



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE



Université Saad Dahleb de Blida

Institut d'Aéronautique et des Études Spatiales

Mémoire présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Domaine : aéronautique

Spécialité : CNS / ATM

Intitulé :

**étude comparative des méthodes d'optimisation
métaheuristique de la cohérence SAR interféro-polarimétric**

Préparé par : - MERRIOUA Mohammed el amine

- KEBBAB YOUNES

Jury d'évaluation :

- Promoteur : Mr.Sofiane Tahraoui, Université saad dahleb 1
- Président du jury : Mr.Amzedroub, Université saad dahleb 1
- Examineurs : Mr.Sabri Nessim Université saad dahleb 1

Année universitaire

2021- 2022

Remerciement

En préambule à ce mémoire nous remerciant ALLAH qui nous aide et nous donne de la patience, du courage et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

Nous voudrions tout d'abord adresse nos gratitude à notre encadreur TAHRAOUI SOFIANE à qui revient le mérite d'avoir su nous remettre sur la bonne voie à chaque fois que nous m'égarions sur la sinieuse route de la recherche. On le remercie pour son encadrement exceptionnel, pour ça patience et ça disponibilité durant notre préparation malgré ça charge académique et professionnel.

Un remerciement spéciale à nos parent, merci de nous avoir amené à cette étape importante de notre vie, merci de partager avec nous tous les détails de notre cheminement éducatif, merci pour votre patience vos encouragement, vos conseil pour votre aide ... merci infiniment nos chers parent

A nos amies qui nous a aidez de réaliser un rêve, qui nous encourage toujours et nous aide aux recherches et dirais c'est une obsession vous allez la passer, nous a facilité l'accès à un monde sans cesse à découvrir. Nous disons encore merci.

A nos enseignants, Aux honorables membres du jury d'avoir accepté de faire partie de nos jury, pour leur patience et leur abnégation à défricher cette initiation ou tentative d'investir l'inconnu.

Enfin, à la communauté universitaire, tous corps confondus qui déploient des efforts considérables- afin d'ériger l'université algérienne au statut de berceau de la connaissance. Je dirai aussi merci.

Dédicaces

Je dédie cet ouvrage

- ❖ *A l'homme, mon précieux offre du dieu, qui doit ma vie, ma réussite et tout mon respect : mon chère père YOUCEF.*
- ❖ *A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui a jamais dit non à mes exigences : Ma Reine mon adorable mère NEDJMA.*
- ❖ *A mes sœurs : Amina , Faten et halouma*
- ❖ *A tout la famille Mokhbi*
- ❖ *A tout la famille Merrioua*
- ❖ *A mon binôme Kebab qui j'apprécie beaucoup ainsi qu'à toute sa famille.*
- ❖ *A tous ceux qui nous ont aidés dans notre thèse Mr.Hadoun-hakim Mr.Bencherchali .*
- ❖ *A toute mes amis(e).*
- ❖ *A toute ma promo AVIONIQUE et CNS/ATM 2017.*

Mohammed el Amin

Dédicaces

Je dédie ce travail

- ✿ *A l'homme, ma précieuse offre du dieu, qui doit ma vie, ma réussite et tout mon respect : mon cher père AYACHE.*
- ✿ *A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non à mes demandes : ma charmante maman FARIDA.*
- ✿ *A mes frères*
- ✿ *A toute la famille KEBBAB*
- ✿ *A toute la famille DJAALOUT*
- ✿ *A mon compagnon MED EL AMINE & à toute sa famille.*
- ✿ *A mes amis : YOUCEF,AYMEN,TAHA,OUSSAMA,SABRE ,IMAD, RAHIM, ISLAM,LAMARI, MARINA, TAREK, WALID ,AMINE*
- ✿ *A tous ceux qui nous ont aidés dans notre thèse Mr.Hadoun-hakim Mr.Bencherchali .*
- ✿ *A tout ma promo AVIONIQUE et CNS/ATM 2017*

YOUNES

Table de matière

Résumé

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Liste des symboles

page

Introduction

Introduction générale..... 1

Revue bibliographique

Chapitre I : : La télédétection et le Radar SAR

1-1- La télédétection 5

1-2- Présentation de Radar..... 7

1-2-1- Historique..... 7

1-2-2- Définition..... 7

1-2-3- Principe de fonctionnement du Radar..... 8

1-3- Le radar a synthese d'ouverture « SAR »..... 9

1-3-1- Caractéristique de l'image SAR..... 11

1-3-2- Configuration géométrique du SAR..... 11

1-3-3- Résolution d'un SAR..... 12

1-3-4- Technique basée sur l'imagerie SAR..... 14

1-3-4-1- Polarimétrie..... 14

A- Polarisation d'une onde..... 14

a- Système cartésien.....	14
B- Ellipse de polarisation.....	14
C- Vecteur de Jones.....	15
1-3-4-1-1- Matrice de diffusion pour la caractérisation de cibles simples.	16
1-3-4-1-2- Matrice de diffusion.....	17
1-3-4-1-3- Vecteur de rétrodiffusion.....	18
1-3-4-1-4- Matrices de covariance et de cohérence.....	19
1-3-4-1-5- Analyse de la matrice de Sinclair.....	19
1-3-4-2- Interférométrie SAR.....	19
1-3-4-2-1- Géométrie et principes de base.....	20
1-3-4-2-2- Notion de phase interférométrique.....	22
1-3-4-2-3- l'interférogramme.....	22
1-3-4-2-4- Cohérence interférométrique.....	24
1-3-4-3- Pol-INSAR.....	25
1-3-4-3-1- La cohérence de Pol-INSAR.....	26

Chapitre 02 : Etude théorique des méthodes d'inversion

2-1- L'Algorithme de l'optimisation.....	29
2-1-1- Introduction.....	29
2-1-2- Algorithme de pollinisation des fleurs complexes.....	30
2-1-2-1- Optimisation de la cohérence interférométrique a l'aide de FPA.....	32
2-1-3- recherche du coucou avec vol de lévy	35
2-1-3-1- l'algorithme de Recherche du coucou	36
2-1-3-2- Optimisation de la cohérence interférométrique a l'aide de CSA.....	39

Chapitre 03 : Résultats et Discussions

3-1- Présentation des données.....	42
---	-----------

3-2- L'effet de la dispersion de polarisation sur la cohérence.....	44
3-3- Comparaison de la phase pour chacun des résultats des deux méthodes	46
3-4- L'efficacité de l'algorithme par rapport au temps.....	48
3-5- Comparaison entre les resultat de les deux méthode FPA/CSA de l'image globale.....	49
Conclusion.....	52
Référence bibliographique.....	54

Résumé

Ces dernières années, la télédétection est utilisée dans de nombreux domaines et fournit des informations indispensables dans des domaines qui ne peuvent être obtenus par les méthodes traditionnelles.

Grâce à ses avantages, les radars à synthèse d'ouverture ont pris une grande place dans le domaine de l'observation de la terre et de la télédétection dans plusieurs domaines comme l'agriculture, l'industrie et l'environnement....

Parmi les applications qui se sont avérées beaucoup offrir dans ce domaine, la polarimétrie interférométrique (PolInSAR), nous permet d'étudier et d'optimiser la cohérence liée à certains mécanismes de diffusions.

Ce mémoire présente les résultats d'investigation faite pour étudier et examiner les performances (temps de mise en œuvre, résultats et convergence) de deux méthodes d'optimisation de la cohérence interférométrique à travers des méthodes d'optimisation méta-heuristique nouvellement publiées, à savoir l'Algorithme de pollinisation des fleurs, et l'Algorithme de recherche de coucou.

Mots Clés :Optimisation, Polarimétrie, Interférométrie, RADAR à Synthèse d'ouverture, PolInSAR, SAR, FPA, CSA, recherche de coucou, Fleur Pollinisation.

Abstract

In recent years, remote sensing has been used in many fields and provides much-needed information in areas that cannot be obtained by traditional methods.

Thanks to its advantages, synthetic aperture radars have taken a great place in the field of earth observation and remote sensing in several fields such as agriculture, industry and the environment....

Among the applications that have proven to offer a lot in this field, interferometric polarimetry (PolInSAR), allows us to study and optimize the coherence linked to certain diffusion mechanisms.

This thesis presents the results of an investigation made to study and examine the performance (implementation time, results and convergence) of two methods for optimizing interferometric coherence through newly published methodological optimization methods, namely Flower Pollination Algorithm, and cuckoo search Algorithm.

Keywords : Optimization , Polarimetry , Interferometry , RADAR aperture synthesis , PolInSAR , SAR. FPA, CSA, Flower pollination, cuckoo search.

ملخص

في السنوات الأخيرة، تم استخدام الاستشعار عن بعد في العديد من المجالات ويوفر معلومات تمس الحاجة إليها في المجالات التي لا يمكن الحصول عليها بالطرق التقليدية.

بفضل مزاياها، احتلت الرادارات ذات الفتحة التركيبية مكاناً رائعاً في مجال مراقبة الأرض والاستشعار عن بعد في عدة مجالات مثل الزراعة والصناعة والبيئة....

بدراسة (PolInSAR) من بين التطبيقات التي أثبتت أنها تقدم الكثير في هذا المجال، يسمح لنا قياس استقطاب التداخل وتحسين التماسك المتعلق بآليات انتشار معينة

تقدم هذه الرسالة نتائج التحقيق الذي تم إجراؤه لدراسة وفحص الأداء (وقت التنفيذ والنتائج والتقارب) لطريقتين لتحسين تماسك قياس التداخل من خلال طرق التحسين المنهجية المنشورة حديثاً وهي :

خوارزمية تلقح الأزهار، خوارزمية بحث الوقواق

الكلمات الرئيسية: التحسين ، قياس الاستقطاب ، قياس التداخل ، تركيب الفتحة ، ، تلقح زهرة ، بحث الوقواق ، CSA ، SAR FPA ، PolInSAR ، رادار

LISTE DES FIGURES
LISTE DES TABLEAUX
LISTE DES ABREVIATIONS

Liste des figures

Figure 1.1 : principe de la télédétection spatiale passive (Source: http://www.alertesmeteo.com/).....	05
Figure 1.2 : Illustration des principes de télédétection passive (à gauche) et de télédétection active (à droite). (Source de l'illustration : https://paititi.info/research-technology/remote-sensing-fromspace/).....	06
Figure 1.3 : Configuration géométrique d'une acquisition SAR.....	12
Figure 1.4 : Paramètres de l'ellipse de polarisation.....	15
Figure 1.5 : Réflexion d'une onde par un objet.....	17
Figure 1.6 : Principes de l'InSAR (source : https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/interferometrie-radar.xml).....	20
Figure 1.7 : Géométrie d'une acquisition SAR interférométrique.....	20
Figure 1.8 : Les informations de deux images SAR de la même zone cible acquises à des moments différents.....	23
Figure 1.9 : la technique PolInSAR.....	25
Figure 1.10 : Représentation de l'information PolInSar pour un pixel.....	26
Figure 1.11 : Géométrie du radar PolInSar.....	26
Figure 2.1 : Pollinisation des fleurs dans la nature.....	30
Figure 2.2 : L'organigramme de l'algorithme de FPA.....	34
Figure 2.3 : L'organigramme de l'algorithme de Cuckoo search.....	40
Figure 3.1 : Image optique des données de test dans in oberpfaffenhofen qui se compose de forêts (Rectangle bleu), terrains nus (rectangle rouge) et zone résidentielle (rectangle vert). (Google Earth).....	43
Figure 3.2 : Comparaison entre les phases , chaque colonne contient une région spécifique, la région A (rectangle vert sur la figure 13) contient de petites zones urbaines , une zone forestière dans la région B (bleu rectangle sur la figure 13) et une zone plate dans la région C (rectangle rouge sur la figure 13) qui contient une petite section de la piste de l'avion. chaque ligne contient une approche, première ligne de CSA, deuxième ligne de FPA.....	44

Liste des figures

Figure (3.3) : Comparaison entre la phase et les résidus associé, Colonne de gauche par optimisation CSA , colonne de droite par FPA.....	46
Figure(3.4) : l'optimisation de la phase d'Image optique par les deux méthodes FPA/CSA	48
Figure(3.5) : Le résidu de la pahse d'image optique par les deux méthode FPA/CSA.....	49

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Vecteurs de Jones dans la base $\{H,V\}$ correspondant à des états de polarisation canoniques.

Tableau 1.2 : Exemples de matrices de Sinclair de cibles canoniques.

Tableau 2.1 : Paramètres et limites sélectionnés pour FPA.

Tableau 3.1 : MEAN/STD des deux méthodes fleur et recherche dans les trois zones A ,B ,C.

Tableau 3.2 : changement de temps et de mean de cohérence Par rapport a la nombre de population.

Tableau 3.3 : changement de temps et de mean de cohérence par rapport a le nombre de nids.

Liste d'abréviation

SAR	Synthétique Aperture Radar.
RS	Télédétection (Remote Sensing).
PPI	Indicateur de position du plan.
SLAR	Radar aéroporté à visée latérale.
DEM	Détection électromagnétique.
SNR:	Rapport signal sur bruit.
SER	Surface Equivalente Radar.
IN-SAR	L'interférométrie de Synthétique Aperture Radar.
ALOS	Satellite d'observation terrestre acronyme.
POL-SAR	Polarimétrie de Synthétique Aperture Radar.
UAV	Véhicule aérien sans pilote.
SZP	Taille de la population (Population size).
SwP	Probabilité de commutation (probability switch).
N-NEST	Nombre de nids (Number of nests).
PoI-InSAR	L'interférométrie et la polarimétrie ensemble dans la Synthétique Aperture Radar.
FPA	L'algorithme de pollinisation des fleurs.
CSA	L'algorithme de recherche de coucou(cuckoo search)
CS	recherche de coucou (Cuckoo search)
FP	pollinisation des fleurs

Liste des Symboles

Liste des Symboles

T : la durée de l'impulsion

R : la distance entre le radar et la cible

G_t : le gain d'antenne émettrice

G_r : le gain d'antenne réceptrices

E_r : L'énergie reçue par le radar

λ : la longueur d'onde

α : une grandeur sans unité caractéristique du récepteur (appelée facteur de bruit)

k_B : la constante de Boltzmann

B_r : la bande équivalente de Brat (largeur de bande du récepteur)

T_0 : la température équivalente du bruit du récepteur

δ_r : La résolution en distance

c : la vitesse de la lumière

B : la bande passante du signal

θ_x : L'ouverture angulaire de l'antenne

L : la taille de l'antenne dans la direction azimutale.

R_0 : la distance entre l'antenne et le centre de l'empreinte au sol

LI : largeur de l'antenne

A : est une constante

E : champ électrique

E_x : champ électrique suivant x

E_y : champ électrique suivant y

E_{0x} : l'amplitude suivant x

E_{0y} : l'amplitude suivant y

δ_x et δ_y : les phases absolues respectives des deux composantes.

ψ : angles situé entre le grand axe de l'ellipse et la direction X

χ : représentant l'ouverture de l'ellipse

v : Linéaire verticale

Liste des Symboles

ρ : rapport de polarisation complexe

\mathbf{J} : Le vecteur de Stokes

P_T : La puissance totale diffusée par une cible radar

\vec{K} : Vecteur de rétrodiffusion

Ψ : un ensemble de matrices définissant une base de projection

ϕ : l'angle d'orientation de la cible par rapport à l'axe de visée du radar

ψ_L : Une base de dictionnaire

ψ_p : Une base de Pauli

S_{xy} : les éléments de la matrice se différencient par leurs indices, x est l'indice de la polarisation reçue et y celui de la polarisation émise

\mathbf{C}_3 : La matrice de covariance

\mathbf{T}_3 : La matrice de cohérence

α : la pente fait un angle avec l'horizontale

θ : un angle d'incidence

\mathbf{s}_1 , \mathbf{s}_2 : signaux reçus

γ : L'espérance mathématique étant supposée identique au moyennage spatial des pixels

γ_{SNR} : Le signal et le bruit étant décorrélés

γ_{temp} : La décorrélation temporelle n'intervient que dans le mode d'interférométrie multi-passes car les propriétés des réflecteurs peuvent changer entre deux acquisitions.

$\gamma_{spatial}$: La décorrélation spatial est due à la différence d'angle d'incidence des antennes interférométriques

\vec{k}_p : le vecteur de Pauli

\mathbf{T}_6 : une matrice positive hermitienne semi-définie 6x6

\mathbf{T}_{11} et \mathbf{T}_{12} : sont des matrices 3x3 contenant l'information polarimétrique pour chaque image

Ω_{12} : contient l'information interférométrique de phase des différents canaux entre les deux acquisitions.

ω_1 et ω_2 : les vecteurs complexes normalisés

Liste des Symboles

μ_1 et μ_2 : les nouveaux coefficients de diffusion

$\gamma(\vec{\mu}_1, \vec{\mu}_2)$: L'expression vectorielle généralisée et normalisée de la cohérence

X_i^t : l'itération de Pollen

g^* : la solution optimale à cette itération

x_i^{t+1} : Les principes locaux de pollinisation et de constance des fleurs

x_j^t et x_k^t : représentent des pollens des différentes fleurs de la même espèce végétale.

L : longueurs ont une distribution de probabilité de poids.

ξ : Facteur d'échelle

ϵ : Étape aléatoire locale

α : le facteur d'échelle d'étape

introduction

Introduction

Les radars à imagerie utilisent des ondes électromagnétiques dans la gamme de fréquence entre 1 et 10 GHz pour surmonter les problèmes de l'imagerie optique. Ceci permet d'obtenir des images "équivalentes" aux images optiques indépendamment des conditions météorologiques, jour et nuit, etc.

Aujourd'hui, l'utilisation de systèmes d'imagerie aéroportés ou satellitaires est devenu indispensable pour Surveiller et observer l'évolution de la Terre dans plusieurs domaines . Le radar est basé sur l'émission et Recevoir des ondes électromagnétiques (dans les bandes L, S, C, X, Ku et Ka) pour obtenir des informations diverses sur la zone d'observation. l'insensibilité relative des ondes électromagnétiques aux conditions météorologiques et que le radar est un système actif , fait le radar présente des avantages par rapport aux autres systèmes Imagerie (par exemple d'un imagerie radar dans une zone où les conditions de vision sont idéales fortement réduit du fait de la présence permanente du nuage). Le plus grand progrès des images radar est le radar a synthèse d'ouverture , cette technique appelée le radar a system SAR (Synthétique Aperture Radar) maintenant est la plus courante utilisée dans les systèmes d'imagerie tels que Système satellitaire RADARSAT.

Actuellement, un système SAR fournit des données pour l'application de techniques comme la polarimétrie, l'interférométrie et la tomographie. Ces techniques permettent de recueillir diverses informations sur la région d'intérêt. Il est alors possible de déterminer les propriétés du sol (rugosité, humidité), l'information sur la végétation (type de végétation et hauteur de cette végétation) ou encore de connaître la densité urbaine et l'évolution des villes au cours du temps. Cependant, ces techniques sont dépendantes des caractéristiques du système d'imagerie SAR. Leurs capacités à obtenir les informations de la région d'intérêt dépendent entre autres des résolutions du système imageur et de son RSB (rapport signal sur bruit).[1]

Une fois les données d'image collectées et examinées, nous constatons que l'image contient de légères erreurs . afin de développer l'image et de réduire les bruit ,on améliorés les facteurs de cohérence et de phase , car nous savons que l'optimisation est une branche de Mathématiques qui cherchent des solutions analytiques et numériques. Et c'est une solution des Problèmes qui consistent à déterminer le meilleur élément de l'ensemble, c'est-à-dire le critère quantité donnée.

Introduction

Dans notre cas, le meilleur composant est la cohérence maximale. Les chercheurs se sont inspirés de la nature plusieurs algorithmes d'amélioration et d'analyse après leur efficacité dans divers domaines, et parmi cela nous prenons deux méthodes d'algorithmes :

- Algorithme de pollinisation des fleurs
- Algorithme et coucou

En utilisant ces deux éléments, on analyse et améliore la cohérence des données.

chapitre 01
La télédétection et le Radar SAR

1-1- La télédétection:

La télédétection (Remote Sensing (RS)), la mesure ou l'acquisition d'informations d'un objet ou un phénomène par l'intermédiaire d'un instrument de mesure n'ayant pas de contact avec l'objet étudié (Figure 1.1). C'est l'utilisation à distance (par exemple, d'un drone, d'un avion, d'un engin spatial, d'un satellite ou encore d'un bateau) de n'importe quel type d'instrument permettant l'acquisition d'informations sur l'environnement. On fait souvent appel à des instruments tels qu'appareils photographiques, lasers, radars, sonars, sismographes ou gravimètres.

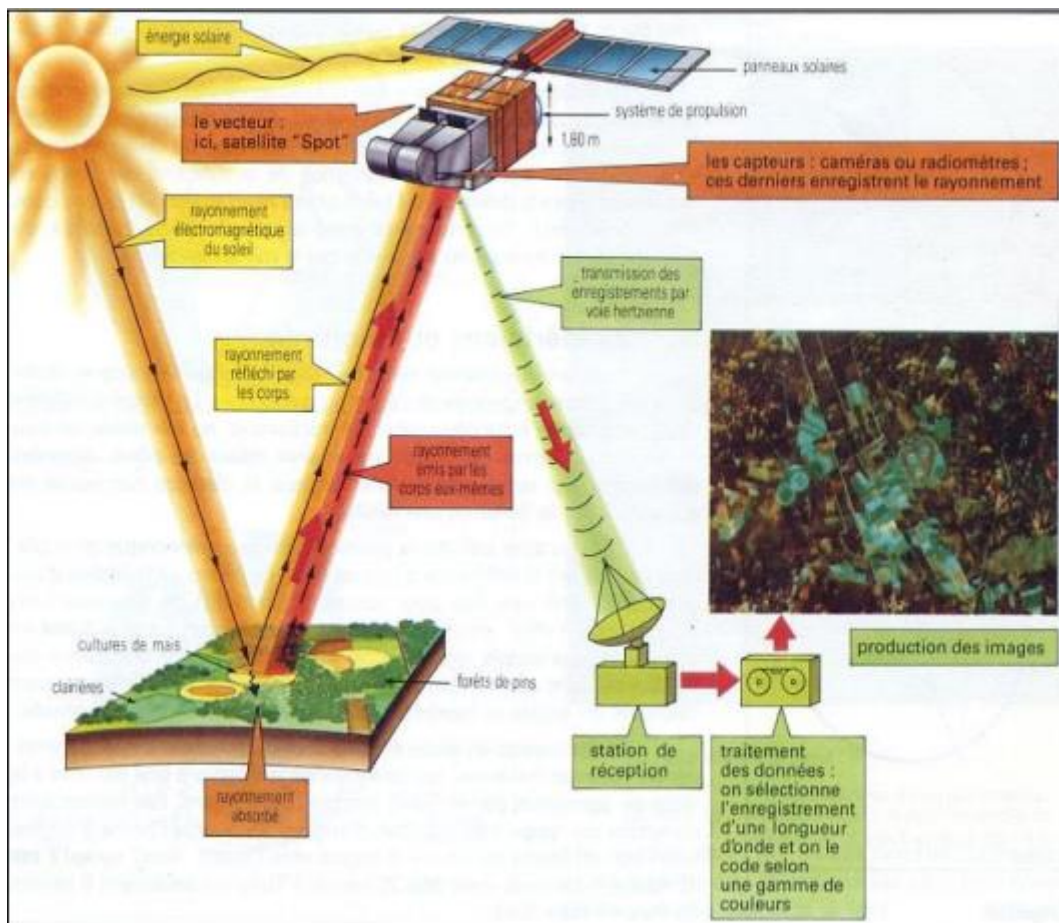


Figure (1.1) : Principe de la télédétection spatiale passive .

L'on distingue en général les moyens de télédétection « actif » et « passif » (Figure 1. 2):

- Télédétection passive: enregistrement du rayonnement naturel, fourni par la lumière ou la chaleur, qu'il soit émis, réfléchi ou réfracté (ex : photographies aériennes du paysage éclairé par la lumière du soleil ainsi que certaines images satellitaires comme (SENTINEL-2, LANDSAT, IKONOS, SPOT,...)).

- Télédétection active : enregistrement du rayonnement que réfléchit l'objet ou le paysage

« Illuminé » par l'appareil de mesure (ex : images radar (SENTINEL-1,...))

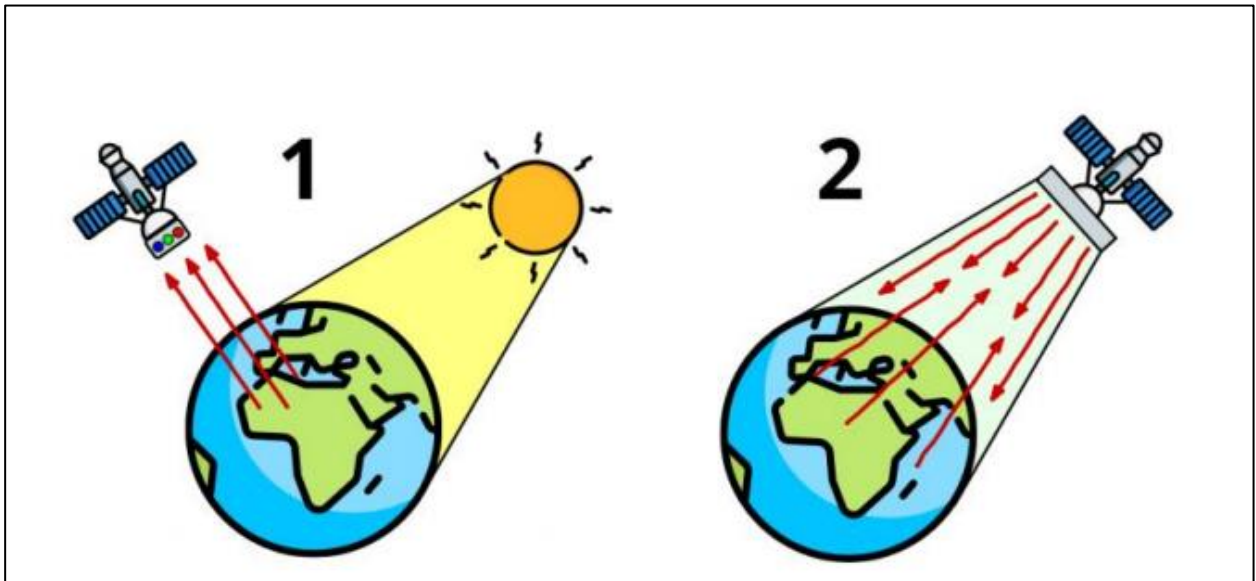


Figure (1.2) : Illustration des principes de télédétection passive (à gauche) et de télédétection active (à droite).

La télédétection spatiale mesure les rayonnements électromagnétiques émis ou réfléchis des objets étudiés (végétation, sol, bâti, surfaces d'eau ou masses d'air, etc) dans un certain domaine de longueurs d'ondes ou fréquences (infrarouge, visible, micro-ondes). Le rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi par ces objets peut varier en intensité selon la nature de ces objets et selon leur état (teneur en eau, chaleur, etc), ce qui permet d'utiliser ce rayonnement électromagnétique pour les identifier et les caractériser. Certains instruments de télédétection utilisent des ondes sonores de façon similaire, et d'autres mesurent des variations dans des champs magnétiques ou gravitaires. [2]

La télédétection consiste à mesurer ou plus généralement acquérir de l'information sur un objet ou un phénomène, par l'intermédiaire d'un instrument n'ayant pas de contact avec l'objet étudié. Ce type de méthode d'acquisition utilise généralement la mesure du rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi par les objets étudiés dans un certain domaine de fréquence. Dans ce contexte, l'imagerie optique et l'imagerie radar

A synthèse d'ouverture représentent deux sources d'informations complémentaires utilisables pour l'observation des objets géophysiques terrestres.

1-2- Présentation de Radar :

1-2-1- Historique :

Dès le début du XXème siècle, Nicolas Tesla évoque l'idée d'utiliser l'électromagnétisme pour détecter des objets. Une première validation expérimentale fut réalisée en 1904 par Christian Hülsmeyer, qui a utilisé cette idée pour détecter des bateaux [3]. Pendant toute la première moitié du XXème siècle, ces idées et les technologies associées ont été développées.

Le premier radar imageur, développé pendant la Seconde Guerre mondiale, utilisait le B-Scan qui produisait une image dans un format rectangulaire. La relation non linéaire entre l'angle et la distance par rapport au côté de l'avion produisait de grandes distorsions sur l'écran. Cette distorsion a été grandement améliorée par le développement du Plan Position Indicator (PPI) [4]. Son faisceau d'antenne était tourné de 360° autour de l'avion et une image du sol était produite. Dans les années 1950, le radar aéroporté à visée latérale (SLAR) a été développé. Le balayage a été réalisé avec le SLAR par un faisceau fixe pointé sur le côté, le mouvement de l'avion déplaçant le faisceau sur le terrain. À travers le terrain. Les premières versions des systèmes SLAR étaient principalement utilisées à des fins de reconnaissance militaire. Jusqu'au milieu des années 1960. Ces développements se sont poursuivis par la suite, avec par exemple l'apparition du SAR [5], et se poursuivent encore aujourd'hui.

Le mot radar est un acronyme pour American Express Détection et télémétrie radio, c'est-à-dire détection radio et mesure de distance. Jusqu'au milieu des années 1940, l'anglais utilisait le terme de radiolocalisation, tandis que le français utilisait le terme de détection électromagnétique (DEM). C'est un système qui éclaire une partie de l'espace avec des ondes électromagnétiques et reçoit les ondes réfléchies par les objets qui s'y trouvent. Ces ondes peuvent caractériser des objets : leur position horizontale, leur hauteur, leur vitesse et parfois même leur forme.

1-2-2- Définition :

Le radar, Radiodetection And Ranging en anglais, est un système électronique qui émet et reçoit des ondes électromagnétiques, des ondes incidentes sont émises vers une zone d'intérêt. Les éléments qui composent la région d'intérêt présentent un

comportement diélectrique aux ondes électromagnétiques incidentes et rétrodiffusent les ondes incidentes en fonction de leurs propriétés diélectriques. Ces ondes réfléchies sont ensuite reçues et détectées par le système radar. Ces ondes électromagnétiques reçues par l'antenne sont ensuite traitées par des procédés de traitement du signal afin de récupérer des informations sur les objets dans la région d'intérêt. Résultats du traitement des ondes électromagnétiques.

La réussite de ces méthodes dépend de plusieurs caractéristiques :

- La longueur d'onde λ_c du signal émis, qui affecte le phénomène physique observé.
- La forme d'onde utilisée affecte également le rapport signal sur bruit (SNR).
- Basé uniquement sur les performances générales des systèmes radar.
- Définir les méthodes d'imagerie possibles et les modes d'acquisition pour la précision image générée.
- Interaction des ondes incidentes avec des objets dans la région d'intérêt.

1-2-3- Principe de fonctionnement du Radar :

Un Radar est un capteur d'ondes électromagnétiques comprenant un émetteur, une antenne et un récepteur de micro-ondes pulsées . L'antenne peut être partagée dans le temps entre l'émetteur et le récepteur en utilisant un circulateur comme le montre la figure (1.1).

L'émetteur lance à intervalles réguliers (par exemple, toutes les millisecondes) des signaux très brefs (par exemple, de 1 microseconde de durée), à une fréquence donnée (correspondant à une longueur d'onde variant, selon les applications, entre quelques mètres et quelques millimètres). Le signal n'est pas émis dans toutes les directions. Ces cibles réfléchissent les signaux reçus, et l'antenne capte les échos avec un décalage par rapport à l'émission, décalage d'autant plus grand que les cibles sont d'autant plus lointaines [6] [7].

Les ondes vont se propager dans l'espace à la vitesse $c \approx 3.108 \text{ m. s}^{-1}$. L'une des propriétés des ondes électromagnétiques est qu'elles sont (partiellement) réfléchies lorsqu'elles rencontrent un obstacle, par exemple un bâtiment. Si la puissance des ondes réfléchies est suffisante, elles peuvent alors être captées par le récepteur.

L'énergie E_r reçue par le radar d'une cible dépend de plusieurs paramètres : la puissance émise par le radar , la durée de l'impulsion T , la distance entre le radar et la cible R , les gains des antennes émettrices et réceptrices G_t et G_r , la longueur d'onde λ

et la Surface Equivalente Radar (SER) de la cible S_1 . Ces paramètres sont reliés par l'équation radar (1.1).

$$E = \frac{T Gr Gt \lambda 2S}{(4\pi)^3 4R Pt} \quad (1.1)$$

En plus d'être atténué, le signal d'intérêt est systématiquement « pollué » par du bruit. En grande majorité, ce bruit provient des composants électroniques, et est ainsi qualifié de bruit thermique. La puissance de ce bruit est de la forme (1.2):

$$P_n = \alpha k B B_r T_0 \quad (1.2)$$

Avec α une grandeur sans unité caractéristique du récepteur (appelée facteur de bruit), kB la constante de Boltzmann, B_r la bande équivalente de Brat (largeur de bande du récepteur) et T_0 la température équivalente du bruit du récepteur [8].

Le récepteur et l'émetteur ne sont pas nécessairement à la même position : on parle alors de configuration bi statique [9]. Dans le cas où l'émetteur et le récepteur sont situés au même endroit, on parle de configuration mono statique [9].

1-3- Le radar a synthèse d'ouverture « SAR »:

L'imagerie radar a connu un développement rapide grâce à la technique appelée synthèse d'ouverture qui utilise le déplacement du porteur pour générer une antenne synthétique de longueur très grande. Ceci permet aux images SAR (Synthétique Aperture Radar) d'atteindre des résolutions spatiales proches de celles des images optiques. L'intérêt porté aux données radar vient de la richesse de l'information acquise par les capteurs radar à synthèse d'ouverture.

Les systèmes SAR (Synthétique Aperture Radar) tirent profit du caractère tout temps du radar et de la capacité d'imagerie de haute résolution pour s'imposer dans un grand spectre d'applications aéronautiques ou spatiales à finalités militaires ou civiles. Le radar à ouverture synthétique ou SAR, est un capteur micro-ondes qui permet d'obtenir une image de haute résolution. La résolution dans la direction distance est obtenue par la transmission d'une certaine forme d'onde, tandis que la résolution dans la direction azimut est obtenue par la formation d'une ouverture synthétique. L'utilisateur peut ainsi sur une image distinguer certaines régions. Cependant, cette distinction est subjective, et d'autant plus délicate, dans le cas des images SAR que le speckle ("bruit" dû à l'addition cohérente des ondes rétrodiffusées par les cibles élémentaires contenues dans un pixel) nuit à la lisibilité des images [10].

Grace a la répétitivité des orbites, les satellites tels que ERS 1 et 2 ont acquis progressivement des séries d'images d'une même zone vue sous le même angle de visée. Ainsi, une première technique de l'imagerie SAR multi variée a surgit : l'interférométrie (In-SAR). Cette technique analyse la différence de phase entre deux images radar à synthèse d'ouverture acquises `a partir de deux positions l'égarément différente [11].

En janvier 2006, le satellite japonais ALOS à été mis en orbite avec le premier capteur SAR pleinement polarimétrie embarque sur une plateforme satellitaire civile. Il permet la mesure du champ électromagnétique rétrodiffuse par la surface terrestre comme un champ vectoriel (le cas le plus général) en préservant toute l'information polarimétrie sur le processus de rétrodiffusion. Une seconde extension multi variée de l'imagerie radar à synthèse d'ouverture, la polarimétrie (POL-SAR), exploite cette information polarimétrie pour caractériser l'information liée a la nature des interactions entre l'onde électromagnétique radar et le milieu rétrodiffusant.

Le radar à synthèse d'ouverture (SAR) est devenu une technologie de télédétection puissante et mature utilisée dans le monde entier pour une variété d'applications en raison de sa capacité à détecter la surface de la Terre de jour comme de nuit et à détecter instantanément la surface de la Terre dans toutes les conditions météorologiques. Les progrès récents ont considérablement augmenté le potentiel de surveillance SAR en améliorant la résolution spatiale, le temps de revisite, la largeur de bande et les capacités de polarisation. De plus, les missions spatiales actuelles et futures fournissent des images SAR dans différentes bandes et modes d'acquisition (par exemple, projecteur, large bande, bi statique, multistatique et géosynchrone).

Toutes ces avancées ont stimulé la recherche de nouveaux algorithmes de traitement, de produits et d'applications capables de tirer pleinement parti des nouvelles capacités des capteurs telles que les larges bandes spectrales, les vues multi-angles, les temps de revisite courts, ainsi que les grandes archives de données SAR continuellement mises à jour.

Il en va de même pour l'imagerie SAR à partir de plateformes terrestres, d'avions et de véhicules aériens sans pilote (UAV). Cet éditorial passe en revue le contenu du numéro spécial consacré aux techniques et applications SAR, en présentant les avancées en matière de modélisation des signaux SAR, de simulation SAR, de traitement SAR, d'analyse des images SAR et d'applications basées sur le SAR. l'analyse des images SAR et les applications basées sur le SAR [12].

1-3-1- Caractéristique de l'image SAR :

Il est important de rappeler que l'image SAR acquise est une matrice bidimensionnelle dans laquelle chaque pixel représente une information sur une petite zone de la surface imagée, déterminée par une mesure de temps associée à la distance, sous forme de nombres complexes (magnitude et phase). Le pixel est associé à la réflectivité du diffuseur qu'il contient. La réflectivité de la surface est également fonction de la rugosité et de l'humidité de surface, ainsi que des paramètres du système radar (fréquence f , polarisation, angle d'incidence du champ de lancement) et des caractéristiques de la cible (topographie, angle d'incidence local, rugosité, propriétés diélectriques, humidité).

1-3-2- Configuration géométrique du SAR :

Géométrie SAR Le porteur, aéroporté ou satellitaire, se déplace selon une trajectoire appelée direction de vol. Le radar envoie des impulsions électromagnétiques au sol et la surface irradiée propage ces ondes de manière omnidirectionnelle. Le système reçoit alors une partie pour l'enregistrement, qui est appelée la partie "rétrodiffusion". En raison du mouvement du porteur, les empreintes se chevauchent et le même point (point C sur la figure 3) est éclairé plusieurs fois. Le résultat de tous les échos provoqués par tous les points d'éclairage est un signal, qui est traité par synthèse d'ouverture pour former une image de la zone observée, telle que celle enregistrée par une grande antenne. Ainsi, en déplaçant l'antenne du capteur le long de la direction de vol [13], la synthèse d'ouverture peut reproduire de très grandes antennes avec des antennes physiques relativement petites. L'illustration 3 ci-dessous illustre la configuration d'un tel système.

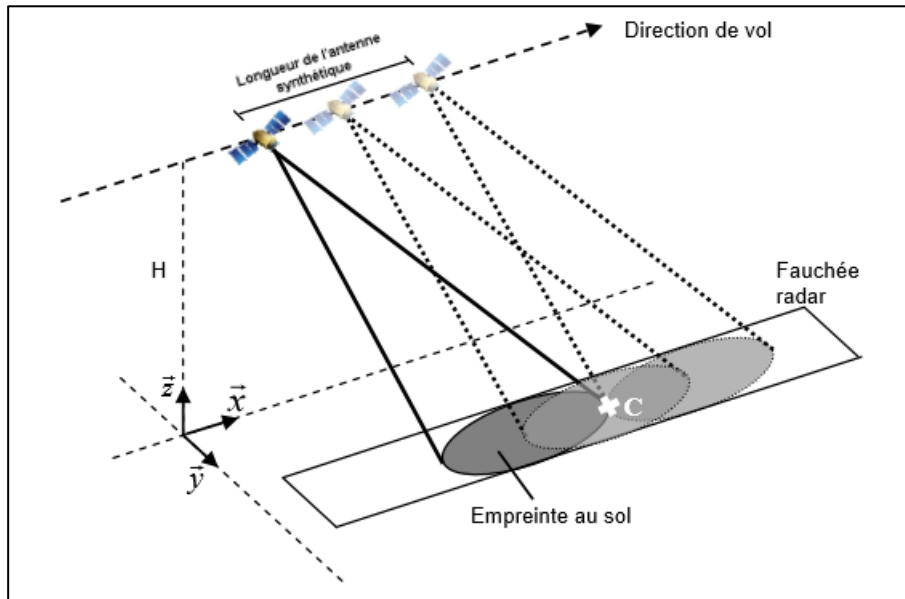


Figure 1.3: Configuration géométrique d'une acquisition SAR.

1-3-3- Résolution d'un SAR :

La résolution spatiale est un facteur clé de la qualité d'un système SAR. C'est la capacité du radar à séparer deux points proches au sol. Pour obtenir une résolution élevée, des impulsions très courtes sont nécessaires. Cependant, l'énergie de ces impulsions doit être importante pour minimiser les effets de bruit et permettre la détection des signaux réfléchis. Cependant, le matériel requis pour transmettre des impulsions très courtes et à haute énergie est trop complexe. C'est pourquoi cette énergie est générée sur toute la durée de l'impulsion la plus longue. Par la suite, des techniques de compression d'impulsions sont utilisées pour trouver la résolution de distance requise. La technique consiste à émettre des impulsions modulées en fréquence linéaire pendant une durée τ . Le signal balaye la bande de fréquences B centrée sur la fréquence porteuse f_0 . Un tel signal est appelé « chirp » à rampe de fréquence linéaire. Le signal reçu est ensuite traité par filtrage adapté pour obtenir la même résolution effective que le signal émis de longueur $1/B$. La résolution en distance est donnée par :

$$\delta_r = \frac{c}{2B} \quad (1.3)$$

Où c est la vitesse de la lumière et B est la bande passante du signal. La résolution azimutale maximale est liée à la taille de l'empreinte. L'ouverture angulaire θ_x de l'antenne est approximée par :

$$\theta_x = \frac{\lambda}{L} \quad (1.4)$$

Où λ est la longueur d'onde et L est la taille de l'antenne dans la direction azimutale.

En notant R_0 la distance entre l'antenne et le centre de l'empreinte au sol, la résolution azimutale est :

$$\delta_{az} = \theta_x R_0 = R_0 \frac{\lambda}{L} \quad (1.5)$$

Par conséquent, une très longue antenne est nécessaire pour une très bonne résolution azimutale. Cependant, il n'est pas possible de transporter une très longue antenne. C'est pourquoi le concept d'"ouvertures synthétiques" est utilisé [13] [14]. Il est basé sur le traitement cohérent de plusieurs signaux à différentes positions azimutales de l'antenne, qui sont rétrodiffusés par la même scène [13]. La résolution angulaire d'une antenne à synthèse d'ouverture de longueur L_{SA} est donnée par :

$$\theta_{SA} = \frac{\lambda}{2L_{SA}} \quad (1.6)$$

Où le facteur 2 correspond à l'aller-retour de l'onde.

La longueur de l'antenne composite est limitée par le temps d'illumination du réflecteur et est donnée par la taille de l'empreinte :

$$L_{SA} \leq \theta_x R_0 = \frac{\lambda R_0}{L} \quad (1.7)$$

Par conséquent, la résolution azimutale minimale d'un radar aéroporté utilisant une antenne à synthèse d'ouverture est :

$$\delta_{az} \geq \theta_{SA} R_0 = \frac{L}{2} \quad (1.8)$$

Par conséquent, la résolution azimutale du SAR est indépendante de la distance entre la zone d'imagerie et le radar. Aussi, plus l'antenne est petite, plus la résolution obtenue est fine. Cependant, l'antenne.

Ne doit pas être trop petit pour dégrader de manière significative le rapport signal sur bruit. La limite est le niveau de bruit dans les données, car plus l'antenne est petite, plus le gain est faible, comme le montre l'équation suivante :

$$G = 10. \log \left[\frac{ALl}{\lambda^2} \right] \quad (1.9)$$

Où l largeur de l'antenne et A est une constante.

1-3-4- Technique basée sur l'imagerie SAR :

Vu ses performances par rapport au système optique, le SAR présente un grain remarquable pour l'étude et le suivie de l'évolution de différent surface, et Depuis sa

découverte, nombreuse technique basées sur l'imagerie SAR sont apparues. Nous citons, entre autre l'interférométrie, la polarimétrie, et la Pol-InSAR et la tomoSAR. ces technique ont contribué énormément dans les avancées de la télédétection active.

1-3-4-1- Polarimétrie

La polarimétrie est l'étude de la réponse électromagnétique d'un objet ou d'un milieu rétrodiffusé éclairé par un signal SAR polarimétrique. Les modifications de signal observées sont liées aux propriétés géométriques et physiques de la cible. Cette section présente les concepts de base des mesures de polarisation SAR en passant brièvement en revue la propagation des ondes électromagnétiques, puis en définissant la polarisation des ondes, et enfin en introduisant la matrice de diffusion qui caractérise les propriétés électromagnétiques d'un objet ou d'un milieu rétrodiffusant.

A- Polarisation d'une onde :

a- Système cartésien :

Le vecteur champ électrique d'une onde plane se propageant selon l'axe z^{\wedge} du repère orthogonal $(x^{\wedge}, y^{\wedge}, z^{\wedge})$ a deux composantes E_x et E_y dont la valeur :

$$\begin{aligned} E_x(z, t) &= E_{0x} \cos(\omega t - kz + \delta_x) \\ E_y(z, t) &= E_{y0} \cos(\omega t - kz + \delta_y) \end{aligned} \quad (1.10)$$

Avec E_{0x} et E_{0y} les amplitudes suivant x et y , δ_x et δ_y les phases absolues respectives des deux composantes.

B- Ellipse de polarisation

En considérant les amplitudes non nulles ($E_{0x} \neq 0$ et $E_{0y} \neq 0$) et en posant $\tau = \omega t - kz$.

on a:

$$\begin{aligned} E_x(z, t) &= E_{0x} \cos(\tau + \delta_x) \\ E_y(z, t) &= E_{0y} \cos(\tau + \delta_y) \end{aligned} \quad (1.11)$$

En prolongeant le cosinus et en combinant les deux équations pour éliminer τ , on trouve l'équation de l'ellipse suivante, décrite par les extrema du vecteur champ électrique E dans le plan xOy . :

$$\left(\frac{E_y(z, t)}{E_{0y}} \right)^2 - 2 \frac{E_y(z, t) E_x(z, t)}{E_{0y} E_{0x}} \cos \delta + \left(\frac{E_x(z, t)}{E_{0x}} \right)^2 = \sin^2 \delta \quad (1.12)$$

L'ellipse de polarisation est caractérisée par les paramètres suivants [15], [16]:

- Son orientation ψ , angles situé entre le grand axe de l'ellipse et la direction x, - $2P \leq \psi \leq 2P$.
- Son ellipticité χ , représentant l'ouverture de l'ellipse Le signe de χ définit le sens de rotation de l'ellipse. En considérant un sens de rotation trigonométrique (ou antihoraire) lorsque l'observateur regarde dans la direction de propagation, la polarisation est dite main gauche si χ est positif. Si χ est négatif La polarisation négative est dite de droite. Une valeur nulle de χ caractérise la polarisation linéaire ($\delta=0$), tandis que $\chi=\pm\pi/4$ si la polarisation est dite circulaire ($\delta=\pi/2$) et dans ce dernier cas ψ est indéfini :

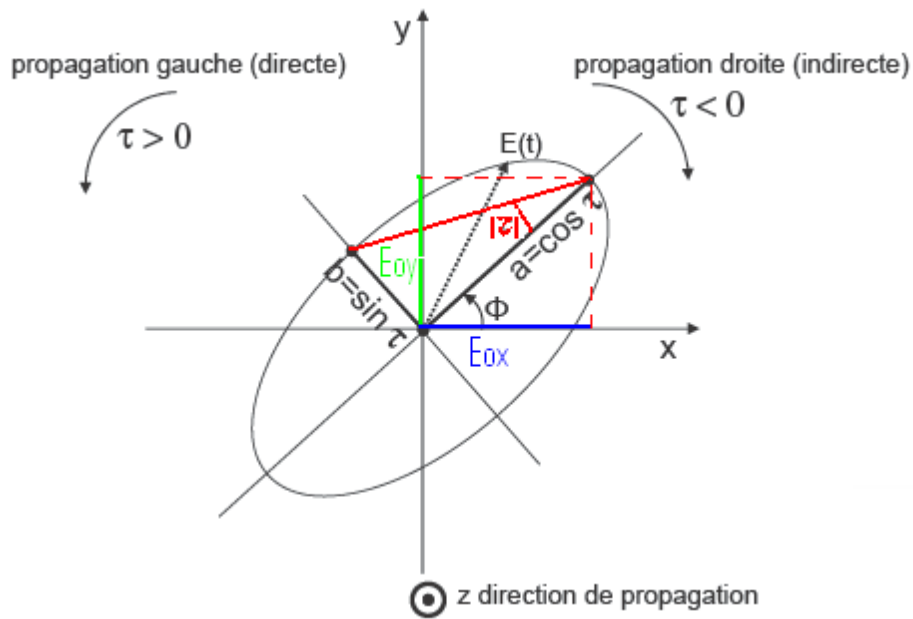


Figure (1.4) : Paramètres de l'ellipse de polarisation.

C- Vecteur de Jones :

Dans le cas d'une onde monochromatique, le champ électrique peut être représenté sous forme complexe tel que :

$$\vec{E}(z, t) = \Re e \begin{pmatrix} E_{0x} e^{j(\omega t - kz + \delta_x)} \\ E_{0y} e^{j(\omega t - kz + \delta_y)} \end{pmatrix} = \Re e \begin{pmatrix} e^{j(\omega t - kz)} E_{0x} e^{j(\delta_x)} \\ e^{j(\omega t - kz)} E_{0y} e^{j(\delta_y)} \end{pmatrix} \quad (1.13)$$

Le vecteur de Jones associé au champ électrique s'écrit alors :

$$\vec{E} = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_{0x} e^{j\delta_x} \\ E_{0y} e^{j\delta_y} \end{pmatrix} = E_{0x} e^{j\delta_x} \left\{ \vec{x} + \frac{E_{0y}}{E_{0x}} e^{j\delta_y} \vec{y} \right\} \quad (1.14)$$

Ce vecteur, indépendant du temps et de la position le long de l'axe de propagation, contient l'information essentielle pour décrire une onde plane.

En effet, outre les angles d'orientation et d'ellipticité pour décrire son état de polarisation, deux autres paramètres interviennent : son amplitude A_0 , proportionnelle à la taille de l'ellipse, et sa phase absolue. L'expression généralisée du vecteur

de Jones E dans une base orthonormée quelconque $\{m, n\}$ est :

$$\vec{E} = \begin{pmatrix} E_m \\ E_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_m e^{j\delta_m} \\ a_n e^{j\delta_n} \end{pmatrix} = A_0 e^{j\varphi_0} \begin{Bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi \\ \sin\psi & \cos\psi \end{Bmatrix} \begin{pmatrix} \cos\chi \\ j\sin\chi \end{pmatrix} \quad (1.15)$$

Différents vecteurs de Jones correspondant à des états de polarisation triviaux sont répertoriés dans le Tableau 1.

On définit ensuite le rapport de polarisation complexe ρ :

$$\rho = \frac{E_n}{E_m} = \frac{\cos 2\chi \sin 2\psi + j \sin 2\psi}{1 + \cos 2\chi \cos 2\psi} \quad (1.16)$$

Etat de polarisation	Ellipticité χ	Orientation ψ	Vecteur de jones unitaire
Linéaire verticale (v)	0°	90°	$\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$
Linéaire horizontale (h)	0°	0°	$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$
Linéaire +45	0°	$+45^\circ$	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$
Linéaire -45	0°	-45°	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix}$
Circulaire gauche	$+45^\circ$	Non défini	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ j \end{pmatrix}$
Circulaire droite	-45°	Non défini	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -j \end{pmatrix}$

Tableau (1.1) : Vecteurs de Jones dans la base $\{H,V\}$ correspondant à des états de polarisation canoniques.

1-3-4-1-1- Matrice de diffusion pour la caractérisation de cibles simples :

Lorsqu'une onde électromagnétique incidente interagit avec une cible, ses propriétés de polarisation changent. Par conséquent, l'onde réfléchie est différente de l'onde reçue, comme le montre la figure 1.5 :

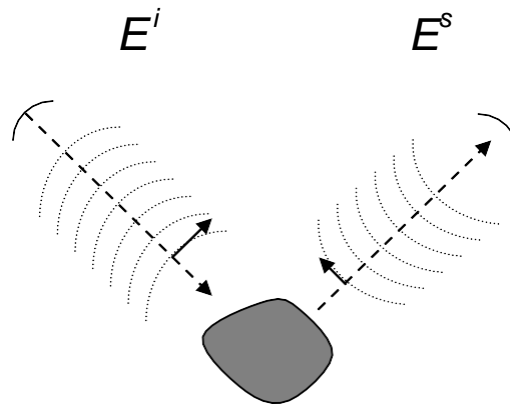


Figure 1.5 : Réflexion d'une onde par un objet.

Où E^i est l'onde incidente sur l'objet diffusant et E^s est le champ diffusé par le même objet.

Le vecteur de Jones de l'onde réfléchi est lié au vecteur de Jones de l'onde incidente par la matrice de diffusion (également appelée matrice de Sinclair).

1-3-4-1-2- Matrice de diffusion :

La matrice de diffusion, ou matrice de Sinclair [17], notée S , est une matrice complexe (2x2) qui représente les propriétés électromagnétiques de l'objet diffusant, combinées aux vecteurs de Jones

L'événement E^i est lié au E^s diffusé par la relation suivante [18]:

$$\begin{pmatrix} E_h^s \\ E_v^s \end{pmatrix} = \frac{e^{-jkr}}{r} S \begin{pmatrix} E_h^i \\ E_v^i \end{pmatrix} = \frac{e^{-jkr}}{r} \begin{pmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_h^i \\ E_v^i \end{pmatrix} \quad (1.17)$$

Où les éléments S_{xy} de la matrice se différencient par leurs indices, x est l'indice de la polarisation reçue et y celui de la polarisation émise. Les éléments diagonaux de la matrice S ont la même polarisation à l'émission et à la réception et sont dits co-polarisés. Les coefficients non diagonaux sont appelés éléments en polarisation croisée (ou cross-polarisés), leur polarisation d'émission et de réception étant orthogonales entre elles. Les matrices de Sinclair de cibles canoniques sont répertoriées dans le Tableau 2.

La puissance totale diffusée par une cible radar est donnée par :

$$P_T = |S_{HH}|^2 + |S_{VH}|^2 + |S_{HV}|^2 + |S_{VV}|^2 \quad (1.18)$$

et correspond au *spande* la matrice de Sinclair [15] .

Dans le cas mono statique où l'émetteur de l'onde incidente et le récepteur de l'onde diffusée sont au même endroit, la matrice S est dite symétrique et $S_{HV} = S_{VH}$.

La matrice de diffusion peut être vectorisée par projection sur un ensemble de matrices orthogonales. Le vecteur complexe ainsi obtenu, appelé vecteur de rétrodiffusion ou vecteur cible, contient toute l'information polarimétrique :

$$\vec{K} = \frac{1}{2} Trace(S\Psi) = \begin{pmatrix} k_0 \\ k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{pmatrix} \quad (1.19)$$

Où Ψ est un ensemble de matrices définissant une base de projection.

Cible canonique	S
Sphère , plan , trièdre	$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$
Dipole orienté	$\begin{pmatrix} \cos^2 \phi & \frac{1}{2} \sin 2\phi \\ \frac{1}{2} \sin 2\phi & \sin^2 \phi \end{pmatrix}$
Dièdre orienté	$\begin{pmatrix} \cos 2\phi & \sin 2\phi \\ \sin 2\phi & -\cos 2\phi \end{pmatrix}$
Hélice droite	$\frac{e^{-2j\phi}}{2} \begin{pmatrix} 1 & -j \\ -j & -1 \end{pmatrix}$
Hélice gauche	$\frac{e^{-2j\phi}}{2} \begin{pmatrix} 1 & j \\ j & -1 \end{pmatrix}$

Tableau (1.2) : Exemples de matrices de Sinclair de cibles canoniques.

Où ϕ est l'angle d'orientation de la cible par rapport à l'axe de visée du radar.

1-3-4-1-3- Vecteur de rétrodiffusion :

Deux bases de projection couramment utilisées sont ψ_L qui est une base de dictionnaire et ψ_p qui est une base de Pauli, qui sont définies dans le cas de base unique, où $S_{HV}=S_{VH}$ telles que [19], [15]:

$$\begin{aligned} \psi_L &= \left\{ 2 \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, 2\sqrt{2} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, 2 \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \right\} \\ \psi_p &= \left\{ \sqrt{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \sqrt{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, \sqrt{2} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \right\} \end{aligned} \quad (1.20)$$

Les vecteurs de rétrodiffusion correspondants sont :

$$\vec{k}_L = \begin{pmatrix} S_{HH} \\ \sqrt{2}S_{HV} \\ S_{VV} \end{pmatrix} \quad \text{et} \quad \vec{k}_P = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} S_{HH} + S_{VV} \\ S_{HH} - S_{VV} \\ 2S_{HV} \end{pmatrix} \quad (1.21)$$

1-3-4-1-4- Matrices de covariance et de cohérence :

Les matrices de covariance C_3 et de cohérence T_3 [15] de taille (3x3) peuvent également être construites en multipliant les vecteurs de rétrodiffusion telles que :

$$C_3 = \begin{pmatrix} \langle |S_{HH}|^2 \rangle & \sqrt{2}\langle S_{HH}S_{HV}^* \rangle & \langle S_{HH}S_{VV}^* \rangle \\ \sqrt{2}\langle S_{HV}S_{HH}^* \rangle & \langle |S_{HV}|^2 \rangle & \sqrt{2}\langle S_{HV}S_{VV}^* \rangle \\ \langle S_{VV}S_{HH}^* \rangle & \sqrt{2}\langle S_{VV}S_{HV}^* \rangle & \langle |S_{VV}|^2 \rangle \end{pmatrix} \quad (1.22)$$

$$T_3 = \langle k_p k_p^t \rangle = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \langle |S_{HH} + S_{VV}|^2 \rangle & \langle (S_{HH} + S_{VV})(S_{HH} - S_{VV})^* \rangle & 2\langle S_{HV}^*(S_{HH} + S_{VV}) \rangle \\ \langle (S_{HH} + S_{VV})^*(S_{HH} - S_{VV}) \rangle & \langle |S_{HH} - S_{VV}|^2 \rangle & 2\langle (S_{HH} - S_{VV})S_{HV}^* \rangle \\ 2\langle (S_{VV} + S_{VV})^* S_{VV} \rangle & 2\langle (S_{HH} - S_{VV})^* S_{HV} \rangle & 4\langle |S_{HV}|^2 \rangle \end{pmatrix} \quad (1.23)$$

1-3-4-1-5- Analyse de la matrice de Sinclair :

C'est pour représenter la matrice de Sinclair S se compose de combinaisons linéaires de matrices de Pauli, chacune représentant un mécanisme physique les différentes polarisations que nous essayons d'identifier :

$$S = \begin{pmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{pmatrix} = \left\{ a \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, b \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, c \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \right\} \quad (1.24)$$

$$a = \frac{S_{HH} + S_{VV}}{\sqrt{2}}, \quad b = \frac{S_{HH} - S_{VV}}{\sqrt{2}}, \quad c = 2 \frac{S_{HV}}{\sqrt{2}}$$

Coefficients a , b et c Chacun représente un mécanisme :

- Rebond simple : c'est-à-dire diffusion sur la surface.
- Double rebond : généralement réfléchi sur les bâtiments.
- Diffusion volumétrique : généralement trouvée dans les zones de végétation.

1-3-4-2- Interférométrie SAR :

L'interférométrie SAR (In-SAR) permet d'exploiter l'information de distance contenue dans l'image de phase. Une acquisition d'une image de phase.

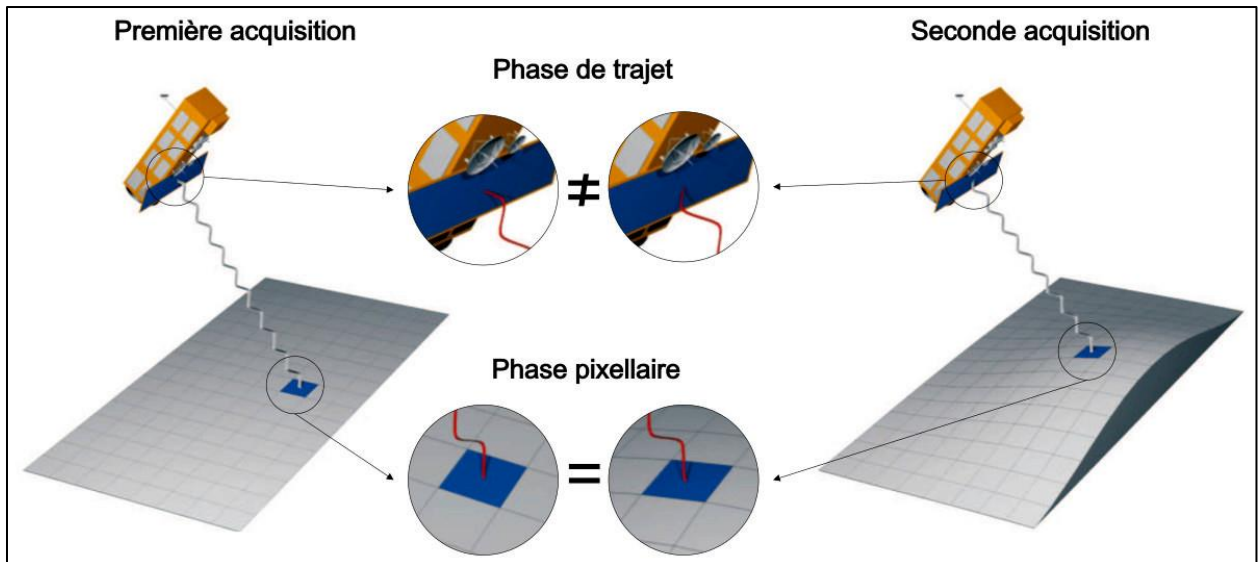


Figure (1.6) : Principes de l'In-SAR

Le SAR interférométrique (InSAR) exploite la différence de phase entre deux observations radar SAR complexes de la même zone, prises à partir de positions de capteur légèrement différentes, et extrait des informations de distance sur le terrain terrestre.

En combinant la phase de ces deux images après le coregistration, un interférogramme peut être généré où la phase est fortement corrélée à la topographie du terrain

1-3-4-2-1- Géométrie et principes de base :

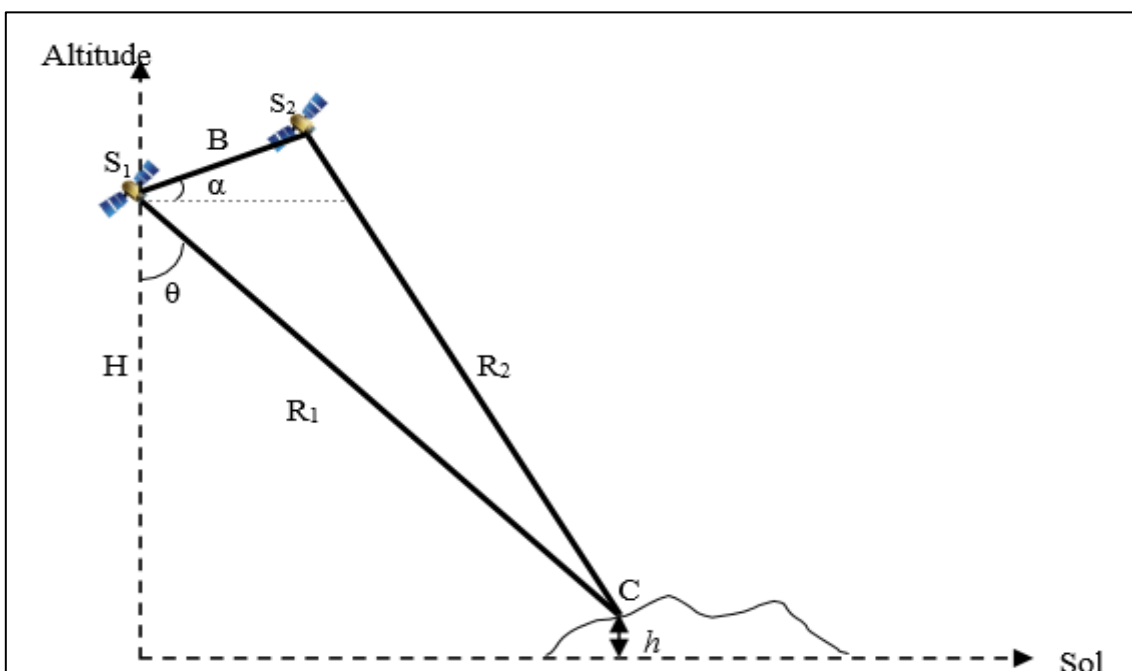


Figure (1.7) : Géométrie d'une acquisition SAR interférométrique.

L'interférométrie SAR est une technique permettant de déterminer la hauteur de la cible. Deux images SAR d'une même zone sont acquises simultanément par deux capteurs, en mode monocanal (canal unique), ou par le même capteur à des instants différents et sur une trajectoire parallèle au premier mode multi canal (canal répété). La figure 7 illustre la géométrie d'un système monopasse, où l'antenne d'émission est située en S1 et les deux antennes de réception sont situées en S1 et S2. Les calculs dans la suite du document peuvent être facilement étendus au cas où S1 et S2 comportent respectivement une émission et une réception (cas typique du mode multi canal). Les deux capteurs sont séparés par une distance B, appelée référence d'interférence ou ligne de base, dont la pente fait un angle α avec l'horizontale. S1 est situé à une hauteur H au-dessus du sol, et son antenne émet et reçoit des ondes sous un angle d'incidence θ . R1 et R2 sont les distances radiales entre les deux capteurs et la cible C à la hauteur h au-dessus du sol. En utilisant le théorème d'Al-Kashi ou le théorème de Pythagore généralisé dans le triangle (S1, S2, C), la relation suivante peut être dérivée pour la différence de chemin entre deux capteurs :

$$\sin(\theta - \alpha) = \frac{R_1^2 + B^2 - R_2^2}{2R_1B} \quad (1.2)$$

En négligeant les termes en ΔR^2 , la différence de trajet $\Delta R = R_1 - R_2$ s'exprime ainsi :

$$\Delta R = -\frac{B^2}{2R_1} + B\sin(\theta - \alpha) \quad (1.26)$$

En supposant la ligne de base négligeable par rapport à la distance capteur-cible ($B \ll R_1$), le premier terme du côté droit de l'Equation (1.30) peut être négligé :

$$\Delta R = B \sin(\theta - \alpha) \quad (1.27)$$

Il est courant de décomposer la ligne de base en ses composantes parallèle B et perpendiculaire B^\wedge par rapport à la ligne de vue du radar :

$$\begin{aligned} B &= B \sin(\theta - \alpha) \\ B^\wedge &= B \cos(\theta - \alpha) \end{aligned} \quad (1.28)$$

La hauteur h de la cible est obtenue géométriquement par :

$$h = H - R_1 \cos(\theta) \quad (1.29)$$

1-3-4-2-2- Notion de phase interférométrique :

L'interférométrie utilise les phases des signaux s_1 et s_2 reçus par les deux capteurs pour extraire des informations sur la topographie de la scène imagée. Les deux signaux s_1 et s_2 sont :

$$\begin{aligned} s_1 &= |s_1| e^{jf_1} \\ s_2 &= |s_2| e^{jf_2} \end{aligned} \quad (1.30)$$

La phase ϕ contient l'information de hauteur du point C. Les phases ϕ_1 et ϕ_2 des signaux s_1 et s_2 s'écrivent comme la somme de deux termes de déphasage. Le premier est lié au double trajet que suit l'onde et le deuxième appelé phase propre est associé à l'interaction de l'onde avec la surface :

$$\begin{aligned} \phi_1 &= \frac{4\pi}{\lambda} R_1 + \phi_{P1} \\ \phi_2 &= \frac{4\pi}{\lambda} R_2 + \phi_{P2} \end{aligned} \quad (1.31)$$

La différence de phase permet de déduire la différence de trajet ΔR [20] :

$$\begin{aligned} \Delta\phi = \text{Arg}(s_1 s_2^*) &= \phi_1 - \phi_2 = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R + 2k\pi \quad \text{avec } k \text{ entier} \\ \Delta\phi &= \frac{4\pi}{\lambda} B \sin(\theta - \alpha) \end{aligned} \quad (1.32)$$

1-3-4-2-3- l'interférogramme :

Lorsque deux images ont été coregistrées avec succès, on peut générer un interférogramme simplement en distinguant les valeurs de phase des pixels comme le montre la figure suivante (Figure 1.8) :

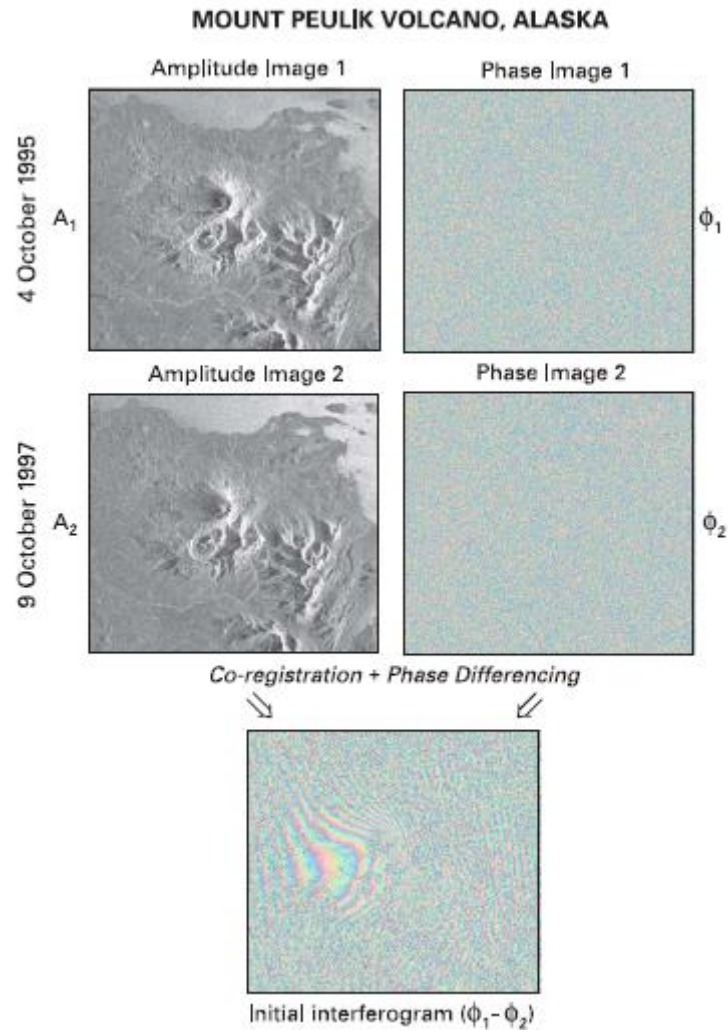


Figure (1.8) : Les informations de deux images SAR de la même zone cible acquises à des moments différents et à partir de points de vue légèrement différents peuvent être combinées pour produire un interférogramme en différenciant valeurs de phase après le co-enregistrement des images (ci-dessus). L'interférogramme résultant contient des franges produites par les différentes géométries de visualisation (franges orbitales), la topographie (franges topographiques), les retards de chemin présents dans les images et les déplacements de surface (franges de déformation). Ces images du volcan du mont Peulik, en Alaska, ont été acquises par ERS-1 le 4 octobre 1995 (en haut) et ERS-2 le 9 octobre 1997 (au milieu). Le nord est approximativement au sommet. Au sol, les dimensions de la zone représentée sont d'environ 28km de gauche à droite par 25km de haut en bas.[26]

Si ces propriétés ne changent pas significativement entre les temps d'acquisition des première et deuxième images, on se retrouve avec des informations utiles. L'interférogramme produit de cette manière comprend les contributions des différentes géométries de visualisation des deux images parentes, la topographie, les retards de trajet dus aux différentes conditions atmosphériques, le bruit et tout changement de plage causé par la déformation de la surface pendant l'intervalle couvert par l'acquisition d'image.

1-3-4-2-4- Cohérence interférométrique :

Afin de vérifier la qualité d'un interférogramme, le coefficient de l'inter-corrélation, aussi appelé cohérence interférométrique, entre les deux signaux s_1 et s_2 est évalué :

$$\gamma = \frac{E(s_1 s_2^*)}{\sqrt{E(|s_1|^2)E(|s_2|^2)}} \quad (1.33)$$

Ce module γ permet l'évaluation de qualité d'interférogramme, si il tend vers zéro, les images sont totalement décorrélées, si γ tend vers 1, dans ce cas les images sont très corrélées, et la qualité est meilleure.

L'espérance mathématique étant supposée identique au moyennage spatial des pixels, est simplifiée :

$$\gamma = \frac{s_1 s_2^*}{\sqrt{\langle s_1 s_1^* \rangle \langle s_2 s_2^* \rangle}} \quad (1.34)$$

Ce paramètre permet d'estimer la qualité de l'image interférométrique par l'évaluation du niveau de bruit de la phase interférométrique.

La décorrélation du signal peut être due à différents phénomènes qu'il n'est pas toujours possible de corriger : le bruit additif thermique γ_{SNR} , la décorrélation temporelle γ_{temp} et la décorrélation spatiale $\gamma_{spatial}$ en sont les trois principaux.

$$\gamma = \gamma_{snr} \cdot \gamma_{temp} \cdot \gamma_{spatial} \quad (1.35)$$

Les deux antennes étant distinctes, chaque signal est affecté par un bruit gaussien qui lui est propre. En supposant que le rapport signal à bruit est identique dans les deux images et que la ligne de base est nulle ($s_1 = s_2 = s$), alors : $s_1 = s + b_1$ et $s_2 = s + b_2$, avec b_1 et b_2 les bruits respectifs des deux signaux.

Le signal et le bruit étant décorrélés, on a :

$$\gamma_{SNR} = \frac{|s|^2}{|s|^2 + |b|^2} = \frac{1}{1 + SNR} \quad (1.36)$$

Avec le rapport signal à bruit $SNR = |s|^2 / |b|^2$.

- La décorrélation temporelle γ_{temp} n'intervient que dans le mode d'interférométrie multi-passes car les propriétés des réflecteurs peuvent changer entre deux acquisitions.
- La décorrélation spatiale $\gamma_{spatial}$ est due à la différence d'angle d'incidence des antennes interférométriques.

1-3-4-3- Pol-INSAR :

La méthode de polarisation SAR introduite dans la section 3.4.1 permet d'identifier les mécanismes de rétrodiffusion et ainsi de les différencier. L'interférométrie SAR définie dans la section précédente permet de trouver la hauteur du rétro diffuseur. Un système d'interférométrie avec son antenne entièrement polarisée verticalement localise le centre de phase du mécanisme, qui est ensuite corrélé avec l'élément structurel de la cible. A cette fin, la notion de cohérence d'interférence est étendue en considérant la polarisation du signal.

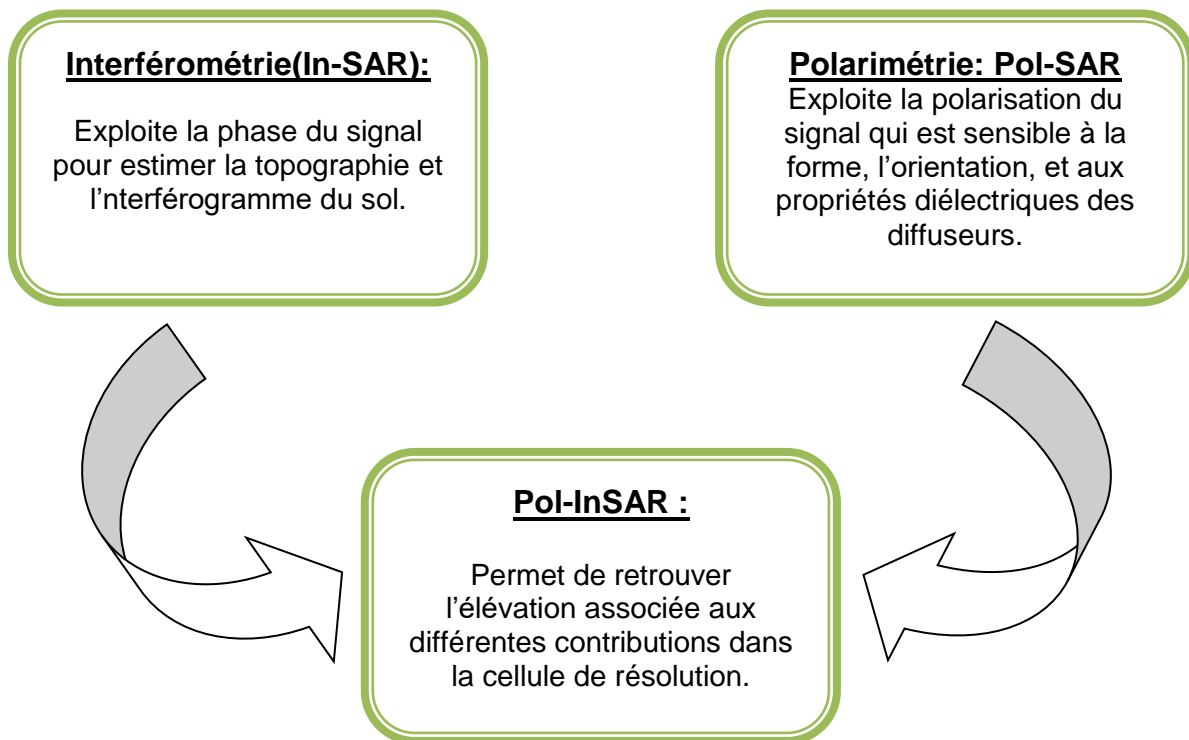


Figure (1.9) : la technique Pol-InSAR.

1-3-4-3-1- La cohérence de Pol-INSAR :

Nous utilisons les quatre images radar mono vues acquises dans les quatre polarisations. A chaque pixel correspond une matrice de diffusion donnée comme suit:

$$S = \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix} \tag{1.37}$$

Afin de séparer les types de mécanismes de diffusions associés aux cibles au niveau du sol, la matrice de diffusion est décomposée sur des composantes indépendantes. La base de transformation la plus proche de la rétrodiffusion des cibles au sol est celle de Pauli. Elle exprime la diffusion de la cible sous trois types : la diffusion surface, double rebond et la diffusion multiple. Elle est représentée par le vecteur de Pauli :

$$\vec{k}_P = \frac{1}{\sqrt{2}} [S_{hh} + S_{vv}, S_{vv} - S_{hh}, 2S_{vh}]^T \tag{1.38}$$

Le produit interférométrique des deux images est calculé au moyen des vecteurs de Pauli du couple interféropolarimétrique (S₁,S₂) représentant l'image maître S₁ et l'image esclave S₂ :

$$\vec{k}_P = \frac{1}{\sqrt{2}} [S_{hh} + S_{vv}, S_{vv} - S_{hh}, 2S_{vh}]^T \tag{1.39}$$

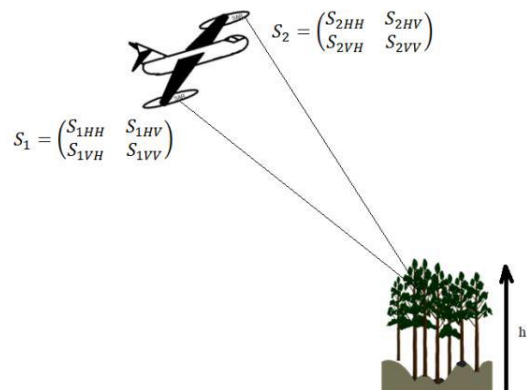
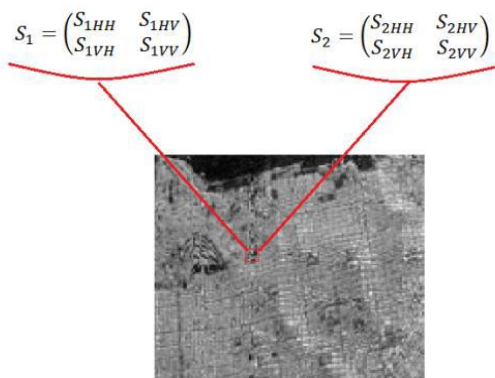


Figure (1.10): Représentation de l'information Pol-InSar pour un pixel. **Figure (1.11) :** Géométrie du radar Pol-InSar

Le calcul du produit tensoriel des éléments des vecteurs k_1 et k_2 constitue la première étape pour l'optimisation de la cohérence. Ce produit est donné par l'expression suivante :

$$[T_6] = \left\langle \begin{bmatrix} \vec{k}_1 \\ \vec{k}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{k}_1^* & \vec{k}_2^* \end{bmatrix}^T \right\rangle = \begin{bmatrix} [T_{11}] & [\Omega_{12}] \\ [\Omega_{21}] & [T_{22}] \end{bmatrix} \quad (1.40)$$

- $[T_6]$ est une matrice positive hermitienne semi-définie 6x6.
- $[T_{11}]$ et $[T_{12}]$ sont des matrices 3x3 contenant l'information polarimétrique pour chaque image.
- $[\Omega_{12}]$ contient l'information interférométrique de phase des différents canaux entre les deux acquisitions.

L'optimisation consiste à rechercher une nouvelle base de projection des composantes de la matrice $[\Omega_{12}]$ dans laquelle l'information interférométrique est maximisée. Il s'agit donc de définir deux vecteurs complexes normalisés ω_1 et ω_2 qui permettront d'obtenir les nouveaux coefficients de diffusion μ_1 et μ_2 vérifiant :

$$\mu_1 = \vec{\omega}_1^* \vec{k}_1^T ; \mu_2 = \vec{\omega}_2^* \vec{k}_2^T \quad (1.41)$$

L'expression vectorielle généralisée et normalisée de la cohérence dans la base (ω_1, ω_2) est donnée par :

$$\gamma(\vec{\mu}_1, \vec{\mu}_2) = \frac{|\langle \vec{\omega}_1^* \Omega_{12} \vec{\omega}_2 \rangle|}{\sqrt{\langle \vec{\omega}_1^* [T_{11}] \vec{\omega}_1 \rangle \langle \vec{\omega}_2^* [T_{22}] \vec{\omega}_2 \rangle}} \quad (1.42)$$

Les informations fournies par les vecteurs propres dans les deux méthodes peuvent être interprétées comme un mécanisme de diffusion dominant spécifique. pour asymétrique le milieu est diffusé et le diffuseur a un angle d'orientation spécifique. Par conséquent, les éléments suivants peuvent être appliqués :

$$\vec{\omega}_{ki} = \begin{pmatrix} \cos \alpha_{ki} \\ \sin \alpha_{ki} \cdot \cos \beta_{ki} \cdot e^{i\delta_{ki}} \\ \sin \alpha_{ki} \cdot \sin \beta_{ki} \cdot e^{i\chi_{ik}} \end{pmatrix} \quad (1.43)$$

où $i \in (1 ; 2)$, α correspond au type de diffusion (c'est-à-dire la diffusion depuis la surface $\alpha = 0^\circ$, en passant par des dipôles mécanisme lorsque $\alpha = 45^\circ$, jusqu'à la diffusion à double réflexion $\alpha = 90^\circ$), l'angle β caractérise la direction de polarisation et l'angle δ caractérise la différence de phase entre les termes $(S_{HH} + S_{VV})$ et $(S_{HH} - S_{VV})$, l'angle χ est le déphasage entre les termes $(S_{HH} + S_{VV})$ et (S_{HV}) .

1-4- Conclusion :

Dans ce chapitre on a introduit les principes fondamentaux qui sont a la base de la techniques PolInSAR et de **l'optimisation** de la cohérence interfero-polarimetrique. D'abord on a commencer par la polarimétrie SAR qui permet de déterminer la nature physique des mécanismes de diffusion, ensuite, on a mis en lumière l'interférométrie SAR qui nous renseigne sur la topographie de la scène étudiée grâce à l'information de la phase. En fin on a aborder la combinaison de ces deux techniques ; appelé PolInSAR . Et ce, afin de localiser verticalement les centres de phase de différents mécanismes de diffusion, puis de les corrélés avec les éléments structuraux de la cible.

CHAPITRE 02
Etude théorique des méthodes d'inversion

2-1- L'Algorithme de l'optimisation:

2-1-1- Introduction:

Les algorithmes sont des outils importants pour résoudre des problèmes par le calcul. Tous les calculs impliquent des algorithmes, et l'efficacité d'un algorithme détermine en grande partie son utilité.

Un bref historique des récents algorithmes d'optimisation inspirés de la nature. L'optimisation est essentielle dans de nombreuses applications, telles que l'ingénierie, les opérations commerciales et la conception industrielle. Évidemment, l'objectif de l'optimisation peut être n'importe quoi : maximiser le profit, les performances et l'efficacité. Étant donné que les ressources, le temps et l'argent sont toujours limités dans les applications du monde réel, nous devons trouver des solutions pour utiliser de manière optimale ces précieuses ressources sous diverses contraintes. L'optimisation ou la programmation mathématique est l'étude de ces problèmes de planification et de conception à l'aide d'outils mathématiques. Étant donné que la plupart des applications du monde réel sont généralement très non linéaires, elles nécessitent des outils d'optimisation sophistiqués pour les gérer.

Aujourd'hui, les simulations informatiques sont un outil indispensable pour résoudre de tels problèmes d'optimisation en utilisant divers algorithmes de recherche efficaces.

Derrière toute simulation informatique et toute méthode de calcul, il y a toujours des algorithmes à l'œuvre. Les composants de base et leur interaction déterminent le fonctionnement de l'algorithme ainsi que son efficacité et ses performances.

2-1-2- Algorithme de pollinisation des fleurs complexes :

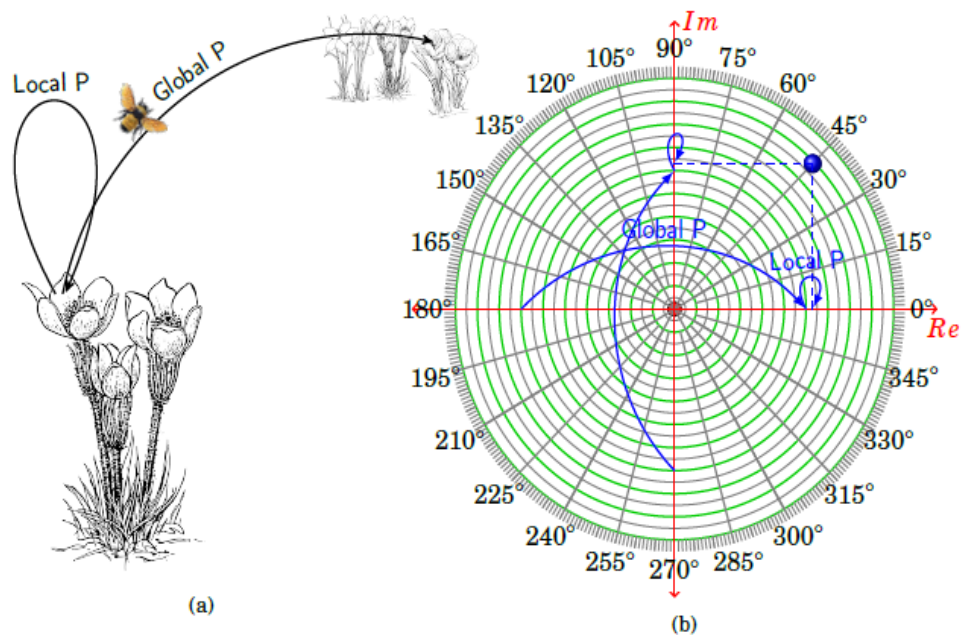


Figure (2.1) : Pollinisation des fleurs dans la nature.

Basé sur le mécanisme de pollinisation des plantes à fleurs dans la nature (voir Figure 2.1), l'algorithme de pollinisation des fleurs (FPA) est un algorithme d'optimisation nouvellement développé pour résoudre des problèmes d'optimisation autolimités et sans contraintes. Sa vitesse de traitement est rapide et l'opération est simple.

L'algorithme s'inspire du processus de pollinisation de la nature, où les pollinisateurs, tels que les insectes, transfèrent le pollen d'une fleur à une autre et améliorent la fertilisation. Ce processus peut également être effectué par des pollinisateurs abiotiques tels que le vent, la gravité et l'eau. De plus, la pollinisation peut être réalisée par autopolinisation ou pollinisation croisée. L'autopolinisation se produit dans une seule plante de deux manières ; avec la même fleur (également appelée division intra feuille) ou entre deux fleurs de la même plante.

D'autre part, la pollinisation croisée se produit deux fleurs de plantes différentes sont impliquées.

- Pollinisation Globale : Le transport du pollen obéit aux vols de Levy dans le biotique et pollinisation croisée. Ce processus peut être considéré comme une pollinisation globale.

- Pollinisation locale: Est-ce l'abiotique et l'auto-pollinisation.
- Constance des fleurs: La probabilité de reproduction est proportionnelle aux similitudes entre les fleurs impliquées.

FPA utilise deux équations principales pour simuler le phénomène de pollinisation locale et globale, et ceci est déterminé par la probabilité d'échange $S_{\omega P} \in [0,1]$. La première équation se rapporte aux principes de la pollinisation universelle et de la stabilité des fleurs comme suit :

$$X_i^{t+1} = X_i^t + L(X_i^t - g^*) \quad (2.1)$$

Où X_i^t est le i^{th} Pollen, en d'autres termes est le vecteur de solution suggéré au i^{th} itération, g^* est la solution optimale à cette itération, et L le paramètre imite la taille de pas globale.

Les principes locaux de pollinisation et de constance des fleurs sont liés par la deuxième formulation mathématique dans comme suit:

$$x_i^{t+1} = x_i^t \epsilon (x_j^t - x_k^t) \quad (2.2)$$

x_j^t et x_k^t représentent des pollens des différentes fleurs de la même espèce végétale. Dans ce cas, ϵ le paramètre \leq imite l'étape aléatoire locale des pollinisateurs.

Le FPA a été largement utilisé avec un codage à valeur complexe (CFPA) dans lequel la mise à jour des populations sera divisée en deux parties, la partie réelle et la partie imaginaire. Cela signifie analytiquement, pour utiliser deux fois les équations (2.1) et (2.2) (c'est-à-dire avec des parties réelles et imaginaires) dans chaque itération. Cette extension nous a permis d'utiliser un FPA pour l'optimisation de la cohérence polarimétrique interférométrique. L'objectif dans notre cas est de trouver deux vecteurs complexes ω_1 et ω_2 qui améliorent le module de cohérence.

Pour ce faire, certains paramètres FPA doivent être définis dans ce contexte, comme suit :

1. Taille de la population (SZP) : en tant que méta-heuristique, la solution au problème d'optimisation dans FPA est basée sur la taille de la population (SZP). Ce paramètre simule le nombre de pollinisateurs (tels que les insectes) qui contribuent au processus de pollinisation, où chaque pollinisateur contribue au pollen aléatoire.

2. Probabilité de commutation (SwP) : Bien que le processus FPA puisse se produire à l'échelle mondiale et locale, comme dans la nature (Fig. 2.1 (a)), il se produit plus fréquemment à l'échelle locale qu'à l'échelle mondiale. En effet, les insectes ont tendance à trouver du pollen près d'eux. Cette fonction est contrôlée par la probabilité de commutation (SwP). Dans chaque itération, un nouveau nombre aléatoire (Sw) est généré et comparé à (SwP) et des décisions de type de pollinisation sont prises sur la base de la comparaison.

3. Nombre d'itérations (MXIT) : nombre maximal d'itérations par pixel.

4. Lévy-Flight L-Steps (\emptyset): En raison de leur capacité à voler, les pollinisateurs peuvent parcourir de longues étapes de distance en L dans la pollinisation mondiale. Ces distances sont simulées à partir d'une table d'échantillonnage. Les étapes du modèle sont dans des directions aléatoires isotropes, et leurs longueurs ont une distribution de probabilité de poids. La formule correspondante est donc donnée par :

$$L \sim \frac{\beta \Gamma(\beta) \sin\left(\frac{\pi\beta}{2}\right)}{\pi s^{1+\beta}} \quad (2.3)$$

où Γ représente la fonction gamma standard, β est sa variable associée, et cette distribution est valable pour de grands pas ($s > 0$).

2-1-2-1- Optimisation de la cohérence interférométrique a l'aide de FPA:

Pour accélérer le processus d'optimisation, le FPA a été légèrement modifié. La commutation entre la recherche globale et la recherche locale est contrôlée à chaque cycle en mettant à jour le facteur de probabilité de commutation sous le critère d'amélioration ou de détérioration de la solution. Cela nous permet de contrôler quelque peu la portée de la recherche, c'est-à-dire que nous augmentons la probabilité d'utiliser la pollinisation locale lorsque la cohérence s'améliore, et l'échelle de recherche globale lorsque la cohérence ne s'améliore pas. Ce dernier est effectué avec une combinaison différente de paramètres. Évidemment, le processus d'optimisation prend plus de temps lorsqu'on augmente la population ou/et le nombre d'itérations. [21]

Paramètre	Brève description	Valeur/gamme
SzP	Taille de la population	[10-25]
SωP	Probabilité de commutation	0,8
L(ν)	Levy-Flight Steps	Défini à partir de Levy distribution, lorsque $1 \leq \nu \leq 1.9$
ξ	Facteur d'échelle	0,6
ϵ	Pas aléatoires locaux	[0-1]
MxiT	nombre maximal d'itérations	≥ 1

Tableau (2.3) : Paramètres et limites sélectionnés pour FPA.

Facteur d'échelle ξ : Ce paramètre est utilisé pour contrôler la taille du pas du vol de Lévy pour la pollinisation globale.

Ou Étape aléatoire locale ϵ : Contrairement à la pollinisation globale, dans la pollinisation locale, le pollen (éléments vecteurs) est sélectionné dans la même région (plus proche de la meilleure solution précédente).

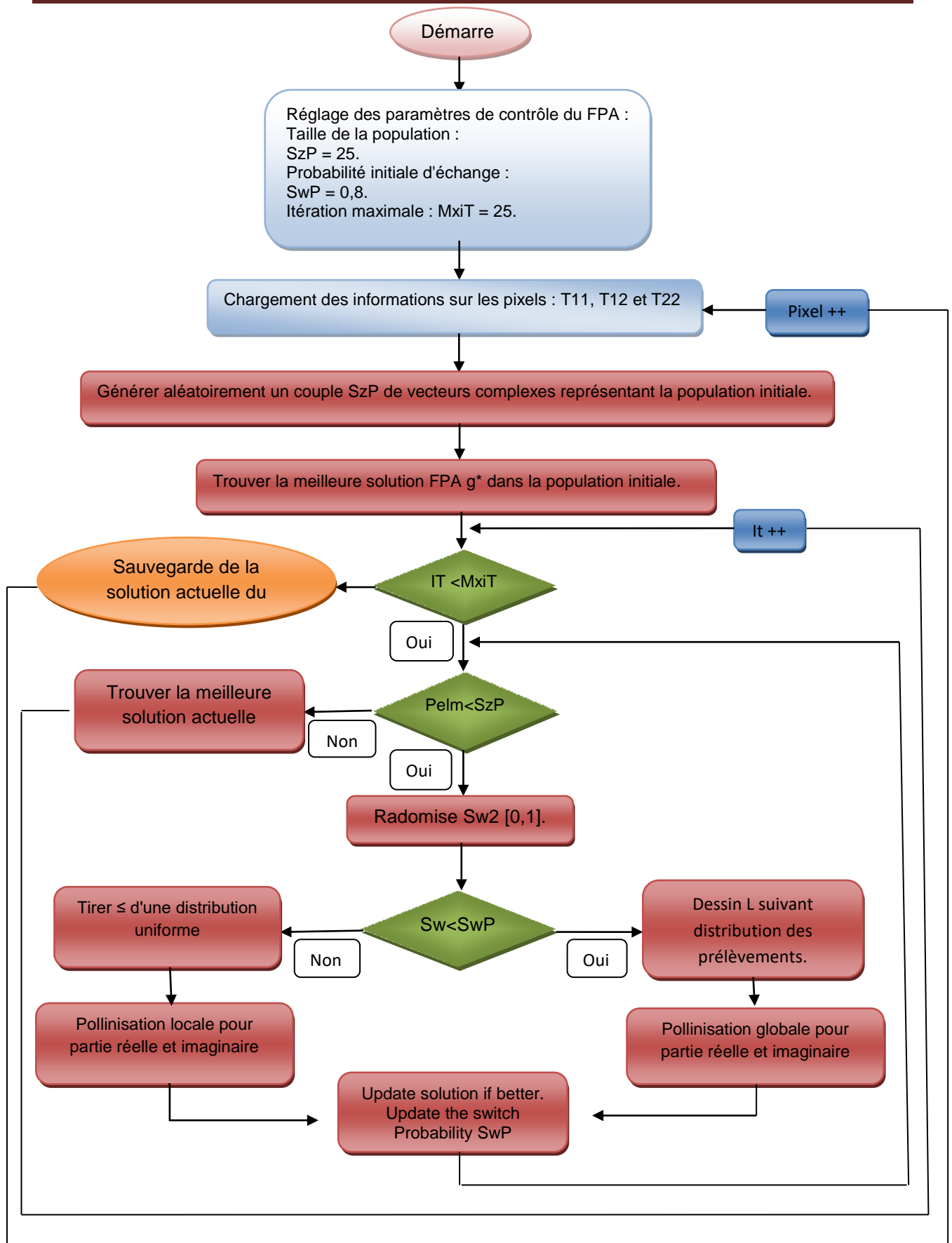


Figure 2.2 : L'organigramme de l'algorithme de FPA

2-1-3- recherche du coucou avec vol de lévy :

L'algorithme de cuckoo search est basé sur le comportement de reproduction des coucous et, en tant qu'algorithme méta-heuristique, il peut être utilisé pour résoudre des problèmes difficiles tels que l'optimisation d'image[22]. L'algorithme Coucou tire son nom des oiseaux coucous, qui sont connus non seulement pour leur attrait charmant ou les sons apaisants qu'ils produisent, mais aussi pour leur agressivité et leurs stratégies de reproduction [22].

De nombreuses espèces qui sont incapables de former leurs propres nids ou de pondre leurs propres œufs suivent une pratique appelée parasitisme obligatoire du couvain, dans laquelle elles pondent leurs œufs dans les nids d'autres espèces parce qu'elles sont incapables de construire leur propre nid ou de faire éclore votre propre nid. Le parasitisme obligatoire du couvain se divise en trois grandes catégories : le parasitisme intra-spécifique du couvain, l'élevage coopératif et la prise de contrôle du nid. Ils pondent leurs œufs dans le nid d'une autre espèce et espèrent se reproduire avec succès. Cependant, si les oiseaux/espèces hôtes découvrent que les œufs qu'ils éclosent ne sont pas les leurs, ils jetteront les œufs ou abandonneront leur nid actuel et en construiront un nouveau à un autre endroit. Pour réduire la probabilité que leurs œufs soient jetés et améliorer leurs chances de reproduction, certaines espèces de coucous ont évolué au fil des ans pour avoir des coucous parasites femelles qui imitent spécifiquement les couleurs et les motifs des coucous. L'espèce hôte, de sorte que l'espèce hôte ne sera pas consciente qu'elle élève les œufs d'une autre espèce, de sorte que les chances que les œufs soient jetés ou abandonnés sont considérablement réduites. Il existe également des espèces de coucous qui coordonnent leur période de frai avec celle de l'espèce hôte choisie, et leurs œufs éclosent légèrement plus tôt que ceux de l'espèce hôte [23].

Les coucous parasites choisissent souvent les nids des espèces hôtes, où ils pondront éventuellement leurs œufs. Lorsque le premier poussin coucou éclot, la première étape d'induction du coucou consiste à expulser ou à éliminer les œufs de l'espèce hôte,

Cela augmente finalement la part du poussin coucou dans la nourriture qui lui est fournie par l'oiseau hôte. Certaines études suggèrent également que certains poussins coucous peuvent imiter les appels de leurs poussins hôtes pour faciliter davantage d'opportunités d'alimentation.

Ce concept d'élevage actif d'œufs dans un autre cluster et une approche gourmande pour tirer le meilleur parti de ses propres enfants seront dessinés en parallèle avec un problème d'optimisation d'image du monde réel, avec différentes segmentations agissant comme des nids et des objets, avec des clusters de pixels dans chaque segment de l'image. La classe segment agit comme un groupe hôte et doit donc servir de base pour développer des algorithmes.

2-1-3-1- l'algorithme de Recherche du coucou :

La recherche du coucou se compose des trois règles principales suivantes :

1. Chaque coucou essaie de pondre un œuf à la fois et de le placer dans un nid choisi au hasard.
2. Les meilleurs nids avec le plus d'œufs seront transmis à la progéniture.
3. Le nombre de nids hôtes disponibles est fixe, si les œufs pondus par le coucou sont trouvés par l'oiseau hôte, alors la probabilité que l'espèce hôte identifie les œufs est $p_a \in [0, 1]$.

Pour simplifier le sens de la règle finale, la dernière hypothèse suggère qu'elle peut être ajustée par une fraction de " p_a " de n nids hôtes qui sont éventuellement remplacés par de nouveaux nids.

Lorsque l'on considère un problème de maximisation, la qualité ou l'adéquation de la solution peut être proportionnelle à la valeur de la fonction objectif. D'autres formes de fitness peuvent également être décrites comme similaires aux fonctions de fitness dans d'autres algorithmes génétiques [23].

On peut considérer la représentation suivante : chaque œuf dans le nid représente une solution spécifique, donc chaque nouvel œuf placé dans le nid représente une nouvelle solution. Le but de l'algorithme est d'utiliser une meilleure solution innovante, appelée coucou, pour remplacer les solutions plus faibles et moins bonnes. Nous devrions considérer l'approche la plus simple, où chaque nid ne contient qu'un seul œuf [23].

Les étapes de l'algorithme général de recherche de coucou seront décrites en détail ci-dessous :

- Étape : 1 Initialisez le paramètre de contrôle sur n , c'est-à-dire le nombre de réseaux hôtes, la limite supérieure et la limite inférieure.(UB et LB).

- Étapes : 2 Initialisez la population aléatoire du réseau hôte.
- Étapes : 3 Calculez la valeur de fitness de chaque nid et sélectionnez le meilleur parmi les nids.
- Étape : 4 Utilisez la recherche de coucous pour générer de nouveaux nids avec l'algorithme Levy Flight.
- Étape : 5 Évaluez la valeur de fitness de chaque nouveau réseau et sélectionnez le meilleur dans le nouveau nid.
- Étape : 6 Comparez les nids sélectionnés et conservez la meilleure solution.
- Étapes : 7 Optimisez avec la meilleure solution.

L'algorithme utilise une combinaison équilibrée de marches aléatoires locales et de marches aléatoires exploratoires globales, contrôlées par un paramètre de commutation. Une marche aléatoire locale peut s'écrire comme suit :

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \alpha s \otimes H(P_a - \epsilon) \otimes (x_j^t - x_k^t) \quad (2.4)$$

où x_j^t et x_k^t sont deux solutions différentes sélectionnées au hasard par permutation aléatoire, $h(u)$ est la fonction de Heaviside, ϵ est un nombre aléatoire tiré d'une distribution uniforme et est la taille du pas. Cela représente le produit d'entrée de deux vecteurs.

D'autre part, utilisez le vol de Lévy pour effectuer une marche aléatoire globale :

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \alpha L(s, \beta) \quad (2.5)$$

Ici α est le facteur d'échelle d'étape, qui doit être lié à l'échelle du problème d'intérêt. L'équation ci-dessus est essentiellement l'équation d'une marche aléatoire. En général, une marche aléatoire est une chaîne dont le prochain état/emplacement dépend uniquement de l'emplacement actuel (premier terme de l'équation ci-dessus) et de la probabilité de transition (deuxième terme).

Pseudo code de la recherche du coucou pour un problème de maximisation:

Function objective $f(x), x=(x_1, \dots, x_d)^T$

Générer un population initial de n nids hôtes x_i

Tant que ($t < \text{Max Generation}$) **ou** (critère d'arrêt)

Obtenez un coucou au hasard

Générer une solution par les vols Levy

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \alpha L(s, \beta)$$

Évaluer la qualité de sa solution ou sa valeur objective f_i

Choisissez un nid parmi n (dire i, j) au hasard

si ($f_i < f_j$),

Replacer j par la nouvelle solution i

FIN

Une fraction (p_a) des pires nids sont abandonnés

Les nouveaux nids/solutions sont construits/générés par

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \alpha s \otimes H(p_a - \epsilon) \otimes (x_j^t - x_k^t)$$

Conserver les meilleures solutions ou les nids de solutions de qualité

Classer les solutions et trouver la meilleure solution actuelle

Mise à jour $t \rightarrow t+1$

Fin tant que

Post-traitement des résultats et visualisation

Fin

2-1-3-2- Optimisation de la cohérence interférométrique a l'aide de CSA :

Dans cette section, la CSA (Cuckoo search Algorithm) est appliquée à la cohérence interférométrique optimisation, Notre but dans cette partie est d'optimiser la cohérence interférométrique en utilisant cette algorithme (i.e Cuckoo opt), Pour trouver deux vecteurs de diffusion complexes normalisés ω_1 et ω_2 qui améliore le module de cohérence.

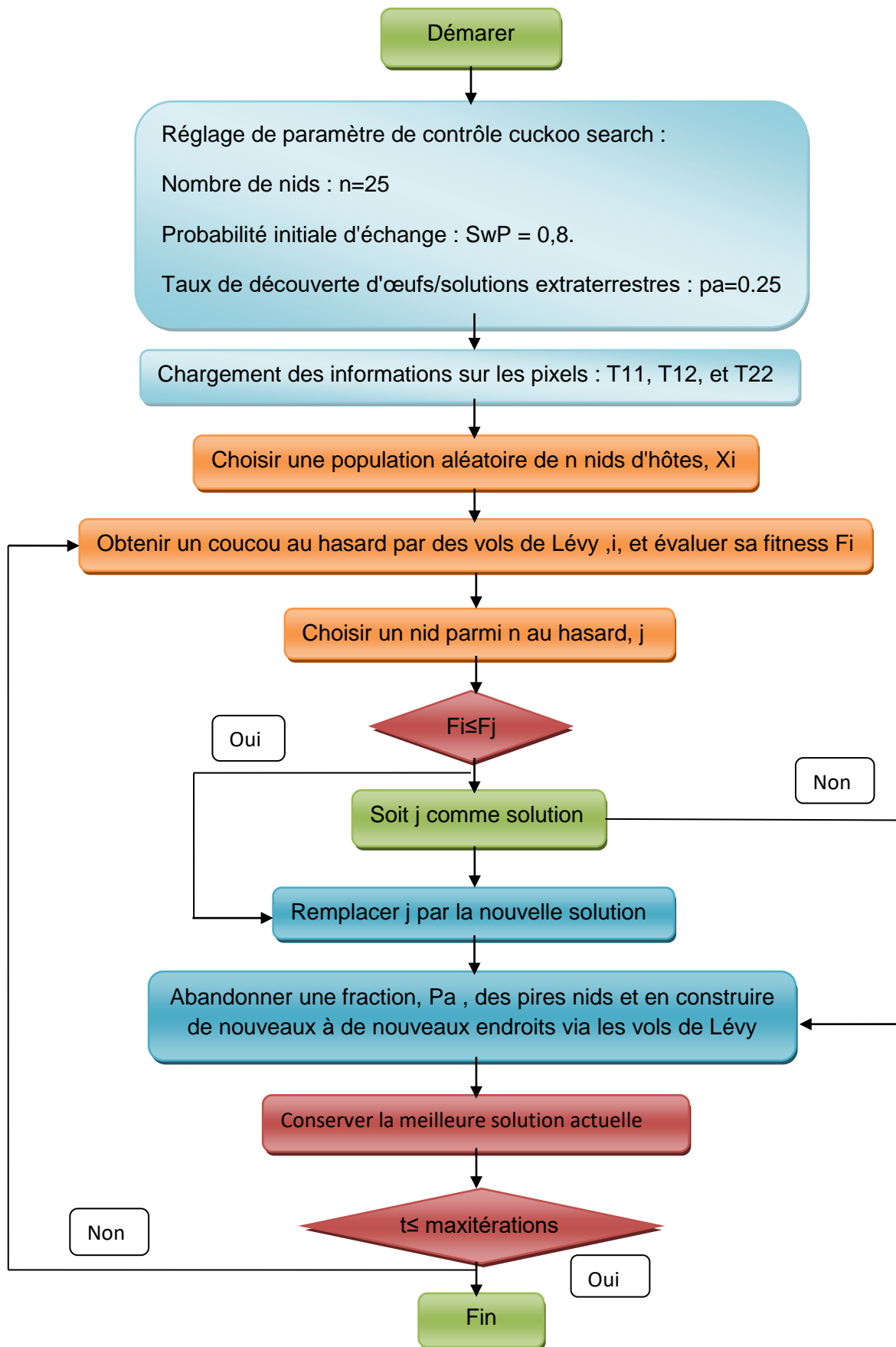
A cette fin, certains les paramètres de CS doit être défini dans ce contexte comme suit :

1. nombre de nids (n-nids) : la solution au problème d'optimisation dans CS est basée sur le nombre de nids (n-nids). Chaque coucou apporte des nids aléatoires (c'est-à-dire Une paire aléatoire de vecteurs de diffusion $\vec{\omega}_2$ et $\vec{\omega}_1$)
2. Nombre d'itérations (n-itr) : nombre d'itérations max pour chaque pixel dans l'image
3. Levy-Flight L étapes $L(\beta)$: En raison de sa capacité à voler, Un coucou peut se déplacer par des foulées longues et variées dans la recherche.

ces distances sont imitées sur la base de la distribution Levy-vol comme suit :

$$L(\beta) \sim \frac{\beta \Gamma(\beta) \sin\left(\frac{\pi\beta}{2}\right)}{\pi S^{1+\beta}}$$

où Γ représente la fonction gamma standard, β est sa variable associée, et cette distribution est valable pour les grands pas ($s > 0$).

**Figure 2.3** : L'organigramme de l'algorithme de Cuckoo search

2-2- Conclusion :

Dans ce chapitre on a abordé les techniques d'optimisation de la cohérences interfero-polarimetrique qui serons implémenté dans ce mémoire

L'optimisation de la cohérence intefero-polarimetrique améliore la corrélation entre les mécanismes de diffusion entre les deux images a travers diffèrent types d'algorithmes d'optimisation connue : et ce, afin d'avoir une qualité meilleure de la phase interférométrique.

Les algorithmes d'optimisation appliquée et investiguer sont l'algorithmes de pollinisation des fleurs FPA et l'algorithme de recherche de coucou CSA, Pour améliorer la cohérence et découvrir la meilleure façon d'améliorer

CHAPITRE 03
Résultats et discussions

3-1- Présentation des données :

Pour La validation de la méthode d'optimisation proposée FPA et CSA est d'abord réalisée en utilisant les données Pol-InSAR de passage répété E-SAR acquises en bande L sur la Région d'Oberpfaffenhofen en Allemagne (Figure 3.1) par le Centre aérospatial allemand à l'aide du radar E-SAR.

La ligne de base temporelle est inférieure à un jour.

Nous avons sélectionné trois régions différentes avec diverses propriétés :

- La région A (vert rectangle) Contenant de petites zones résidentielles.
- La zone forestière de la Région B (rectangle bleu).
- La région nue dans la région C (rectangle rouge) qui contient une petite section de la piste d'avion.

Ce figure montre les zones A ,B,C qui ont été prises :

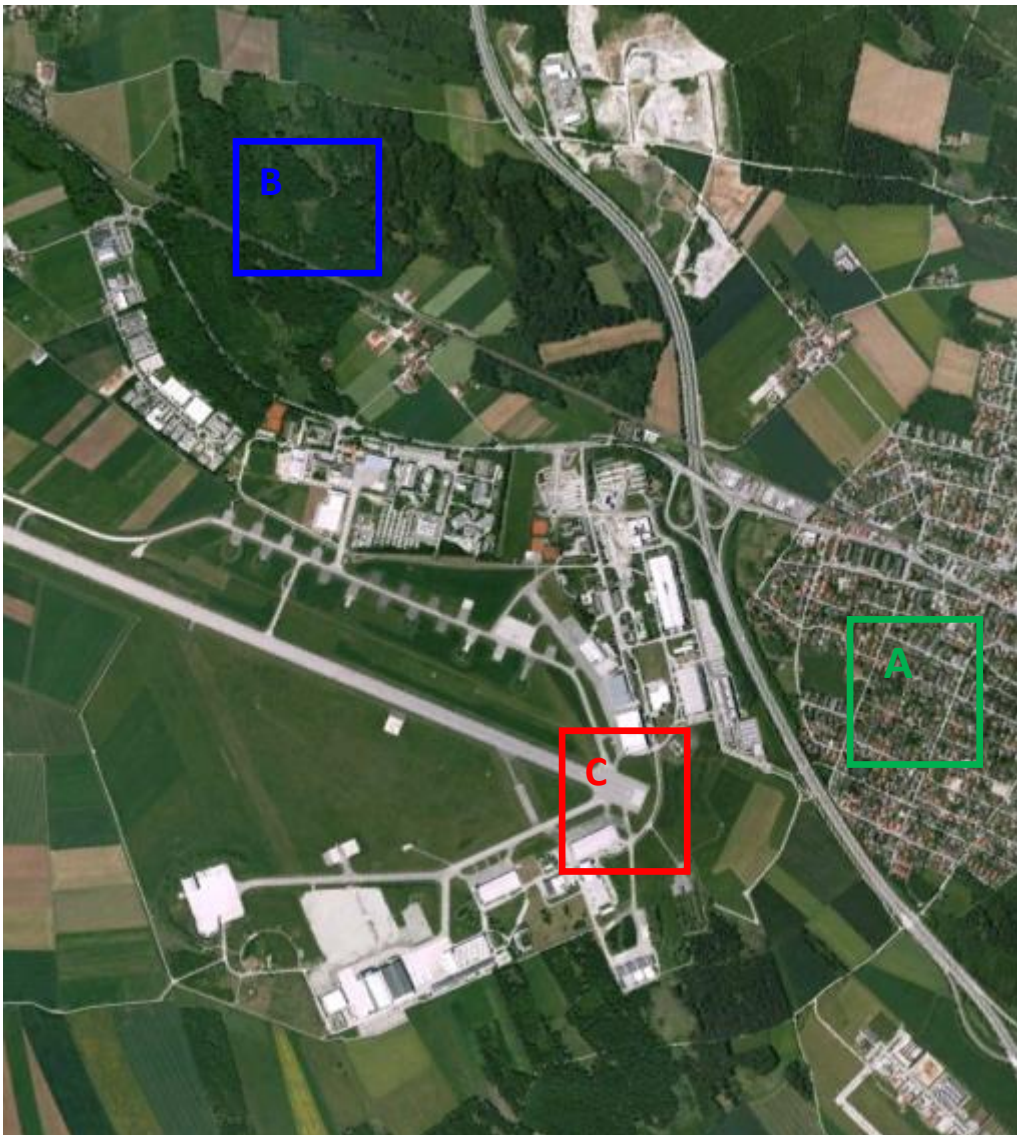


Figure (3.1) : Image optique des données de test dans in oberpfaffenhofen qui se compose de forêts (Rectangle bleu), terrains nus (rectangle rouge) et zone résidentielle (rectangle vert). (Google Earth).

Pour mettre en œuvre des méthodes d'optimisation et de traitement d'images, nous avons utilisé le langage de programmation Matlab, qui est fortement recommandé dans la communauté scientifique et dans le domaine des mathématiques, et qui est également un langage important pour le traitement des images.

3-2- L'effet de la dispersion de polarisation sur la cohérence :

Nous voulons connaître l'effet de la dispersion sur les valeurs de cohérence, et ceci en comparant les résultats de la cohérence sur trois zones préalablement définies (A,B,C) car elles sont différentes en termes de qualité de surface, puis nous les analysons.

Ceci est fait en utilisant Les deux méthodes d'optimisation de recherche de coucou **CSA** et pollinisation de fleur **FPA**.

Paramètres de contrôle du **FPA** :

- ITERATION Max : 25

- Probabilité initiale $S_{\omega P}$:0.8

- Nombre de population SzP: 25

Paramètres de contrôle du **CSA** :

- nombre d'itération : 25

- probabilité initiale $S_{\omega P}$:0.8

- nombre de nids N-NEST: 25

Les zones	FPA MEAN	STD AFPICO	MEAN CUCKOO	STD CUCKOO
Zone A	0.7805	0.1089	0.9253	0.008
Zone B	0.505	0.1186	0.6004	0.006
Zone C	0.8495	0.1098	0.9529	0.001

Tableau (3.1) : MEAN/STD des deux méthodes fleur et recherche de coucou s dans les trois zones A ,B ,C.

A travers un tableau, on remarque qu'il y a une nette différence dans les résultats obtenus entre les trois régions A , B , C. ce sont les résultats obtenus après optimisation.

- Dans la zone C (surface) la cohérence est très élevée
- La cohérence dans la zone A (zone résidentielle) est modérée
- La zone B (zone forestière) a une cohérence quelque peu faible.

La cohérence peut être utile à cet égard pour déterminer le mécanisme de diffusion ou la qualité de surface de la cible étudiée, tels que :

- Faible cohérence : couverture végétale ou eau multi-surfaces.
- Cohérence modérée : zones urbaines avec des surfaces bi-couvertes.
- Haute cohérence: route ou surfaces dures.

3-3- Comparaison de la phase pour chacun des résultats des deux méthodes :

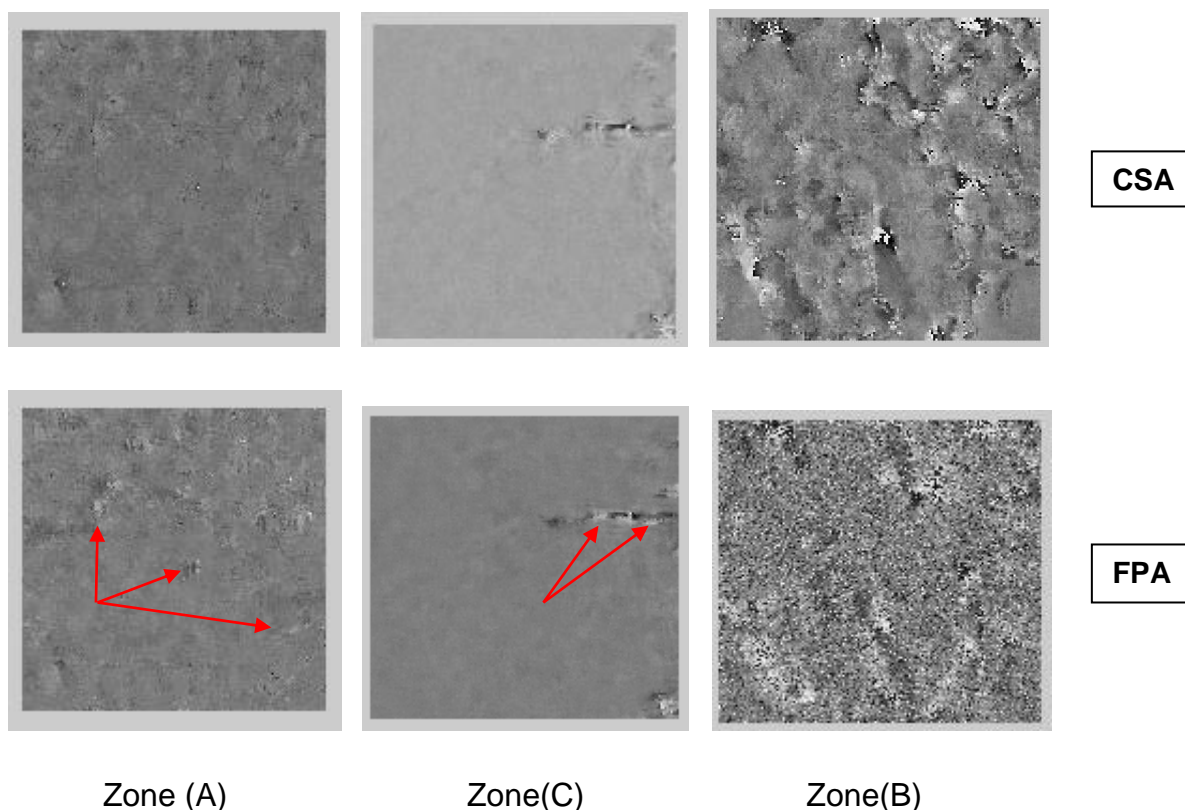


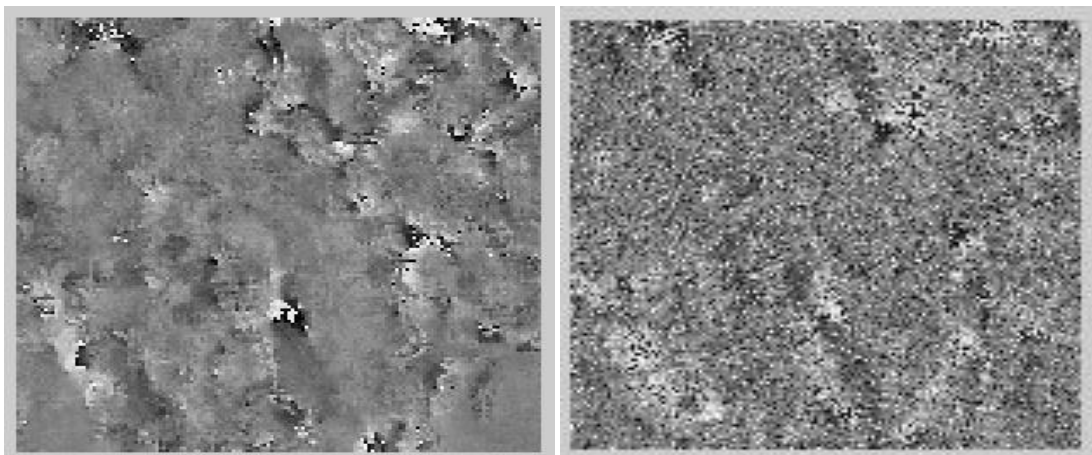
Figure (3.2) : Comparaison entre les phases , chaque colonne contient une région spécifique, la région A (rectangle vert sur la figure 3.1) contient de petites zones urbaines , une zone forestière dans la région B (bleu rectangle sur la figure 3.1) et

une zone plate dans la région C (rectangle rouge sur la figure 3.1) qui contient une petite section de la piste de l'avion. chaque ligne contient une approche, première ligne de CSA, deuxième ligne de FPA.

La figure (3.2) montre la comparaison de phase. On peut facilement remarquer qu'il n'y a pas de différence dans les images de phase des deux méthodes, si ce n'est l'apparition de zones blanches (indiquées par des flèches rouges) dans celles résultant de l'optimisation, qui sont plus en zone urbaine en raison du double effet rebond. Ces zones ne sont pas mises en évidence sur les images CSA. avec une grande différence dans la zone boisée (B). Les images SAR sont très sensibles aux effets de la forme du terrain en raison de l'aspect latéral du radar provoquant des distorsions géométriques telles que des effets de compression, des recouvrements et des ombres, qui provoquent ce qu'on appelle un résidu dans le calcul de la phase interférométrique. Son taux peut être estimé par calcul numérique [3-4-2-3].

Un problème causé par du bruit ou des résidus dans la phase d'interfrogramme les images SAR peut être lié à un problème d'information pour la Polarisation émis par POLIN-SAR. Les résidus sont un problème majeur dans le déroulement de la phase interférométrique. La minimisation du nombre de résidus nécessite un filtrage d'interférogramme avant l'étape de déroulement de phase.

Pour confirmer l'efficacité des méthodes d'optimisation précédemment utilisées (CSA , FPA) sur le bruit, nous avons pris la région B pour considérer entre la phase et ses résidus et découvrir la différence entre les deux méthodes. Nous avons obtenu les résultats dans la figure (3,4) :



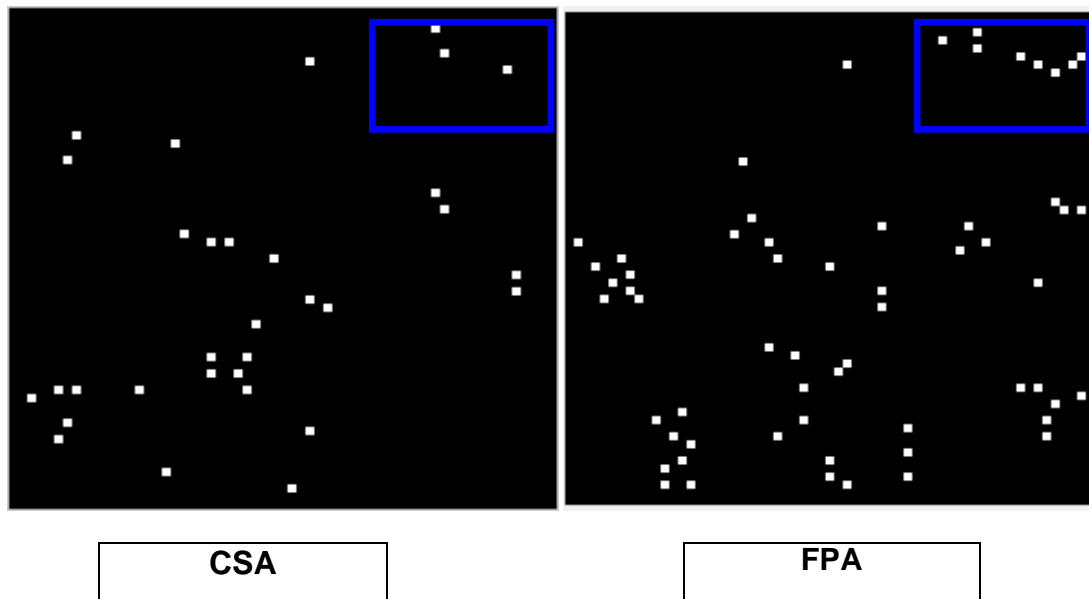


Figure (3.3) : Comparaison entre la phase et les résidus associé, Colonne de gauche par optimisation CSA , colonne de droite par FPA.

Si l'on compare les deux phase (Fig. 3.4), on constate que l'optimisation par CSA est moins bruitée que celle par FPA, Par exemple, si vous regardez les échantillons d'image cadré en bleu associés aux résidus de phase , il y a du bruit ou des résidus dans FPA, qui contrairement à CSA, sont presque inexistantes.

3-4- L'efficacité de l'algorithme par rapport au temps :

Les algorithmes sont mis en œuvre avec différentes combinaisons de paramètres, qui affectent les résultats et le temps. Par exemple, lorsque nous augmentons le nombre d'itérations MIXT du nombre de pollinisations SzP dans l'algorithme FPA, ou le nombre de nids N-NEST et le nombre d'itérations N-ITER dans l'algorithme CSA, Pour illustrer cela, nous étudions la région C et modifions le nombre de pollen de fleurs dans l'algorithme FPA et le nombre de nids dans les paramètres de l'algorithme de CSA, on obtient les résultats suivant :

Paramètres de contrôle du **FPA** :

-ITERATION Max : 25

-Probabilité initiale SwP :0.8

-Nombre de population SzP : var

Paramètres de contrôle du **CSA** :

- nombre d'itération : 25

- probabilité initiale SwP :0.8

-nombre de nids N-NEST : var

SzP	TEMPS	MEAN
10	35 min	0.84308
15	41 min	0.84664
20	46 min	0.84847

Tableau 3.2 : changement de temps et de mean
Par rapport a la nombre de population

N-NEST	TEMPS	MEAN
10	46 min	0.9512
15	1h 1min	0.9523
20	1h 15min	0.9527

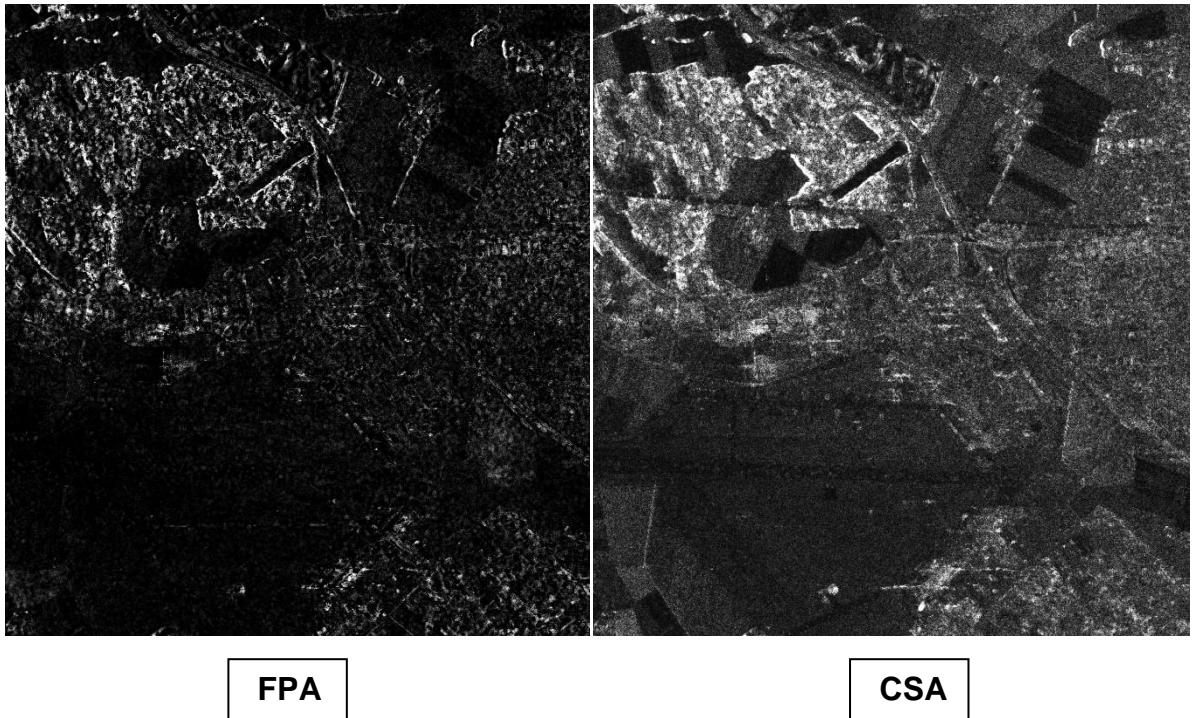
Tableau 3.3 : changement de temps et de mean
de cohérence par rapport a le nombre de nids

De toute évidence, nous ralentissons le processus d'optimisation lorsque la population FPA ou le nombre de nids de CSA augmente. Mais malgré cela, convergé vers la meilleure solution comme le montre les tableaux 4 et 5.

Lorsque le nombre de pollinisations ou le nombre de nids est le même, on constate que le temps mis par la méthode recherche de coucou est plus long que dans la méthode de pollinisation des fleurs, on prend par exemple le nombre 10, le temps mis par la méthode CSA est de 46 minutes, tandis que dans la méthode FPA, cela prend 35 minutes. Comme on distingue quel que soit le nombre de pollinisations ou le nombre de nids, la méthode qui donne les meilleurs résultats est la méthode de recherche du coucou.

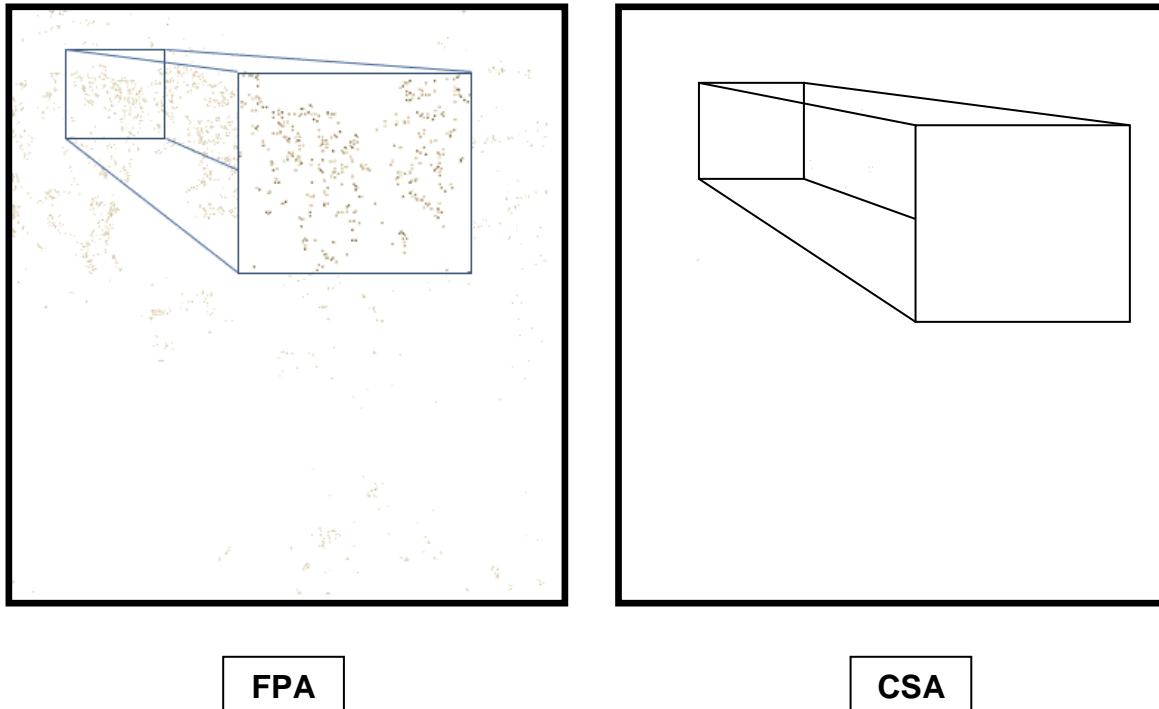
3-5- Comparaison entre les résultat de les deux méthode FPA/CSA de l'image globale :

On a appliqué les deux méthodes d'optimisation sur l'image de la scène globale comme illustré sur les figures ci-dessous, sur les quelle on constate qu'il y'a une grande différence de l'image issue de CSA par rapport a celle de FPA (Fig. 3.5) :



Figure(3.4) : l'optimisation de la phase d'image optique par les deux méthodes FPA/CSA .

On remarque certaines zones où des points blancs apparaissent dans une image et l'autre n'apparaît pas, comme nous l'avons vu dans la section (3.3), où nous avons pris une petite zone de l'image. Afin de pouvoir comparer les deux images avec précision, nous nous appuyons sur les résidus des images, et cela est illustré dans la figure suivante :



Figure(3.5) : Le résidu de la phase d'image optique par les deux méthodes FPA/CSA

D'après les résultats des résidus au-dessus, on voit que la phase par la méthode de FPA est plus bruitée que la phase obtenue par CSA, et sur la base des résultats obtenus dans les sections précédentes (3.2), (3.3), (3.4), nous concluons que le meilleur moyen d'optimisation optimale est la méthode de recherche de coucou.

3-5 conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons implémenté les deux méthodes d'optimisation, l'algorithme de recherche de coucou **CSA** et l'algorithme de polissage floral **FPA** pour optimiser la cohérence interférométrique SAR, et nous avons obtenu les résultats suivants :

- Étant itératifs, ces algorithmes prennent un temps considérable dans le processus d'optimisation de la cohérence pour les grandes images, ce qui empêche leur utilisation en ligne.
- La méthode CSA est la plus performante en termes de qualité de la phase optimisée.
- Le nombre de résidus des interférogrammes optimisés en utilisant CSA est le plus faible.
- Le type des cibles influence considérablement la qualité de la cohérence optimisée.

Conclusion

Conclusion

L'objectif de ce mémoire est d'étudier d'investiguer deux méthodes d'optimisation métaheuristique de la cohérence interférométrique afin de voir celle qui fournit une phase moins bruitée, et un meilleur temps de convergence.

La cohérence des mécanismes de diffusion entre les deux images est améliorée par les algorithmes d'optimisation afin d'avoir une qualité meilleure de la phase interférométrique.

Les données PolinSAR utilisée dans ce mémoire ont été acquises dans la bande L sur la région d'Oberpfaffenhofen en Allemagne par le Centre aérospatial allemand (DLR), En utilisant le radar E-SAR.

Nous avons évalué la faisabilité de l'approche d'optimisation et comparé les performances entre l'algorithme de pollinisation des fleurs et l'algorithme de recherche de coucou avec plusieurs tests : les images de phase ainsi que le résidu de phase et l'efficacité temporelle.

La méthode proposée (CSA) est la méthode qui donne le meilleur rendement dans la phase d'interférence qui est un véritable mécanisme de diffusion. Le nombre de valeurs résiduelles calculées pour le tracé de l'interférogramme dans CSA est le plus faible..

Ce type de recherche est en fait très récent et nécessite plus d'attention d'autant plus qu'il est spécialisé dans de nombreuses revues, et avec le développement d'une programmation parallèle adaptée aux applications PolInSAR

Référence

Référence bibliographique

- [1] THÈSE / UNIVERSITÉ DE RENNES 1 sous le sceau de l'Université Européenne de Bretagne pour le grade de DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE RENNES 1 Spécialité : Traitement du signal et télécommunications Ecole doctorale matisse présentée par VishalRiché . préparée à l'unité de recherche (no 6164 IETR) Institut d'électronique et de télécommunications de Rennes ISTIC - UFR informatique électronique (<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00870035/document>).
- [2] Antoine DENIS, 2020 Université de Liège (ULIEGE) Arlon Campus Environnement Département des Sciences et Gestion de l'environnement Unité Eau Environnement Développement (EED) Avenue de Longwy, 185 6700 Arlon, Belgique.
- [3] J. Darricau, Physique et théorie du radar, 2e éd., vol. I, Paris: SODIPE, 1981.
- [4] <http://server.idemdito.org/pics/mil/electro/radar.html>.
- [5] L. J. Cutrona, W. E. Vivian, E. N. Leith et G. O. Hall, «A high resolution radar combatsurveillance system,» IRE Transactions on Military Electronics, Vols. 1 sur 2MIL-6, pp. 119-133, 1961.
- [6] Tomiyasu, K. (1978). *Tutorial review of synthetic-aperture radar (SAR) with applications to imaging of the ocean surface. Proceedings of the IEEE, 66(5), 563–583.*
- [7] Principe du Radar à Synthèse d'Ouverture RSO & Simulation d'une chaîne d'acquisition d'image Radar Hadj Sahraoui Omar Division de Télédétection Centre National des Techniques Spatiales, 1 Rue de la Palestine, B.P.13 Arzew 31 200 Oran Algérie.
- [8] J. C. Toomay et P. J. Hannen, Radar principles for the non specialist, Scitech publishing Inc..
- [9] M. Skolnik, Radar handbook (3rd edition), New York: McGraw Hill, 2008.
- [10] Alexandru ISAR , André QUINQUIS , Michel LEGRIS , Dorina ISAR Débruitage des images SAR : Application de la TODDE (Transformée en Ondelettes Discrète à Diversité enrichie)Faculté d'électronique et télécommunications, Université « Politehnica » de Timisoara, Roumanie ENSIETA, Brest, France.

Référence bibliographique

- [11] Gabriel Vasile.2007, Imagerie Radar à Synthèse d'ouverture interférométrique et polarimétrique. Application au suivi des glaciers alpins.. Traitement du signal et de l'image [eess.SP]. Université de Savoie; Université Polytechnique de Bucarest,. Français.
- [12] Bovenga, F. (2020). Special Issue "Synthetic Aperture Radar (SAR) Techniques and Applications." *Sensors*, 20(7), 1851.
- [13] JC. Curlander et R.N. McDonough, *Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing*, John Wiley and Sons, New York, 1991.
- [14] [C. Elachi, *Introduction to the Physics and Techniques of Remote Sensing*, John Wiley & Sons, 1987.
- [15] J-S. Lee et E. Pottier, *Polarimetric Radar Imaging: From Basics to Applications*, CRC Press, Taylor& Francis Group, 2009.
- [16] W-M. Boerner, M. B. El-Arini, C-Y. Chan, P. M. Mastoris, Polarization Dependence in Electromagnetic Inverse Problems, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. AP-29, no. 2, Mars 1981.
- [17] W-M. Boerner et al. (Eds), *Direct and Inverse Methods in Radar Polarimetry*, Proceedings of the NATO-ASI Series C : Mathematical and Physical Sciences, vol. C-350, Part 1, Kluwer Academic Publishers, Pays-Bas, 1992 .
- [18] E. Lüneburg, S. R. Cloude et W-M. Boerner, On the Proper Polarimetric Scattering Matrix Formulation of the Forward Propagation Versus Backscattering Radar Systems Description, *Proceedings of IGARSS'97*, Singapoure, 3-8 Août 1997.
- [19] S. R. Cloude et E. Pottier, *A Review of Target Decomposition Theorems in Radar Polarimetry*, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 34, no. 2, Mars 1996.
- [20] R. Bamler et P. Hartl, *Synthetic aperture radar interferometry*, *Inverse Problems*, vol. 14, no. 4, 1998.
- [21] The interested reader is referred to Chapter 11 of the book entitled "Nature-Inspired Optimisation Algorithms" by Xin-She Yang [108] for the methodological framework and the implementation of the method.
- [22] Aishwarya Palaiah, Akshata H Prabhu, Reetika Agrawal and S. Natarajan, "Clustering using Cuckoo search levy flight", 2016 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI), IEEE 2016.

Référence bibliographique

[23] Meng Zhang, Dengxu He and Chonglong Zhu, "Cuckoo Search Algorithm Based on Hybrid-Mutation", 2016 12th International Conference on Computational Intelligence and Security (CIS), IEEE 2016.

[24] X.-S. Yang, M. Karamanoglu, and X. He, "Flower pollination algorithm: a novel approach for multiobjective optimization," *Engineering Optimization*, vol. 46, no. 9, pp. 1222–1237, 2014.

[25] BAER (J.-G.), 1946. — *Le Parasitisme*. Masson et Cie , Paris.

[26] Z Lu, D Dzurisin "InSAR imaging of Aleutian volcanoes" , 2014 The Earth Resources Observation and Science (EROS) Center is a U.S. Geological Survey (USGS).