

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE SAAD DAHLEB BLIDA-1-**



**Institut d'Aéronautique et des Etudes Spatiales**

**MEMOIRE**

**Pour l'obtention du diplôme**

**De Master en Aéronautique**

**Spécialité : Télécommunications Spatiales**

---

---

**APPROCHE DE DETECTION DES SURFACES NUES BASEE SUR LA MATRICE  
DE COVARIANCE DU MODELE DE BRAGG ETENDU "XBragg"**

---

---

Présenté par :

SAIDANI Thamazight

ESSERHANE Nada

Dirigé par :

M. TAHRAOUI Sofiane

MCB

à IAES

Présenté devant les membres du jury :

M. KRIM Mohamed

MAB, IAES

Président

M. AZMEDROUB Boussad

MCB, IAES

Examineur

Année universitaire : 2020/2021

## *Remerciements*

Nous tenons avant tout à remercier Dieu tout puissant de nous avoir donné la force et la volonté pour achever ce modeste travail.

Nous tenons à remercier particulièrement nos parents, notre succès demeure de loin le fruit de leurs longues années de sacrifices et d'éducation.

Nos vifs remerciements, accompagnés de toute notre gratitude, vont tout d'abord à notre encadreur Mr TAHRAOUI Sofiane pour nous avoir proposé ce sujet et dirigé notre travail. Nous le remercions aussi pour son prestigieux aide, sa disponibilité et avis éclairés.

Nous remercions également les membres du jury AZMEDROUB Boussad et KRIM Mohamed d'avoir accepté de juger ce travail en nous honorant par leur présence.

Nous adressons nos remerciements à Mme AZINE Houria et AZMDROUB Boussad pour l'aide et le soutien qu'ils nous ont apporté pour accomplir ce travail.

Enfin, Nous remercions toute personne ayant intervenue de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

## *Dédicace :*

Je dédie ce modeste travail :

A l'être le plus cher de ma vie, ma mère aucune dédicace ne saurait exprimer mes remerciements, je t'offre ce modeste travail en témoignage de tous les sacrifices et l'immense tendresse dont tu as toujours su me combler.

A mon père, qui m'a toujours poussé et motivé durant mon parcours.

A mes chères sœurs Kenza, Thafsouth qui ont toujours été à mes côtés pour me soutenir.

A mes chers frères Takfarinas, Syphax pour leurs encouragements.

A la mémoire de mon grand-père disparu trop tôt j'espère que du monde qui est sien maintenant, il apprécie cet humble geste comme preuve d'amour et de remerciement pour tout le bien qu'il m'a apporté

A Mme DJEBARRI, qui m'a toujours aidé et encouragé durant mon chemin d'études.

A mon binôme NADA à qui je tiens à souhaiter beaucoup de réussite dans sa vie.

A tous mes amis et particulièrement à ma meilleure amie MEKKAOUI Karima pour sa présence et son soutien moral et à mes camarades Adel et Housseem.

SAIDANI Thamazight

## *Dédicace :*

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents, que sans eux je ne serai pas arrivée là aujourd'hui.

A mon mari, qui m'a toujours motivé et aidé dans mon parcours.

A mon binôme, pour sa présence et ses encouragements

A mes amis et particulièrement Adel et Housseem qui nous ont beaucoup aidé pour accomplir ce travail.

ESSERHANE Nada

## Résumé

Pendant les années antérieures les radars à synthèse d'ouverture SAR (synthetic aperture radar) ont joué un rôle essentiel dans le domaine de la télédétection.

L'objectif de cette thèse est l'extraction des surfaces nues rugueuses d'une image SAR réelle acquise par le satellite AIR-SAR, cette image se réfère à la zone située en Allemagne sous le nom de Oberpfaffenhofen avec une nouvelle approche. On a commencé la détection des surfaces nues rugueuses avec le modèle étendue de X-Bragg basée sur l'estimation de l'angle de rugosité puis on a utilisé la méthode connue de Freeman Durden en l'appliquant sur une zone agricole de casagrandA2 en Arizona et sur l'image SAR de Oberpfaffenhofen pour comparer et évaluer les résultats issus de la méthode X-Bragg qui est nouvelle. En conclusion la méthode De X-Bragg a donné des résultats très satisfaisants.

## Abstract

In the past years synthetic aperture radar (SAR) has played an essential role in the field of remote sensing.

The objective of this thesis is the extraction of rough bare surfaces from a real SAR image taken by AIR SAR satellite, located in Germany under the name Oberpfaffenhofen with a new approach. In order to compare and evaluate the results of the new X-Bragg method, we started the detection of rough bare surfaces with the extended X-Bragg model based on the estimation of the roughness angle and used the known Freeman Duren method by applying it on an agricultural area in the casagrandA2 agricultural region in Arizona and on the SAR image of Oberpfaffenhofen. In conclusion, the De X-Bragg method gave very satisfactory results.

## ملخص

لعب رادار الفتحة التركيبية (SAR) دورًا أساسيًا في الاستشعار عن بعد في السنوات السابقة.

الهدف من هذه الرسالة هو استخراج الأسطح العارية الخشنة من صورة SAR حقيقية مأخوذة من القمر الاصطناعي AIR SAR هذه الصورة تتمثل في المنطقة التي تقع في ألمانيا تحت اسم Oberpfaffenhofen بنهج جديد. بدأ الكشف عن الأسطح العارية الخشنة مع النموذج الموسع لـ X-Bragg بناءً على تقدير زاوية الخشونة، استخدم الأسلوب المعروف لـ Freeman Duren من خلال تطبيقه على منطقة زراعية في المنطقة الزراعية في casagrandA2 في أريزونا وعلى صورة SAR لـ Oberpfaffenhofen لمقارنة وتقييم النتائج من طريقة X-Bragg الجديدة. في الختام، أعطت طريقة De X-Bragg نتائج مرضية للغاية.

# Table de matières

Résumé .....	i
Abstract.....	i
ملخص.....	i
Introduction générale .....	X
1. Chapitre1 : Les principes du PolSAR.....	1
1.1. Introduction :.....	1
1.2. Le radar :.....	2
1.2.1. Radar a synthétique ouverture (SAR) :.....	3
1.2.2. Résolution spatiale du SAR :.....	4
1.2.3. Principe de fonctionnement du SAR : .....	5
1.2.4. Formation d'images Sar :.....	7
1.2.5. Caractéristiques de l'image SAR :.....	7
1.2.6. Interprétation de l' image SAR :.....	7
1.2.7. Le speckle d' image SAR : .....	7
1.2.8. Les filtres du speckle : .....	8
1.2.8.1. Le filtre Lee : .....	9
1.2.8.2. Filtre boxcar : .....	10
1.3. Propagation d'une onde électromagnétique plane monochromatique :.....	10
1.3.1. La polarimétrie radar :.....	11
1.3.2. Qu'est-ce que c'est la polarisation ?.....	12
1.3.3. Les types de polarisation : .....	12
1.3.4. Vecteur de Jones : .....	14
1.3.5. Taux de polarisation :.....	15
1.3.6. Matrice de rétrodiffusion :.....	16
1.3.7. Matrices de cohérence et de covariance :.....	18
1.4. Représentation lexicographique par code couleur :.....	19
1.5. Conclusion : .....	20
.....	21
2. Chapitre2 : décomposition et classification des données de PolSAR.....	22
2.1. Introduction :.....	22
2.2. Décompositions des données SAR polarimétriques : .....	22

2.2.1.	Décompositions cohérentes :	23
2.2.1.1.	Décomposition de Pauli :	23
La décomposition de Pauli consiste en une représentation de la matrice de diffusion dans la base de Pauli.		23
Cette base est un ensemble de quatre matrices deux par deux qui caractérisent chacune un mécanisme physique de polarisation différent que l'on essaye d'identifier [14] :		23
2.2.1.2.	Décomposition de Krogager :	25
2.2.1.3.	Décomposition de Cameron :	26
2.2.2.	Décomposition incohérente :	27
2.2.2.1.	Décomposition de Cloude-Pottier :	28
2.2.2.2.	La décomposition de Freeman-Durden :	29
2.2.2.2.1.	Diffusion de Bragg :	30
2.2.2.2.2.	Double rebond :	31
2.2.2.2.3.	Diffusion volumique :	31
2.3.	Classification des données SAR polarimétriques	34
2.3.1.	Classification H/ $\alpha$ :	34
2.3.1.1.	Descriptions des zones de l'espace Entropie/Alpha :	35
2.4.	Conclusion :	37
Chapitre 3 : résultats et discussion		38
3. Chapitre3 : résultats et discussion		39
3.1.	Introduction :	39
3.2.	Les données des sites d'études :	39
3.3.	L'angle de rugosité :	41
3.4.	Tests utilisant des données simulées :	43
3.5.	La détection des sols nus avec la décomposition de X-Bragg :	45
3.6.	Décomposition de Freeman-Durden :	46
3.6.1.	Détection avec la décomposition de Freeman-Durden :	48
3.6.1.1.	L'organigramme de la décomposition Freeman-Durden :	48
3.6.1.2.	L'algorithme de la décomposition de Freeman-Durden :	49
3.6.2.	Résultats :	50
3.6.2.1.	Application de la décomposition de Freeman-Durden sur la zone Oberpfaffenhofen :	53
3.7.	Conclusion :	54
Conclusion générale		56

Bibliographie .....57  
webographie.....58



## *La liste des figures*

Figure(1.1) télédétection passive et active.....	1
Figure(1.2) radar monostatique et bistatique.....	2
Figure (1.3)Présentation schématique d'un radar.....	3
Figure (1.4) illustre la géométrie de l'imagerie SAR.....	4
Figure(1.5) résolution de radar SAR.....	5
Figure (1.6) les notions de base du système.....	6
Figure (1.7) les effets du chatoiement dans les images.....	9
Figure(1.8)l'effet de filtre lee (9×9) sur les données SAR.....	10
Figure(1.9) l'effet de filtre boxcar (9×9) sur les données SAR.....	11
Figure (1.10) types de polarisation.....	13
Figure(1.11) L'ellipse de polarisation.....	15
Figure(1.12) Schéma simplifié de l'interaction entre une onde électromagnétique et un diffuseur.....	17
Figure (1.13) Cube de couleurs RVB.....	19
Figure(2.1) décomposition de Pauli à San Francisco.....	26
Figure(2.2)Cibles caractérisant la décomposition de Krogager.....	26
Figure(2.3) diagramme de la décomposition de Cameron.....	28
Figure(2.4)décomposition de Cameron.....	28
Figure(2.5) diffusion de Bragg .....	32
Figure(2.6)diffusion double rebond. ....	32
Figure(2.7)diffusion volumique.....	33

Figure(2.8) mécanisme des trois diffusions.....	34
Figure(2.9)Plan H/ $\alpha$ pour l'identification des mécanismes de diffusion. ....	35
Figure(2.10)exemple d'une classification (H/ $\alpha$ ). ....	37
Figure(3.1)l' image SAR d'Oberpfaffenhofen par la décomposition de Pauli colorée en RGB. ....	41
Figure(3.2)l' image SAR d'Oberpfaffenhofen tirée de Google Earth .....	41
Figure(3.3)L' image Casa-grandA2 .....	42
Figure (3.4) angles de rugosité récupérés à partir de la surface pure.....	44
Figure(3.5)Angles de rugosité récupérés à partir de la surface pure et de composante de volume.....	45
Figure(3.6)l'effet de composant additif sur la distance entre les angles de rugosité.....	45
Figure(3.7) résultats de détection des surfaces nues avec la décomposition de X-Bragg.....	47
Figure(3.8) La zone étudiée dans la région Casa-grandA2. ....	48
Figure (3.9) résultat en utilisant la bande P.....	48
Figure(3.10)résultat en utilisant la bande L.....	48
Figure(3.11)l'organigramme de la décomposition de Freeman-Durden.....	49
Figure(3.12)L'algorithme de la décomposition de Freeman-Durden.....	50
Figure(3.13)décomposition de Freeman-Durden avec la bande P. ....	51

Figure(3.14) décomposition de Freeman-Durden avec la bande L. ....	51
Figure(3.15) Angle de rugosité de la bande P.....	52
Figure(3.16) Discrimination des surfaces nues.....	52
Figure(3.17) Angle de rugosité de la bande L.....	53
Figure(3.18)Discrimination de surface de la bande L.....	53
Figure(3.19) résultats de détection des surfaces nues avec la décomposition de Freeman-Durden.....	54

## *Listes des tables*

Tableau (1.1) États de polarisation canonique.....	17
--	----

## ***Liste des Abréviations :***

<b>SAR</b>	synthetic aperture radar.
<b>HH</b>	Emission Horizontal, réception Horizontal.
<b>VV</b>	Emission Verticale, réception Verticale
<b>HV</b>	Emission Horizontal, réception verticale.
<b>RDF</b>	Radio Direction Finding.
<b>VSAR</b>	The velocity SAR.
<b>PPI</b>	plan position indicator.
<b>BSA</b>	back scatter alignment.
<b>FSA</b>	forward scatter alignment.
<b>RVB</b>	rouge, vert, bleu.
<b>P<sub>s</sub></b>	Puissance surfacique.
<b>P<sub>v</sub></b>	Puissance volumique.
<b>P<sub>DB</sub></b>	Puissance double.

# Introduction générale

## *Introduction générale*

La télédétection radar a connu un formidable essor ces dernières années grâce à la conception et la réalisation des systèmes aéroportés et spatioportés dont les caractéristiques du champ électromagnétique telles que la polarisation et la fréquence sont étudiées. Il est clair que la combinaison de plusieurs polarisations et fréquences permet d'améliorer les résultats obtenus par le traitement et l'interprétation des images.

Les systèmes de radar à ouverture synthèse (SAR) sont plus efficaces que les capteurs optiques car en tant que des capteurs actifs, ils peuvent fonctionner indépendamment de la lumière du jour et des conditions météorologiques. Un système SAR fonctionne en émettant une onde électromagnétique en direction du sol et en mesurant à la fois la phase et l'amplitude du signal de retour (appelé signal rétrodiffusé). Les données ainsi mesurées sont donc complexes. De plus, dû à la propriété de polarisation des ondes électromagnétiques, des systèmes SAR appelés PolSAR sont capables d'émettre et de recevoir des ondes polarisées orthogonalement à la fois en émission et en réception. Pour chaque cellule de résolution du système radar, on dispose ainsi de plusieurs mesures grâce aux différentes combinaisons possibles de polarisation, contenues dans une matrice appelée matrice de diffusion.

Les informations de polarisation contenues dans les ondes rétrodiffusées sont liées à la structure géométrique de la cible, sa réflectivité, sa forme et son orientation, ainsi qu'à ses propriétés géophysiques telles que l'humidité, la rugosité...etc. Ceci a ouvert la porte à plusieurs applications de polarimétrie SAR dans différents domaines comme la végétation forestière, l'agriculture, la surveillance urbaine.

Le radar SAR permet la détection des surfaces nues, des résultats satisfaisants ont été obtenus durant ces dernières années en utilisant de nouvelles approches basées sur le modèle de diffusion de Bragg et de Bragg étendu "X-Bragg".

Ce mémoire est organisé en trois chapitres :

-Le premier chapitre introduit en première partie les notions de base de l'imagerie radar SAR, puis en deuxième partie y expose la polarimétrie radar.

-Le deuxième chapitre présente la décomposition et la classification des données SAR polarimétriques.

-Le troisième chapitre sera dédié à la discussion et l'évaluation des différents résultats obtenus de la nouvelle méthode X-Bragg en les comparant avec les résultats de la méthode de Freeman Durden.

# Chapitre1: Les principes du PolSAR

## 1. Chapitre1 : Les principes du PolSAR

### 1.1.Introduction :

La télédétection est un ensemble de techniques qui permet d'observer et d'enregistrer le rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi par une cible quelconque sans contact direct avec celle-ci, afin de mesurer des grandeurs physiques des objets ou des phénomènes météorologiques.

Il existe essentiellement deux formes de télédétection :

La télédétection passive : elle utilise des capteurs passifs qui sont uniquement des récepteurs (radiomètres, caméras, spectroradiomètres, etc.), la source d'énergie est le plus souvent le soleil.

La télédétection active : elle utilise des capteurs actifs qui sont à la fois émetteurs et récepteurs (les radars, les lasers etc.). La figure 1 montre les deux grands domaines de la télédétection.

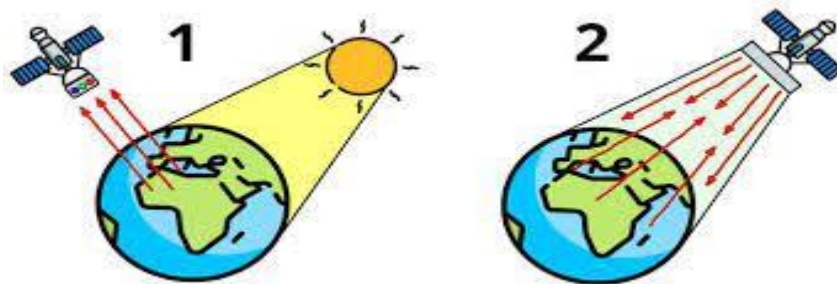


Figure (1.1) télédétection passive et active.

A l'origine, on dispose d'une source d'énergie (radar) qui éclaire une cible (surfaces, objets, etc.). Une fois parvenue à la cible, l'énergie entre en interaction avec celle-ci et l'énergie diffusée par la cible est alors reçue à distance par un capteur actif se trouvant sur un porteur (avion, satellite, etc.).

L'énergie reçu par le capteur est ensuite analysée et transformée en images.

Les radars à synthèse d'ouverture (SAR, Synthetic Aperture Radar) sont des instruments communs à bord des satellites de télédétection modernes. Ces radars sont utilisés pour créer des images de paysage en utilisant des ondes radio.

Dans ce chapitre, nous allons présenter plus en détail les bases des systèmes SAR, plus précisément les systèmes SAR polarimétriques.



## 1.2. Le radar :

Le mot RADAR provient de l'acronyme anglais Radio Détection And Ranging, que l'on peut traduire par détection et estimation de la distance par ondes radio. Cet acronyme d'origine américaine a remplacé le sigle anglais précédemment utilisé : RDF (Radio Direction Finding)[1].

Le radar fait usage de l'écho produit par un obstacle situé sur la trajectoire d'une onde électromagnétique ce qui permet de détecter leur existence et (sauf exception rare) de déterminer certaines caractéristiques de ces objets[1]. Dans un radar monostatique, l'émetteur et le récepteur sont connectés à une antenne commune, en revanche, dans un radar bistatique, l'émetteur et le récepteur sont connectés à deux antennes différentes, comme indiqué sur la figure (2).

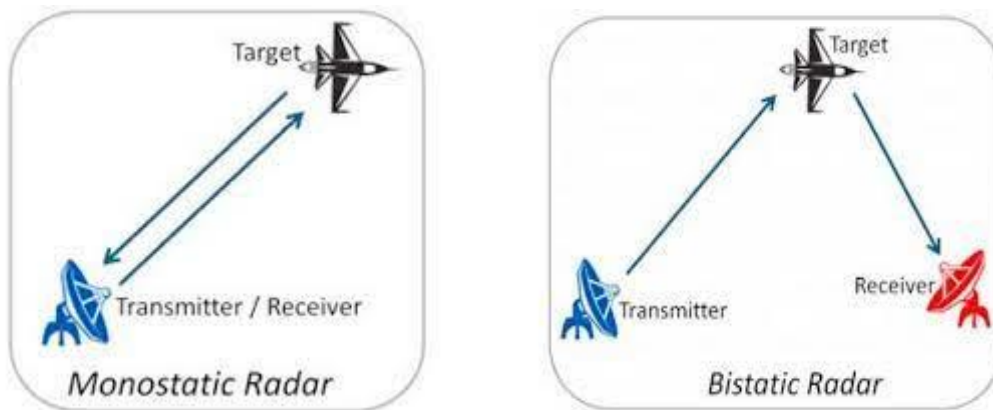


Figure (1.1) radar monostatique et bistatique.

Le temps d'aller-retour de l'onde électromagnétique entre une cible et l'antenne (émetteur/récepteur) permet de calculer la distance  $R$  de cette cible. La variation de fréquence du signal sert à déterminer la vitesse relative de l'obstacle par rapport à la source (effet Doppler). La direction dans laquelle se trouve l'obstacle est obtenue en pointant une antenne à faisceau étroit dans la direction donnant le plus grand signal réfléchi, mais aussi d'éliminer un grand nombre d'objets indésirables pour ne conserver que les « cibles » intéressantes[1].

Le schéma de principe d'un radar est donné dans la figure (1.2) :

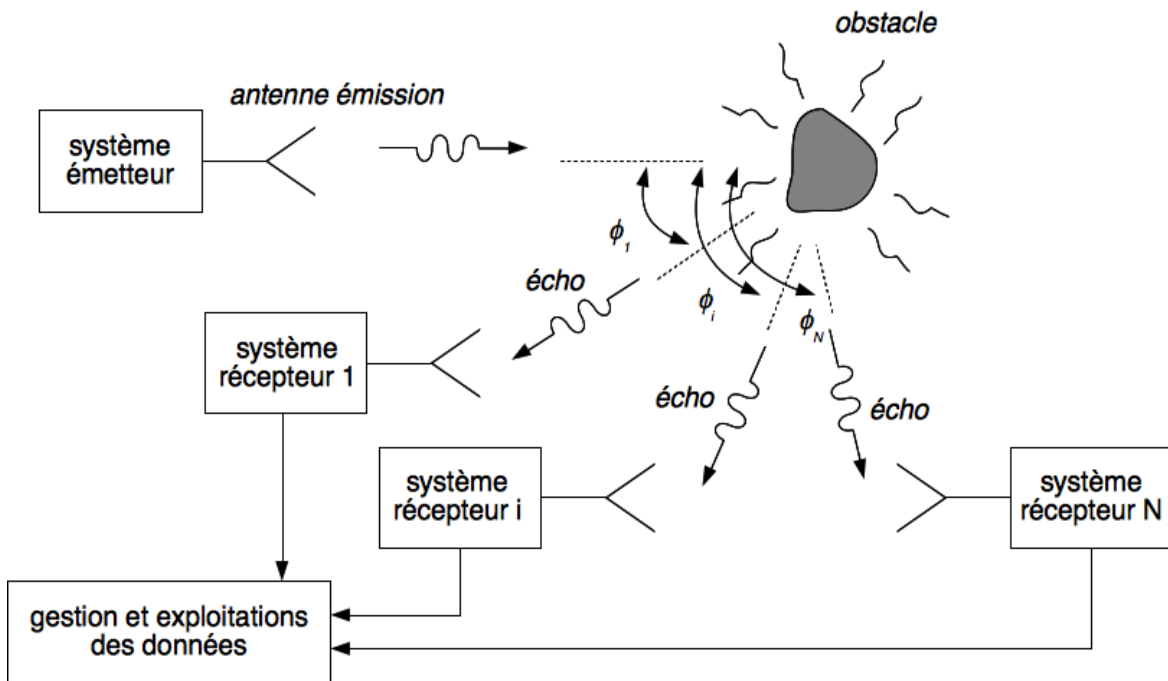


Figure (1.2) Présentation schématique d'un radar.

### 1.2.1. Radar à synthèse ouverture (SAR) :

Le radar à ouverture synthétique "SAR" est un type de radar mobile qui utilise une acquisition à visée latérale c'est-à-dire l'antenne est pointée latéralement par rapport à son porteur. Pendant que le capteur est en mouvement (à l'intérieur de satellites ou l'avions), il transmet un signal, et reçoit la rétrodiffusion correspondante de la zone illuminée.

Comme précédemment, le système d'imagerie SAR est monté sur une plate-forme mobile, qui est située à une hauteur  $H$ , et se déplace à une vitesse "VSAR". L'antenne est dirigée perpendiculairement à la direction de vol (l'azimut) et rayonne vers le sol avec un angle de visée  $\theta_0$ [2].

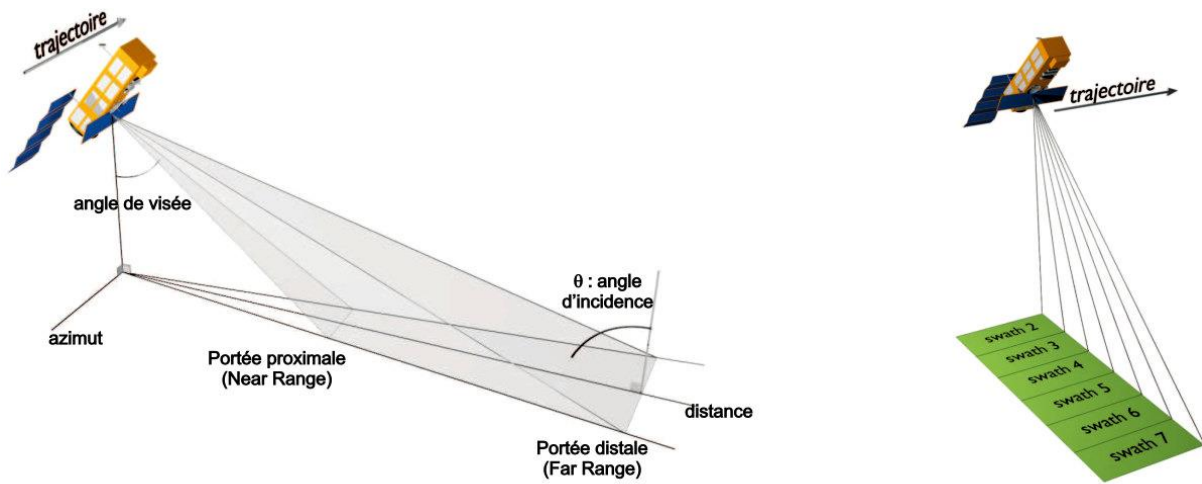


Figure (1.3) illustre la géométrie de l'imagerie SAR.

-La direction perpendiculaire à la trajectoire du satellite est appelée **portée** ou **distance**.

**-La portée proximale** (Near range, en anglais) : correspond au point de l'image le plus près du *Nadir*.

- **La portée distale** (Far range, en anglais) : correspond au point de l'image le plus loin du nadir.

-La direction parallèle à la trajectoire du satellite est appelée **azimut**.

## 1.2.2. Résolution spatiale du SAR :

L'un des critères de qualité les plus importants d'un système d'imagerie SAR est sa résolution spatiale. Elle décrit la capacité du radar à séparer deux diffuseurs proches l'un de l'autre. Est déterminée par les paramètres du système[3] :

$$R_d = \frac{c}{2B} \quad (1.1)$$

$$R_{az} = \frac{L}{2} \quad (1.2)$$

$c$  est la célérité de la lumière.

$B$  est la largeur de bande d'impulsion.

$L$  est la longueur de l'antenne.

Ou  $R_d$  est la résolution distale qui dépend de la largeur de la bande  $B$  de l'impulsion émise et de la vitesse de propagation de l'onde  $C$ ,  $R_{az}$  représente la résolution dans la direction de déplacement du satellite (azimutale) qui dépend de la taille de l'antenne  $L$  après le traitement de synthèse d'ouverture.

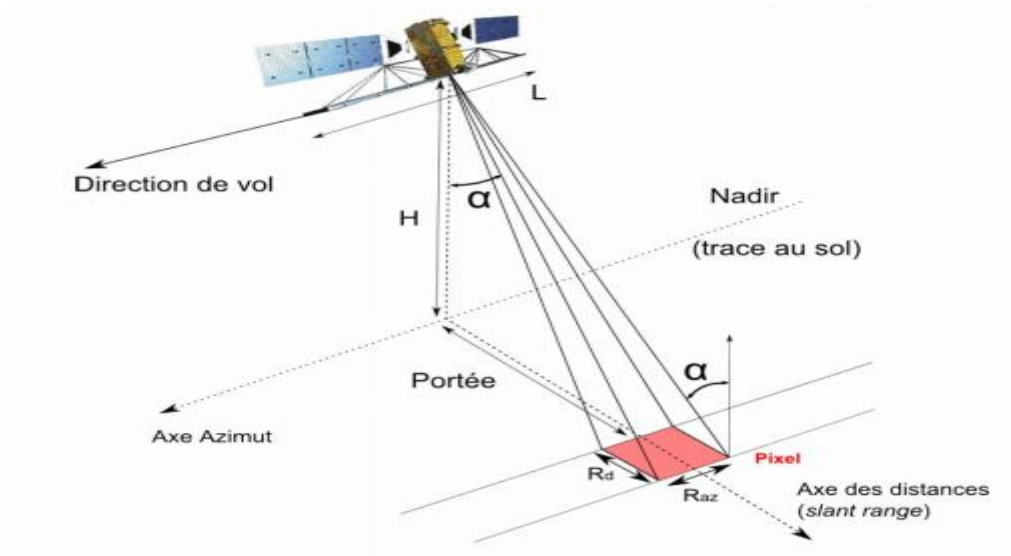


Figure (1.5) résolution de radar SAR.

## 1.2.3.Principe de fonctionnement du SAR :

Comme tout radar, le SAR fonctionne comme un radar optique.

Émetteur, un commutateur, une antenne, un récepteur, un enregistreur de données et un processeur.

L'émetteur génère des ondes électromagnétiques pulsées ; le commutateur les dirige vers l'antenne, qui les transmet à la zone balayée.

Ensuite, il recueille la rétrodiffusion. Ces dernières sont converties en données numériques par le récepteur et sont stockées dans l'enregistreur de données pour un traitement et un affichage ultérieur. La figure ci-dessous montre les notions de base du système SAR[2]:

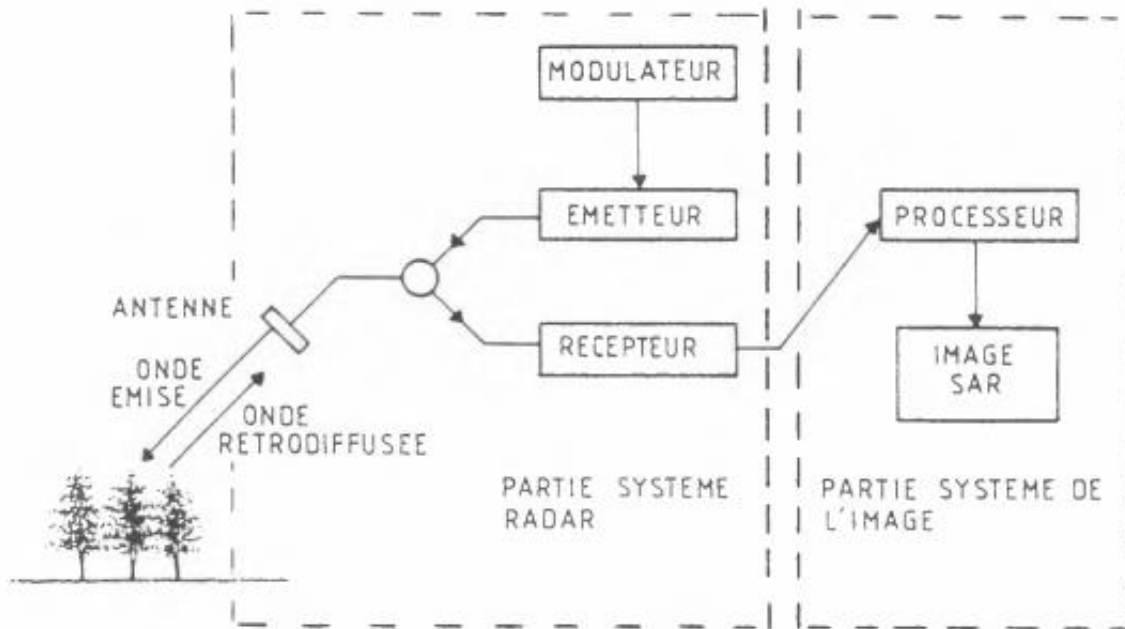


Figure (1.4) les notions de base du système SAR.

- L'émetteur permet de délivrer le signal émis. Il est important de noter que la puissance émise dépend aussi beaucoup de cet organe. Toutefois, il est aussi possible d'amplifier le signal émis par l'émetteur par l'intermédiaire d'amplificateurs de puissance. Il faut aussi indiquer que la nature de l'émetteur permet de décrire la nature du signal émis (signal cohérent ou non cohérent).
- Le modulateur permet de mettre en forme le signal provenant de l'émetteur. Le signal de modulation peut être très sommaire (modulation d'amplitude de type "tout ou rien", par exemple) ou plus évolué (modulation de phase avec code de Barker – signaux pseudo-aléatoires –, par exemple).
- Le récepteur permet de capturer le signal présent sur l'antenne à la réception. Il peut aussi contenir des amplificateurs permettant d'améliorer l'amplitude du signal reçu. Il faut noter que le récepteur est un organe très sensible. Il est donc nécessaire de le protéger, et en particulier si l'émetteur transmet une forte puissance.
- Le processeur (dispositif à 3 accès) permet d'isoler la partie réception de la partie émission.
- Il reste alors un élément important effectuant la transduction du champ électromagnétique en courant électrique, et vice-versa, qui est l'antenne radar. Dans l'exemple fourni sur la dernière figure, nous présentons une seule antenne pour une configuration monostatique.

## 1.2.4. Formation d'images Sar :

L'antenne SAR transmet des ondes pulsées vers la cible et stocke les échos de la cible le long de l'antenne synthétisée. Les échos stockés forment une matrice bidimensionnelle appelée données brutes. Aussi Il faut noter que l'image SAR est complexe, les informations d'amplitude et de phase sont directement associées à la réflectivité de tous les diffuseurs contenus dans la résolution SAR[4].

## 1.2.5. Caractéristiques de l'image SAR :

Comme mentionné précédemment l'image SAR est une matrice à deux dimensions où chaque pixel représente l'information d'une petite zone de la surface imagée. Ce pixel est associé à la réflectivité des diffuseurs qu'il contient. La réflectivité de la surface est fonction aussi de la rugosité et de l'humidité de la surface, aussi que des paramètres du système radar (fréquence  $f$ , polarisation, angle d'incidence du champ émis), et des Caractéristiques de la cible (topographie, angle d'incidence local, propriétés diélectriques, etc.)[4].

## 1.2.6. Interprétation de l'image SAR :

Lors de l'analyse d'une image radar, le radar "voit" la scène d'une manière très différente de l'œil humain ou Les niveaux de gris de la scène sont liés à l'intensité relative de l'énergie micro-onde rétrodiffusée par les éléments du paysage.

Les ombres dans une image radar sont liées à l'angle d'incidence oblique du rayonnement micro-ondes émis par le système radar et non à la géométrie de l'illumination solaire.

L'intensité du signal rétrodiffusé varie en fonction de la rugosité, des propriétés diélectriques et de la pente locale. Ainsi, le signal radar fait principalement référence aux propriétés géométriques de la cible[5].

## 1.2.7. Le speckle d'image SAR :

Le chatoiement (speckle) correspondant à l'énorme variabilité des réponses entre les pixels adjacents que l'on peut considérer comme l'effet sel et poivre, cet effet peut être observé de manière plus intuitive lorsque l'image radar est en pleine résolution sur l'écran.

Ce phénomène est dû à des interférences créées entre les échos en provenance des diverses cibles élémentaires présentes dans un pixel. Ces interférences sont possibles parce que les échos d'ondes radar sont cohérents entre eux avec des écarts en phase qui dépendent des

différences de chemin parcourus par chaque onde. Cette cohérence signifie que les réponses des cibles peuvent être additionnées en prenant en compte leurs amplitudes et phases (en mathématique, ces réponses sont représentées par des nombres complexes). La longueur d'onde (centimétrique) étant petite devant la taille du pixel (métrique) il en résulte que les nombreuses cibles élémentaires réparties dans un pixel présentent des différences de phase très variables. La somme de ces contributions, dont les phases sont quasi-quelconques, est elle-même très variable en amplitude et en phase entre deux pixels voisins. Il en résulte, dans une image, une grande variabilité de niveaux entre pixels et, pour les territoires homogènes (par exemple une canopée d'altitude constante), une texture « poivre et sel » due au chatoiement, dont la finesse dépend de l'échelle de restitution de l'image[21].

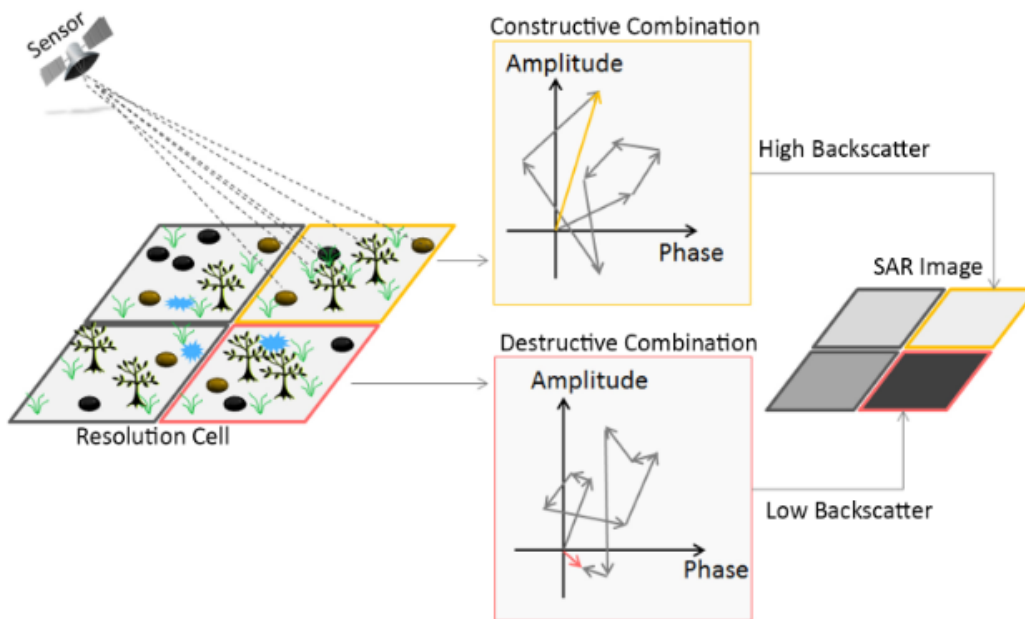


Figure (1.5) les effets du chatoiement dans les images.

## 1.2.8. Les filtres du speckle :

D'une manière générale, il s'agit de remplacer la valeur de l'intensité d'un pixel par une valeur calculée à partir de l'ensemble des valeurs situées dans un voisinage du pixel considéré, de manière à réduire le pseudo-bruit de chatoiement.

Différents algorithmes, plus ou moins sophistiqués ayant cet objectif, permettent de calculer la valeur de remplacement pour un pixel donné.

Ils sont tous actionnés par une fenêtre mobile qui se déplace dans l'image, centrée sur un pixel donné, permet de calculer à partir de toutes les valeurs présentes dans la fenêtre une nouvelle valeur pour remplacer la valeur centrale. Le processus de déplacement de cette fenêtre s'apparente à celui d'une convolution [21].

Dans notre travail on va utiliser deux filtres : le filtre lee, le filtre boxcar.

## 1.2.8.1. Le filtre Lee :

Le filtre Lee est utilisé pour lisser les données de speckle, qui ont une intensité liée à l'image et ont également une composante additive ou multiplicative. Il préserve la netteté et les détails de l'image tout en supprimant le bruit. Le pixel qui est filtré est remplacé par une valeur calculée à partir des pixels environnants. Chaque pixel est classé dans l'une des trois classes suivantes, qui sont traitées comme suit [21]:

Homogène : La valeur du pixel est remplacée par la moyenne de la fenêtre de filtrage.

Hétérogène : La valeur du pixel est remplacée par une moyenne pondérée.

Cible ponctuelle : La valeur du pixel n'est pas modifiée.



Figure (1.6) l'effet de filtre lee (9x9) sur les données SAR.



## 1.2.8.2. Filtre boxcar :

La valeur retenue est la moyenne des valeurs de la fenêtre retenue pour l'opération. Ce voisinage est en général un pavé carré dont le nombre de lignes, égal au nombre de colonnes, est un nombre impair de telle manière que le pixel initial se trouve au centre de la fenêtre. Ce filtre est bien adapté pour les zones homogènes car il y réduit la variabilité du chatoiement (l'écart type des valeurs est divisé par le facteur  $\frac{1}{\sqrt{N}}$  ou  $N$  est le nombre de termes du voisinage considéré lorsque l'on considère que les valeurs de pixels voisins sont des variables indépendantes). Dans le cas de variations brusques de contrastes, dus à des objets linéaires ou ponctuels par exemple, la moyenne introduit un effet de flou pour les détails car la résolution spatiale est dégradée de ce même facteur  $\frac{1}{\sqrt{N}}$  [21].



Figure (1.7) l'effet de filtre boxcar (9x9) sur les données SAR.

## 1.3. Propagation d'une onde électromagnétique plane monochromatique :

Une onde est dite monochromatique plane lorsqu'elle n'est composée que d'une seule longueur d'onde et d'une seule fréquence, qui se déplace dans l'espace contrairement à la lumière de soleil.

A partir des équations de Maxwell pour une onde électromagnétique monochromatique

Avec une amplitude constante le champ électrique est comme suivant [2]:

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \text{Re}[\underline{E}(\vec{r})e^{j\omega t}] \quad (1.3)$$

La propagation d'une onde est représentée par l'équation suivante[2]:

$$\Delta \vec{E}(\vec{r}) + \omega \omega^2 \mu \varepsilon \left(1 - J \frac{\sigma}{\varepsilon \omega}\right) \underline{E}(r) = \Delta \vec{E}(\vec{r}) + \underline{K}^2 \underline{E}(r) = 0 \quad (1.4)$$

Avec :

$$\underline{\varepsilon} = \varepsilon' - J\varepsilon'' = \varepsilon - J \frac{\sigma}{\omega} \quad (1.5)$$

Et :

$$\underline{K} = \omega \mu \varepsilon \sqrt{1} - J \frac{\varepsilon''}{\varepsilon} = \beta - J\alpha \quad (1.6)$$

Dans une base orthogonale (x, y, z) définie de telle sorte que la direction de propagation k=z.

L'expression du champ électrique devient :

$$\vec{E}(z) = \Delta \vec{E}_0 e^{az} e^{j\beta z} \quad (1.7)$$

Avec :

$$\underline{E}_{0z} = 0 \quad (1.8)$$

On peut observer à partir de l'équation précédent que  $\beta$  agit comme le nombre d'onde dans le domaine temporel

Tandis que  $\alpha$  correspond à un facteur d'atténuation. De retour dans le domaine temporel, cette expression

Prend la forme vectorielle[2]:

$$\underline{E}(z, t) = \begin{bmatrix} E_{0x} e^{az} \cos(\omega t - Kz + \delta_x) \\ E_{0y} e^{az} \cos(\omega t - Kz + \delta_y) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

### 1.3.1. La polarimétrie radar :

C'est la science qui permet d'acquérir, de traiter et d'analyser l'état de polarisation d'un champ électromagnétique et qui traite la nature vectorielle d'une onde électromagnétique polarisée. Afin de décrire le processus précédent, définissons la polarisation de l'onde dans ce qui suit[7].

## 1.3.2. Qu'est-ce que c'est la polarisation ?

Les systèmes de radar à synthèse d'ouverture (SAR) sont des instruments actifs, c'est-à-dire qu'ils disposent de leur propre source d'énergie. Cela permet non seulement d'acquérir des données pendant la nuit et d'être relativement indépendant des conditions atmosphériques, mais aussi d'avoir un contrôle total sur le signal émis et reçu en ce qui concerne la "polarisation".

La polarisation d'une onde décrit la manière dont le champ électrique évolue au cours du temps dans le plan orthogonal à la direction de propagation [7].

## 1.3.3. Les types de polarisation :

La polarisation d'une onde électromagnétique dépend également de l'orientation du champ électrique ou du plan d'oscillation du signal de propagation. Dans les applications SAR, la plupart des capteurs sont polarisés de manière linéaire. D'autres formes de polarisation peuvent exister, mais sont plus rarement utilisées en télédétection. Les polarisations que nous pouvons rencontrer en pratique sont les suivantes : rectiligne, circulaire, elliptique [7].

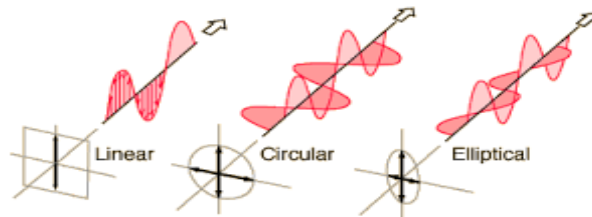


Figure (1.8) types de polarisation.

### Polarisation rectiligne (ou linéaire) :

Dans le cas du radar imageur, deux polarisations rectilignes sont courantes, ce sont les polarisations **H** et **V**.

**H** comme horizontal lorsque le champ vibre perpendiculairement au plan d'incidence et **V** comme vertical lorsque le champ vibre dans le plan d'incidence [7].

### Polarisation simple :

Au niveau vocabulaire, nous parlerons de Polarisation simple lorsque émission et réception seront de même nature, HH ou VV [7].

## Polarisation duale :

Lorsque émission et polarisation sont rectilignes mais différentes, H émise et V reçue par exemple, on parle de polarisation duale HV[7].

## Pleine polarisation :

Toutes les polarisations duales peuvent être acquises ce qui conduit aux possibilités **HH, HV, VV, VH=HV**[7].

## Polarisation circulaire :

Ainsi la polarisation circulaire résulte de la combinaison de deux polarisations orthogonales présentant une différence de phase de  $\pi/2$ . Le champ résultant situé dans le plan perpendiculaire à la direction de propagation tourne autour de cette direction avec un sens dépendant du signe de la différence de phase,  $+\pi/2$  ou  $-\pi/2$ . Cet effet coïncide avec la description d'un cercle à partir de deux coordonnées orthogonales dans le plan Oxy, l'une égale à sinus ( $wt$ ) et l'autre à cosinus ( $wt$ ) [7].

## Polarisation elliptique :

Une polarisation elliptique quelconque sera obtenue en combinant les polarisations H et V avec des amplitudes et des différences phases adaptées. Les polarisations rectiligne et circulaire sont simplement des cas particuliers de polarisations elliptiques pour des différences de phase spécifiques. Un capteur pleine-polarisation permet d'élaborer par calcul toutes les réponses correspondant à des polarisations elliptiques quelconques à partir des réponses obtenues pour deux polarisations rectilignes orthogonales d'amplitudes et phases sélectionnées. Cette capacité enrichit grandement les capacités discriminantes des radars planimétriques.

L'évolution spatiale d'une onde plane monochromatique suit une trajectoire hélicoïdale le long de l'axe z ; l'analyse de cette évolution dans le domaine temporel est observée à une position fixe  $z = z_0$  [7].

Après avoir étudié le comportement temporel de l'onde, on peut remarquer que la propagation de l'onde décrit une ellipse caractéristique dont l'équation est définie comme suit :

$$\left(\frac{E_x(z_0, t)}{E_{0x}}\right)^2 - 2\left(\frac{E_x(z_0, t)E_y(z_0, t)}{E_{0x}E_{0y}}\right)\cos(\delta_y - \delta_x) + \left(\frac{E_y(z_0, t)}{E_{0y}}\right)^2 = \sin^2(\delta_y - \delta_x) \quad (1.10)$$

L'ellipse dite de polarisation décrit la polarisation de l'onde ; sa forme est déterminée par trois paramètres illustrés dans la figure (10) suivante :

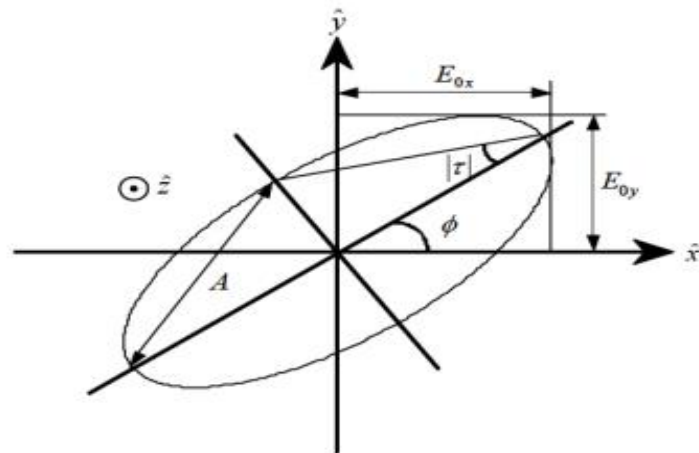


Figure (1.11) L'ellipse de polarisation.

Où :

- A est l'amplitude de l'ellipse : 
$$A = \sqrt{E_{0x}^2 - E^2} \quad (1.11)$$

-  $\phi$  est l'orientation de l'ellipse (l'angle entre le grand axe de l'ellipse et l'axe des x) :

$$\tan 2\phi = 2 \frac{E_{0x}E_{0y}}{E_{0x}^2 - E_{0y}^2} \cos(\delta_y - \delta_x) \quad (1.12)$$

-  $|\tau|$  est l'ouverture de l'ellipse (ellipticité) :

$$|\sin 2\tau| = 2 \frac{E_{0x}E_{0y}}{E_{0x}^2 + E_{0y}^2} |\sin \delta| \quad (1.13)$$

### 1.3.4. Vecteur de Jones :

La représentation d'un champ électrique plan monochromatique sous la forme d'un vecteur de Jones vise à décrire la polarisation de l'onde en utilisant un minimum d'informations. Elle contient des informations complètes sur les amplitudes et les phases des vecteurs du champ électrique. Un vecteur de Jones  $\underline{E}$  est alors défini à partir du vecteur de champ électrique complexe  $E(z)$  comme suit [7] :

$$\underline{E} = \begin{bmatrix} E_{0x} & e^{j\delta_x} \\ E_{0y} & e^{j\delta_y} \end{bmatrix} \quad (1.14)$$

Les définitions de la polarisation déterminée à partir de l'ellipse de polarisation ou d'un vecteur de Jones sont équivalentes. Plus efficace, où il est une fonction des caractéristiques de l'ellipse de polarisation [7] :

$$\underline{C} = Ae^{j\alpha} \begin{bmatrix} \cos \varnothing - \sin \varnothing & \\ \sin \varnothing & \cos \varnothing \end{bmatrix} \quad (1.15)$$

### 1.3.5. Taux de polarisation :

Le rapport de polarisation  $\rho$  est un autre moyen efficace de déterminer la polarisation d'une onde monochromatique, il est défini comme suit :

$$\rho = \frac{E_Y}{E_X} = \frac{E_{0y}}{E_{0x}} e^{j(\delta_y - \delta_x)} \quad (1.16)$$

Il peut également être écrit comme une fonction des caractéristiques de l'ellipse de polarisation :

$$\rho = \frac{\sin \varnothing \cos \tau + j \cos \varnothing \sin \tau}{\cos \varnothing \cos \tau - j \sin \varnothing \sin \tau} \quad (1.17)$$

Le tableau ci-dessous résume tous les états de polarisation canoniques d'une onde électromagnétique plane monochromatique en fonction de polarisation elliptique, du vecteur de Jones et du rapport de polarisation [7].

Tableau (1.1) États de polarisation canonique.

Polarisation États	Jones unitaire Vecteur	Orientation $\emptyset$	Ellipticités $\tau$	Polarisation Ratio
Horizontal (H)	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$	0	0	0
Vertical (v)	$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	$\frac{\pi}{2}$	0	$\infty$
Linéaire +45	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$	$\frac{\pi}{4}$	0	1
Linéaire -45	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} -1 \\ 1 \end{bmatrix}$	$\frac{3\pi}{2}$	0	-1
Circulaire à Gauche	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ j \end{bmatrix}$	Aucun	$\frac{\pi}{4}$	j
Circulaire à Droit	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -j \end{bmatrix}$	Aucun	$\frac{\pi}{-4}$	-j

### 1.3.6. Matrice de rétrodiffusion :

Nous considérons qu'une onde électromagnétique  $E^{em} = \begin{pmatrix} E^{em}_h \\ E^{em}_v \end{pmatrix}$  est émise par une source en polarisation H et V puis est réfléchi par un diffuseur comme illustré sur la Figure (11).

L'onde réfléchi est notée  $E^{re} = \begin{pmatrix} E^{re}_h \\ E^{re}_v \end{pmatrix}$  et son étude permet d'obtenir différentes informations sur les propriétés intrinsèques du diffuseur [8].

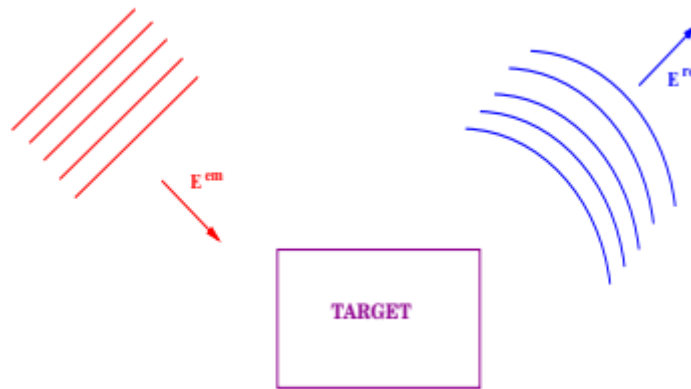


Figure (1.9) Schéma simplifié de l'interaction entre une onde électromagnétique et un diffuseur.

La matrice de rétrodiffusion définit le processus de transformation de l'onde  $E_{em}$  en l'onde réfléchie  $E_{er}$ . Elle est définie comme suit [7] :

$$\begin{pmatrix} E^{r\theta}_h \\ E^{re}_v \end{pmatrix} = S \begin{pmatrix} E^{\theta m}_h \\ E^{\theta m}_v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_{hh} & s_{hv} \\ s_{vh} & s_{vv} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E^{\theta m}_h \\ E^{\theta m}_v \end{pmatrix} \quad (1.18)$$

Où  $s_{hh}$ ,  $s_{vv}$  sont les coefficients complexes des co-polarisations et  $s_{hv}$ ,  $s_{vh}$  sont les coefficients des cross-polarisations. La matrice de Sinclair définit totalement la modification de polarisation d'une onde émise par un diffuseur quelconque.

La matrice de diffusion décrit la transformation du champ électrique de l'onde incidente en champ électrique de l'onde diffusée, l'exposant  $E_m$  désigne l'onde incidente, et  $re$  désigne l'onde diffusée. Après avoir mesuré cette matrice, la force et la polarisation de l'onde diffusée pour une polarisation arbitraire de l'onde incidente peuvent être calculées, car toute onde incidente peut être exprimée dans l'ensemble de base  $\begin{pmatrix} E^{em}_h \\ E^{em}_v \end{pmatrix}$ .

Les quatre éléments de la matrice de diffusion sont complexes, et peuvent être obtenus à partir des amplitudes et des phases mesurées par les quatre canaux d'un radar polarimétrique.

Une procédure de calibration précise est nécessaire pour obtenir les éléments, mais si la calibration n'était pas nécessaire, les quatre éléments de la matrice de diffusion seraient directement mesurés par les canaux correspondants du système radar. Les propriétés de diffusion mesurées de la cible ne s'appliquent qu'à la fréquence et à l'angle du faisceau radar utilisés lors de la mission. Cependant, les propriétés de diffusion peuvent varier de manière significative avec la fréquence du radar et la direction du faisceau (ou la rotation de la cible).



Dans les radars monostatiques, la propriété de réciprocité est valable pour la plupart des cibles. Cette propriété signifie que  $S_{hv} = S_{vh}$ , c'est-à-dire que la matrice de diffusion est symétrique et ne comporte que 3 éléments indépendants. Notez que comme les éléments de la matrice de diffusion sont complexes, un changement de phase qui peut se produire pendant le processus de diffusion peut être représenté.

En raison des règles de convention différentes, la matrice de diffusion prend une forme différente dans les conventions BSA et FSA. Dans la convention BSA, la matrice de diffusion est appelée matrice de Sinclair, tandis que dans la convention FSA, la matrice de diffusion est appelée matrice de Jones[8].

### 1.3.7. Matrices de cohérence et de covariance :

Le vecteur de diffusion ou vecteur de covariance  $K_C$  est une version vectorisée de la matrice de diffusion. En supposant la réciprocité, c'est-à-dire que  $S_{vh} = S_{hv}$ , ce vecteur est le suivant[9] :

$$K_C = \begin{bmatrix} S_{hh} \\ \sqrt{2}S_{hv} \\ S_{vv} \end{bmatrix} \quad (1.19)$$

Il est pratique de construire une représentation du domaine de puissance des propriétés de diffusion, ce qui est fait en formant le produit de ce vecteur par lui-même. On obtient ainsi la matrice de covariance, qui décrit aussi parfaitement les propriétés de diffusion de la cible :

$$C = K_C \cdot K_C^+ = \begin{bmatrix} \langle |S_m|^2 \rangle & \sqrt{2}\langle S_m S_{hv}^* \rangle & \langle S_m S_{vv}^* \rangle \\ \sqrt{2}\langle S_{hv} S_{hh}^* \rangle & 2\langle |S_{hv}|^2 \rangle & \sqrt{2}\langle S_{kv} S_{vv}^* \rangle \\ \langle S_{vv} S_{hh}^* \rangle & \sqrt{2}\langle S_{vv} S_h^* \rangle & \langle |S_{vv}|^2 \rangle \end{bmatrix} \quad (1.20)$$

Où + désigne la transposition conjuguée et \* le conjugué. La matrice de covariance présente une symétrie conjuguée.

La matrice de cohérence est étroitement liée à la matrice de covariance, et elle est préférée par certains analystes Cloude & Pottier. Pour obtenir la matrice de cohérence, la matrice de diffusion est vectorisée d'une manière différente en utilisant les éléments de spin de Pauli (en supposant à nouveau la réciprocité)[9]:

$$K_T = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} S_{hh} + S_{vv} \\ S_{hh} - S_{vv} \\ 2S_{hv} \end{bmatrix} \quad (1.21)$$

Ce vecteur est parfois préféré car ses éléments ont une interprétation physique (rebond impair, rebond pair, diffus, etc.). Notons que certains auteurs utilisent  $(S_w - S_{hh})$  pour le deuxième

élément de ce vecteur Cloude & Papathanassiou, obtenant ainsi une analyse équivalente [9]. Là encore, l'information de  $K_T$  est exprimée dans le domaine de puissance en formant le "produit" de ce vecteur avec lui-même, ce qui donne la matrice de cohérence :

$$T_3 = \langle k * k^* \rangle = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \langle |S_{hh} + S_{vv}|^2 \rangle & \langle (S_{hh} + S_{vv})(S_{hh} + S_{vv})^* \rangle & 2\langle (S_{hh} + S_{vv})S_{hv}^* \rangle \\ \langle (S_{hh} - S_{vv})(S_{hh} + S_{vv})^* \rangle & \langle |S_{hh} - S_{vv}|^2 \rangle & 2\langle (S_{hh} - S_{vv})S_{hv}^* \rangle \\ 2\langle S_{hv}(S_{hh} + S_{vv})^* \rangle & 2\langle S_{hv}(S_{hh} + S_{vv})^* \rangle & 4\langle |S_{hv}|^2 \rangle \end{bmatrix} \quad (1.22)$$

Les valeurs propres de la matrice de covariance et de la matrice de cohérence sont réelles et sont les mêmes. La somme des éléments diagonaux (la trace) des deux matrices est également la même, et représente la puissance totale de l'onde diffusée si l'onde incidente à une puissance unitaire. Notez que la plupart des auteurs utilisent la convention BSA pour ces définitions.

## 1.4. Représentation lexicographique par code couleur :

La représentation lexicographique d'image SAR par code couleur RVB offre deux alternatives pour représenter les informations fournies par l'image de rétrodiffusion dans une seule image [10].

Dans ce code couleur particulier, nous combinons les trois couleurs primaires (rouge, vert et bleu) pour créer un nouveau code additif. Par conséquent, nous pouvons considérer la couleur comme un espace tridimensionnel tel qu'il est représenté dans la figure suivante :

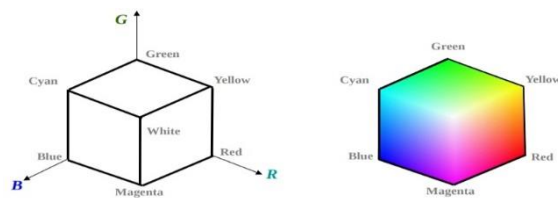


Figure (1.10) Cube de couleurs RVB

Pour représenter l'information polarimétrique, la représentation du code couleur RVB considère comme dimensions de l'espace couleur les intensités des éléments de la matrice de rétrodiffusion, un exemple de codification des couleurs est donné ci-dessous [10] :

$|s_{vv}^2|$  : Rouge

$2|s_{hv}^2|$  : Vert

$|s_{hh}^2|$  : Bleu

## 1.5.Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté brièvement l'analyse et l'interprétation des images radar SAR et les caractéristiques principale de l'image SAR dès l'envoi de l'onde électromagnétique jusqu'à la réception de l'onde réfléchi.

Dont cette onde est représentée par la matrice de diffusion qui contient toutes les informations détectées de la cible. Ainsi le phénomène subit par l'image SAR et les filtres utilisé pour l'éliminer.

Dans le chapitre suivant nous présenterons le traitement des images SAR, et nous introduirons les décompositions et les classifications polarimétriques SAR afin de caractériser l'image de la Terre et la nature de la zone couverte.

# Chapitre 2 : décomposition et classification des données de PolSAR

## **2. Chapitre2 : décomposition et classification des données de PolSAR**

### **2.1.Introduction :**

Dans ce chapitre, nous allons aborder les différentes méthodes de décompositions des données polarimétriques qui ont pour but d'obtenir les représentations les plus précises des informations contenues dans l'image SAR.

Plusieurs théorèmes de décomposition des données polarimétrique ont été proposés au cours des trente dernières années (Huynen, 1970 ; Holm et Barnes, 1988 ; Krogager, 1990 ; VanZyl, 1989 ; Cloude et Pottier, 1997 ; Cameron et al, 1996 ; Freeman et Durden, 1998 ; Dong et al., 1998). De manière générale nous pouvons distinguer deux catégories : les décompositions cohérentes et les décompositions non cohérentes.

Dans la catégorie des décompositions non cohérentes nous pouvons retrouver deux sous-catégories, celles qui introduisent des modèles physiques explicites (Freeman et Durden) et d'autres qui essaient d'extraire la typologie des rétro diffuseurs en analysant les propriétés des matrices (Cloude et Pottier)

La classification polarimétrique a pour but de classer chaque pixel d'une image SAR dans une classe de diffusion principale basée sur les propriétés de rétrodiffusion de la cible.

Dans ce travail de thèse, nous allons essayer d'expliquer les différentes méthodes de classifications.

### **2.2.Décompositions des données SAR polarimétriques :**

La décomposition polarimétrique est une technique établie qui permet de discriminer les effets de la végétation et de la rugosité de surface pour diviser le signal rétrodiffusé de la cible en mécanismes de diffusion indépendants[11].

Il est intéressant d'envisager le fait qu'il y ait un mécanisme polarimétrique dominant ou moyen dans chaque cellule de résolution. Il est alors possible de caractériser ce mécanisme de plusieurs manières[12] :

- En utilisant une analyse de la matrice de Sinclair S.
- En utilisant un modèle de décomposition de la matrice de covariance T.
- En exploitant la décomposition en valeurs propres et vecteurs propres de la matrice de covariance T. Deux principales décompositions de cibles ont été proposées.

### 2.2.1. Décompositions cohérentes :

Le but d'une décomposition cohérente consiste à exprimer la matrice complexe de diffusion  $[S]$  mesurée par le radar comme une combinaison de matrices  $[S]_i$  correspondant à des objets simples, également appelés cibles canoniques [13].

Par conséquent la matrice de diffusion est présentée comme suit :

$$[S] = \sum_{i=1}^k C_i [S]_i \quad (2.1)$$

Où :

$S_i$  représente les matrices de diffusion d'une composante de diffusion indépendante dans la même cellule de résolution.

$C_i$  est le poids de chaque matrice  $S_i$  dans la combinaison conduisant à  $S$ .

Afin de simplifier la compréhension de  $[S]$ , il est souhaitable que les matrices  $[S]_i$  soient indépendantes les unes des autres pour éviter qu'un mécanisme de rétrodiffusion particulier ne soit présent dans plus d'une d'entre elles.

Pour éviter cette situation, des conditions strictes d'orthogonalités entre les matrices  $[S]_i$  sont la plupart du temps imposées.

Évidemment, si une cible est cohérente (très polarisée), le nombre de matrices  $[S]_i$  nécessaires pour obtenir une description adéquate de  $[S]$  sera faible, typiquement égal à  $k=1$ .

Par analogie, il est donc possible de définir une décomposition polarimétrique comme une forme de classification non supervisée des images polarimétriques [13].

Il existe une infinité d'algorithmes utilisant ce type de décomposition. Cependant, ils ne sont pas tous pratiques pour interpréter l'information contenue dans la matrice de la cible. Les plus utilisés sont la décomposition de Pauli, la décomposition de Krogager et les décompositions de Cameron ; nous décrivons brièvement ces trois méthodes de décomposition dans ce qui suit.

#### 2.2.1.1. Décomposition de Pauli :

La décomposition de Pauli consiste en une représentation de la matrice de diffusion dans la base de Pauli.

Cette base est un ensemble de quatre matrices deux par deux qui caractérisent chacune un mécanisme physique de polarisation différent que l'on essaye d'identifier [14] :

$$S = \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[ \left( a \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \right) + \left( b \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \right) + \left( c \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \right) + \left( d \begin{bmatrix} 0 & -j \\ j & 0 \end{bmatrix} \right) \right] \quad (2.2)$$

$$a = \frac{S_{hh} + S_{vv}}{\sqrt{2}} \quad (2.3)$$

$$b = \frac{S_{hh} - S_{vv}}{\sqrt{2}} \quad (2.4)$$

$$c = \frac{S_{hv} + S_{vh}}{\sqrt{2}} \quad (2.5)$$

$$d = \frac{S_{hv} - S_{vh}}{\sqrt{2}} \quad (2.6)$$

Comme mentionné dans le premier chapitre, en configuration monostatique, le terme d est nul car  $S_{hv} = S_{vh}$

Les coefficients a, b et c représentent respectivement un mécanisme de :

- Simple rebond : c'est-à-dire de diffusion sur une surface.
- Double-rebond : typiquement de réflexion sur un bâtiment ou un tronc d'arbre.
- Diffusion de volume : souvent présent dans les zones de végétation.

Il est important de noter que lorsqu'un coefficient ne domine pas par rapport aux autres, l'interprétation devient très difficile.

La Figure (2.1) présente le résultat d'une décomposition de Pauli sur une image de référence, acquise par le système AIRSAR de la NASA en 1988 au-dessus de la baie de San Francisco en Californie. La représentation colorée est  $S_{hh} + S_{vv}$  en bleu,  $S_{hh} - S_{vv}$  en rouge et  $\sqrt{2}S_{hv}$  en vert. La surface de l'océan est représentée presque entièrement en bleu, ce qui correspond au terme  $S_{hh} + S_{vv}$ . Ce terme est caractéristique d'une diffusion sur une surface, ce qui est cohérent dans le cas de l'océan.

De même, les zones de végétation ressortent en vert, ce qui correspond au terme  $\sqrt{2}S_{hv}$  et donc bien à une diffusion de volume. Finalement les bâtiments ressortent principalement en rouge, c'est-à-dire que le terme en  $S_{hh} - S_{vv}$  est plus important, ce qui indique bien un mécanisme de type double rebond [14] :



Figure (2.1) : décomposition de Pauli à San Francisco

### 2.2.1.2. Décomposition de Krogager :

Cette technique proposée par E. Krogager [Krog., 99] est une décomposition qui aboutit à l'extraction de paramètres physiques liés à l'aspect physique du diffuseur. C'est-à-dire Krogager a proposé une alternative pour décomposer la matrice de Sinclair comme une combinaison de la réponse d'une sphère, d'un dièdre et d'une hélice.

La figure 2.2 représente les trois cibles : La sphère telle qu'une terre rugueuse, le dièdre tel que le bâti, et l'hélice qui est principalement due à deux mécanismes ou plus de réflexions de double rebond[15].



Figure (2.2) Cibles caractérisant la décomposition de Krogager.



La décomposition de Krogager exprime la matrice [S] de la manière suivante :

$$[S] = e^{j\varphi} \{ e^{j\varphi_s} k_s [S] + k_d [s]_d + k_h [s]_h \}$$

$$[S] = e^{j\varphi} \left\{ e^{j\varphi_s} k_s \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} + k_d \begin{bmatrix} \cos 2\theta & \sin 2\theta \\ \sin 2\theta & -\cos 2\theta \end{bmatrix} + k_h e^{\pm j2\theta} \begin{bmatrix} 1 & \pm j \\ \pm j & 1 \end{bmatrix} \right\} \quad (2.7)$$

$\varphi_s$  et  $\varphi$  sont respectivement le déplacement de la sphère par rapport aux composantes diplane et hélice, et la phase absolue.

$K_s$ ,  $K_d$  et  $K_h$  sont respectivement la puissance diffusée par la composante de type sphère, la composante de type diplane et la composante de type hélice.

### 2.2.1.3. Décomposition de Cameron :

La décomposition de Cameron n'est pas basée directement sur des matrices de diffusion d'éléments canoniques mais sur deux propriétés des diffuseurs : la réciprocité et la symétrie.

Décomposant la matrice [S] en trois parties : composante symétrique maximale et minimale et une composante non réciproque, en utilisant une projection dans la base de Pauli pour obtenir une décomposition invariante à la base de polarisation utilisée. Cette décomposition discerne d'abord les cibles réciproques ( $S_{HV} = S_{VH}$ ) des cibles non réciproques avec un angle  $\Theta$ . Les cibles (pixels) sont ensuite classées en 2 groupes : les cibles symétriques et celles non symétriques avec un angle  $\tau_{sym}$

La décomposition de Cameron prend la forme suivante[2] :

$$\vec{S} = a \{ \cos \theta_{rec} \{ \cos \tau_{sym} \hat{S}_{sym}^{max} + \sin \tau_{sym} \hat{S}_{sym}^{min} \} + \sin \theta_{rec} \hat{S}_{nonrec} \} \quad (2.8)$$

Où :

$$a = \|\vec{S}\|_2^2$$

$\theta_{rec}$  Représente l'angle pour lequel la matrice de diffusion respecte le principe de réciprocité.

$\hat{S}_{nonrec}$  Représente la composante non réciproque normalisée

$\hat{S}_{sym}^{max}$  Est la composante symétrique maximale normalisée.

$\hat{S}_{sym}^{min}$  Est la composante symétrique minimale normalisée.

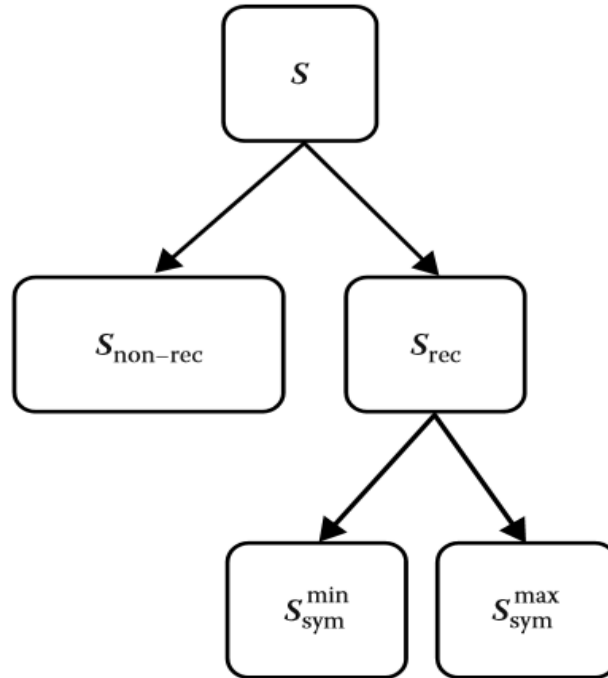


Figure (2.3) diagramme de la décomposition de Cameron.

Cette décomposition est utilisée pour classer les diffuseurs par rapport aux éléments canoniques tels que le trièdre, le dièdre ou le cylindre.

Les étapes essentielles de cette décomposition sont récapitulées dans la figure suivante[13].

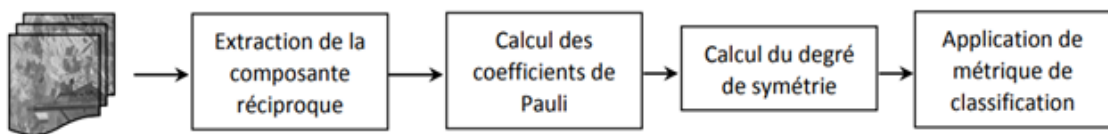


Figure (2.4) décomposition de Cameron.

### 2.2.2. Décomposition incohérente :

Les matrices de diffusion non cohérentes sont mesurées par le système radar à un terme de phase près. Ce terme de phase est dû au trajet aller-retour de l'onde entre l'antenne et la cible. L'utilisation de formes quadratiques permet de s'affranchir de ce terme. De plus elle permet l'étude des statistiques polarimétriques d'ordre 2, c'est à dire la variance des signaux dans les différents canaux de polarisation et leur corrélation mutuelle.

A partir des vecteurs cibles  $k_i$  et  $k_p$ , sont définies les matrices polarimétriques de covariance,  $[C]$ , et de cohérence  $[T]$ , toutes les deux ( $3 \times 3$ ) complexes :

$$\begin{aligned}
 [C] &= \begin{bmatrix} \langle |S_{hh}|^2 \rangle & \sqrt{2} \langle S_{hh} S_{hv}^* \rangle & \langle S_{hh} S_{vv}^* \rangle \\ \sqrt{2} \langle S_{hv} S_{hh}^* \rangle & 2 \langle |S_{hv}|^2 \rangle & \sqrt{2} \langle S_{hv} S_{vv}^* \rangle \\ \langle S_{vv} S_{hh}^* \rangle & \sqrt{2} \langle S_{vv} S_{hv}^* \rangle & \langle |S_{vv}|^2 \rangle \end{bmatrix} \\
 &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \langle |S_{hh} + S_{vv}|^2 \rangle & \langle (S_{hh} + S_{vv})(S_{hh} + S_{vv})^* \rangle & 2 \langle (S_{hh} + S_{vv}) S_{hv}^* \rangle \\ \langle (S_{hh} - S_{vv})(S_{hh} + S_{vv})^* \rangle & \langle |S_{hh} - S_{vv}|^2 \rangle & 2 \langle (S_{hh} - S_{vv}) S_{hv}^* \rangle \\ 2 \langle S_{hv} (S_{hh} + S_{vv})^* \rangle & 2 \langle S_{hv} (S_{hh} + S_{vv})^* \rangle & 4 \langle |S_{hv}|^2 \rangle \end{bmatrix} \quad (2.9)
 \end{aligned}$$

Différentes décompositions ont été proposées pour donner une interprétation physique des matrices polarimétriques incohérentes. Les méthodes présentées ci-dessous sont celles proposées par Cloude et Pottier, et Freeman-Durden.

### 2.2.2.1. Décomposition de Cloude-Pottier :

La décomposition polarimétrique de Cloude-Pottier est basée sur une décomposition en valeurs propres ( $\lambda_i$ ) et en vecteurs ( $u_i$ ) propres de la matrice de cohérence ( $T$ ). Ainsi, trois paramètres pertinents (l'entropie ( $H$ ), l'anisotropie ( $A$ ) et l'angle ( $\alpha$ )) d'où [11]:

L'angle  $\bar{\alpha}$  : il varie entre  $0^\circ$  et  $90^\circ$ , identifie le mécanisme dominant de rétrodiffusion (surface ( $\bar{\alpha} < 40^\circ$ ), volume ( $40^\circ \leq \bar{\alpha} \leq 50^\circ$ ), double rebond ( $\bar{\alpha} \geq 50^\circ$ )).

L'entropie  $H$  : définit le caractère aléatoire du phénomène de rétrodiffusion Sa valeur varie entre 0 et 1.

L'anisotropie : exprime l'importance des mécanismes secondaires, varie entre 0 et 1.

Les équations suivantes montrent comment ces paramètres sont extraits des valeurs propres et des vecteurs propres de la matrice de cohérence ( $T$ ).

$$\langle [T] \rangle = [U_3][\Sigma][U_3]^{-1} = [U_1 \quad U_2 \quad U_3] \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix} [U_1 \quad U_2 \quad U_3] \quad (2.10)$$

Vecteurs propres :

$$U_i = [\cos \alpha_i \quad \sin \alpha_i \cos \beta_i e^{j\delta_i} \quad \sin \alpha_i \cos \beta_i e^{j\gamma_i}]^T \quad (2.11)$$

Valeurs propres :

$$P_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{k=1}^3 \lambda_k} \quad (2.12)$$

Alpha :

$$\alpha = \sum_{i=1}^3 P_i \alpha_i \quad (2.13)$$

L'entropie :

$$H = \sum_{i=1}^n -P_i \log_n P_i \quad (2.14)$$

L'isotropie :

$$A = \frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_2 + \lambda_3} \quad (2.15)$$

A son tour Freeman-Durden a introduit sa méthode de décomposition de la matrice de covariance. Contrairement à Cloude-Pottier, Freeman-Durden s'est basé sur l'aspect physique des processus de diffusion.

### 2.2.2.2. La décomposition de Freeman-Durden :

La méthode de décomposition de la polarisation Freeman-Durden à trois composantes a été développée en 1998. Cette méthode diffère de la méthode H/Alpha. Elle exprime la matrice de covariance  $[C]$  par une contribution de trois mécanismes de diffusion.

Diffusion volumique où les diffuseurs de type tronç sont modélisés par un ensemble de dipôles orientés arbitrairement.

Diffusion à double rebond modélisée par le mécanisme canonique de type dièdre.

Diffusion de surface ou simple modélisée par le modèle de diffusion surfacique du premier ordre de Bragg[16].

### 2.2.2.2.1. Diffusion de Bragg :

Ce mécanisme de diffusion est représenté par la matrice de diffusion suivante :

$$[S] = \begin{bmatrix} R_h & 0 \\ 0 & R_v \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Les coefficients de réflexion pour les ondes polarisées horizontalement et verticalement sont données par[17] :

$$R_h = \frac{\cos \theta_i - \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2 \theta_i}}{\cos \theta_i + \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2 \theta_i}} \quad (2.17)$$

$$R_v = \frac{(\varepsilon_r - 1)\{\sin^2 \theta_i - \varepsilon_r(1 + \sin^2 \theta_i)\}}{\varepsilon_r \cos \theta_i + \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2 \theta_i}} \quad (2.18)$$

$\theta_i$  est l'angle d'incidence local,  $\varepsilon_r$  est la constante diélectrique relative de la surface (permittivité)

Par conséquent, la matrice de cohérence qui correspond à cette composante diffusante est :

$$T_\beta = f_s \begin{bmatrix} 1 & \beta^* & 0 \\ \beta & |\beta|^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

$$f_s = \frac{m_s^2}{2} |R_h + R_v|^2 \quad (2.20)$$

$$\beta = \frac{R_h - R_v}{R_h + R_v} \quad (2.21)$$

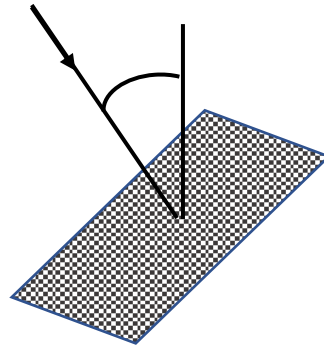


Figure (2.5) diffusion de Bragg.

### 2.2.2.2.2. Double rebond :

On considère ici un dièdre composé de deux diélectriques caractérisant le sol-tronc. La surface horizontale représentative d'un sol nu (ground) est représentée par les coefficients de Frensel  $R_{ghh}$  et  $R_{gvv}$  respectivement pour les polarisations horizontales et verticales.

De la même manière, la surface verticale représentative d'un tronc est définie par les coefficients de Frensel  $R_{thh}$  et  $R_{tvv}$ .

A cela, le modèle de Freeman ajoute deux termes de phase,  $e^{j2\gamma_{hh}}$  et  $e^{j2\gamma_{vv}}$ , pour caractériser l'atténuation ainsi que les changements de phase lors de la propagation de l'onde.

La matrice de rétrodiffusion correspondante est donc de la forme[13]:

$$S_{DB} = \begin{bmatrix} R_{ghh} \cdot R_{thh} \cdot e^{j2\gamma_{hh}} & 0 \\ 0 & R_{gvv} \cdot R_{tvv} \cdot e^{j2\gamma_{vv}} \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

La matrice de cohérence sera écrite comme suit[17] :

$$T_{DB} = f_d \begin{bmatrix} |\alpha|^2 & \alpha & 0 \\ \alpha^* & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

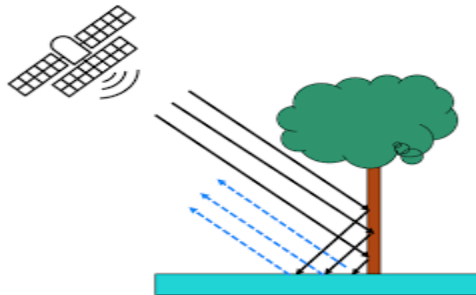


Figure (2.6) diffusion double rebond.

### 2.2.2.2.3. Diffusion volumique :

La diffusion volumique est modélisée par des dipôles orientés dans des angles aléatoires, la matrice de diffusion et la matrice de cohérence sont données par :

$$S_v = \begin{bmatrix} \cos^2\varphi & \frac{1}{2} \sin 2\varphi \\ \frac{1}{2} \sin 2\varphi & \cos^2\varphi \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

D'où :  $\varphi$  est l'orientation de l'angle du dipôle.

La matrice de cohérence sera écrite comme suit [17]:

$$T_V = \frac{f_V}{4} \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

Avec :  $f_d$  la contribution à la puissance de la diffusion du Volume.

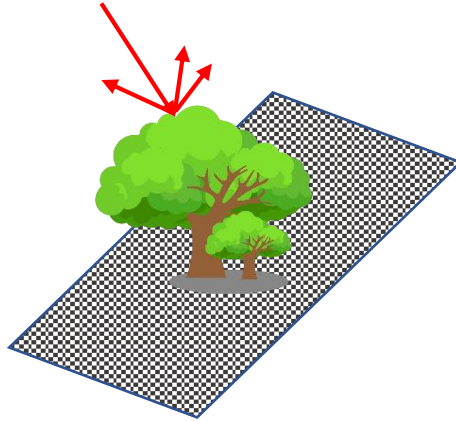


Figure (2.7) diffusion volumique.

La matrice de cohérence totale de ce modèle est exprimée en sommant les trois matrices de cohérence précédentes.

$$T_{tot} = f_s \begin{bmatrix} 1 & \beta^* & 0 \\ \beta & |\beta|^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + f_d \begin{bmatrix} |\alpha|^2 & \alpha & 0 \\ \alpha^* & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \frac{f_V}{4} \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

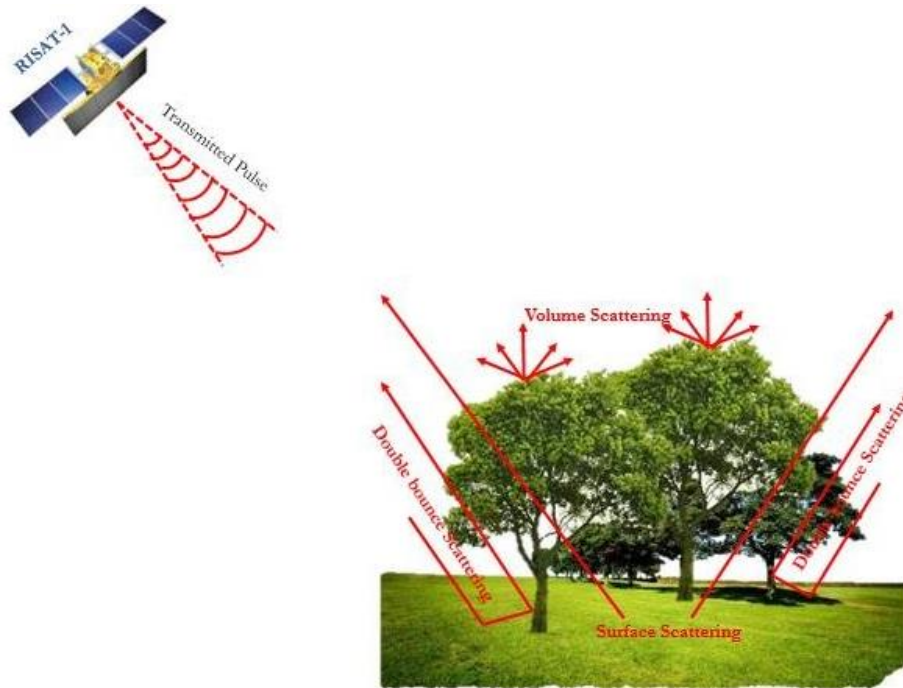


Figure (2.8) mécanisme des trois diffusions.

La validité du modèle de diffusion de Bragg est limitée à une faible rugosité (par rapport à la longueur d'onde). Par conséquent, le modèle ne tient pas compte des effets de dépolarisation.

Ainsi, la matrice de cohérence du modèle de BRAGG est de rang 1. Par conséquent, le modèle n'est pas capable de décrire la diffusion à polarisation croisée.

Afin de d'étendre le domaine de validité du modèle de Bragg et d'introduire des effets de diffusion et de dépolarisation à polarisation croisée, le modèle de Bragg étendu (X-Bragg) a été proposé dans et sa matrice de cohérence s'écrit comme suit[16]:

$$T_{Xbragg} = f_s \begin{bmatrix} 1 & \beta * sinc2\delta & 0 \\ \beta * sinc2\delta & \frac{1}{2} |\beta|^2 (1 + sinc4\delta) & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} |\beta|^2 (1 - sinc4\delta) \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

D'où :

$\beta$  Représente l'effet de rugosité.

$\delta$  Représente la largeur de la distribution.

$f_s$  Est la contribution en puissance de la composante X-Bragg.

La matrice de cohérence totale de la décomposition modifiée est la somme des trois matrices de cohérence de chaque composant et s'écrit comme suit :



$$T_{tot} = f_s \begin{bmatrix} 1 & \beta * \text{sinc}2\delta & 0 \\ \beta * \text{sinc}2\delta & \frac{1}{2} |\beta|^2 (1 + \text{sinc}4\delta) & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} |\beta|^2 (1 - \text{sinc}4\delta) \end{bmatrix} + f_d \begin{bmatrix} |\alpha|^2 & \alpha & 0 \\ \alpha^* & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \frac{f_v}{4} \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

### 2.3. Classification des données SAR polarimétriques

#### 2.3.1. Classification H/α :

Cloude et Pottier ont élaboré un plan H/α à partir de l'entropie et de l'angle α pour classifier les mécanismes de diffusion.

Ce plan est subdivisé en huit zones comme montré dans la figure ci-dessous.

Les zones non-grisées représentent les zones de projection possible dans le plan (H/α) (diffusion de surface, diffusion de volume, double rebond). Malgré son aspect purement mathématique. Cette méthode de décomposition fait preuve d'efficacité[13].

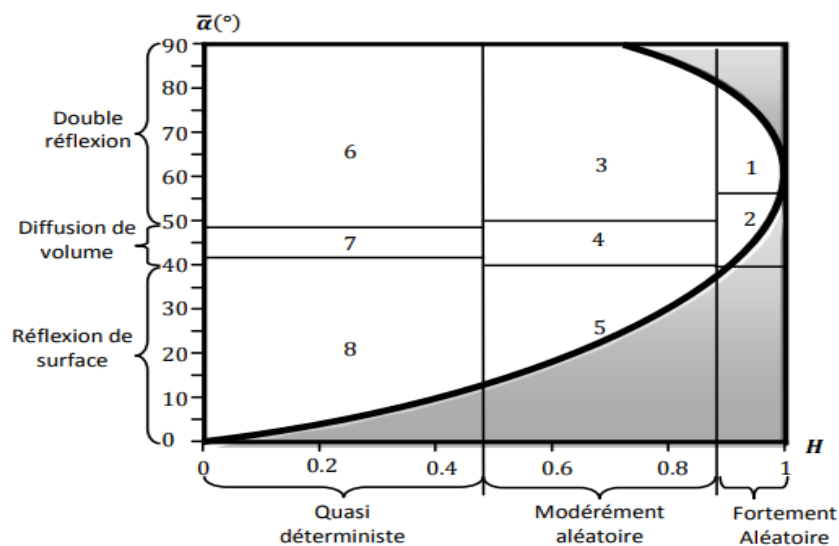


Figure (2.9) Plan H/α pour l'identification des mécanismes de diffusion.

### 2.3.1.1. Descriptions des zones de l'espace Entropie/Alpha :

- Entropie faible

#### a) Zone 8 : Diffusion de surface

Dans cette zone se situent les processus de diffusion ayant un angle alpha estimé à moins de 42.5°. Ceux-ci incluent la diffusion de surface Bragg caractérisant les surfaces de la mer et les phénomènes de diffusion spéculaires. Cette zone représente des surfaces physiques comme les surfaces d'eau et les surfaces des terrains très lisses[18].

#### b) Zone 7 : Diffusion de volume

Dans cette zone, nous avons les mécanismes fortement corrélés qui présentent une inégalité importante dans l'amplitude entre HH et VV, telle que la diffusion de la végétation ayant des diffuseurs à orientations fortement corrélées[18].

#### b) Zone 6 : Diffusion double réflexion

Cette zone correspond à la diffusion double rebond, comme celle fournie par les diffuseurs dièdres métalliques. Ces diffuseurs sont caractérisés par un angle alpha supérieur à 47.5° [18].

- Entropie Moyenne

#### a) Zone 5 : Diffusion de Surface

Cette zone reflète l'augmentation de l'entropie. Ceci est dû aux changements dans la rugosité de la surface et les effets de diffusion au niveau de la canopée[18].

#### b) Zone 4 : Diffusion de Végétation

Ici le mécanisme de diffusion dominant est de type dipôle. L'augmentation de l'entropie est due à une distribution statistique de l'angle d'orientation. Une telle zone inclut la diffusion de surfaces de végétation avec des diffuseurs anisotropiques[18].

#### c) Zone 3 : Diffusion double réflexion

Cette zone comporte une diffusion dièdre avec une entropie modérée. Cela se passe par exemple dans les zones forestières où les mécanismes de diffusion de type double rebond se produisent aux longueurs d'onde P et L. Un deuxième processus important dans cette catégorie se présente dans les zones urbaines, où un rassemblement dense de centres de diffusion peut générer une entropie modérée avec une diffusion multiple dominante[19].

- Entropie forte

a) Zone 2 : Diffusion de Végétation

La haute entropie qui caractérise la diffusion volumique se produit quand  $\alpha$  est supérieur à  $40^\circ$  et l'entropie est supérieure à 0.9. Le comportement de cette classe est dominé par un bruit aléatoire. Nous pouvons trouver des types de forêts et quelques types de végétation avec des diffuseurs aléatoires hautement anisotropiques[18].

b) Zone 1 : Diffusion double réflexion

Dans cette région ( $H$  est supérieur à 0.9), nous pouvons encore distinguer des mécanismes de diffusion double rebond. Ce mécanisme peut être observé dans des zones forestières avec une diffusion dominante de branches et de troncs denses[18].

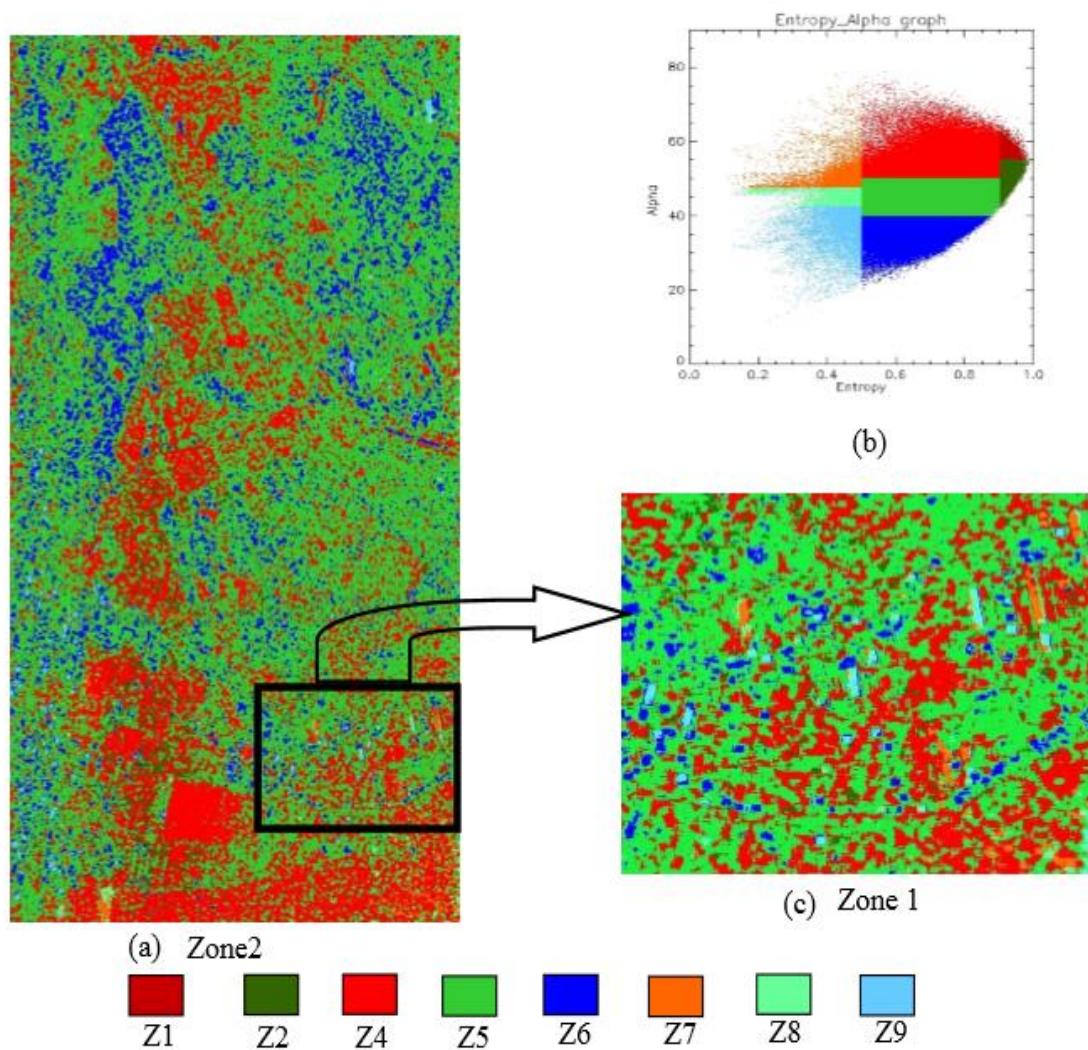


Figure (2.10) exemple d'une classification ( $H/\alpha$ ).

## 2.4. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons mis en œuvre les méthodes fondamentales de décomposition et classification des données polarimétriques.

Nous avons mentionné que les décompositions sont divisées en cohérentes et non cohérentes. Pour la première technique, nous avons mis au point trois décompositions à savoir la décomposition de Pauli, la décomposition de Krogager et la décomposition de Cameron.

Pour la deuxième technique nous avons abordé la décomposition de Cloude-Pottier et celle de Freeman-Durden.

Nous avons également présenté la technique de classification basée sur l'espace  $H/\alpha$ , en classifiant l'image polarimétrique en 8 classes. L'avantage principal de cette méthode est le fait qu'une bonne corrélation entre les paramètres de l'espace et les processus de diffusion au sol fournit une bonne interprétation des données sans connaissance a priori.

# Chapitre 3 : résultats et discussion

### 3. Chapitre3 : résultats et discussion

#### 3.1.Introduction :

Dans ce chapitre, nous présenterons les résultats obtenus en utilisant la méthode basée sur X-Bragg pour la détection de surfaces nues. Ensuite, nous comparerons les résultats obtenus à partir de cette dernière avec la composante de surface résultant de la décomposition de Freeman Durden, tout en basant sur nos connaissances théoriques mentionnées dans les deux premiers chapitres.

#### 3.2.Les données des sites d'études :

Notre travail de thèse a pour but de mettre en œuvre la technique de détection des surfaces nues rugueuses basée sur la méthode de décomposition X-Bragg et de la comparait avec la fameuse méthode de décomposition de Freeman-Durden.

Pour cela on va exploiter deux images SAR et nous allons utiliser deux ensembles de données avec deux bandes de fréquences à savoir la bande L et la bande P.

La première zone d'étude est située à Allemagne situé dans l'arrondissement de Starnberg, en Bavière et s'appelle Oberpfaffenhofen.

Les figures ci -dessous représentent la première image sar réelle extraite de Google Earth, en décomposition de Pauli colorée en RGB et l'image optique de la région Oberpfaffenhofen.



Figure 3.1 l'image SAR d'Oberpfaffenhofen par la décomposition de Pauli colorée en RGB.



Figure 3.2 l'image SAR d'Oberpfaffenhofen tirée de Google Earth

Le deuxième accord est l'image Casa-granda2 qui est illustrée en dessus. Cette image est un rayon américain appartenant à la NASA avec les deux types de bandes de fréquences (bande L, bande P).



Figure (3.3) L'image Casa-grandeA2.

### 3.3. L'angle de rugosité :

La détection des surfaces nues rugueuses dans les images SAR nécessite l'estimation de l'angle de rugosité. Dans ce qui suit nous présenterons la procédure utilisée pour récupérer cet angle.

L'angle de rugosité sera déduit à partir de la matrice de cohérence qui représente la composante X-BRAGG, il faut préciser que la méthode employée est basée sur la modélisation de la surface étudiée comme un dépolarisant à symétrie de réflexion [20].

La matrice de cohérence X-BRAGG sera par la suite tournée d'un quart de tour d'un angle  $\beta$  dans le plan perpendiculaire au plan de diffusion, par conséquent, la matrice de X-BRAGG devient :

$$T_{X-B} = f_s \begin{bmatrix} C_1 & C_2^U \sin c2\beta_s & 0 \\ C_2 \sin c2\beta_s & C_3(1 + \sin c4\beta_s) & 0 \\ 0 & 0 & C_3(1 - \sin c4\beta_s) \end{bmatrix} \quad (3.1)$$



Avec :

$$C_1 = |R_{hh} + R_{vv}|^2 \quad (3.2)$$

$$C_2 = (R_{hh} + R_{vv})(R_{hh}^* - R_{vv}^*) \quad (3.3)$$

$$C_3 = \frac{1}{2} |R_{hh} - R_{vv}|^2 \quad (3.4)$$

$$\beta_s = \frac{R_{vv}}{R_{hh}} \quad (3.5)$$

$\beta_s$  décrit l'étendue de la rugosité de surface, et contrôle à la fois, le niveau de la puissance polarisée croisée et la (HH+VV) (HH-VV) cohérence. La matrice de cohérence de la surface X-Bragg est caractérisée par une énergie polarisée croisée et par une cohérence polarimétrique inférieure à un. La cohérence normalisée entre la polarisation circulaire gauche-gauche et la polarisation circulaire droite-droite est donnée par [20]:

$$\gamma_{(LL-RR)} = \frac{T_{22} - T_{33}}{\sqrt{T_{22} + T_{33}}} = \text{sinc}(4\beta_s) \quad (3.6)$$

Alors que la cohérence entre (HH+VV) et (HH-VV) est :

$$\gamma_{(HH+VV)(HH-VV)} = \frac{T_{12}}{\sqrt{T_{11}T_{22}}} = \frac{\text{sinc}(2\beta_s)}{\sqrt{\left(\frac{(1 + \text{sinc}(4\beta_e))}{2}\right)}} \quad (3.7)$$

En substituant le terme " $\text{sinc}(4\beta_s)$ " de l'équation (3.2) dans

L'équation (3.3), on obtient :

$$\text{sinc}(2\beta_s) = \frac{T_{12}}{\sqrt{T_{11}(T_{22}+T_{33})}} \quad (3.8)$$

On peut observer que l'équation (3.6) n'utilise que les éléments diagonaux de la matrice de cohérence T.

Alors que l'équation (3.8) utilise l'élément hors diagonale  $T_{12}$  en plus des éléments diagonaux.

La récupération de  $\beta_s$  à partir de l'équation (3.6) et de l'équation (3.8) Devrait donner la même valeur lorsque la matrice de cohérence décrit une diffusion de surface pure.

Si la diffusion est issue d'autres composants, c'est-à-dire d'un double rebond, volume, ou un mélange de composantes, les valeurs de  $\beta_s$  tirées n'auront pas les mêmes valeurs et donc le point mentionné dans le paragraphe précédent n'est pas applicable dans ce cas.

### 3.4. Tests utilisant des données simulées :

Afin de décrire plus clairement les procédures utilisées précédemment pour distinguer les surfaces nues, nous allons procéder à un ensemble de simulations de Monte Carlo.

Dans ce but, quelques échantillons de données qui s'adaptent à la forme théorique de la matrice de cohérence pour les différentes diffusions possibles ont été générés (c'est-à-dire surface pure, surface+ double rebond, et surface +volume). Avec bruit additif et un ensemble de rugosité supposée, et un ensemble d'angles de rugosité supposés  $\beta_s$ .

La figure (3.3) montre l'angle de rugosité  $\beta_s$  récupéré à l'aide de l'équation (3.6) et l'angle récupéré à l'aide de l'équation (3.8) pour deux scénarios de diffusion différents (c'est-à-dire sol nu, surface plus végétation).

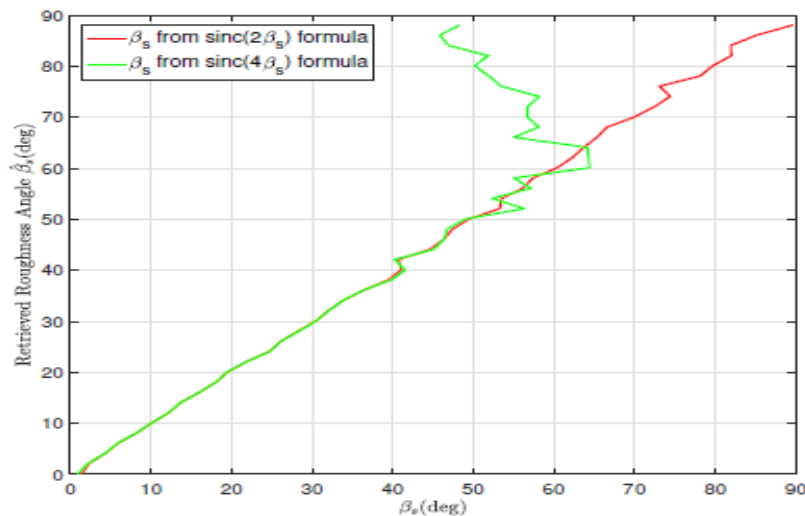


Figure (3.4) angles de rugosité récupérés à partir de la surface pure.

La figure (3.4) révèle que pour une diffusion de surface pure, les deux valeurs de rugosité obtenues seront comprises entre 0° et 65°.

Ainsi il existe des différents scénarios de diffusion de surface qui ont été simulés, les résultats ci-dessous montrent comment les deux angles de rugosité récupérés divergent dans ce scénario :

\*  $\beta_s$  Récupéré à partir de la simulation du sol nu + volume + bruit de speckle :

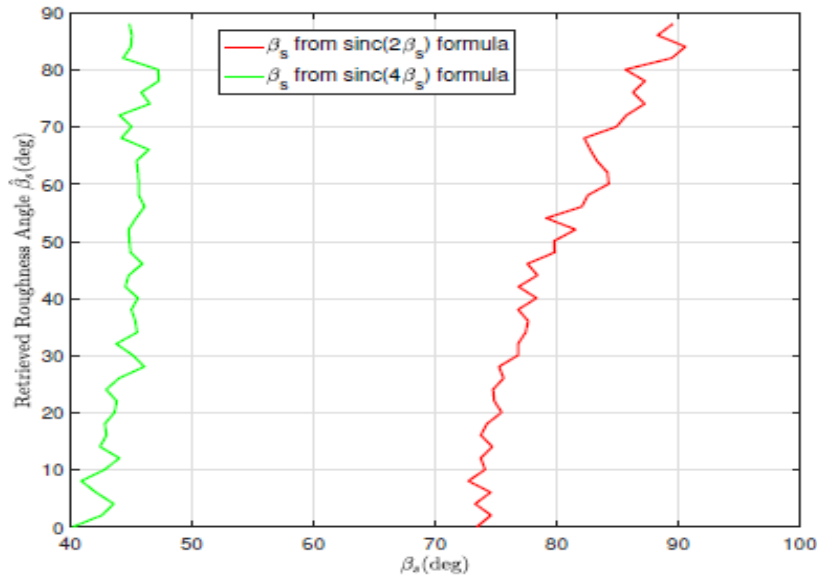


Figure (3.5) Angles de rugosité récupérés à partir de la surface pure et de composante de volume.

Pour avoir une compréhension globale de l'influence des composantes additive sur la convergence des deux angles de rugosité récupérés précédemment. La différence entre ces deux derniers a été calculée pour chaque scénario de diffusion.

La figure ci-dessus démontre l'affectation de la distance entre les deux angles de rugosité par la composante additive, on remarque que la différence entre les deux valeurs augmente avec la contribution de la composante additive.

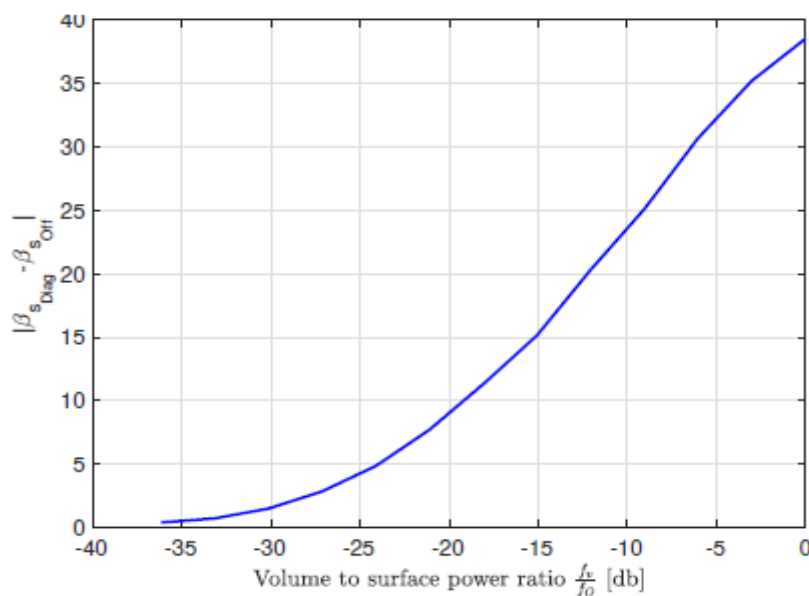


Figure (3.6) l'effet de composant additif sur la distance entre les angles de rugosité.

On peut conclure que pour une surface idéale à diffusion pure la distance entre les deux angles de rugosité sera nulle. Vu le bruit, la différence est acceptable d'environ  $\frac{f_v}{f_0} \leq -20 \text{ db}$ .

Aussi le seuil de discrimination de surface doit choisir dans cet intervalle.

### 3.5. La détection des sols nus avec la décomposition de X-Bragg :

La décomposition de X-Bragg est une méthode qui utilise la matrice de cohérence T pour récupérer l'angle de rugosité à partir de la diagonale de la matrice T et de l'hors diagonale, pour nous donner les différents scénarios de diffusion.

L'algorithme ci-dessus est appliqué sur le site d'étude pour discriminer les surfaces de sol nu :

1. Donner l'image SAR du site.
2. Filtrage avec le filtre Lee.
3. Estimation de l'angle de rugosité à partir de la matrice X-Bragg.

Si ( $T_{22} - T_{33} = 0$ )

$$\text{Alors } \frac{T_{22} - T_{33}}{\sqrt{T_{22} + T_{33}}} \text{ sinc}(4\beta_s)$$

Sinon

$$\frac{T_{12}}{\sqrt{T_{11}(T_{22} + T_{33})}} \rightarrow \text{sinc}(2\beta_s)$$

Si  $\beta_s$  (diagonale) =  $\beta_s$  (off diagonale)

Alors le pixel est une surface nue.

Sinon

Le pixel n'est pas une surface nue.

4. Discrimination de surface.

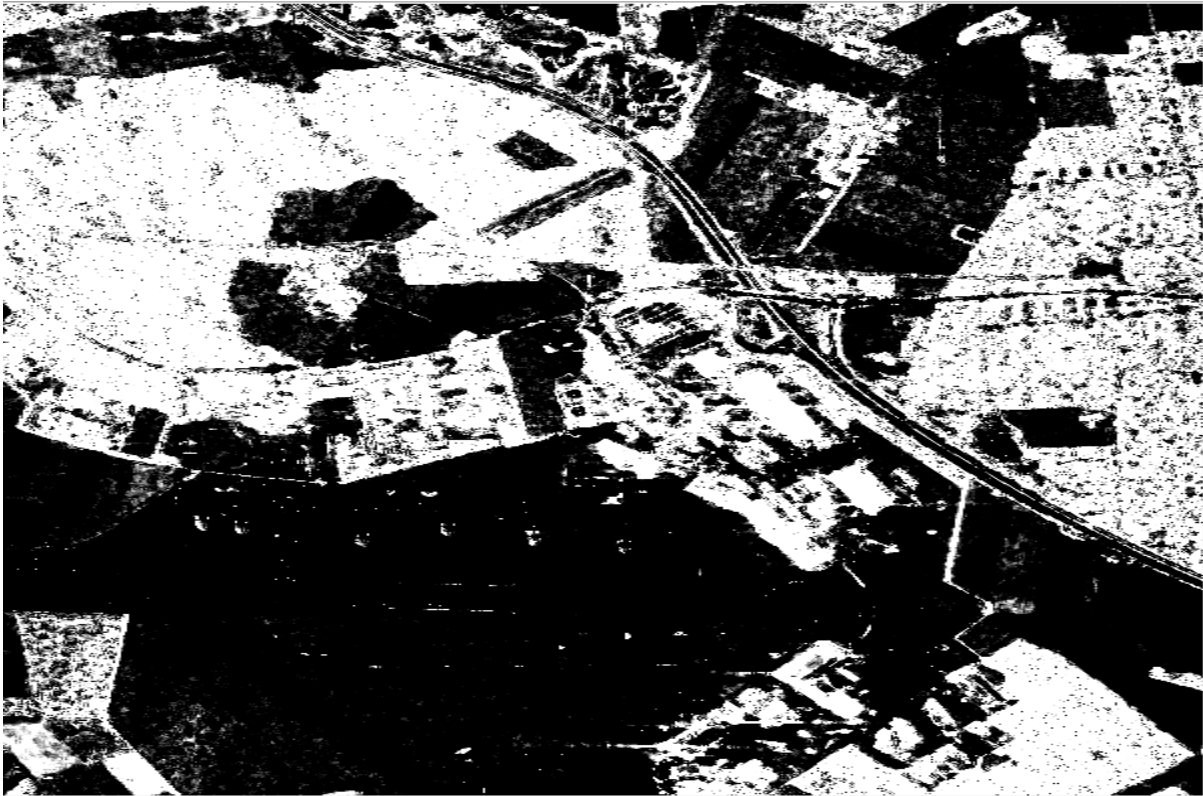


Figure (3.7) résultats de détection des surfaces nues avec la décomposition de X -Bragg.

La figure (3.7) représente le résultat de la méthode de détection des surfaces nues avec l'estimation de l'angle de rugosité par le modèle de X-Bragg. En remarque que les surfaces nues sont bien détectées.

- La couleur noire représente les sols nus.
- Nous pouvons indiquer que la zone autour de la piste d'atterrissage de l'aéroport est une zone surfacique car elle est colorée en noire.
- Les toitures des bâtiments sont également classées comme sol nu.
- Les autres zones colorées en blanc sont indéfinies.

On peut conclure que la classification utilisant ce seuil a des résultats acceptables.

### 3.6. Décomposition de Freeman-Durden :

Pour une meilleure détection des cibles (surfaces nues) dans une image SAR, il est préférable d'utiliser la méthode de décomposition de Freeman-Durden.

Comme mentionné dans le chapitre précédant, cette méthode se caractérise par trois types de diffusion : diffusion de surface, diffusion de double rebond, diffusion de volume.

Afin de mieux représenter les résultats de la méthode de décomposition de Freeman-Durden, nous allons faire nos études sur une petite zone agricole de la région Casa-grandA2.

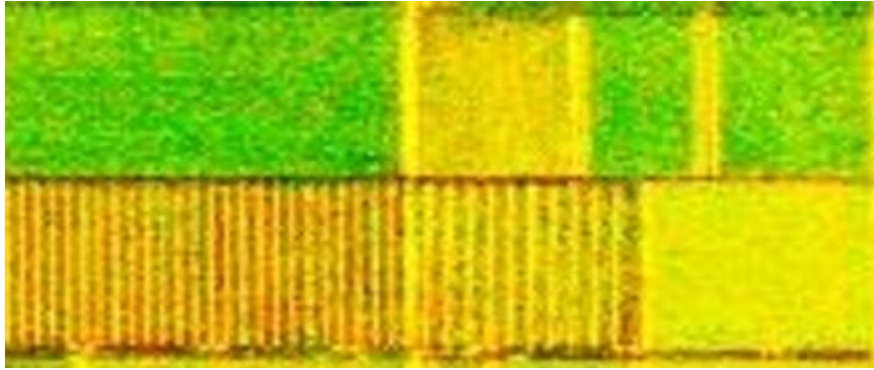


Figure (3.8) La zone étudiée dans la région Casa-grandA2.

En basant sur un programme qui montre la différence entre les deux bandes utilisées dans la télédétection de cette zone, on obtient les figures suivantes :

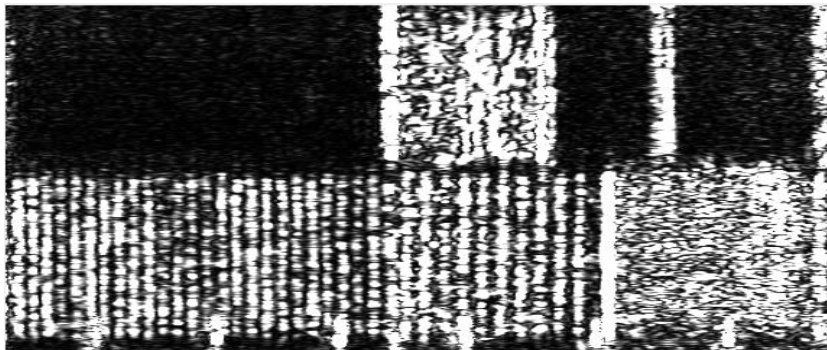


Figure (3.9) résultat en utilisant la bande P.

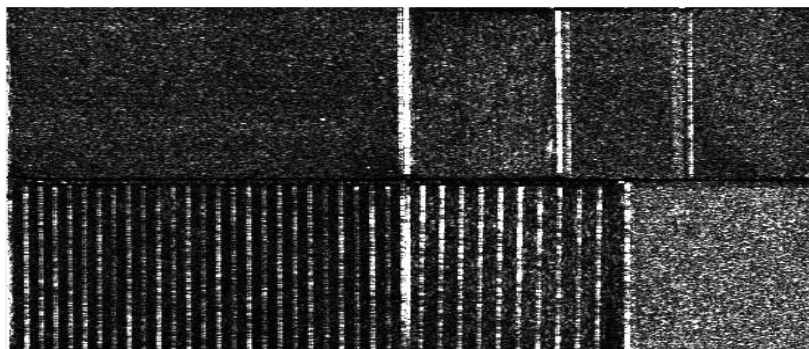


Figure (3.10) résultat en utilisant la bande L.

D'après les figures obtenues, on remarque que la pénétration est très grande dans la bande P en comparant avec la bande L (plus la fréquence est faible et la longueur d'onde est élevée plus la pénétration est grande), ce qui permet d'observer plus de détails (même en dessus de la terre).

Par conséquent, la bande L est la mieux adaptée pour les espaces d'agriculture et permet de mieux étudier les propriétés de la végétation et donc c'est la bande la plus utilisée.

### 3.6.1. Détection avec la décomposition de Freeman-Durden :

Afin de détecter les surfaces nues avec la méthode de Freeman-Durden, nous avons utilisé un programme dont on fait une adaptation de la matrice C.

#### 3.6.1.1. L'organigramme de la décomposition Freeman-Durden :

L'organigramme ci-dessus résume les étapes suivies dans la programmation qui a abouti à la détection des différents mécanismes de diffusion dans la zone étudiée :

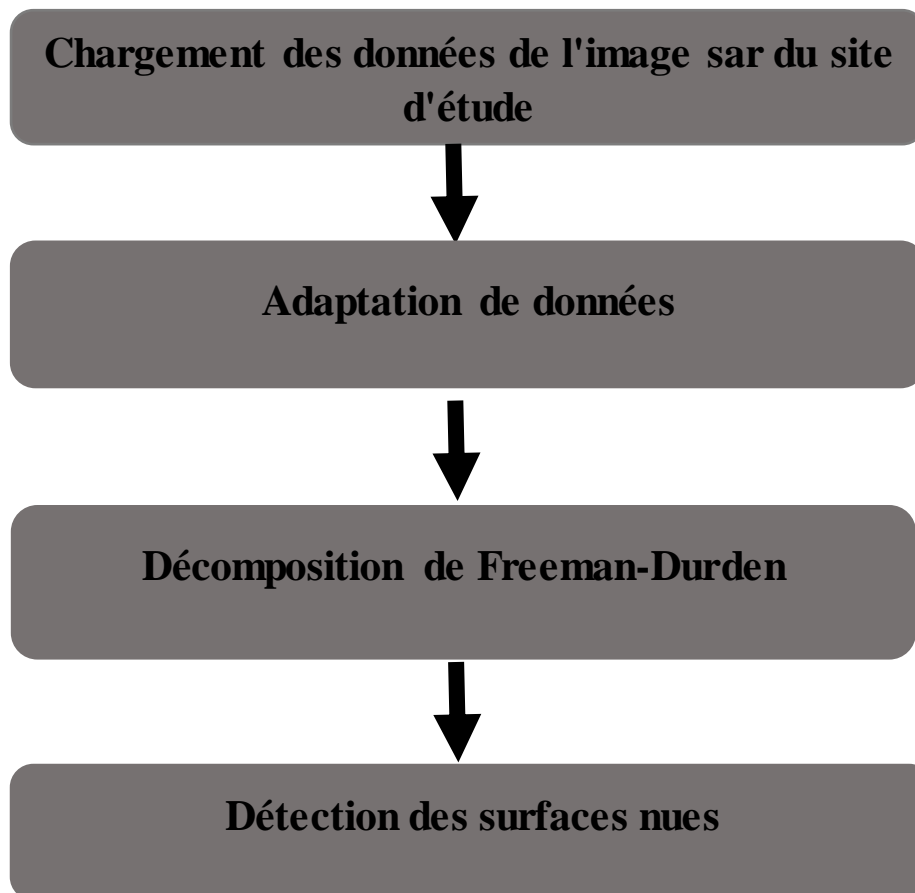


Figure (3.11) l'organigramme de la décomposition de Freeman-Durden.

3.6.1.2. L'algorithme de la décomposition de Freeman-Durden :

L'algorithme de cette méthode est basé sur le modèle obtenu à partir de la matrice de cohérence qui représente la somme des trois types de diffusion : surface, volume, double rebond.

$$[T] = P_S [T] + P_V [T] + P_{DB} [T] \quad (3.9)$$

Où :  $P_S P_V P_{DB}$  représente la puissance de chaque type de diffusion

$$P = P_S + P_V + P_{DB} = P_{11} + P_{22} + P_{33} = P_{11}(\theta) + P_{22}(\theta) + P_{33}(\theta) \quad (3.10)$$

Où :

$P_{11} + P_{22} + P_{33}$  représentent les éléments diagonaux de la matrice de cohérence

$P_{11}(\theta) + P_{22}(\theta) + P_{33}(\theta)$  représentent les éléments diagonaux de la matrice de cohérence adaptée.

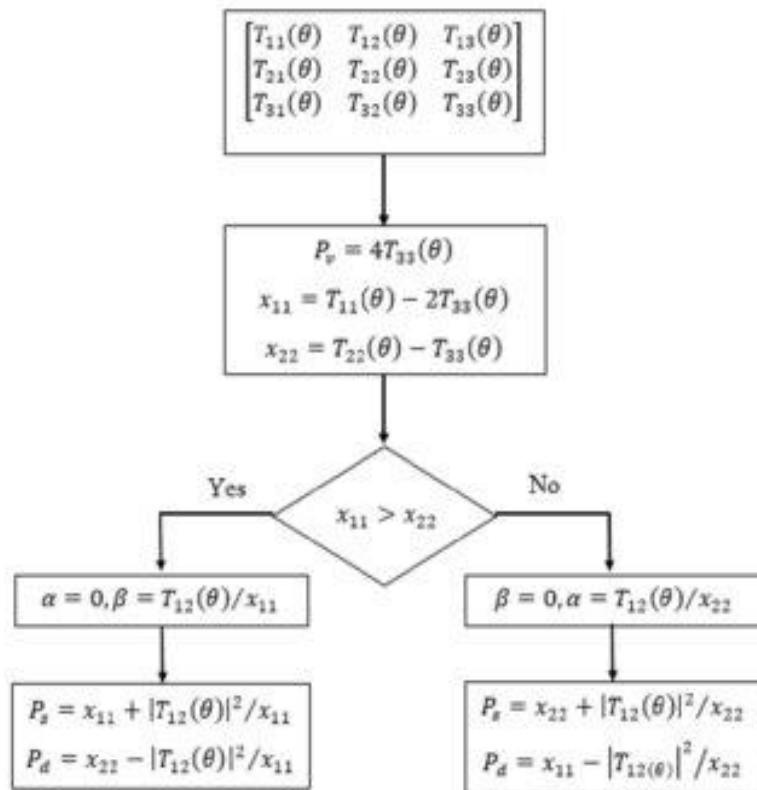


Figure (3.12) L'algorithme de la décomposition de Freeman-Durden.



## 3.6.2.Résultats :

- a. Dans la figure (3.13) où nous avons utilisé la bande de fréquence P, on remarque la forte présence de la couleur bleue qui est associée à la diffusion surfacique.

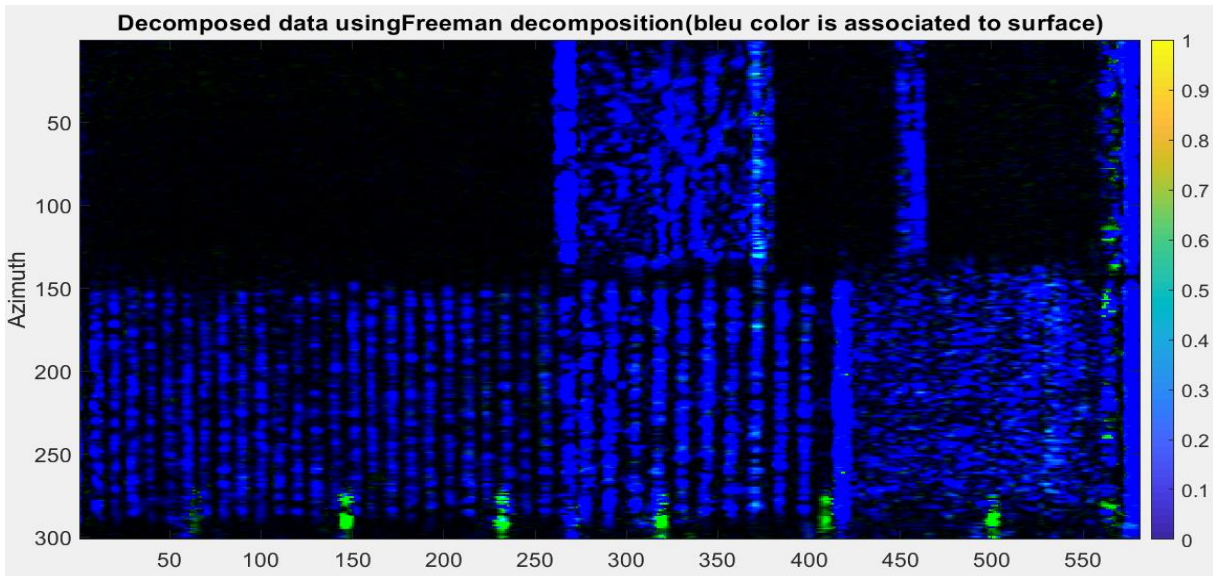


Figure (3.13) décomposition de Freeman-Durden avec la bande P.

- b. Dans la figure (3.14) où nous avons utilisé la bande de fréquence L, on remarque la présence de la couleur verte qui est associée à la diffusion volumique.

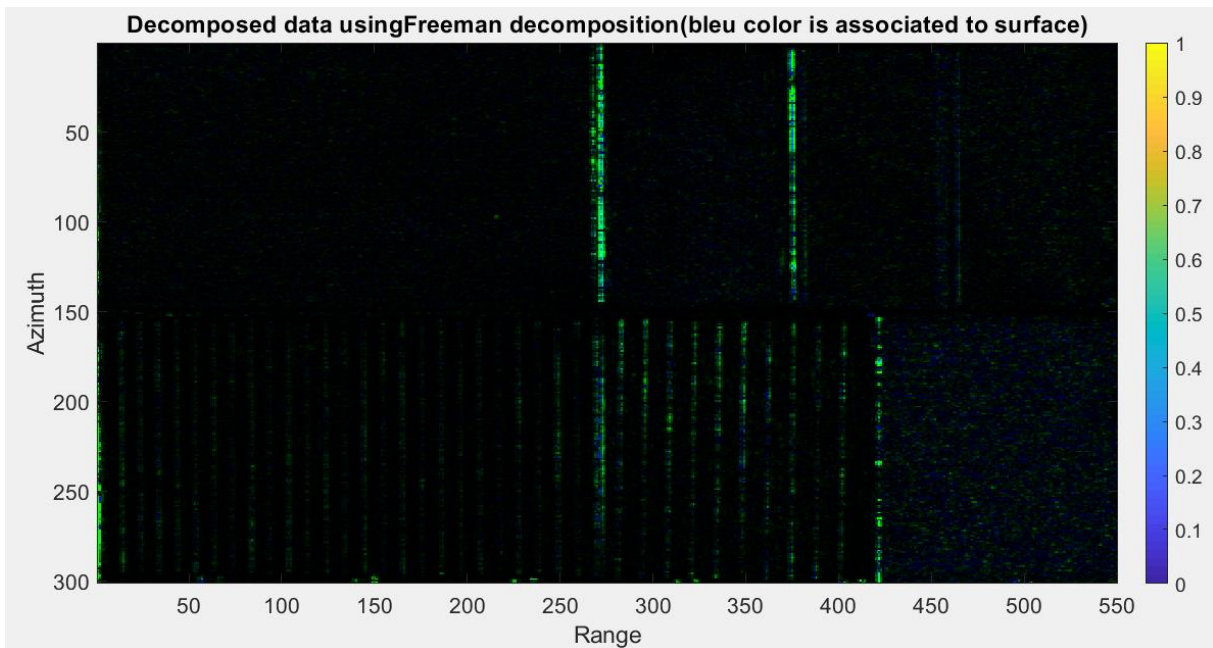


Figure (3.14) décomposition de Freeman-Durden avec la bande L.

c. L'apparition du taux de rugosité dans les bandes utilisées :

- La bande P

Le chatoyement en vert et en jaune apparaît dans la figure ci-dessus illustre le taux de rugosité dans la surface étudiée.

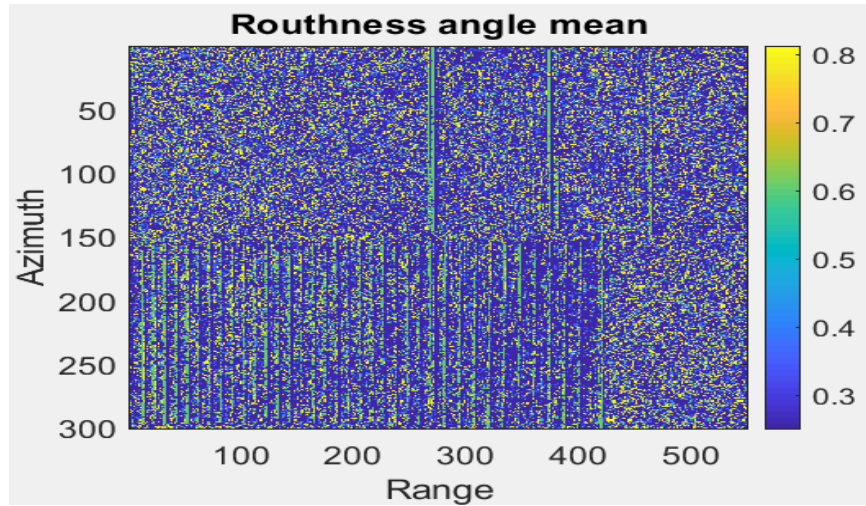


Figure (3.15) Angle de rugosité de la bande P.

La figure suivante permet de discriminer les zones de surfaces nues des autres zones et de mieux les observer.

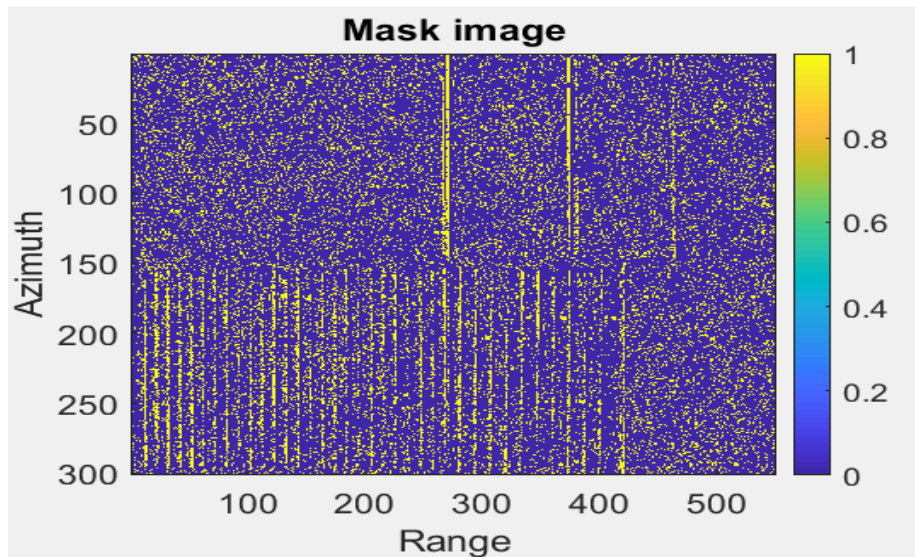


Figure (3.16) discrimination des surfaces nues.

- Bande L :
- a. L'angle de rugosité :

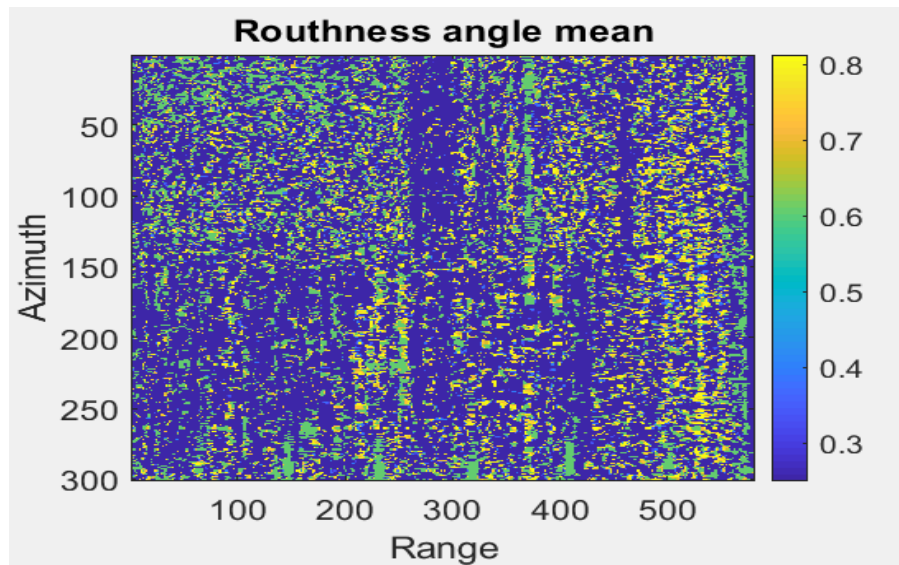


Figure (3.17) Angle de rugosité de la bande L.

- b. Discrimination de la surface :

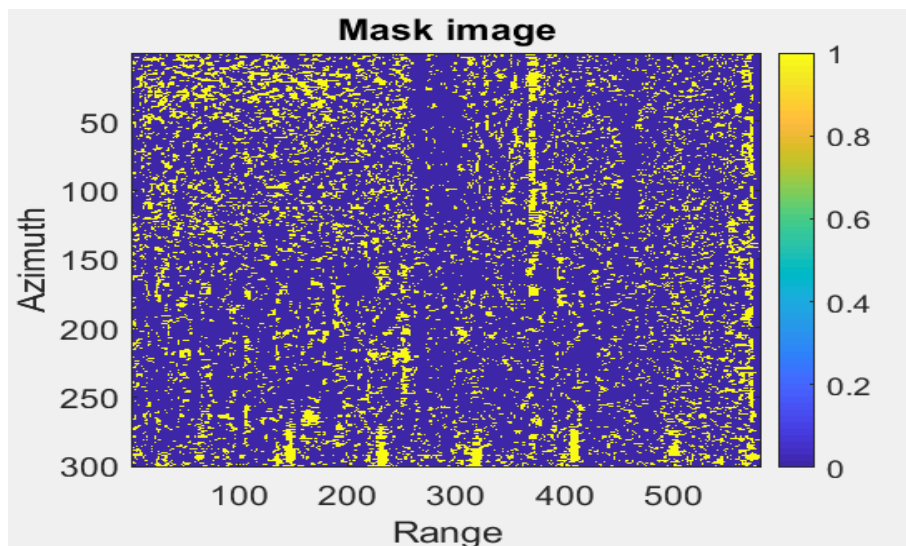


Figure (3.18) Discrimination de surface de la bande L.

Dans cette bande, on remarque que l'angle de rugosité la discrimination de surface apparaissent mieux que la bande précédente ce qui permet une meilleure détection

### 3.6.2.1. Application de la décomposition de Freeman-Durden sur la zone Oberpfaffenhofen :

Nous allons appliquer le programme basant sur la décomposition de Freeman-Durden pour détecter les sols nus au niveau de notre zone d'étude principale (Oberpfaffenhofen).

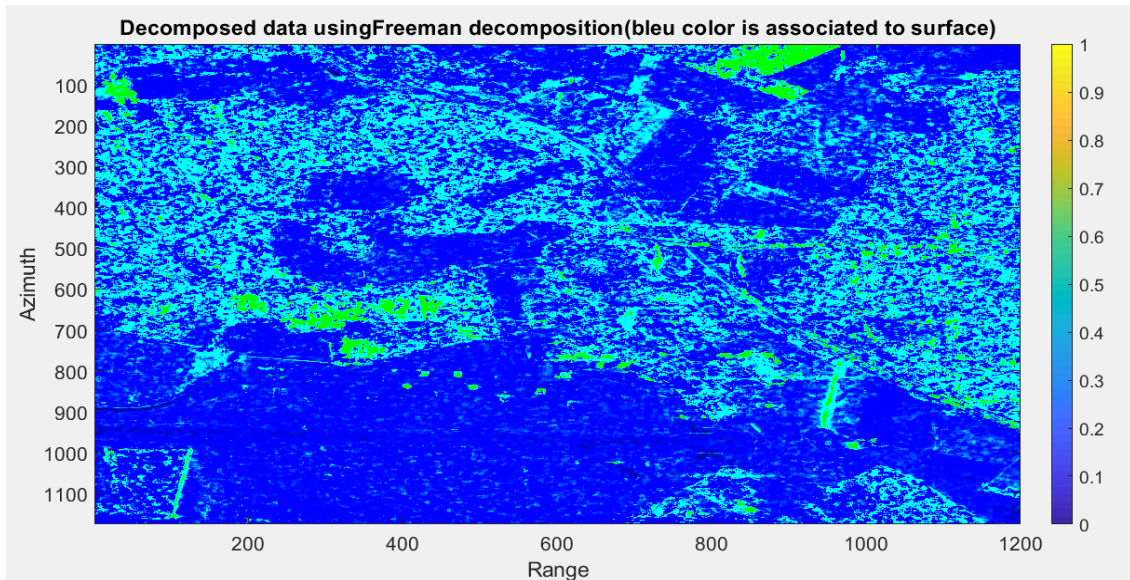


Figure (3.19) résultats de détection des surfaces nues avec la décomposition de Freeman-Durden.

- Les sols nus ont été bien détectés, ils se présentent en couleur bleu foncé sur la figure.
- La zone autour de la piste d'atterrissage de l'aéroport est de couleur bleu foncé aussi, ce résultat est confirmé en référant à l'image optique de cette zone.
- Les toitures des bâtiments sont aussi classées comme sols nus.
- La couleur verte présente sur la figure est associée aux terres agricoles.
- Les autres zones colorées en bleu clair sont des zones indéfinies.

Donc on peut conclure que cette méthode de décomposition donne des résultats acceptables.

### 3.7. Conclusion :

Dans ce dernier chapitre nous avons représenté les résultats de deux méthodes de détection des surfaces nues, la première méthode consiste à utiliser la décomposition de X-Bragg à l'aide de la matrice la matrice de cohérence, et la deuxième méthode avec la décomposition de Freeman-Durden à l'aide d'une adaptation de la matrice de cohérence utilisée dans la première méthode.

D'après les résultats obtenus on a conclut que la méthode de décomposition de X-Bragg donne de très bon résultat pour la détection des surfaces nues dans les images SAR en le comparent avec la méthode de décomposition de Freeman-Durden, le seul inconvénient est la nécessité de connaître les données de l'image étudiée, cette dernière peut être éliminée par une méthode basée sur l'intelligence artificielle qui permet de détecter les surfaces nues de n'importe quelle image SAR.

# Conclusion générale

## *Conclusion générale*

Le travail mené au cours de ce mémoire avait pour objectif principal de détecter les surfaces nues rugueuses, nous avons d'abord eu besoin de discriminer la surface du sol en récupérant l'angle de rugosité, cela en appliquant la nouvelle méthode de détection basée sur le modèle X-Bragg sur les données polarimétriques d'une image SAR.

Cette méthode a d'abord été appliquée sur des données simulées qui englobaient différents mécanismes de diffusion possibles, cette simulation nous a permis de déterminer un seuil que nous utiliserons pour les données réelles d'une image SAR.

Ensuite, la méthode de X-Bragg a été appliquée sur des données réelles d'un site d'étude, en se référant à l'image optique du site, les résultats ont pu être vérifiés ce qui signifie que l'utilisation de ce seuil permet de détecter les surfaces nues et donne des résultats acceptables.

Pour l'évaluation de notre travail, nous avons comparé la méthode de X-Bragg avec la méthode de Freeman-Durden qui est beaucoup utilisée.

Les résultats obtenus montrent que la méthode de X-Bragg donne des résultats satisfaisants pour la détection des surfaces nues rugueuses.

## *Bibliographie*

- [1] Thèse université de Batna2, « techniques\_radars.pdf ».
- [2] J.-S. Lee et E. Pottier, *Polarimetric Radar Imaging: From Basics to Applications*. CRC Press, 2017.
- [3] Cedric Lardeux, «Apport des données radar polarimétriques pour la cartographie en milieu tropical ».Université Paris-Est,Mai 2010
- [4] « These de magister TAHRAOUI SANS ANNEXE.pdf ».
- [5] R. Guida, A. Iodice, D. Riccio, et U. Stilla, « Model-Based Interpretation of High-Resolution SAR Images of Buildings », *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 1, n° 2, p. 107-119, juin 2008, doi: 10.1109/JSTARS.2008.2001155.
- [6] H. Zhong, J. Zhang, et G. Liu, « Robust Polarimetric SAR Despeckling Based on Nonlocal Means and Distributed Lee Filter », *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 52, n° 7, p. 4198-4210, juill. 2014, doi: 10.1109/TGRS.2013.2280278.
- [7] J. R. Schott, *Fundamentals of Polarimetric Remote Sensing*. SPIE Press, 2009.
- [8] F. Nunziata, A. Gambardella, et M. Migliaccio, « On the Mueller Scattering Matrix for SAR Sea Oil Slick Observation », *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 5, n° 4, p. 691-695, oct. 2008, doi: 10.1109/LGRS.2008.2003127.
- [9] T. T. Cai et T. Jiang, « Limiting laws of coherence of random matrices with applications to testing covariance structure and construction of compressed sensing matrices », *The Annals of Statistics*, vol. 39, n° 3, p. 1496-1525, juin 2011, doi: 10.1214/11-AOS879.
- [10] P. C. Walimbe, K. D. Takale, P. S. Kulkarni, et S. D. Kulkarni, « Precise Evaluation of Spatial Characteristics of Periodically Precipitating Systems via Measurement of RGB (Red, Green, and Blue) Values of Pattern Images », *Langmuir*, vol. 37, n° 27, p. 8212-8221, juill. 2021, doi: 10.1021/acs.langmuir.1c00921.
- [11] S. Jammali, « Analyse des signaux radars polarimétriques en bandes C et L pour le suivi de l'humidité », p. 103.
- [12] E. Krogager, D. K. Staykova, V. Alberga, A. Danklmayer, et M. Chandra, « Comparison of Methods for Classification of Land Cover Using Polarimetric SAR Data », p. 4.
- [13] M. B. Haddad et M. A. Belhadj-Aissa, « Décompositions polarimétriques des images radar SAR associées aux signatures polarimétriques des cibles au sol », p. 85.



- [14] F. Tupin *et al.*, « Thèse soutenue à SUPÉLEC le 10 décembre 2013 », p. 144.
- [15] M. Y. Smara, M. A. Belhadj-Aissa, M. B. Haddad, M. Y. Chibani, et M. S. Kahlouche, « Caractérisation de l'état de surface et optimisation de la cohérence interférométrique par utilisation de la polarimétrie radar », p. 119.
- [16] « \_Hajnsek et al. - 2009 - Potential of Estimating Soil Moisture Under Vegeta.pdf ».
- [17] « \_Hajnsek et al. - 2003 - Inversion of surface parameters from polarimetric .pdf ».
- [18] \_souissi, « Caractérisation de l'état de surface et optimisation de la cohérence interférométrique par utilisation de la polarimétrie radar. Université des Sciences et de la Technologie Houari BOUMEDIENE » ».
- [19] Souissi, « Caractérisation de l'état de surface et optimisation de la cohérence interférométrique par utilisation de la polarimétrie radar. Université des Sciences et de la Technologie Houari BOUMEDIENE »
- [20] S. Tahraoui et M. Ouarzeddine, « A New Approach for rough Surfaces Detection Based on extended Bragg covariance matrix model », p. 6, 2020.

### *Webographie :*

- [21] <https://eo-college.org/courses/principes-de-la-retrodifusion-radar/>