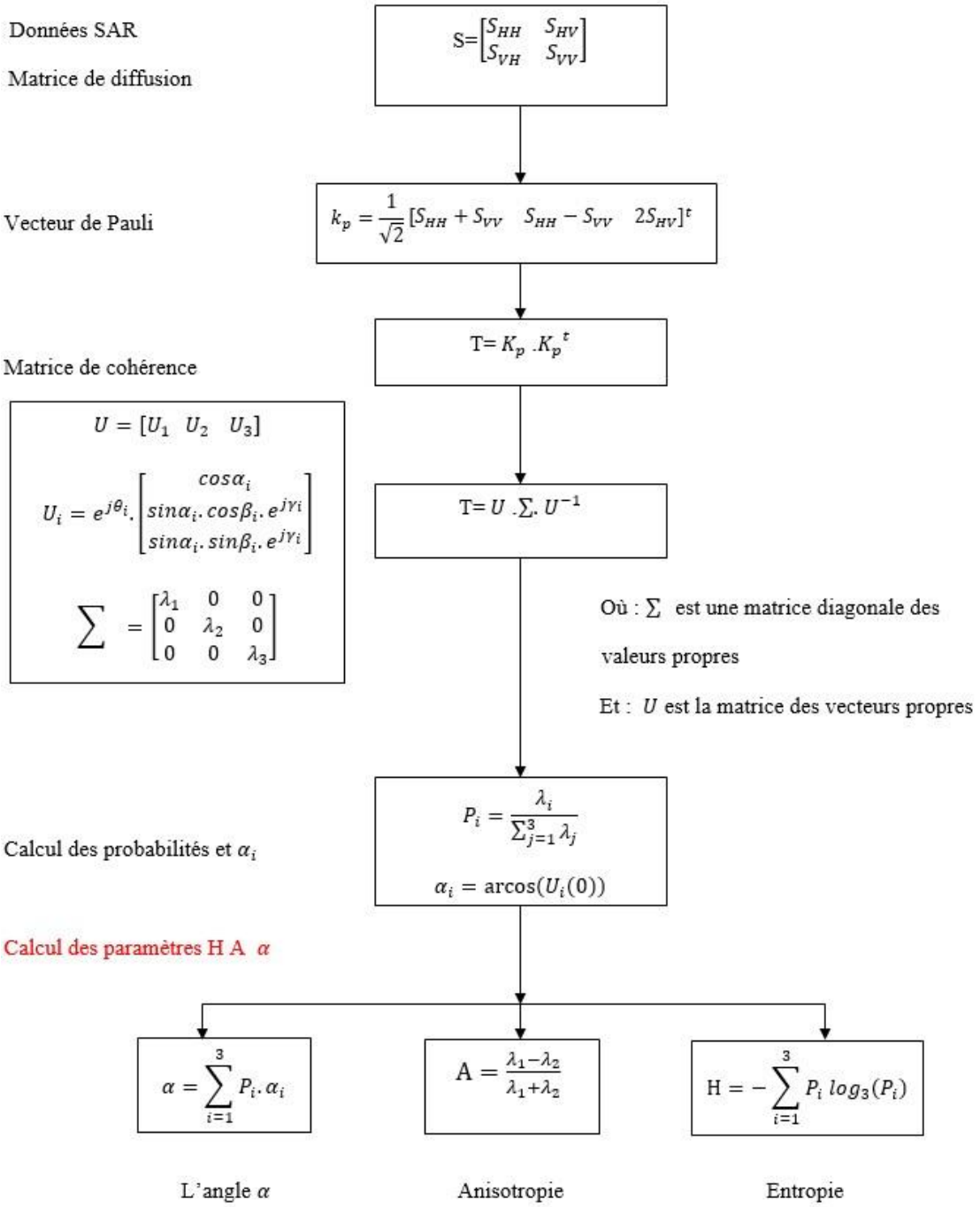


Figure II.6 : Schéma blocs de la décomposition H/A/α [20].

L'utilisation de la décomposition H/A/α va servir dans l'évaluation des performances des filtres dans le cadre de la préservation de l'information polarimétrique, en assurant que la moyenne locale dans des zones cibles de ces trois composantes soit maintenue avant et après filtrage.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié les méthodes d'évaluation que nous allons utiliser dans le prochain chapitre pour effectuer notre étude comparative et analyser leur efficacité. Nous avons commencé par présenter les techniques de l'évaluation visuelle, qui comprend

l'image Span, la représentation RVB de la décomposition de Pauli et les classifications non supervisées K-Means et ISODATA, ce qui nous permettra d'évaluer les performances des filtres visuellement. Ensuite, nous avons abordé les procédures de l'évaluation statistique et ses grandeurs usuelles qui permettent d'analyser les performances des filtres PolSAR sous les deux critères suivants : lissage des zones homogènes et conservation de contours. Pour finir, nous avons exposés les méthodes de vérification de la préservation de l'information de polarisation, qui sont : la moyenne locale du vecteur de Pauli, l'amplitude et la phase de la matrice de cohérence et l'analyse du l'image de speckle, la signature polarimétrique, et la décomposition H/A/α.

Chapitre III :

Résultats et discussion

Introduction

Après avoir présenté dans le chapitre précédent les méthodes d'évaluation des filtres polarimétriques, nous allons consacrer ce chapitre tout d'abord à présenter les images PolSAR avec lesquelles nous avons travaillé. Pour pouvoir bien tester nos méthodes d'évaluation, les données polarimétriques ont été filtrés par les méthodes de filtrage suivantes : filtre boxcar 3, boxcar 5, boxcar 7, boxcar 9 et le filtre de Lee adaptatif. Ensuite, nous présenterons les résultats de l'évaluation visuelle des images Span avant et après filtrage et la décomposition de Pauli, ainsi que les images résultantes de la classification non supervisée ISODATA et K-Means.

Puis, nous allons exposer les résultats des calculs des grandeurs statistiques, telles que : la moyenne, l'écart-type, l'ENL le calcul de moyenne des composantes du vecteur de Pauli et plusieurs d'autres paramètres nécessaires afin d'analyser les performances des filtres. En dernier, nous allons exposer les résultats de la signature polarimétrique et la décomposition H/A/α.

L'analyse des résultats obtenus repose sur les trois principaux critères suivants : le lissage des zones homogènes, la préservation de contours et surtout la conversation de l'information polarimétrique. Pour cela, nous avons utilisé des données complétement polarimétriques de la région d'Alger, Algérie.

Les méthodes étudiées ont été développées sous le langage de programmation IDL (Interactive Data Language) en utilisant le logiciel ENVI (Environnement for Visualizing Image), un logiciel de traitement d'images géo-spatiales [URL19].

III.1 Présentation des donnés

Les données que nous avons utilisées sont complètement polarimétriques (HH, HV, VH, VV), de type complexe (figure III.1) correspondant à la zone d'Alger, en Algérie qui permet de faciliter l'étude grâce à la connaissance préalable du terrain. Ces données sont acquises par le satellite RADARSAT-2 en bande de fréquences C, en 2009. Ces images ont été exploiter pour calculer les images Span (eq. I.6) et les composantes de vecteur de Pauli (eq. I.8) ($|S_{HH} - S_{VV}|$, $|S_{HH} + S_{VV}|$, $|S_{HV} + S_{HV}|$) (figure III.2).

Pour pouvoir bien tester l'efficacité des méthodes d'évaluation proposées, un filtrage a été appliqué sur les images polarimétrique, par les méthodes de filtrages suivantes : boxcar (3×3, 5×5, 7×7, 9×9) [URL20] et Lee adaptatif (RLF : Refined Lee), avec une fenêtre mobile de taille 7×7 pixels [15] [18].

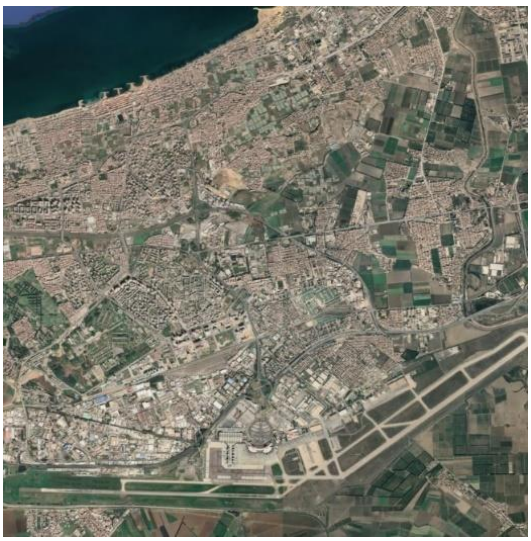
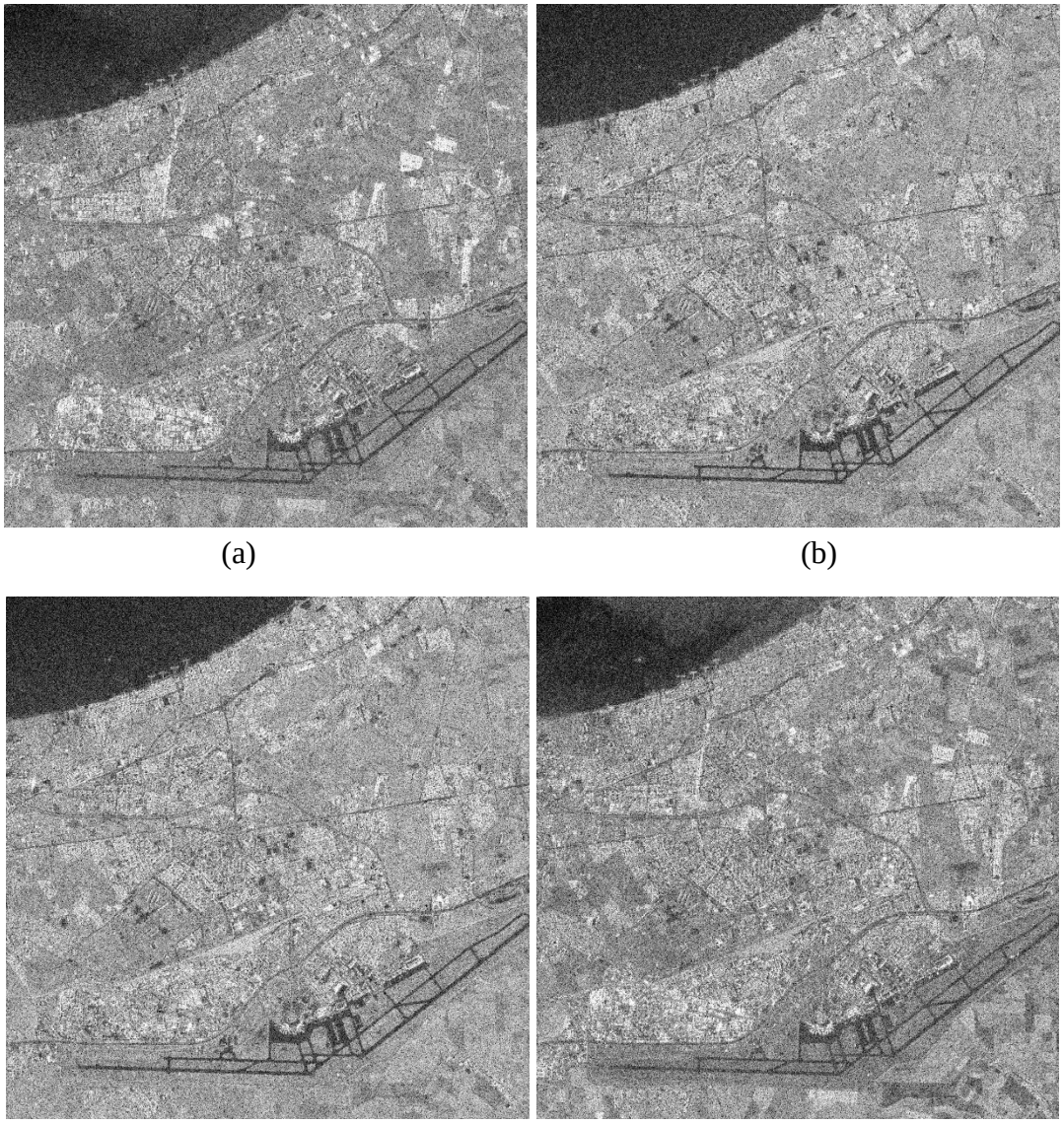


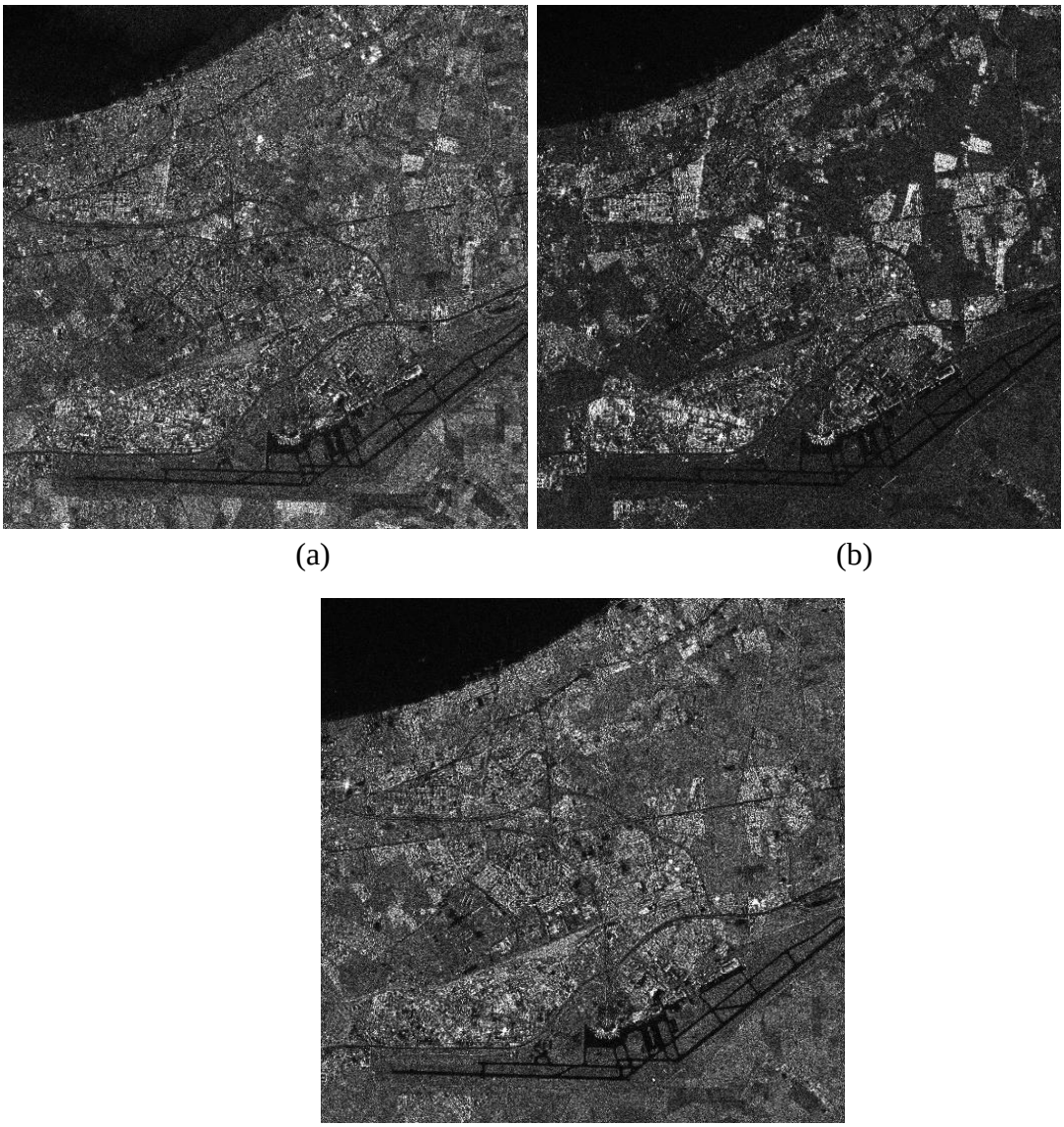
Image optique de la région d'Alger en 2009 (Google Earth).



(a) (b)

(c) (d)

Figure III.1 Représentation des données polarimétriques en amplitude. (a) Composante HH. (b) Composante HV. (c) Composante VH (d) Composante VV.



(a) (b)

Figure III.2 Images en amplitudes des trois composantes de Pauli, (a) |SHH + SVV| (b) |SHH -SVV| (c) $|S_{HV} + S_{VH}|$.

A propos de la réduction du speckle, il faut noter que plus le masque du filtrage est élevé, plus le lissage devient plus important, de ce fait, les contours sont fortement dégradés, ils deviennent flous, ainsi les structures fines deviennent moins visibles et il y aura perte de l'information.

Nous connaissons, par principe, que le filtre de Lee adaptatif apporte une meilleure conservation de contours, ainsi qu'un bon lissage des zones homogènes et une bonne préservation de l'information polarimétrique [30]. Grâce aux avantages de ce filtre, on le retrouve dans diverses applications SAR et PolSAR [31]. Par contre, le filtre boxcar amène un meilleur lissage aux zones homogènes, une conservation de contours moyenne ce qui implique une préservation moyenne de l'information polarimétrique [32]. Dans ce qui suit, nous allons se baser sur les performances de chaque filtre pour évaluer les méthodes étudiées.

III.2 Résultats des méthodes de l'évaluation visuelle

Dans cette partie, nous allons exposer les résultats de l'évaluation visuelle effectué sur les images Span, les images RVB de la décomposition de Pauli, ainsi que les images classifiées par les méthodes de classification non supervisée ISODATA et K-Means.

III.2.1 Image Span

L'évaluation visuelle de la figure III.3, qui montre les images Span en amplitude ; originale et filtrées, permet de vérifier le critère de lissage ainsi que le critère de préservation de contours.

En commençant par le Span en amplitude originale, le speckle est présent ce qui rend la visibilité des zones homogènes mauvaise, la définition des contours désagréable, ainsi l'extraction des informations sera compliquée. L'application du filtre boxcar 3 (c. à. d. 3×3) a apporté un lissage faible, ce qui a amélioré faiblement l'homogénéisation, par contre, les contours sont devenus moins visibles. De même, pour le filtre boxcar 5 (5×5) et le filtre boxcar 7 (7×7), le lissage est plus fort mais la conservation de contours est mauvaise. Le boxcar 9 (9×9) apporte le meilleur lissage, par conséquent la conservation de contours est la plus mauvaise. Concernant le filtre RLF, nous remarquons qu'il existe un équilibre entre le lissage et la conservation de contours, nous pouvons le confirmer au niveau des pistes de l'aéroport d'Alger qui sont plus définies, et les zones homogènes qui les entourent sont plus lisses. Donc, l'évaluation visuelle des images représente une bonne méthode d'évaluer les filtres selon les deux critères : lissage des régions de même texture et conservation des détails.

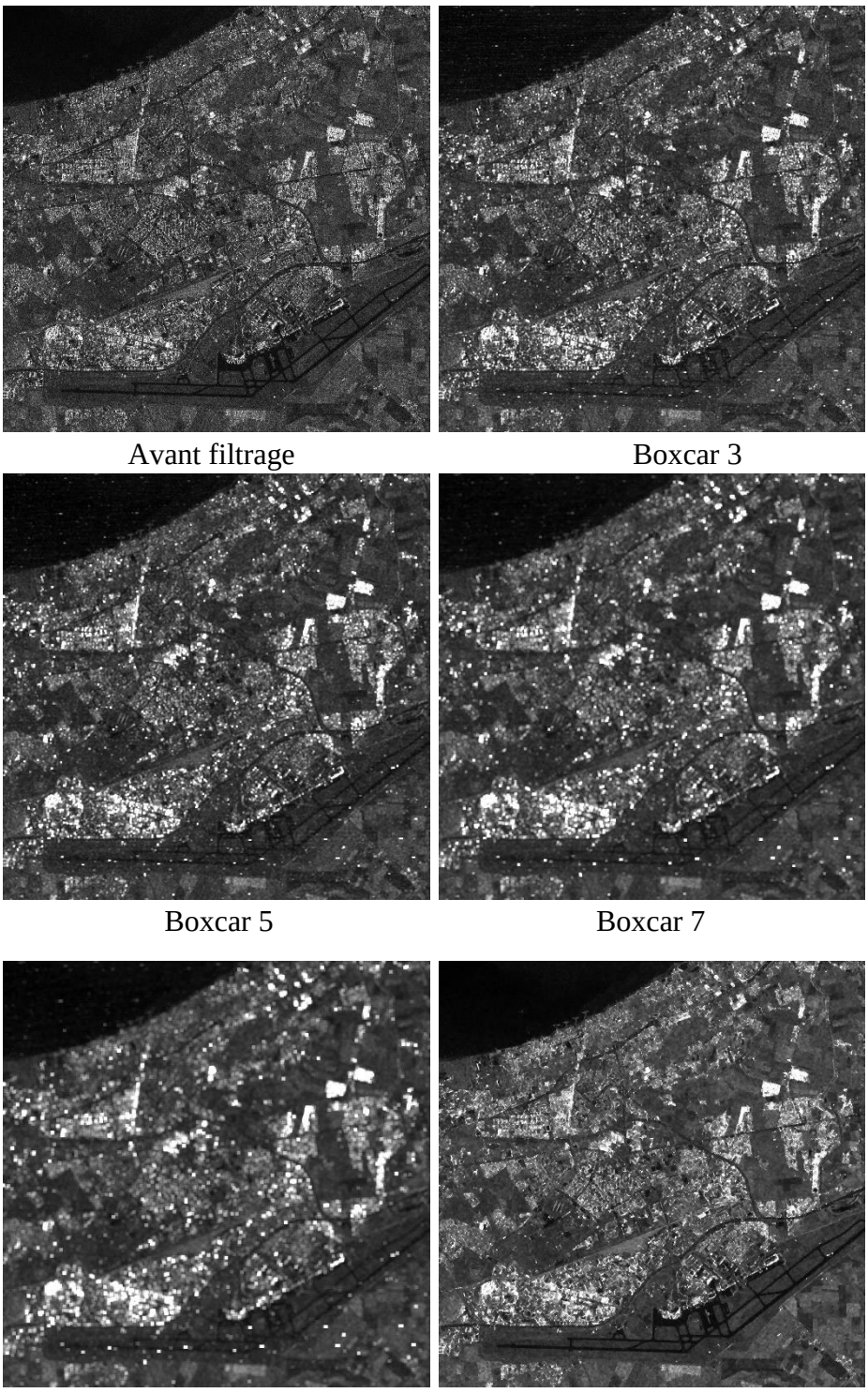
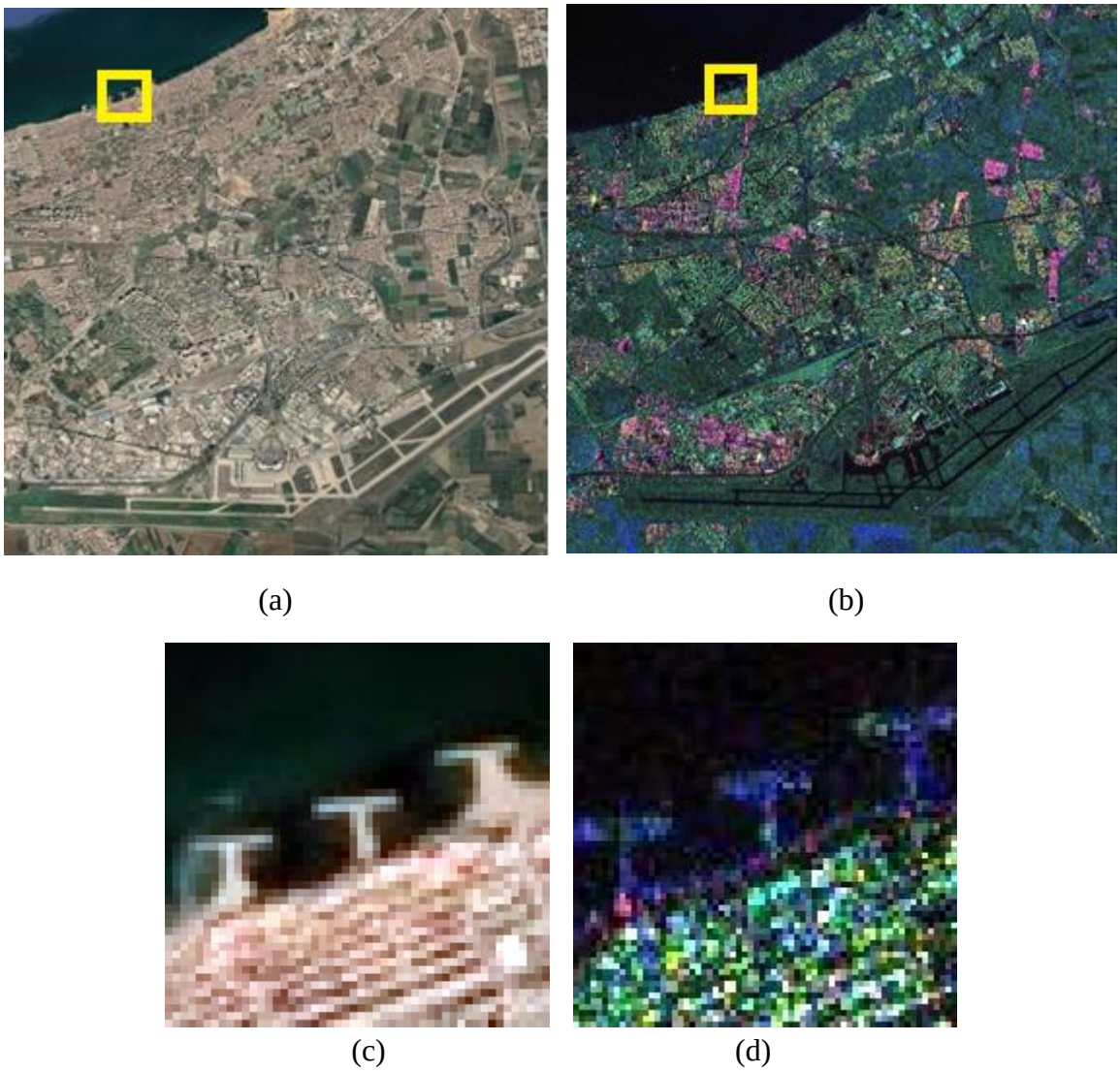


Figure III.3 Image optique et images Span en amplitudes de la région d'Alger ; originale et filtrées.

III.2.2 Décomposition de Pauli

Le bruit speckle est clairement visible dans la figure III.4 qui présente la composition RVB colorée de Pauli de l'image originale, avec R : $|S_{HH} - S_{VV}|$, B : $|S_{HH} + S_{VV}|$ et V : $|S_{HV} + S_{VH}|$. Ce bruit dégrade la qualité de l'image et rends difficile l'extraction de l'information polarimétrique.



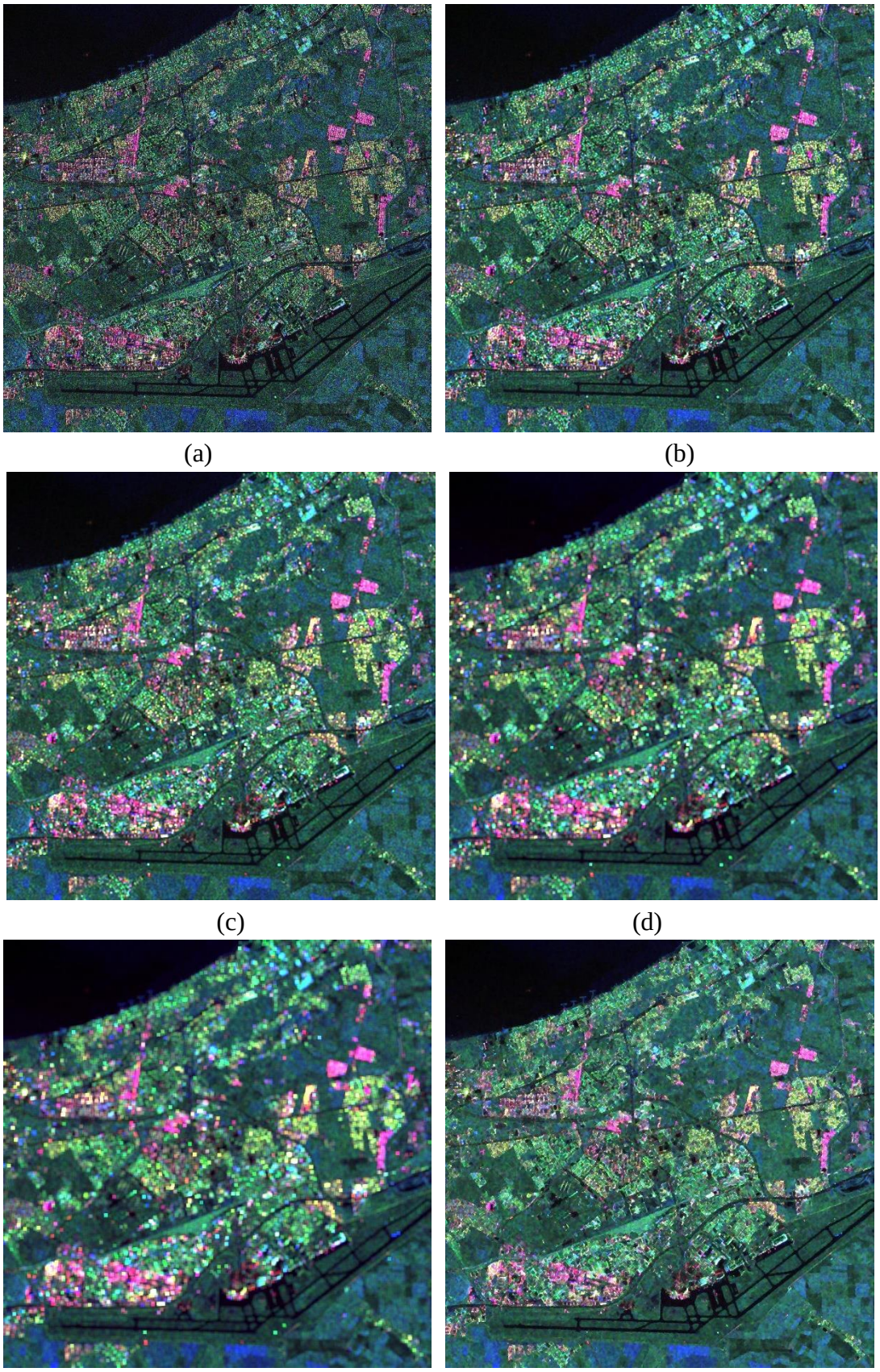
(a) (b)

(c) (d)

Figure III.4 Image optique (Google Earth) (a) et image PolSAR originale (b) en composition colorée de Pauli avec leurs zooms en jaune (c) et (d) respectivement.

La décomposition colorée de Pauli permet d'évaluer l'habilité des filtres à éliminer le bruit, lisser les zones homogènes et préserver les contours. Ainsi, la préservation des couleurs avant et après filtrage, montre une préservation de l'information polarimétrique. Comme nous l'avons mentionné précédemment dans la partie II.1. 2, chaque composante (couleur) représente un type de mécanisme de diffusion : le rouge représente l'amplitude $|S_{HH} - S_{VV}|$ et il correspond au mécanisme de diffusion double rebonds, le vert représente l'amplitude $|S_{HV} + S_{VH}|$ et correspond au mécanisme de diffusion volumique et le bleu s'agit de l'amplitude $|S_{HH} + S_{VV}|$ et correspond au mécanisme de diffusion simple rebond (surfacique).

La figure III.5 illustre les résultats de la décomposition de Pauli des images filtrées.



(a) (b)

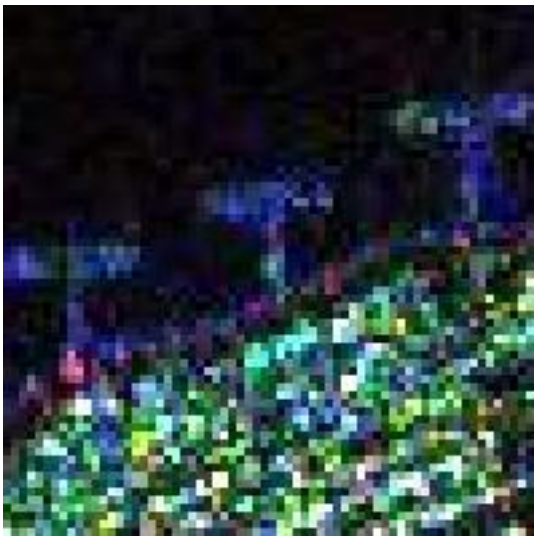
(c) (d)

(e) (f)

Figure III.5 Image optique et images PolSAR en composition colorée de Pauli (a) avant filtrage et filtrés par (b) Boxcar 3 (c) Boxcar 5 (d) Boxcar 7 (e) Boxcar 9 (f) RLF.



Image optique



(a)



(b)



(c)



(d)



(e) (f)

Figure III.6 Image optique et images zooms PolSAR en composition colorée de Pauli (a) avant filtrage filtrés par (b) Boxcar 3 (c) Boxcar 5 (d) Boxcar 7 (e) Boxcar 9 (f) RLF.

D'après les figures III.6, du point de vue lissage, nous remarquons que pour les images filtrées par le filtre Boxcar, le lissage des zones homogènes augmente en augmentant la taille de la fenêtre d'étude mais les contours deviennent flous. Le filtre Boxcar 9 est plus efficace dans l'élimination du bruit, contrairement aux filtres boxcars 7, 5 et 3. Du point de vue préservation de contours, le filtre boxcar n'offre pas la meilleure solution. Concernant le filtre RLF, nous observons qu'il apporte une meilleure élimination du bruit avec conservation des détails fins et permet aussi d'obtenir un bon compromis entre le lissage des zones homogène et la préservation de contours.

Egalement, nous remarquons d'une manière général les couleurs sont maintenues pour tous les filtres. Pour le filtre de RLF, les couleurs sont mieux conservées car elles sont plus rehaussées, ainsi que l'aspect visuel des objets est amélioré. Par contre, du point de vue visuel, cela ne permet pas de donner une conclusion définitive sur le critère de la préservation de l'information polarimétrique, de ce fait, il est nécessaire d'effectuer une analyse statistique pour valider les résultats sur tous les critères requis (voir section II.2).

III.2.3 Classifications ISODATA et K-Means

La figure III.7 et la figure III.8, représentent les résultats de la classification des images Span, avant et après filtrage, par les méthodes ISODATA et K-Means.

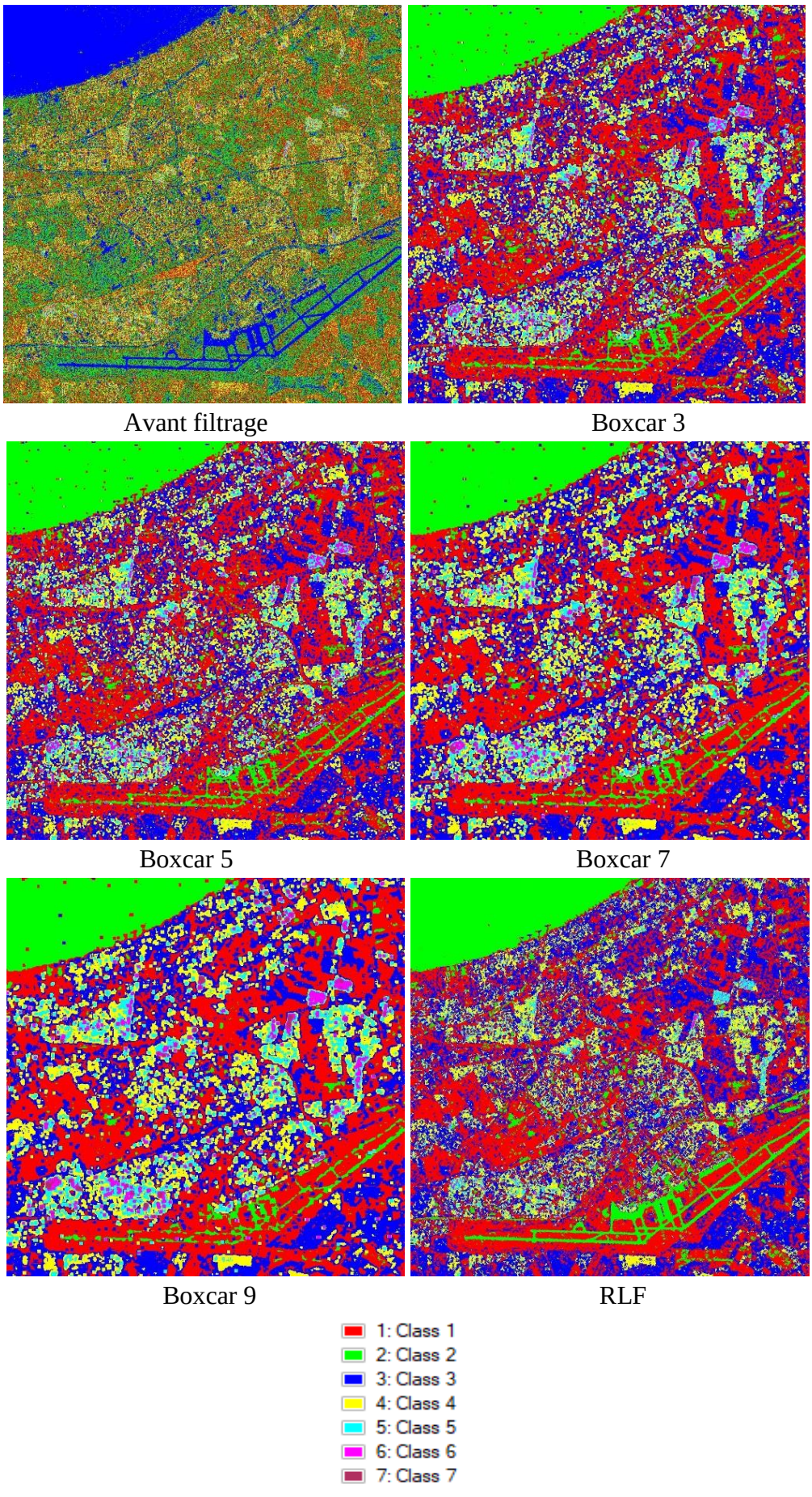


Figure III.7 Images Span avant et après filtrage classifiées par la méthode K-means

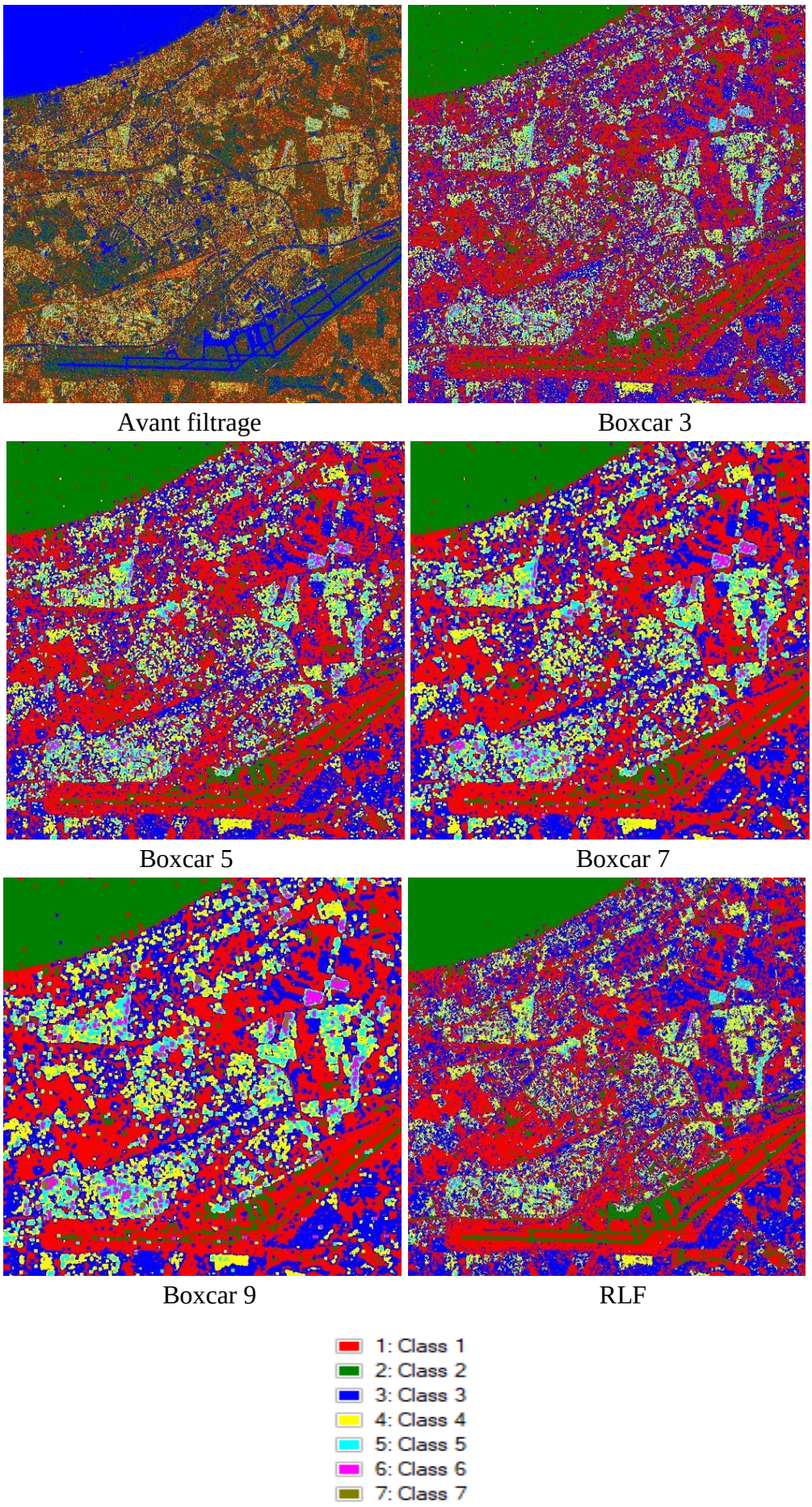


Figure III.8 Images Span classifiées avant et après filtrage par la méthode ISODATA.

Les images Span classifiées avant filtrage ne présentent pas des classes bien définies. De plus, l'existence du bruit et les tâches granulaires, rend la visibilité des classes plus difficile. Les images Span classifiées après filtrage montrent une amélioration au niveau des classes, elles sont bien définies et elles sont plus homogènes et uniformes, cela permet une meilleure visibilité et identification des objets, par exemple, les pistes de l'aéroport d'Alger sont facilement reconnues, cela prouve que chaque filtre utilisé possède l'habilité de séparer les classes.

En comparant les résultats des images filtrés classifiées par la classification K-Means (figure III.7), le filtre RLF présente le meilleur résultat dont les classes sont bien définies et visibles, les régions homogènes sont aisément identifiables, les routes sont clairement visibles, grâce à l'élimination de l'effet granulaire causé par le speckle. Pour le filtre boxcar, la visibilité des classes est moins claire, les tâches granulaires sont beaucoup moins réduites, par rapport au filtre RLF.

De même, pour la classification ISODATA (figure III.8), les résultats du RLF sont meilleurs que ceux du filtre boxcar.

Nous concluons donc que la classification non-supervisée K-means où bien ISODATA apporte des résultats similaires, à voire identiques, ainsi, l'utilisation d'une seule classification pour évaluer visuellement les capacités des filtres suffit.

En conclusion, concernant les méthodes de l'évaluation visuelle, la décomposition colorée de Pauli offre une meilleure technique d'évaluer visuellement les filtre PolSAR. Car, elle permet de bien observer la capacité des filtres à lisser les zones homogènes, à conserver les contours et surtout à préserver l'information polarimétrique à la fois.

III.3 Résultats des méthodes de l'évaluation statistique

Les calculs statistiques sont effectués sur les images Span avant et après filtrage. Ils permettent de vérifier le critère de lissage des zones homogènes, le critère de la préservation de contours, ainsi que celui de la conservation de l'information polarimétriques.

La figure III.9 montre les 3 zones homogènes et hétérogènes utilisées dans cette l'évaluation.

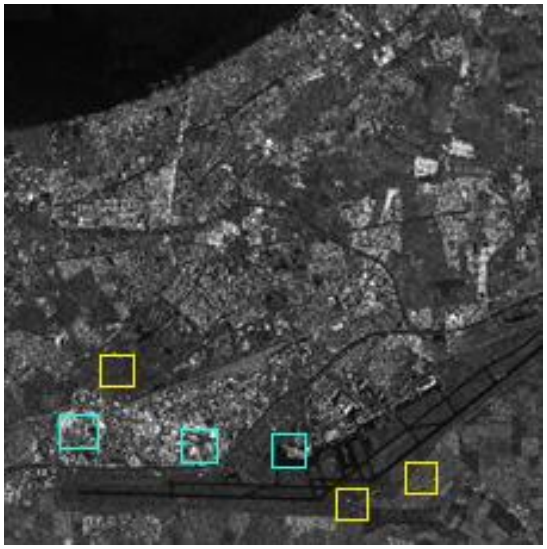


Figure III.9 Image Span de trois zones homogènes en jaune et trois zones hétérogènes en cyan.

III.3.1 Lissage des zones homogènes

Les résultats de calculs des paramètres statistiques concernant par la vérification du lissage des zones homogènes qui ont été effectuées sur trois zones homogènes de l'image Span avant et après filtrage, sont montrés dans le tableau suivant :

Tableau III.1 Valeurs de σ, μ, CV, ENL et RR des Span en intensité avant et après filtrage par les méthodes : boxcar 3, boxcar 5, boxcar 7, boxcar 9 et RLF.

Filtres / Méthodes	Avant filtrage	Boxcar 3	Boxcar 5	Boxcar 7	Boxcar 9	RLF
Zone homogène 1						
σ	9.302×10^{7}	4.869×10^{7}	3.445×10^{7}	2.814×10^{7}	2.078×10^{7}	5.693×10^{7}
μ	2.525×10^{7}	3.026×10^{7}	3.166×10^{7}	3.046×10^{7}	2.773×10^{7}	2.360×10^{7}
Cv	3.682	1.609	1.088	0.924	0.749	2.412
ENL	1.433	1.665	4.627	9.022	15.073	6.773
RR	10.348	10.324	10.197	10.142	10.110	10.163
Zone homogène 2						
σ	8.924×10^{8}	3.438×10^{8}	2.596×10^{8}	2.477×10^{8}	2.458×10^{8}	4.639×10^{8}
μ	2.263×10^{8}	1.535×10^{8}	1.535×10^{8}	2.477×10^{8}	2.004×10^{8}	1.550×10^{8}
Cv	3.943	2.244	1.691	1.409	1.226	2.992
ENL	1.693	9.229	27.430	52.670	83.264	18.894
RR	10.321	10.140	10.0821	10.059	10.047	10.098
Zone homogène 3						
σ	4.323×10^{7}	1.095×10^{7}	6.277×10^{6}	3.996×10^{6}	3.391×10^{6}	2.487×10^{7}
μ	2.227×10^{7}	1.222×10^{7}	1.163×10^{7}	1.141×10^{7}	1.201×10^{7}	1.696×10^{7}
Cv	1.941	0.896	0.539	0.350	0.282	1.466
ENL	1.959	8.075	18.116	32.895	59.396	11.545
RR	10.299	10.150	10.100	10.075	10.056	10.126

D'après le tableau III.1, nous remarquons que les valeurs de la moyenne pour ces trois zones sont maintenues avant et après filtrage, l'écart-types diminue, ce qui implique des valeurs de coefficient de variation faibles et donc des valeurs de l'ENL élevées. Cela veut dire, que les critères sont vérifiés.

Prenons la moyenne et l'écart-type en considération, nous constatons que leurs valeurs calculées des différents filtres ne présentent pas une différence remarquable entre eux, ce qui rends difficile la comparaison entre ces filtres

De même, les résultats statistiques de la résolution de radiation sont proches pour tous les filtres. Donc, cette dernière n'est pas considérée comme une bonne méthode d'évaluation.

En parlant du coefficient de variation, nous voyons que les valeurs pour les différents filtres présentent une diminution plus ou moins remarquable. Le filtre boxcar 9 montre le coefficient de variation le plus faible, ce qui veut dire qu'il possède la meilleure capacité de lissage. Pour les filtres boxcar 3, boxcar 5 et boxcar 7, leurs valeurs sont proches. Le filtre de Lee adaptatif présente la valeur la plus élevée de Cv. Cela implique que nous pouvons considérer le coefficient de variation comme un bon indicateur sur la capacité des filtres dans le cadre de lissage des zones homogènes.

Comme l'ENL se définie par l'inverse carré du coefficient de variation, et en remarquant ses valeurs calculées, nous pouvons observer la différence entre les filtres. Le filtre boxcar 9 montre l'ENL le plus supérieur, ce qui veut dire que ce dernier est le meilleur en termes d'élimination de bruit. Pour les autres filtres boxcar, les résultats sont également élevés. Le filtre de Lee montre une valeur de l'ENL plus élevée que celle du boxcar 3, ce qui implique son efficacité à l'élimination du bruit plus que le boxcar 3.

D'après les observations des calculs du tableau III.1, nous pouvons conclure que les résultats joignent bien les remarques de l'évaluation visuelle.

Donc, nous déduisons que l'ENL est considéré comme la meilleure méthode d'évaluation statistique du point de vue lissage.

III.3.2 Conservation de contours

Le tableau III.2 résume les résultats de calcul des méthodes statistiques pour la vérification du critère de la conservation des contours, effectuées sur les images Span après filtrage.

Tableau III.2 Valeurs de C_{VG} et EPI des Span en intensité après filtrage par les méthodes : boxcar 3, boxcar 5, boxcar 7, boxcar 9 et RLF.

Filtres / Méthodes	Boxcar 3	Boxcar 5	Boxcar 7	Boxcar 9	RLF
Zone hétérogène					
C_{VG}	2.09012	1.10630	0.894492	0.752871	2.29012
EPI	0.776933	0.719081	0.656246	0.521987	0.795347

D'après le tableau III.2, nous constatons que la valeur du coefficient de variation globale Cvg la plus élevée est donnée par le filtre RLF et Boxcar 3, puis Boxcar 5, Boxcar 7 et Boxcar 9 respectivement. Concernant l'indice de préservation de contour EPI, en dépit de la ressemblance des résultats pour tous les filtres, on peut remarquer que le filtre de Lee présente la valeur la plus élevée. Tout cela implique que le RLF est le meilleur filtre en terme de la préservation de contours.

Nous pouvons conclure que les résultats obtenus dans le tableau III.2 confirment bien les conclusions de l'évaluation visuelle.

Donc, une comparaison entre les résultats de C_{VG} et l'EPI, nous informe que le C_{VG} est la meilleure méthode d'évaluation des filtres polarimétrique en point de vue préservation de contours.

III.3.3 Préservation de l'information polarimétrique

Dans ce qui suit, nous allons présenter les résultats statistiques des méthodes permettant la vérification de la conservation de l'information polarimétrique.

III.3.3.1 Moyennes des éléments diagonaux et hors diagonaux de la matrice de cohérence

Le tableau III.3 ci-dessous résume les résultats de calculs des moyennes des trois intensités polarimétriques du vecteur de Pauli (eq. I.8), ainsi que la moyenne de l'amplitude et la phase de l'élément T_{12} (eq.I.9).

D'après le tableau III.3, concernant les moyennes des trois composantes polarimétriques, nous remarquons que les résultats de calcul pour le filtre boxcar sont presque identiques aux valeurs originales. Les valeurs du filtre RLF sont également assez proches aux valeurs originales. Cela signifie que tous les filtres ont préservé l'information polarimétrique, ce qui confirme les résultats de l'évaluation visuelle de la décomposition de Pauli.

Concernant la moyenne de l'amplitude de T12, les résultats du filtre boxcar sont assez proches entre eux, et même à la valeur originale, ce qui signifie que le filtre boxcar a réussi à préserver l'information polarimétrique, mais le RLF présente une valeur presque identique à l'originale, ce qui montre que c'est le meilleur filtre à préserver l'information polarimétrique. Concernant la moyenne de la phase, les résultats de tous les filtres sont assez proches à l'originale, cela implique que selon cette méthode, tous les filtres ont également bien préservé l'information polarimétrique.

Tableau III.3 Valeurs des moyennes des éléments diagonaux et hors diagonaux avant et après filtrage par les méthodes : boxcar 3, boxcar 5, boxcar 7, boxcar 9 et RLF.

Filtres / Moyennes	Avant filtrage	Boxcar 3	Boxcar 5	Boxcar 7	Boxcar 9	RLF
$\lvert S_{HH} - S_{VV}\rvert^2$	4.735×10^{13}	4.734×10^{13}	4.736×10^{13}	4.736×10^{13}	4.736×10^{13}	4.055×10^{13}
$\lvert S_{HH} + S_{VV}\rvert^2$	5.408×10^{13}	5.322×10^{6}	5.355×10^{13}	5.352×10^{13}	5.352×10^{13}	5.458×10^{13}
$\lvert S_{HV} + S_{VH}\rvert^2$	2.315×10^{13}	2.320×10^{13}	2.300×10^{13}	2.303×10^{13}	2.303×10^{13}	2.196×10^{13}
$\lvert T_{12}\rvert$	7.968×10^{13}	7.552×10^{13}	7.208×10^{13}	7.265×10^{13}	7.095×10^{13}	7.871×10^{13}
phase de T_{12}	0.162	0.149	0.198	0.206	0.221	0.200

III.3.3.2 Image Speckle

Le tableau III.4 affiche les résultats de calculs des valeurs moyennes du paramètre SP (eq. II.2.3.3) des images Span, ainsi que celles des intensités du vecteur de Pauli ($|S_{HH} - S_{VV}|^2$, $|S_{HH} + S_{VV}|^2$, $|S_{HV} + S_{VH}|^2$) (eq. I.8).

Tableau III.4 Moyennes du paramètre SP après filtrage.

Filtres / SP	Originale	Boxcar 3	Boxcar 5	Boxcar 7	Boxcar 9	RLF
Span	-	0.942984	0.946237	0.949149	0.949422	0.960242
$\|S_{HH} - S_{VV}\|^2$	-	0.91343	0.91654	0.93597	0.92012	0.940946
$\|S_{HH} + S_{VV}\|^2$	-	0.91147	0.91964	0.93230	0.92475	0.934083
$\|S_{HV} + S_{VH}\|^2$	-	0.91238	0.92363	0.92632	0.93697	0.936404

D'après le tableau III.4, nous constatons que le filtre RLF présente des valeurs de SP les plus proche de 1. Les filtres Boxcar 3, 5, 7 et 9 montrent des valeurs proches entre eux et inférieures à celles du filtre RLF. Cela montre que le filtre RLF est le meilleur à éliminer le bruit et préserver l'information polarimétrique. Ainsi, le calcul de la moyenne du paramètre SP est une méthode d'évaluation utile pour vérifier le critère de la conservation de l'information polarimétrique.

Par conséquent, en observant toutes les méthodes proposées, le calcul de la moyenne des intensités de Pauli présente une bonne méthode d'évaluation lors de la préservation de l'information polarimétrique. Le paramètre SP présente la meilleure technique pour évaluer le taux de l'élimination du bruit.

III.4 Signature polarimétrique

Pour pouvoir bien étudier l'efficacité de la méthode de la signature polarimétrique en terme de la préservation de l'information polarimétrique, nous avons affiché les graphes 3D des signatures polarimétriques calculées pour un seul pixel appartenant aux zones choisies. Pour cela, nous avons choisi deux zones homogènes (figure III.10) ; la mer, gazon.

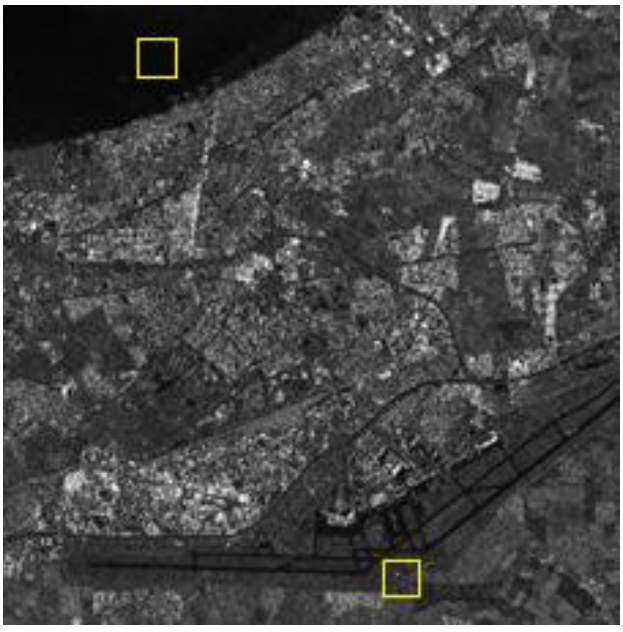
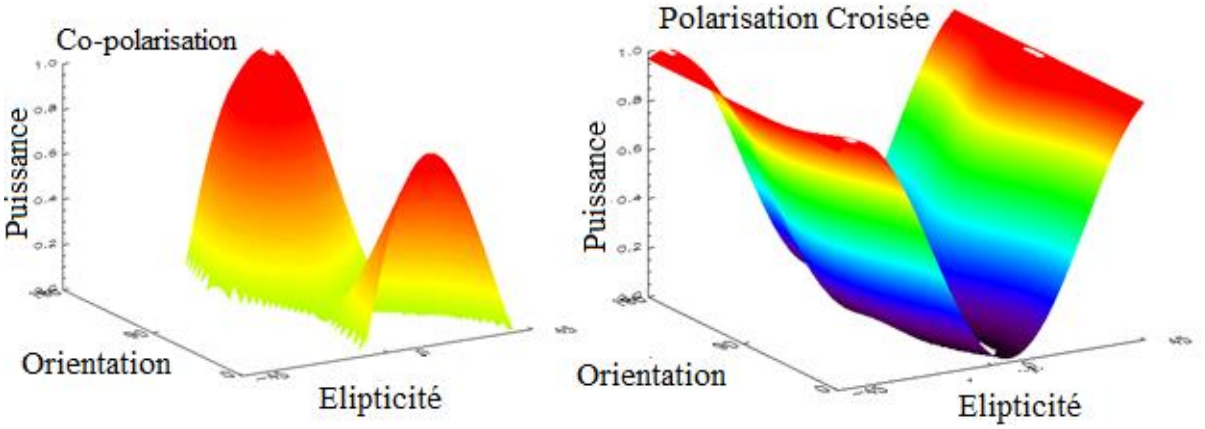


Figure III.10 Image Span de deux zones homogènes : la mer et gazon.

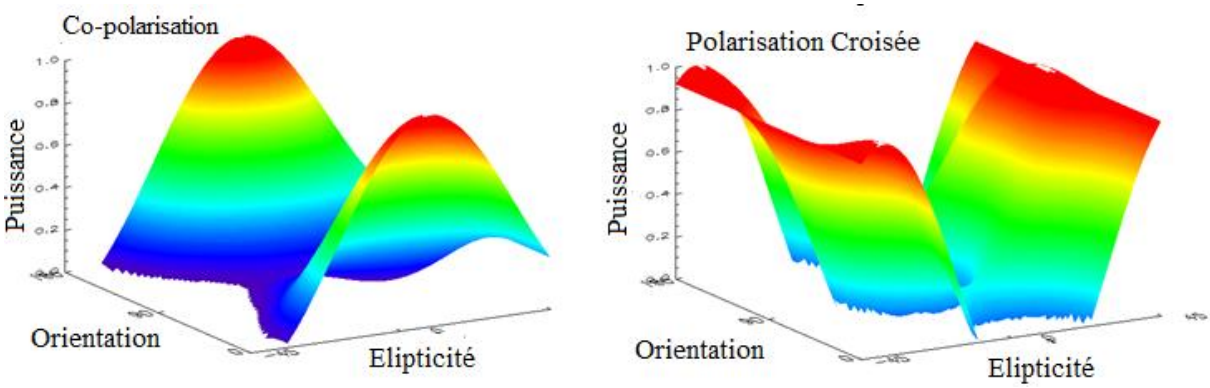
Les figures suivantes présentent les graphes tridimensionnels des signatures polarimétriques en co-polarisation et en polarisation croisée avant et après filtrage correspondants aux deux zones homogènes choisies (figure III.10) :

- Les résultats de la signature polarimétrique pour la première zone homogène :



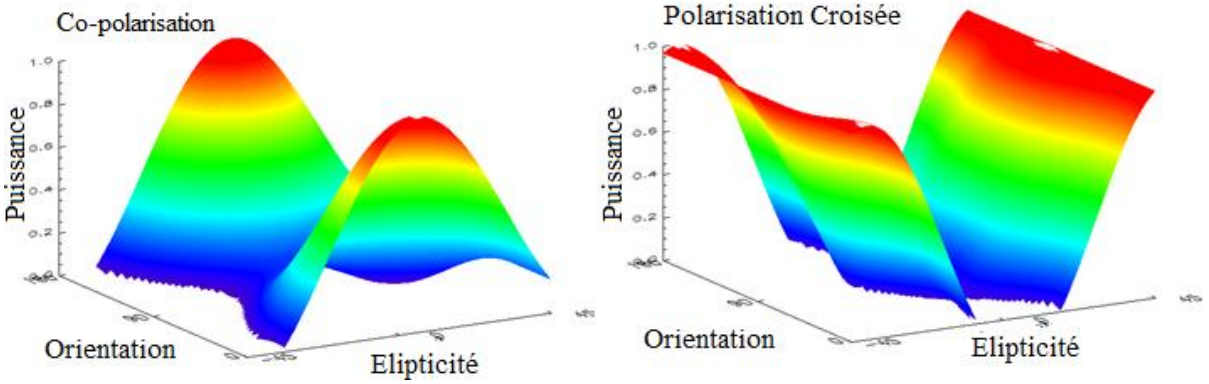
(a) (b)

Figure III.11 Graphes 3D de la signature polarimétrique avant filrage en co-polarisation (a) et en polarisation croisée (b).



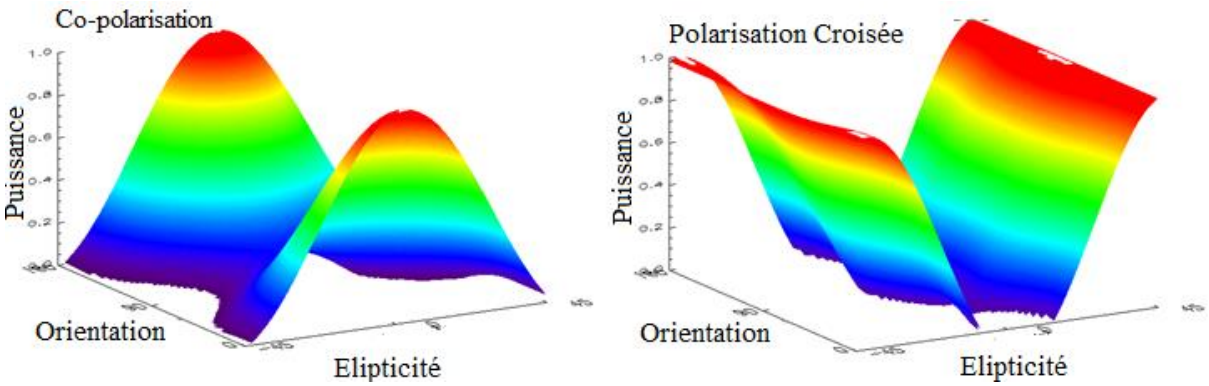
(a) (b)

Figure III.12 Graphes 3D de la signature polarimétrique filtré par boxcar 3 en co-polarisation (a) et en polarisation croisée (b).



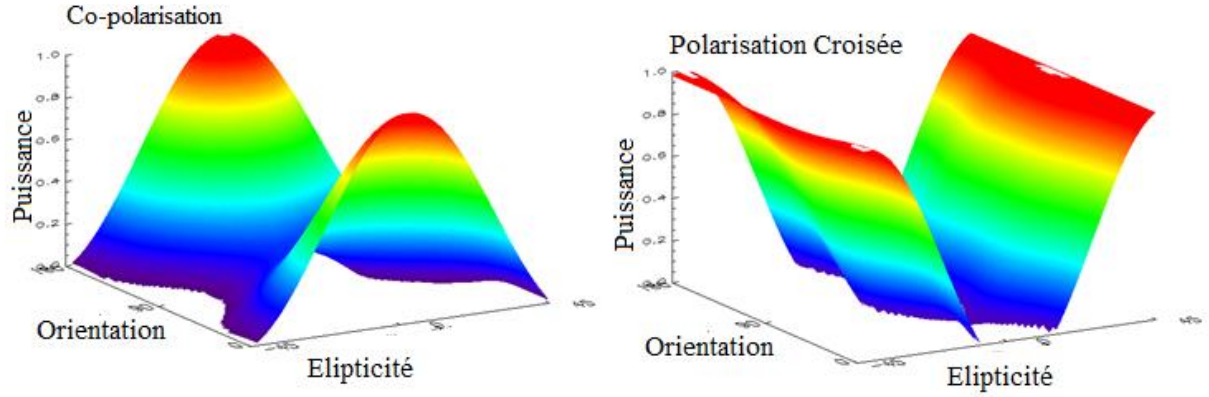
(a) (b)

Figure III.13 Graphes 3D de la signature polarimétrique filtré par boxcar 5 en co-polarisation (a) et en polarisation croisée (b).



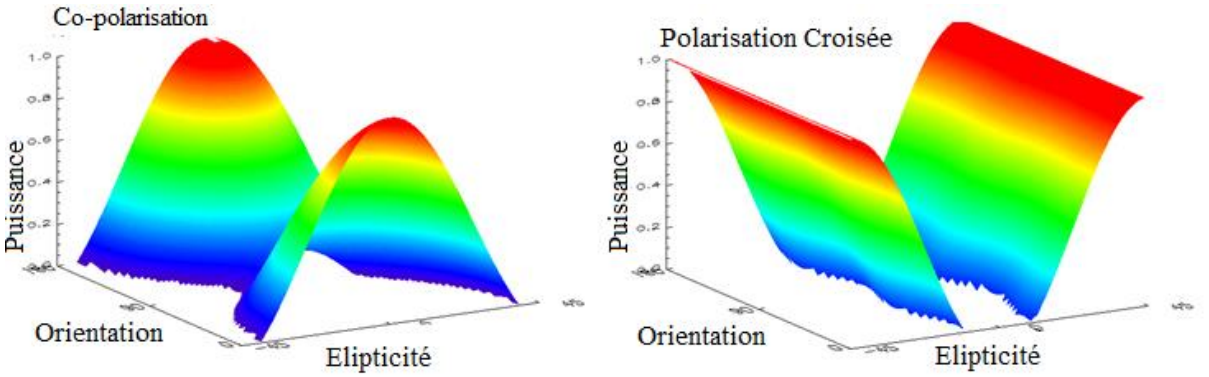
(a) (b)

Figure III.14 Graphes 3D de la signature polarimétrique filtré par boxcar 7 en co-polarisation (a) et en polarisation croisée (b).



(a) (b)

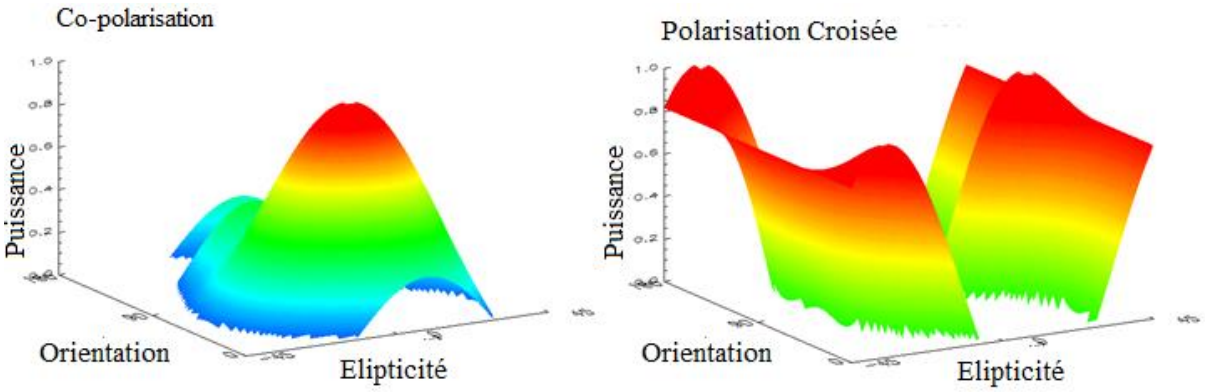
Figure III.15 Graphes 3D de la signature polarimétrique filtré par boxcar 9 en co-polarisation (a) et en polarisation croisée (b).



(a) (b)

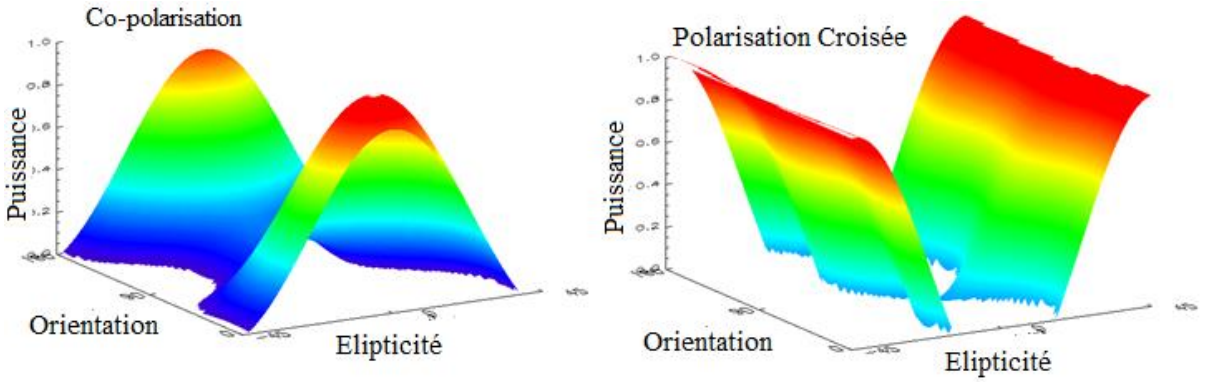
Figure III.16 Graphes 3D de la signature polarimétrique filtré par Lee adaptatif en co-polarisation (a) et en polarisation croisée (b).

➢ Les résultats de la signature polarimétrique pour la deuxième zone homogène :



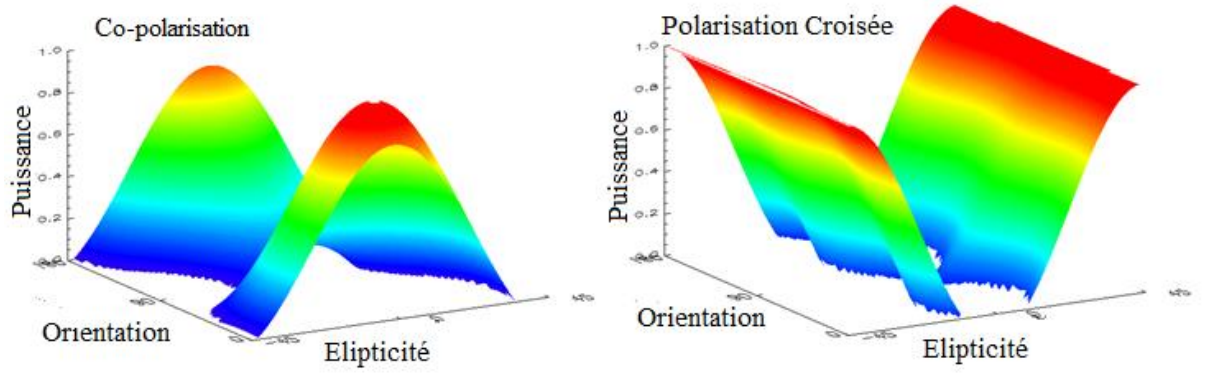
(a) (b)

Figure III.17 Graphes 3D de la signature polarimétrique avant filtrage en co-polarisation (a) et en polarisation croisée (b).



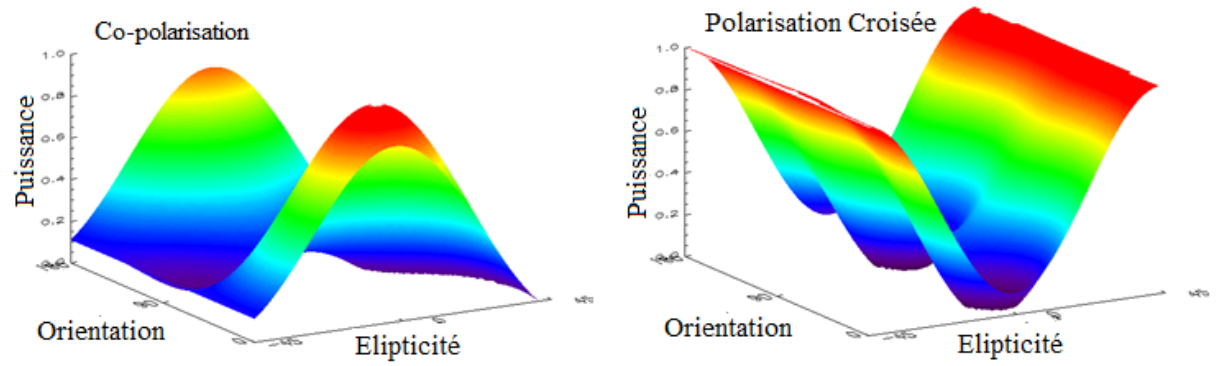
(a) (b)

Figure III.18 Graphes 3D de la signature polarimétrique filtré par boxcar 3 en co-polarisation (a) et en polarisation croisée (b).



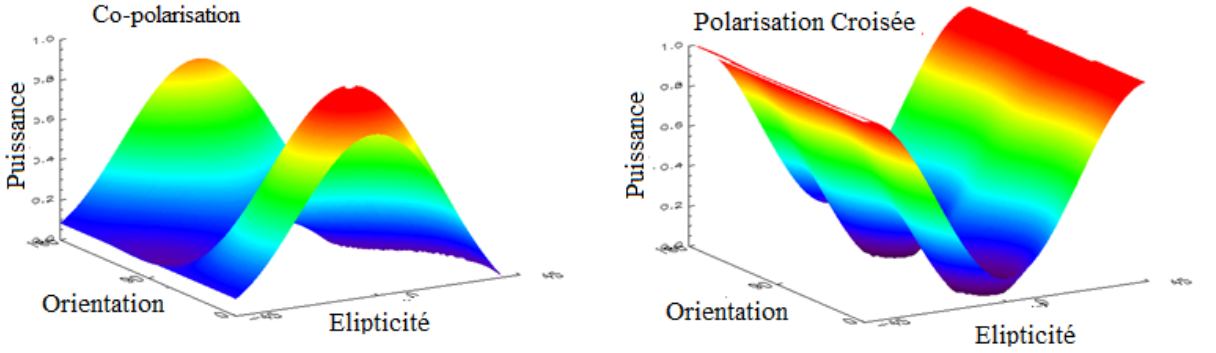
(a) (b)

Figure III.19 Graphes 3D de la signature polarimétrique filtré par boxcar 5 en co-polarisation (a) et en polarisation croisée (b).



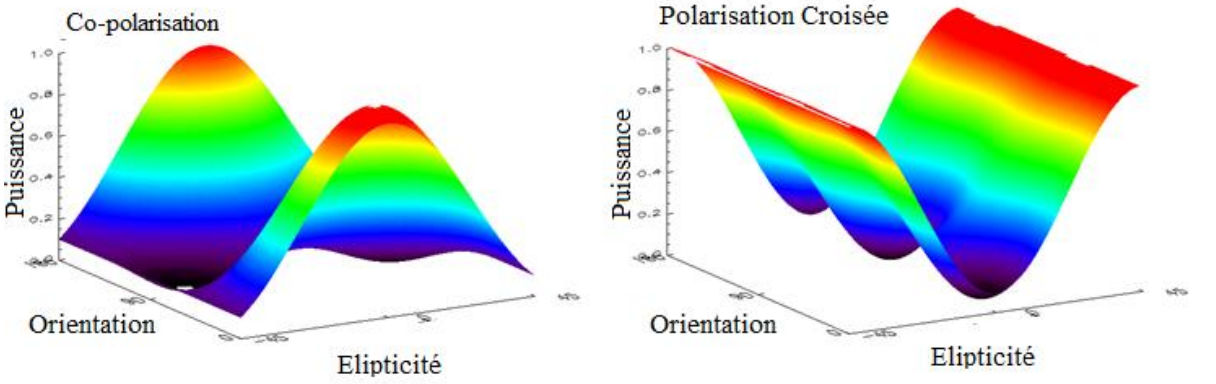
(a) (b)

Figure III.20 Graphes 3D de la signature polarimétrique filtré par boxcar 7 en co-polarisation (a) et en polarisation croisée (b).



(a) (b)

Figure III.21 Graphes 3D de la signature polarimétrique filtré par boxcar 9 en co-polarisation (a) et en polarisation croisée (b).



(a) (b)

Figure III.22 Graphes 3D de la signature polarimétrique filtré par Lee adaptatif en co-polarisation (a) et en polarisation croisée (b).

Par la suite, nous avons proposé de calculer les moyennes des puissances en co-polarisation et en polarisation croisée, avant et après filtrage, que nous avons affiché dans le tableau III.5.

Tableau III.5 Moyennes des puissances en co-polarisation et en polarisation croisée avant et après filtrages.

Filtres / *P-Sig.Pol.*	Avant filtrage	Boxcar 3	Boxcar 5	Boxcar 7	Boxcar 9	RLF
Zone homogène 1						
P_{co}	27432.462	42091.130	30334.732	34710.069	32020.598	27842.831
P_{cr}	32430.680	26608.345	25917.977	20383.420	28068.036	29575.429
Zone homogène 2						
P_{co}	262582.03	501043.67	458036.81	633336.34	555838.05	600677.60
P_{cr}	672639.71	412120.60	515283.49	679916.01	628744.16	653289.70

Prenant la première zone homogène, en observant les résultats de calcul de moyennes de la signature polarimétrique en co-polarisation et en polarisation croisée, nous remarquons que les valeurs du filtre RLF sont les plus proches aux valeurs originales par rapport aux autres filtres. Ce qui implique la bonne capacité du filtre RLF à préserver l'information polarimétrique. Cela peut être confirmé en comparant les graphes des signatures polarimétriques originaux (figure III.11) de cette zone avec ceux du filtre RLF (figure III.16), les graphes sont semblables avec une déformation minimale au niveau de la co-polarisation, le graphe est plus large que celui de l'originale. Concernant les filtres boxcar, les résultats de calculs de moyennes ont subi une variation légère, ce qui implique que leurs graphes des signatures polarimétriques (figure III.12, figure III.13, figure III.14 et figure III.15) des deux polarisations ont changé, en notant que plus la fenêtre du filtrage augmente, plus l'effet de flou s'accentue et plus les graphes des signatures polarimétriques changent, ce qui implique une perte dans l'information polarimétrique, car la préservation du graphe de la signature polarimétrique signifie la préservation de l'information polarimétrique.

Pour la deuxième zone homogène, le filtre RLF présente la valeur de moyenne la plus proche à l'originale en polarisation croisée, pour les autres filtres les valeurs sont assez proches également, mais avec un changement minimal. Cela peut être confirmé en comparant le graphe 3D de la signature polarimétrique originale en polarisation croisée (figure III.17) avec les autres graphes. En faisant une comparaison entre le graphe 3D de la signature polarimétrique originale en co-polarisation (figure III.17) avec les graphes de tous les autres filtres (figure III.18, figure III.19, figure III.20, figure III.21 et figure III.22), on remarque que le graphe a changé ce qui implique un changement dans l'information polarimétrique, cela est confirmé par les moyennes de la puissance en co-polarisation de tous les filtres (tableau III.5) qui ont subi un changement par rapport à la valeur originale. De ce fait, la conservation de l'information polarimétrique au niveau de cette zone en co-polarisation est mauvaise.

En conclusion, l'utilisation des graphes 3D de la signature polarimétrique pour la vérification de la préservation de l'information polarimétriques ne donne pas toujours les meilleurs résultats. Contrairement aux calculs des moyennes des puissances en co-polarisation et en polarisation croisée, qui présentent des renseignements sur la préservation de l'information polarimétriques plus précis.

III.5 Résultats de la décomposition H/A/α

Les résultats de calcul des moyennes des paramètres de la décomposition H/A/α, pour trois zone homogènes (figures III.23), sont présentés dans le tableau suivant :

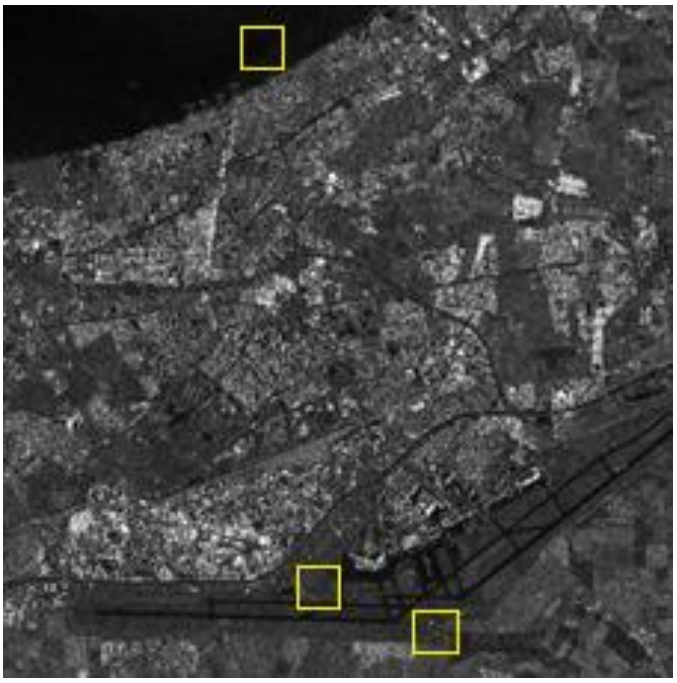


Figure III.23 Images Span des trois zones homogènes en jaune.

En observant les résultats des calculs pour l'entropie dans le tableau III.6, il est montré que le filtre RLF présente les valeurs les plus proches aux valeurs originales pour les trois zones homogènes. En remarquant le filtre boxcar, les résultats sont également bon. Prenant l'anisotropie, il est visible que le filtre RLF montre les meilleurs résultats pour les trois zones d'étude. Pour le filtre boxcar, les valeurs ont subi une variation négligeable. Concernant le troisième paramètre ; l'angle α, également pour les trois zones homogènes, les valeurs du filtre RLF sont les plus proches aux valeurs originales, contrairement à celles du filtre boxcar, qui ont diminué par rapport aux valeurs originales. Tout cela signifie que le filtre de Lee adaptatif préserve d'une façon meilleure l'information polarimétrique.

Ainsi, en conclusion, le calcul des paramètres de la décomposition H/A/α représente une méthode d'évaluation efficace pour la vérification de la conservation de l'information polarimétrique.

Tableau III.6 Moyennes des paramètres de la décomposition H/A/α.

Filtres / Paramètres	Avant filtrage	Boxcar 3	Boxcar 5	Boxcar 7	Boxcar 9	RLF
Zone homogène 1						
H	0.833472	0.738313	0.799695	0.859865	0.883882	0.861828
A	0.356476	0.595603	0.541563	0.472068	0.439840	0.288543
α	67.4254	60.5658	60.2468	59.0959	57.9962	70.1626
Zone homogène 2						
H	0.714743	0.820163	0.842821	0.861559	0.871900	0.750887
A	0.622114	0.604617	0.842821	0.541453	0.479884	0.638162
α	76.7635	51.2318	51.5083	52.0770	53.6301	80.2925
Zone homogène 3						
H	0.749335	0.770879	0.809345	0.846612	0.877431	0.715654
A	0.563341	0.648245	0.626486	0.586387	0.521197	0.572210
α	73.1994	52.3453	51.5882	51.5078	52.2502	76.3747

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé les résultats des méthodes d'évaluation des filtres polarimétriques, que nous avons présenté dans le chapitre II, en considérant trois critères importants qu'un filtre PolSAR doit avoir : capacité à lisser les zones homogènes, aptitude à préserver les contours et habilité à conserver l'information polarimétrique.

Nous avons présenté nos données polarimétriques, sur lesquelles nous avons appliqué les méthodes de filtrage suivants : le filtre boxcar 3, le boxcar 5, le boxcar 7, le boxcar 9 et le filtre de Lee adaptatif.

Notant que certains critères peuvent être vérifiés par plusieurs méthodes. L'évaluation visuelle des images Span, les images RVB de la décomposition de Pauli et les images classifiées par la classification non-supervisée K-Means et ISODATA, nous a permis de conclure que la décomposition de Pauli présente la meilleure méthode d'évaluer visuellement les filtre PolSAR. Elle permet de bien observer la capacité des filtres à lisser les zones homogènes, à conserver les contours et surtout à préserver l'information polarimétrique à la fois.

Statistiquement, en terme de lissage des zones homogènes, l'étude comparative entre les grandeurs statistiques calculés sur trois zones homogènes, qui sont : la moyenne, l'écart-type, le coefficient de variation, l'ENL et la résolution de radiation, nous a montré que l'ENL est la méthode optimale pour évaluer les performances des filtres polarimétriques.

Concernant la préservation des contours, les résultats ont montré que le C_{VG} donne des résultats plus précis que l'EPI, et donc, c'est la meilleure méthode d'évaluation des capacités des filtres. En terme de la préservation de l'information polarimétrique, l'étude comparative entre le calcul de la moyenne des éléments diagonaux de la matrice de cohérence, et les valeurs moyennes de l'amplitude et de la phase de T_{12}, montre que le calcul des moyennes des intensités de Pauli permet d'évaluer correctement la conservation de l'information dans les différentes polarisations. Ainsi, les moyennes calculées du paramètre SP pour les images Span et les intensités du vecteur de Pauli après filtrage, montre que ce paramètre représente une méthode efficace pour la vérification du taux d'élimination du speckle.

Ensuite, nous avons conclu que l'exploitation des graphes 3D de la signature polarimétrique afin d'évaluer les capacités des filtres à conserver l'information polarimétrique n'offre pas toujours les meilleurs résultats, par contre le calcul des moyennes des puissances en co-polarisation et en polarisation croisée, présente des résultats précis.

En dernier, nous avons exposé les résultats de la décomposition H/A/α, qui présente la méthode la plus performante pour la vérification de l'habilité des filtres à conserver de l'information polarimétrique.

Ainsi, grâce à ces méthodes d'évaluation optimales, il sera plus efficace d'analyser les résultats des filtres PolSAR et de sélectionner le filtre qui permet de procurer la meilleure qualité d'image.

Conclusion générale

Conclusion générale

Notre travail a consisté à étudier et analyser les méthodes d'évaluation des méthodes de filtrage polarimétrique du bruit de speckle. Ce bruit affecte les images radar SAR polarimétriques, ce qui réduit leur qualité et diminue l'exactitude de leur information polarimétrique. Ainsi, nous avons effectué une étude comparative entre les méthodes d'évaluation afin de bien choisir la méthode d'analyse qui facilitera la sélection du bon filtre, tout en se basant sur trois critères : la capacité du filtre à lisser les zones homogènes, préserver les contours et conserver l'information polarimétrique.

Les méthodes de filtrage choisies pour cette étude sont : le filtre boxcar (3×3, 5×5, 7×7, 9×9) et le filtre de Lee adaptatif (7×7). Nous avons appliqué ces filtres sur une image SAR complétement polarimétrique de la région d'Alger (RADARSAT-2, bande C) afin de tester les méthodes d'évaluation étudiées. En notant que par principe, que le filtre de Lee adaptatif apporte une meilleure conservation de contours, ainsi qu'un bon lissage des zones homogènes et une bonne préservation de l'information polarimétrique, alors, il permet d'avoir un bon compromis entre le lissage et la conservation des détails. Par contre, le filtre boxcar amène un bon lissage aux zones homogènes, une faible conservation de contours, donc, une faible préservation de l'information polarimétrique.

Nous avons commencé par les méthodes de l'évaluation visuelle qui ont consisté à évaluer l'image Span, les images RVB de la décomposition de Pauli et les images classifiées par les méthodes de classification non-supervisée, K-Means et ISODATA, avant et après filtrage. Par la suite, nous avons présenté les méthodes de l'évaluation statistique pour chaque critère. Du point de vue lissage des zones homogènes, la moyenne doit être conservée, la valeur de l'écart-type doit être diminué, le coefficient de variation et la résolution radiation doivent être affaiblis et la valeur de l'ENL doit être augmenté après filtrage. Du point de vue conservation de contours, le meilleur filtre est caractérisé par l'indice de préservation de contours EPI le plus élevé, et le coefficient de variation globale C_{VG} le plus important. Concernant la préservation de l'information polarimétrique, nous avons calculé les moyennes des intensités du vecteur de Pauli, qui doivent être conservées avant et après de filtrage. Ainsi, nous avons proposé de calculer la moyenne de l'amplitude et de la phase d'un élément hors diagonal de la matrice de cohérence avant et après filtrage afin de vérifier le dernier critère, la conservation de la valeur de la moyenne implique la préservation de l'information polarimétrique. Egalement, nous avons proposé d'adapter la méthode d'évaluation SAR de l'image speckle sur l'image PolSAR, afin d'étudier la préservation de l'information polarimétrique et l'élimination du speckle, et cela est fait en calculant la moyenne des zones homogènes du Span et des intensités de Pauli après filtrage. Par la suite, nous avons exploité les graphes de la signature polarimétrique comme méthode d'évaluation, qui doivent être invariables avant et après filtrage, afin d'assurer la préservation de l'information polarimétrique. Nous avons également proposé comme méthode d'évaluation le calcul des moyennes des puissances des signatures polarimétriques en co-polarisation et en polarisation croisée, qui doivent être préservées avant et après filtrage. En dernier, la décomposition H/A/α nous a renseigné encore sur la préservation de l'information polarimétrique, en calculant la moyenne de ses trois paramètres ; l'entropie, l'anisotropie et l'angle α.

L'étude comparative entre ces méthodes a permis de déduire les conclusions suivantes :

- ✓ Visuellement, la décomposition de Pauli représente la meilleure méthode d'évaluation afin de bien observer la capacité des filtres à lisser les zones homogènes, à conserver les contours et surtout à préserver l'information polarimétrique à la fois. Cette méthode présente l'avantage de la simplicité de l'évaluation et de la vérification globale des trois critères.
- ✓ L'ENL est la méthode optimale pour vérifier le lissage de zones homogènes.
- ✓ Le C_{VG} est la méthode la plus efficace afin d'évaluer les performances des filtres à conserver les contours.
- ✓ Le paramètre SP représente la méthode la plus utile en termes de l'élimination du speckle.
- ✓ L'utilisation des graphes 3D de la signature polarimétrique afin de vérifier le critère de la conservation de l'information polarimétrique peut être substitué par le calcul des moyennes des puissances de la signature polarimétrique en co-polarisation et polarisation croisée, afin d'obtenir des résultats plus précis.
- ✓ La décomposition H/A/α et la conservation de la moyenne de l'amplitude d'un élément hors diagonal de la matrice de cohérence, offrent les meilleurs résultats pour vérifier les capacités des méthodes de filtrage à préserver l'information polarimétrique.

Ainsi, grâce à ces méthodes d'évaluation optimales, il sera plus facile et efficace d'étudier et analyser les performances des techniques de filtrage SAR polarimétriques, surtout dans le choix du bon filtre qui offre la meilleure amélioration de la qualité d'images, ce qui permettra par la suite de faciliter l'identification des objets.

Nous proposons comme perspectives de développer une nouvelle méthode statistique d'évaluation des filtres polarimétrique, qui satisfait la vérification des trois critères ensemble : lissage des zones homogènes, conservation de contours et préservation de l'information polarimétrique.

Bibliographie

Bibliographie

[1] « Notions fondamentales de télédétection », Un cours tutoriel du Centre canadien de télédétection.

https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/earthsciences/pdf/resource/tutor/fundam/pdf/fundamentals_f.pdf

[2] GIRET, Rébecca. Imagerie radar par synthèse d'ouverture pour la gestion du trafic autoroutier. 2003. Thèse de doctorat. INSA de Rennes.

[3] MAITY, Alenrex, PATTANAIK, Anshuman, SAGNIKA, Santwana, et al. A comparative study on approaches to speckle noise reduction in images. In : 2015 International Conference on Computational Intelligence and Networks. IEEE, 2015. p. 148-155.

[4] SHEN, Yinbin, MA, Xiaoshuang, ZHU, Shengyuan, et al. Polarimetric SAR Speckle Filtering Using a Nonlocal Weighted LMMSE Filter. Sensors, 2021, vol. 21, no 21, p. 7393.

[5] BOUTARFA, Souhila & BOUCHEMAKH, Lynda & BOULARBAH, Souissi & SMARA, Youcef & BELABBAS, R & KHETTAL, F & HAMADACHE, Zohra. (2009). Implémentation et Evaluation de Méthodes de Filtrage du Speckle dans les Images Radar SAR Polarimétriques.

[6] LEE, Jong-Sen, GRUNES, Mitchell R., SCHULER, Dale L., et al. Scattering-model-based speckle filtering of polarimetric SAR data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2005, vol. 44, no 1, p. 176-187.

[7] BOUTARFA, Souhila, « Modélisation et Filtrage du Speckle dans les Images Radar SAR Polarimétriques », Thèse de doctorat de l'USTHB, Alger, 2020.

[8] DELPRATO, Julien. « Analyse de la stabilité d'impulsion à impulsion des amplificateurs de puissance HEMT GaN pour applications radar en bande S ». 2016. Thèse de doctorat. Limoges.

[9] Centre Canadien de Télédétection « introduction à la télédétection radar Globe SAR » :

http://hebergement.u-psud.fr/ese/IMG/pdf/doc_cours_teledec.pdf

[10] LEE, Jong-Sen et POTTIER, Eric. «Polarimetric radar imaging: from basics to applications ». CRC press, 2017.

[11] OMAR, Hadj Sahraoui. « Principe du Radar à Synthèse d'Ouverture RSO & Simulation d'une chaîne d'acquisition d'image Radar ». In : 3rd International Conference : Sciences of Electronic, Tunisia. 2005.

[12] BOUTARFA, Souhila, « Développement d'Algorithmes de Filtrage du Speckle dans les Images Radar SAR Polarimétriques », Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de MAGISTER en Electronique, février 2010.

[13] BOUTARFA, Souhila et BENSALEM, Lamia « Filtrage d'Ordre Vectoriel des Images Radar SAR Polarimétriques », Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en électronique, septembre 2007.

[14] SMARA, Youcef. « Réduction du speckle dans les images radar SAR : concepts et algorithmes ». Nous, 2005, vol. 1, p. 2.

[15] LEE, Jong-Sen, GRUNES, Mitchell R., et DE GRANDI, Gianfranco. Polarimetric SAR speckle filtering and its implication for classification. IEEE Transactions on Geoscience and remote sensing, 1999, vol. 37, no 5, p. 2363-2373.

[16] BOUTARFA, Souhila, BOUCHEMAKH, Lynda, et SMARA, Youcef. FILTRE SIGMA ET SES VARIANTES APPLIQUÉS AUX IMAGES RADAR SAR POLARIMÉTRIQUES. Teledetection, 2013, vol. 11, no 2, p. 307-323.

[17] FORMONT, Pierre. « Outils statistiques et géométriques pour la classification des images SAR polarimétriques hautement texturées ». Thèse de doctorat. Rennes 1. 2013

[18] BOUHANIK, Aymen, « Classification d'images PolSAR », Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de Master domaine Sciences et Technologie, 2020.

[19] BOUTARFA, Souhila, BOUCHEMAKH, Lynda, et SMARA, Youcef. Polarimetric synthetic aperture radar speckle filtering by multiscale edge detection. Journal of Applied Remote Sensing, 2019, vol. 13, no 2, p. 024507.

[20] ABBAS, Arbab Waseem, MINALLH, N., AHMAD, Nasir, et al. "K-Means and ISODATA clustering algorithms for landcover classification using remote sensing". Sindh University Research Journal-SURJ (Science Series), 2016, vol. 48, no 2.

[21] BALL, Geoffrey H. et HALL, David J. ISODATA, « a novel method of data analysis and pattern classification ». Stanford research inst. Menlo Park CA, 1965.

[22] MANAKOS, Ioannis, SCHNEIDER, Thomas, et AMMER, U. « A comparison between the ISODATA and the eCognition classification methods on basis of field data ». IAPRS, 2000, vol. 33, no Suppl. B7, p. 133-139.

[23] SHEN, Peng, WANG, Changcheng, FU, Haiqiang, et al. Estimation of equivalent number of looks in time-series Pol (In) SAR data. Remote Sensing, 2020, vol. 12, no 17, p. 2715.

[24] ANFINSEN, Stian Normann, DOULGERIS, Anthony P., et ELTOFT, Torbjørn. Estimation of the equivalent number of looks in polarimetric synthetic aperture radar imagery. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, vol. 47, no 11, p. 3795-3809.

[25] SAAD, Ali, EL ASSAD, Safwan, et BARBA, Dominique. Adaptive vectorial speckle filtering in SAR images based on fuzzy clustering criteria. In : Microwave Sensing and Synthetic Aperture Radar. SPIE, 1996. p. 174-185.

[26] QIU, Fang, BERGLUND, Judith, JENSEN, John R., et al. Speckle noise reduction in SAR imagery using a local adaptive median filter. GIScience & Remote Sensing, 2004, vol. 41, no 3, p. 244-266.

[27] COLESANTI, Carlo et WASOWSKI, Janusz. Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry. Engineering geology, 2006, vol. 88, no 3-4, p. 173-199.

[28] JAFARI, Mohsen, MAGHSOUDI, Yasser, et ZOEJ, Mohammad Javad Valadan. « A new method for land cover characterization and classification of polarimetric SAR data using polarimetric signatures ». IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2015, vol. 8, no 7, p. 3595-3607.

[29] TAIB, Youcef et METI, Said, « Interprétation des données PolSAR par la signature polarimétrique », Projet de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de Licence, domaine Sciences et Technologie, 2018.

[30] YOMMY, Aiyeola Sikiru, LIU, Rongke, et WU, Shuang. SAR image despeckling using refined Lee filter. In : 2015 7th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics. IEEE, 2015. p. 260-265.

[31] BOUCHEMAKH, L., SMARA, Y., BOUTARFA, S., et al. A comparative study of speckle filtering in polarimetric radar SAR images. In : 2008 3rd International Conference on Information and Communication Technologies: From Theory to Applications. IEEE, 2008. p. 1-6.

[32] TONYE, Emmanuel. Pollution Marine par les Hydrocarbures : Méthodes de Détection dans les Images Radar à Synthèse d'Ouverture. 2014.

[URL1] Radar de défense aérienne, (Avril 2022) :

https://www.radartutorial.eu/02.basics/Classification%20des%20syst%C3%A8mes%20radars%20%282%29.fr.html#:~:text=Les%20radars%20de%20d%C3%A9fense%20a%C3%A9rienne,360%20degr%C3%A9s%20autour%20du%20radar.

[URL2] Télédétection, (Avril 2022) :

https://hmn.wiki/fr/Remote_Sensing

[URL3] Polarimétrie, (Avril 2022) :

https://www.rncan.gc.ca/cartes-outils-et-publications/imagerie-satellitaire-et-photos-aeriennes/tutoriel-notions-fondamentales-teledetection/teledetection-par-hyperfrequences/polarimetrie/9276

[URL4] THE ELECTROMAGNETIC SPECTRUM, (Avril 2022) :

https://hubblesite.org/contents/articles/the-electromagnetic-spectrum

[URL5] Synthetic Aperture Radar, (Avril 2022) :

https://earthdata.nasa.gov/learn/backgrounders/what-is-sar

[URL6] Le spectre électromagnétique, (Avril 2022) :

https://www.rncan.gc.ca/cartes-outils-publications/imagerie-satellitaire-photos-aer/tutoriels-sur-la-teledetection/introduction/le-spectre-electromagnetique/14624

[URL7] Principe du Radar à Synthèse d'Ouverture RSO & Simulation d'une chaîne d'acquisition d'image Radar, (Avril 2022) :

http://www.setit.rnu.tn/last_edition/setit2005/image-video/22.pdf

[URL8] Polarisations d'un système radar, (Avril 2022) :

https://www.rncan.gc.ca/polarisations-dun-systeme-radar/9568

[URL9] k-means algorithm applied to image classification and processing, (Mai 2022) :

https://www.unioviedo.es/compnum/labs/new/kmeans

[URL10] k-means clustering and its real use-case in the security domain, (Mai 2022) :

https://behlaman41.medium.com/k-means-clustering-and-its-real-use-case-in-the-security-domain-dcbff7ccbff0

[URL11] Unsupervised Classification algorithms, (Mai 2022):

http://www.wu.ece.ufl.edu/books/EE/communications/UnsupervisedClassification.html

[URL12] Standard Deviation vs Mean, (Mai 2022):

https://www.educba.com/standard-deviation-vs-mean/

[URL13] Getting Mean Value of Image, (Mai 2022):

https://www.geeksforgeeks.org/mahotas-getting-mean-value-of-image/

[URL14] Why standard deviation is used in image processing? , (Mai 2022) :

https://www.sidmartinbio.org/why-standard-deviation-is-used-in-image-processing/

[URL15] Coefficient de variation (CV) , (Juin 2022) :

https://fr.kamiltaylan.blog/coefficientofvariation/

[URL16] Coefficient of Variation (CV) , (Juin 2022) :

https://www.investopedia.com/terms/c/coefficientofvariation.asp

[URL17] Signatures polarimétriques, (Juin 2022) :

https://www.rncan.gc.ca/signatures-polarimetriques/9598

[URL18] Combining of the H/A/Alpha and Freeman–Durden Polarization Decomposition Methods for Soil Moisture Retrieval from Full-Polarization Radarsat-2 Data, (Juin 2022) :

https://www.hindawi.com/journals/amete/2018/9436438/

[URL19] ENVI, (Juin 2022) :

https://www.l3harrisgeospatial.com/Software-Technology/ENVI

[URL20] Filtres moyenneurs , (Juin 2022) :

https://www.pfl-cepia.inra.fr/index.php?page=tutoImg-filtres-moyenneurs

Résumé

Le bruit de speckle est le plus grand inconvénient qui affecte les images PolSAR. Due à sa nature multiplicative, il dégrade leur qualité, complique la problématique de leur interprétation et il réduit l'exactitude de l'information. Son effet est diminué en appliquant les méthodes de filtrages sur les images PolSAR.

Comme il existe tant de filtres polarimétriques, dans ce mémoire, nous avons étudié et effectué une étude comparative entre les méthodes d'évaluation de ces filtres polarimétriques, en considérant trois critères : le lissage des zones homogènes, la conservation des contours et la préservation de l'information polarimétrique, afin de bien choisir la méthode d'analyse qui facilitera la sélection du meilleur filtre.

Mots clés : évaluation polarimétrique, speckle, filtrage polarimétrique, image PolSAR, polarimétrie.

Abstract

Speckle noise is the biggest drawback that affects PolSAR images. Due to its multiplicative nature, it degrades their quality, complicates the problem of their interpretation and reduces the accuracy of the information. Its effect is reduced by applying filtering methods to PolSAR images.

As there are so many polarimetric filters, in this manuscript, we have studied and carried out a comparative study between the evaluation methods of these polarimetric filters, considering three criteria: the smoothing of homogeneous zones, the conservation of contours and the preservation of polarimetric information, in order to choose the analysis method that will facilitate the selection of the best filter.

Keywords: polarimetric evaluation, speckle, polarimetric filtering, PolSAR image, polarimetry.

ملخص

ضجيج الرقطة (Speckle)هو أكبر مشكلة تؤثر على صور الرادار PolSAR بسبب طبيعته المضاعفة، فإنه يحط من جودتها ويعقد مشكلة تفسيرها ويقلل من دقة المعلومات. يتم تقليل تأثيره عن طريق تطبيق طرق التصفية على صور . PolSAR

نظرًا لوجود العديد من المرشحات الاستقطابية، قمنا في هذه الأطروحة بدراسة وإجراء دراسة مقارنة بين طرق التقييم لمرشحات الاستقطاب هذه، مع مراعاة ثلاثة معايير: تجانس المناطق المتجانسة، والحفاظ على الملامح وعلى المعلومات، من أجل اختيار طريقة التحليل التي ستسهل اختيار المرشح الافضل.

الكلمات المفتاحية :التقييم الاستقطابي، Speckle، الترشيح الاستقطابي، صورة PolSAR، قياس الاستقطاب.