
République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Blida I

INSTITUT D'AERONAUTIQUE ET DES ETUDES SPATIALES

DEPARTEMENT ETUDES SPATIALES

Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de Master option
Télécommunications spatiales.

Evaluation des méthodes tomographique SAR basée sur « MUSIC » et « CAPON » pour
l'inversion des hauteurs d'arbres

Proposée par :

Mr Sofiane Tahraoui

Encadré par :

Mr Sofiane Tahraoui

Mr Foued Cherchour

Membres du jury :

M^{me} Mouffok Lila (président de jury)

Mr Boussad Azmedroub (examinateur)

Rédigé et présenté par :

Boukhalfa Riadh

Boumana Aboubakr

2020/2021

Remerciement

J'adresse mes remerciements à tous ce qui contribué à ce que la réalisation de ce travail soit possible.

En premier lieu, je remercie évidemment ma famille , à savoir mes parents , mes sœurs , qui m'ont soutenu tout au long de ce périple et auxquels je dédiez ce travail .

Je remercie Mr Sofiane Tahraoui qui, en tant que promoteur, et Mr Foued Cherchour tant que co-promoteur , m'a guidé dans mon travail .

À toutes ces personnes, et à beaucoup d'autres que je n'ai pas citées, je présente mes remerciements et ma plus profonde gratitude.

RIADH

En premier lieu, Je souhaite avant tout Mes sincères remerciements à ma famille : Mes parents, ma mère, mes frères, tous mes parents, mes amis et mes professeurs, qui m'ont accompagné, m'ont aidé, m'ont soutenu, m'ont encouragé tout au long de la réalisation de cette mention, et de ma carrière scolaire.

Je remercie Dr Sofiane Tahraoui , pour le temps qu'il a consacré à m'apporter les outils méthodologiques indispensables à la conduite de cette recherche. Son exigence m'a grandement stimulé.

Un grand merci également à Mr Foued Cherchour pour avoir eu la patience de répondre à mes innombrables questions.

J'aimerais exprimer ma gratitude à tous les chercheurs et spécialistes, trop nombreux pour les citer, qui ont pris le temps de discuter de mon sujet. Chacun de ces échanges m'a aidé à faire avancer mon analyse.

ABOUBAKR

Résumé

Le but de cette thèse est d'extraire l'altitude d'une Forêt , pour ça on a construit une image tridimensionnelle à partir des images acquises par un radar aéroporté en utilisant la tomographie SAR basée sur la méthode MUSIC et la méthode CAPON. Les résultats obtenus sont comparés avec celles obtenus en utilisant la méthode Capon. Les images sur laquelle nous avons travaillé sont des images d'une scène forestière en Allemagne dans la région de TROCKENBORN.

Abstract

The purpose of this thesis is to extract the altitude of a forest, for that we have built a three-dimensional image from the images acquired by an airborne radar using the SAR tomography based on the MUSIC method and the CAPON method. The results obtained are compared with those obtained using the Capon method. The images on which we worked are images of a forest scene in Germany in the TROCKENBORN region.

ملخص

الهدف من هذا العمل هو بناء صورة ثلاثية الابعاد انطلاقا من الصور التي تم الحصول عليها بواسطة رادار محمول جوا باستخدام التصوير المقطعي SAR باستعمال طريقة MUSIC. تتم مقارنة النتائج المتحصل عليها مع تلك التي تم الحصول عليها باستخدام طريقة CAPON. الصور التي عملنا عليها عبارة عن صور لمشهد غابي في منطقة تروكنبورن بألمانيا.

Table des matières

Liste des figures:	5
Listes des sigles et des acronymes	6
INTRODUCTION GÉNÉRALE :	2
CHPITER I : Radar à synthèse d'ouverture	7
I.1 INTRODUCTION :	7
I.2 Le Radar à synthèse d'ouverture :	7
I.2.1 Définition et principe de fonctionnement :	7
I.2.2 Principe de l'antenne synthétique :	9
I.2.3 Types de plateformes SAR :	10
I.3 Images SAR (SLC) :	11
I.4 PRINCIPE D'ACQUISITION D'UNE IMAGE RADAR A OUVERTURE REELLE :	12
I.4.1 Résolution en distance (Range) :	12
I.4.2 Résolution en azimut :	13
I.5 Géométrie de visée :	14
I.6 Modes d'acquisition pour les radars imageurs :	15
I.6.1 Mode stripmap :	15
I.6.2 Mode spotlight :	16
I.6.3 Mode scanSAR :	16
I.6.4 Mode interférométrique :	17
I.6.5 Mode inverse :	17
I.7 Polarimétrie SAR :	17
I.7.1 Polarisation d'une onde électromagnétique :	18
I.7.2 Représentations polarimétriques d'une cible radar :	18
I.7.3 Matrice de diffusion :	19
I.8 Concept de cohérence :	20
I.8.1 Radar incohérent :	20
I.8.2 Radar cohérent :	20
I.9 Théorème de décomposition aux valeurs / vecteurs propres :	21
I.10 Interaction des ondes radar avec la végétation :	21
I.10 .1 phénomène Rétrodiffusion :	22
I.10 .2 Interactions avec le volume :	23
I.11 Interactions avec le sol :	23
I.12 Le chatoiement :	24
I.13 Opération de filtrage :	26
I.13.1 Filtre de lee :	26
I.13.2 Traitement multilook :	26
I.14 Conclusion :	27

CHAPITRE II : Interférométrie & la tomographie SAR.....	29
II.1 INTRODUCTION :	29
II.2 Interférométrie SAR (InSAR) :	30
II.2.1 Principe de l'InSAR :.....	30
II.2.2 Géométrie d'acquisition InSAR :	30
II.2.3 Paramètres mathématiques de l'INSAR :	32
II.2.4 Cohérence des interférogrammes et décorrélations :	37
II.3 Tomographie SAR :	38
II.3.1 État de l'art de la tomographie SAR :.....	38
II.3.2 Principe de la Tomographie SAR :	39
II.4 Formulation du problème de la tomographie SAR :	41
II.5 Données utilisés:	45
II.6 Lecture des images SAR :	46
II.7 Organigramme de l'algorithme music et Capon :	47
II.8 Méthode d'inversion.....	47
II.8.1 Méthode de capon :	48
II.8.2 Méthode Music :.....	51
II.9 Conclusion :	53
Chapitre III : APPLICATION ET RESULTATS	55
III .1 Introduction :	55
III.2 Implémentation et comparaison des deux méthodes music et capon.....	55
III.2.1 LES IMAGES TOMOGRAPHIQUES :	56
III.5.2 PUISSANCE DES SIGNAUX REFLECHIS :	58
III.2.3 LES PROFILS TOMOGRAPHIQUES :	59
III.3 Conclusion :	62
Conclusion Générale :	64
Bibliographie :	65

Liste des figures:

FIGURE I.1: Schéma de principe d'un radar SAR	8
FIGURE I 2 : configuration géométrique de la prise d'échantillon dans l'axe azimut.....	9
FIGURE I 3:Types de plateformes SAR (a) aéroportée (b) spatioporté.....	10
FIGURE I 4: (a) image radar en amplitude, (b) image radar en phase.	11
FIGURE I 5:PRINCIPE D'ACQUISITION D'UNE IMAGE RADAR A OUVERTURE REELLE.	12
FIGURE I 6: SEPARATION ET SUPERPOSITION DES ONDES REFLECHIES.....	13
FIGURE I 7: Résolution en azimut.....	14
FIGURE I 8:Géométrie de visée d'un radar aéroporté.	15
FIGURE I 14: Diffusion d'une onde par un objet.....	19
FIGURE I 15: Origine de la cohérence, impulsions de transmission cohérentes et non cohérentes.....	20
FIGURE I 16: Pénétration des arbres via différentes longueurs d'onde	22
FIGURE I 17: Mécanisme de la rétrodiffusion dans une forêt.	23
FIGURE I 18: Interaction spéculaire (à gauche) et diffuse (à droite) d'une surface.....	24
FIGURE I 19: Effet de speckle.	25
FIGURE I 20: Speckle dans les images SAR	25
FIGURE I 21 : Filtrage spatial.	26
FIGURE II 1 :phase de trajet et phase pixellaire	29
FIGURE II 2: Géométrie de l'interférométrie SAR	31
FIGURE II 3: Modèle géométrique détaillé de l'InSAR.....	32
FIGURE II 4: Le mont Etna , sicile , Italie, (X-SAR)	34
FIGURE II 5:Géométrie utilisée pour la calcul de phase de la terre plate.....	35
FIGURE II 6: correction de la phase de la terre plate	36
FIGURE II 7 :Géométrie de visualisation du RSO à visée latérale pour un système à lignes de base multiples éclairant une scène forestière.	40
FIGURE II 8: construction d'un cube TomoSAR.....	40
FIGURE II 9: géométrie de la tomographie sar à lignes de base multiples d'une zone forestière est vue par n capteurs sur une trajectoire de vol parallèle.....	41
FIGURE II 10: géométrie d'acquisition multi-passe dans le plan d'inclinaison – élévation.	42
FIGURE II 11: Image optique des données de test à la zone foresterie de Trackneborn par Goole Earthe	45
FIGURE II 12: image SAR d'amplitude [dB].....	46
FIGURE II 13: Diagramme l'application de la tomographie SAR en utelisant MUSIC et CAPON	47
FIGURE II 14 : Illustration d'un système de formation de faisceaux en réseau	49
FIGURE III 1:image optique (a) terre nue (b)zone foresterie	55
FIGURE III 2:les images tomographique horizontales qui correspond à diffèrent hauteurs.	56
FIGURE III 3: la déférence des puissances réfléchis de deux pixels	58
FIGURE III 4 a : Images de profils en distance (range) pour différent azimutes, (a) azimute 283	59
FIGURE III 5: Images de profils en azimute pour différent ranges, (a) range 194, (b) range 718.	61

Listes des sigles et des acronymes

SAR : Synthetic Aperture Radar

SLC : Single look complex

RSO : Radar à Synthèse d'Ouverture

INSAR : Interferometric Synthetic Aperture Radar.

POLSAR : Polarimetric Synthetic Aperture Radar.

PRF : Pulse Répétition Fréquence.

MUSIC : Multiple signale classification.

δ_r : Résolution en distance.

δ_z : Résolution en Azimut.

N : nombre de capteur antenne.

b_n : distance entre les capteur.

λ : longueur d'onde.

P : nombre de sources.

σ : variance.

y : vecteur de signal reçu.

S : vecteur de signal sources (émetteur).

f : fréquence.

b : vecteur de bruit.

θ : ongle d'incident.

t : temps.

$[]^T$: vecteur transposé.

a : vecteur directionnel.

A : matrice directionnel.

R_{yy} : matrice covariance.

R_s : matrice covariance de signal source.

R_B : matrice covariance de signal bruit.

H : le transposé conjugué.

I : matrice identité.

w : vecteur pondération.

Λ : matrice diagonale des valeurs propres de R_{yy} .

E_s : valeur propre sous espace signal.

E_b : vecteur propre sous espace bruit.

P_{music} : puissance de MUSIC.

P_{capon} : puissance de CAPON.

INTRODUCTION
GENERAL

INTRODUCTION GÉNRALE :

Le RADAR est un système de détection qui utilise les ondes radio. Il permet de détecter divers objets et de déterminer leur distance, leur vitesse grâce aux ondes réfléchies par la cible.

La position des objets est estimée grâce au temps de retour du signal tandis que leur vitesse est mesurée à partir du changement de fréquence du signal par effet Doppler. Le nom de cette technologie vient de l'acronyme anglais : Radio Détection And Ranging, qui signifie littéralement "détection et télémétrie radio".

En effet, les radars reposent sur un émetteur (qui envoie des ondes radio) et un récepteur (qui détecte les ondes réfléchies par la cible). L'histoire d'invention du radar a débuté par les travaux du physicien JAMES CLARCK MAXWELL qui a démontré que les ondes électromagnétiques sont réfléchies par les surfaces métalliques. Plusieurs inventeurs, scientifiques et ingénieurs ont contribué au développement du radar au début du XXe siècle.

En 1904, l'allemand Christian Hülsmeyer montre qu'il est possible de détecter la présence de bateaux dans un brouillard très dense à l'aide d'ondes radio. Ensuite, en 1917, Nikola Tesla établit les principes théoriques du futur radar. En 1935, le britannique Robert Watson-Watt a déposé une demande de brevet, qui est largement considéré comme l'inventeur «officiel» du radar. Les Britanniques ont par la suite établi le premier réseau radar sous le nom de «Chain home».

Parallèlement, des recherches dans ce domaine sont également menées en Hongrie, en Allemagne et aux Etats-Unis. Des systèmes opérationnels ont ainsi pu être utilisés au cours de la Seconde Guerre mondiale. L'expérience acquise pendant le conflit par un grand nombre de chercheurs a permis d'élargir l'utilisation du radar à d'autres domaines que le militaire. On le retrouve directement ou indirectement aujourd'hui dans l'aviation civile, le contrôle maritime, la détection météorologique, les détecteurs de vitesse de nos routes et même en médecine, l'observation de la terre.

La télédétection est un outil important pour fournir des images à partir de satellites d'observation de la Terre et convient à de nombreuses applications souhaitées. Cet outil aérospatial utilise l'énergie électromagnétique pour obtenir des informations de la surface de la Terre et de l'atmosphère autour de la Terre sans contact direct.

Les dispositifs de télédétection qui mesurent l'énergie disponible naturellement sont des capteurs passifs. Le soleil est la source d'énergie ou de rayonnement utilisé en télédétection. Cette énergie est soit réfléchi (la portion visible) ou absorbée et transmise (infra -rouge thermique) par la cible. Les capteurs passifs sont des dispositifs de télédétection qui mesure l'énergie disponible naturellement.

Un capteur actif génère sa propre énergie pour éclairer la cible: il émet un rayonnement électromagnétique directement vers la cible. Ensuite, le rayonnement réfléchi par la cible est détecté et mesuré par le capteur. L'avantage des capteurs actifs est qu'ils peuvent mesurer à tout moment de la journée ou de la saison.

Les systèmes actifs d'observation spatiale émettent un signal radar et reçoivent le signal rétrodiffusé associé à l'aide d'une antenne. Un traitement cohérent du signal renvoyé lorsque le radar est en mouvement permet de construire une image radar de la scène scannée. Un radar construit sur ce principe est appelé radar à synthèse d'ouverture (SAR).

Compte tenu de ses performances par rapport au système optique, le système SAR a montré un gain remarquable pour les applications de télédétection. Ses avantages incluent l'indépendance des conditions climatiques, l'acquisition continue jour et nuit, la capacité de pénétration de la couche nuageuse, la capacité de pénétration du sol et le potentiel d'exprimer la rugosité de la surface et la teneur en humidité. De nombreuses applications basées sur le SAR ont été découvertes et développées par l'émergence de la polarimétrie SAR (PolSAR) dans les années 1980 et de l'interférométrie SAR (InSAR) dans les années 1990.

La polarimétrie SAR, qui est une extension de la technologie SAR monocanal, utilise une antenne émettant et recevant dans deux états de polarisation orthogonaux, permettant une caractérisation fine des mécanismes de rétrodiffusion. Cette technique s'est avérée assez efficace pour la discrimination des diffuseurs et pour l'identification des surfaces naturelles et urbaines.

L'interférométrie est une technique particulière consiste à étudier les propriétés d'une ou de plusieurs ondes en identifiant l'interférence qui se produit lorsque deux ou plusieurs ondes s'appliquent l'une à l'autre. Un dispositif qui désigne l'interférence d'onde est appelé un interféromètre. L'étude du chevauchement est particulièrement importante dans de multiples disciplines de l'astronomie, de la technologie des fibres optiques, de la science marine, de la sismologie, de la mécanique quantique, et la télédétection.

Dans notre travail, nous allons passer à l'utilisation du radar à ouverture synthétique pour extraire les hauteurs.

La tomographie est une technique qui permet de découper verticalement les contributions d'une scène et donc permet d'accéder à une image 3D. Pour une forêt, on peut obtenir une information sur la structure du volume et peut séparer les contributions du volume d'une part ; du sol et du double rebond d'autre part.

Cette thèse structurée en trois chapitres .

- Dans le premier chapitre nous allons parler sur le Radar SAR , son principe de fonctionnement des généralités sur la polarimétrie SAR.
- Ensuite , dans le deuxième chapitre on va introduire l'interférométrie SAR , sa principe de fonctionnement et les différentes phase interférométrique et ensuite la tomographie SAR .
- Dans le troisième chapitre on va implémenter les deux méthodes d'inversion de puissance et on va faire une petite comparaison entre eux.

CHAPITRE I :
Radar à synthèse d'ouverture

CHPITER I : Radar à synthèse d'ouverture

I.1 INTRODUCTION :

Le radar classique émet des ondes à partir d'une position fixe et acquiert la réponse de la scène au signal transmis. Mesurer le temps qu'il faut pour que la réponse de l'objet se propage au radar peut mesurer avec précision la distance objet- radar, et l'amplitude du signal reçu peut détecter les obstacles d'intérêt et évaluer la réflectivité. Ce type de radar, appelé radar à ouverture réelle, ne peut distinguer des objets situés à une distance radiale identique, même si leurs positions sont très éloignées dans la direction transverse.

Les Radars à synthèse d'ouverture sont des dispositifs électroniques qui permettent d'imager avec une haute précision spatiale la réflectivité électromagnétique d'objets ou d'environnements.

Dans ce chapitre nous allons parler en générale sur le radar à ouverture réelle, en suite une définition et principe sur le radar à synthèse d'ouvert ure. Enfin on terminera ce chapitre par la polarimétrie SAR.

I.2 Le Radar à synthèse d'ouverture :

I.2.1 Définition et principe de fonctionnement :

Un radar à synthèse d'ouverture (RSO) [1] est un radar imageur qui effectue un traitement des données reçues afin d'améliorer la résolution en azimuth. Les images radar étant le résultat de la diffusion d'une onde électromagnétique, la phase et l'amplitude portent de l'information hétérogène liée à l'occupation du sol, l'interaction avec le milieu diffusant .Ceci permet notamment de remonter à des mesures physiques telles que la hauteur de la végétation, la topographie, le déplacement.

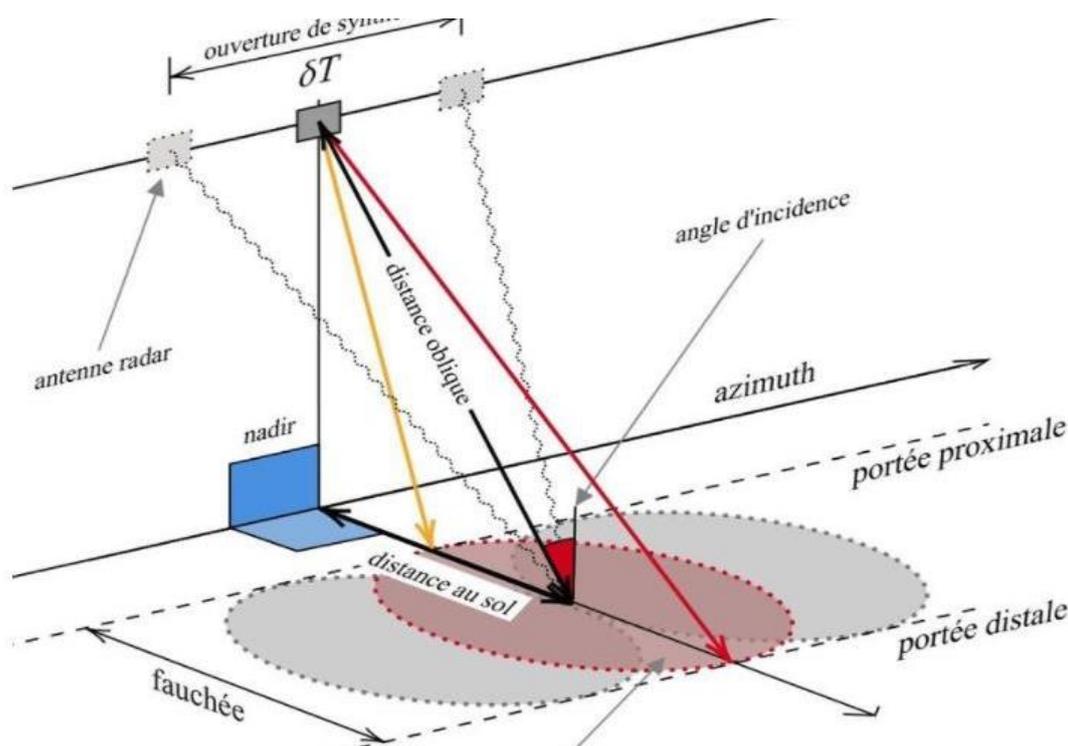


FIGURE I.1: Schéma de principe d'un radar SAR

Afin d'améliorer la résolution en azimuth sans pour autant passer par une augmentation physique de la taille de l'antenne, on utilise la nature cohérente des signaux émis et le déplacement du porteur afin de reconstituer une antenne plus grande. On appelle ce système radar à synthèse d'ouverture (**RSO**) ou « synthetic aperture radar » (**SAR**) en anglais. Le concept est basé sur un traitement du signal et permet d'obtenir une résolution azimuthale comparable à la résolution transversale (quelques mètres). Il est ainsi possible d'obtenir des images radar d'une très grande finesse. Il est possible d'obtenir une résolution azimuthale $r_a = L/2$ où L est la taille de l'antenne dans l'axe de la trajectoire. On constate que ce résultat est indépendant de la distance entre l'antenne et la scène et que la résolution diminue avec la taille de l'antenne. En pratique, un **RSO** émet un signal modulé en fréquence appelé « chirp ». Pour une bande de fréquence Δf , la résolution transversale est donnée par :

$$r_a = c/2\Delta f \quad (\text{I.1})$$

I.2.2 Principe de l'antenne synthétique :

Le principe de l'antenne synthétique est basé sur le déplacement de l'antenne d'émission entre les différentes acquisitions. En considérant la configuration de la (**Figure I.2**), l'antenne d'émission se déplace d'une distance totale L , suivant l'axe azimutal, par rapport à la région d'intérêt. De la même manière que pour l'analyse en distance, on considère que les objets placés sur la région d'intérêt sont immobiles durant toute la durée de l'acquisition radar. Entre deux impulsions, l'antenne d'émission se déplace d'une distance Δd . Ce déplacement entraîne l'apparition d'un décalage doppler au niveau de la phase des signaux renvoyés par les réflecteurs situés sur la région d'intérêt. Ce décalage doppler est dû à la différence des distances parcourues par l'onde émise lors du trajet "émetteur-réflecteur-récepteur" pour chaque position de l'antenne d'émission. En prenant en compte les différents déplacements Δd de l'antenne d'émission et de réception (donc des différents décalages Doppler associés), il est possible en utilisant un traitement spécifique, d'obtenir une bonne discrimination spatiale dans la direction azimutale. Cette opération s'appelle la synthèse d'ouverture. Le choix de la distance Δd doit cependant respecter des contraintes. En effet, cette distance Δd représente aussi la fréquence d'échantillonnage spatiale en azimut du système imageur. Il faut donc que cette fréquence d'échantillonnage respecte le théorème de Shannon dans le domaine espace ce qui donne :

$$\Delta d \leq \frac{c}{2f_c + B} \quad (\text{I.2})$$

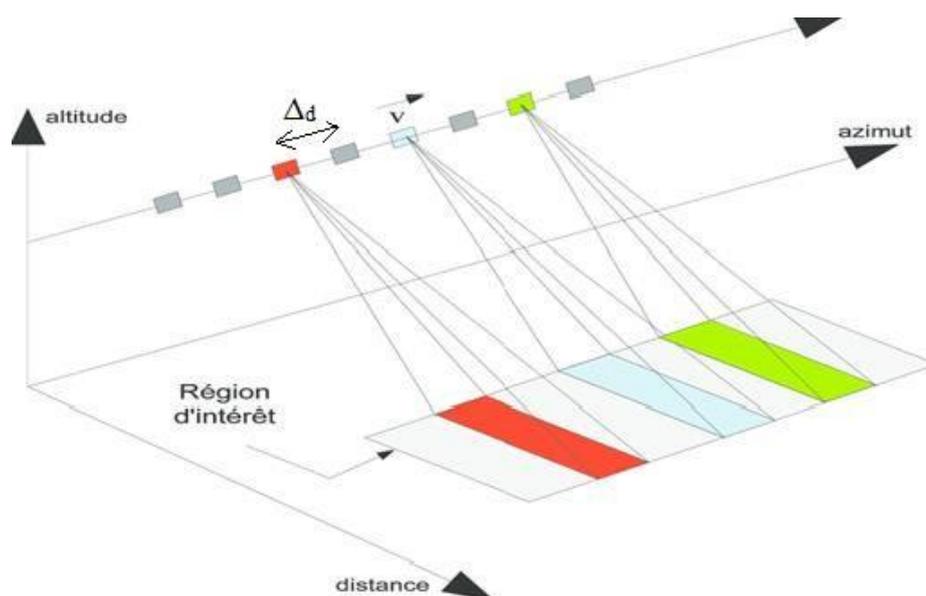


FIGURE I 2 : configuration géométrique de la prise d'échantillon dans l'axe azimut.

I.2.3 Types de plateformes SAR :

On distingue deux principaux types de plateformes dans l'imagerie radar SAR :

✓ **Plateforme aéroportée :**

Un radar aéroporté est embarqué sur un aéronef (généralement un avion). Il couvre une grande étendue d'angles d'incidence (**entre 60° et 70°**). [2]

✓ **Plateforme spatioportée :**

Un radar spatial est embarqué sur un satellite en dehors de l'atmosphère. Son étendue d'angles d'incidence est étroite (**entre 5° et 15°**). [2]

Comparaison :

- Le radar spatioporté peut acquérir des images plus rapidement au-dessus de plus grandes régions que le radar aéroporté puisqu'il opère à des altitudes 100 fois plus hautes (plusieurs centaines de kilomètres).
- Le radar aéroporté est flexible vu son aptitude à acquérir des données partout et en tout temps, tant que les conditions météorologiques le permettent. Ce qui n'est pas le cas du radar spatioporté vu sa géométrie de visée et son horaire d'acquisition des données qui sont soumises à son orbite.
- Le radar aéroporté est sujet aux mouvements de l'avion (variation de vitesse,...) ainsi qu'aux conditions météorologiques (comme cité précédemment). Ceci engendre des erreurs de positionnement que ne subit pas le radar spatioporté car son orbite est généralement très stable et sa position peut être calculée très précisément.

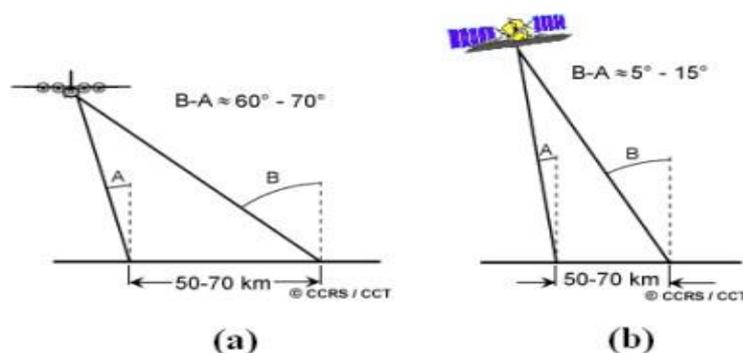


FIGURE I 3: TYPES DE PLATEFORMES SAR (A) AEROPORTEE (B) SPATIOPORTE.

I.3 Images SAR (SLC) :

Les images Single Look Complex (SLC) sont des images dans le plan d'imagerie oblique par azimuth, dans le plan image de l'acquisition des données satellitaires. Chaque pixel de l'image est représenté par une valeur de magnitude complexe et contient donc des informations d'amplitude et de phase.

L'amplitude du signal reçu dépend des caractéristiques du sol (le signal est plus ou moins réfléchi, transmis ou diffusé) et correspond à la quantité de lumière renvoyée vers le satellite. Par exemple, une zone lisse reflétera le signal comme un miroir, et en raison de l'inclinaison du faisceau, le signal ne retournera pas au radar. Les zones lisses sur l'image d'amplitude apparaîtront plus sombres. À l'opposé, les surfaces rugueuses et les pentes dirigées vers les satellites apparaîtront lumineuses. [3]

La phase du signal reçu dépend de la phase du pixel (due à la nature du sol et des objets qui y sont présents) et de la phase du trajet, cette dernière ne dépend que de la distance entre le satellite et le sol. Formées de points dont la couleur (du blanc au noir – selon une nuance de gris – ou selon une échelle de couleur arbitraire) correspond à une valeur de phase comprise entre 0 et 2π , les images de phase ressemblent à du bruit, et ne sont pas exploitables en tant que telles.[3]

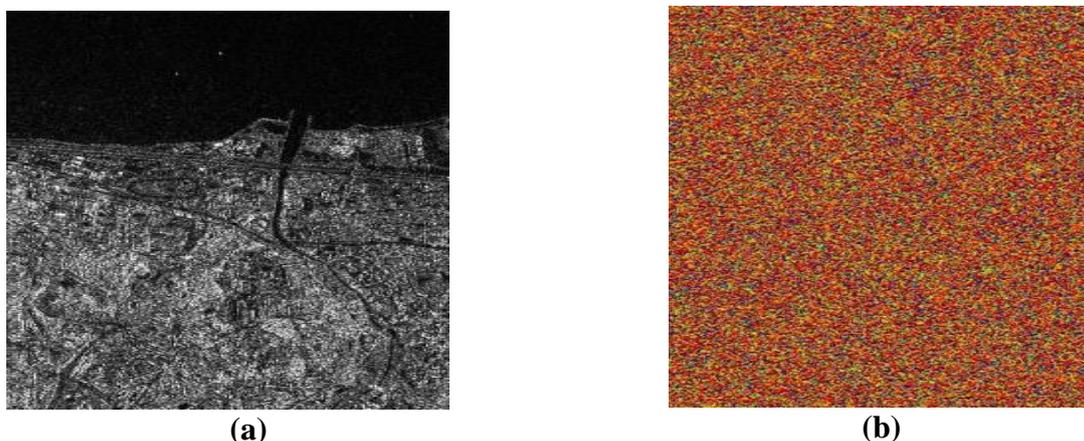


FIGURE I 4: (a) image radar en amplitude, (b) image radar en phase.

I.4 PRINCIPE D'ACQUISITION D'UNE IMAGE RADAR A OUVERTURE REELLE :

Le radar à ouverture réelle est un radar à visée latérale, l'antenne portée par un avion vise le sol à une hauteur suivant un angle par rapport au nadir (l'axe perpendiculaire au radar sur le sol), Cet angle est appelé angle de visée θ , le radar émet des trains d'impulsions avec une fréquence appelée PRF (Pulse Répétition Fréquence) et cela le long de son déplacement suivant l'axe azimuthal. L'axe perpendiculaire à la direction azimuthale est nommé l'axe distant (radial ou transversal).

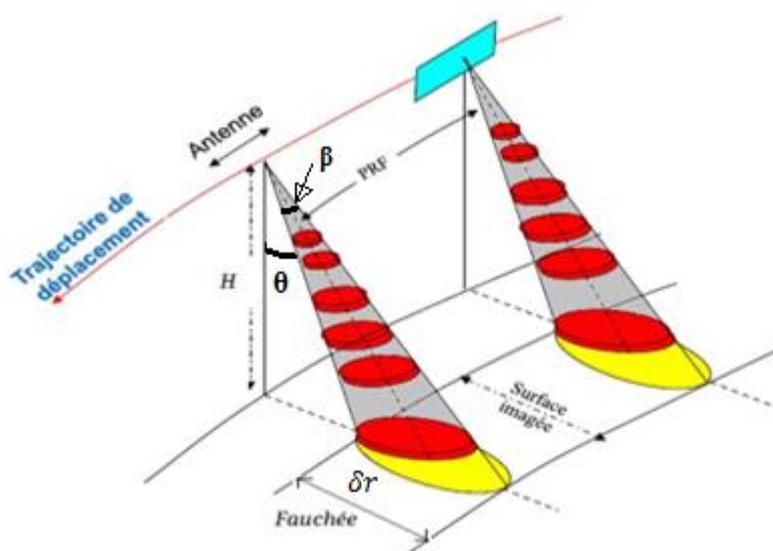


FIGURE I 5:PRINCIPE D'ACQUISITION D'UNE IMAGE RADAR A OUVERTURE REELLE.

I.4.1 Résolution en distance (Range) :

La résolution radiale en distance δr est donnée par la distance radiale minimale entre deux cibles pour que leurs échos ne soient pas mélangés, son expression est la suivante :

$$\delta r = \frac{c \tau}{2} \quad (\text{I.3})$$

Si l'angle d'incidence d'une cible est θ_i , la résolution de cette cible projetée au sol $\delta(r\text{-sol})$ sera donnée par l'équation suivante :

$$\delta(r_{\text{sol}}) = \frac{c \tau}{2 \sin \theta} \quad (\text{I.4})$$

La résolution en distance dans la formation d'image radar est en fonction uniquement de la durée τ de l'impulsion émise. Deux cibles seront différenciables si leurs échos ne se superposent pas. Pour cela, il faut que ces échos soient séparés d'une durée minimum égale à τ (Figure I.6).

La (Figure I.6.a) représente le cas où les deux cibles sont suffisamment éloignées l'une de l'autre, par rapport à la durée de l'impulsion, pour que leurs échos soient éloignés. La figure (Figure I.6.b) représente le cas contraire, les deux échos se chevauchent, car la distance radiale entre les deux cibles est inférieure à la longueur de l'impulsion émise.

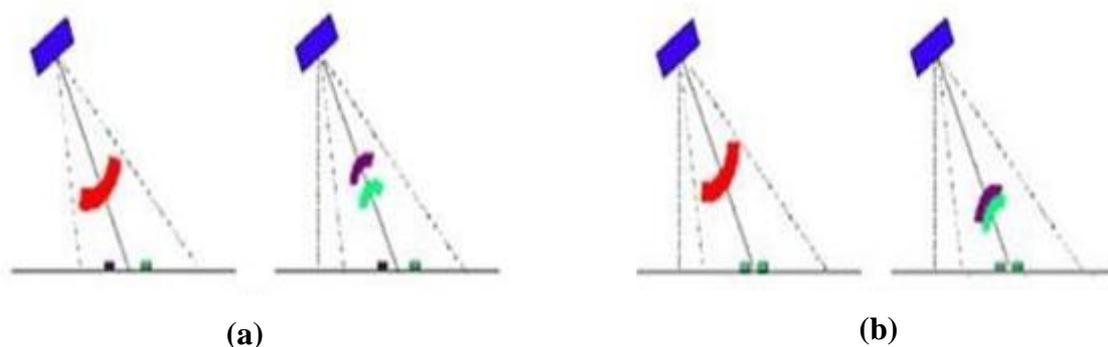


FIGURE I 6: SEPARATION ET SUPERPOSITION DES ONDES REFLECHIES

I.4.2 Résolution en azimut :

A une distance R du capteur, on obtient une résolution égale à :

$$\delta z = \beta \cdot R = \frac{\lambda}{L} \frac{H}{\cos \theta} \quad (\text{I.5})$$

Avec : $\beta = \lambda/L$.

λ est la longueur d'onde.

β l'ouverture du lobe principale.

L est la longueur de l'antenne.

R est la distance entre l'antenne et la cible.

H est l'altitude du radar.

La résolution en azimut δz est liée à la distance radiale R et de l'angle d'ouverture β du lobe principal du diagramme de l'antenne radar (Figure I.7). En général, deux cibles soient séparables en azimut, il faut qu'elles ne soient pas dans le lobe d'antenne au même moment.

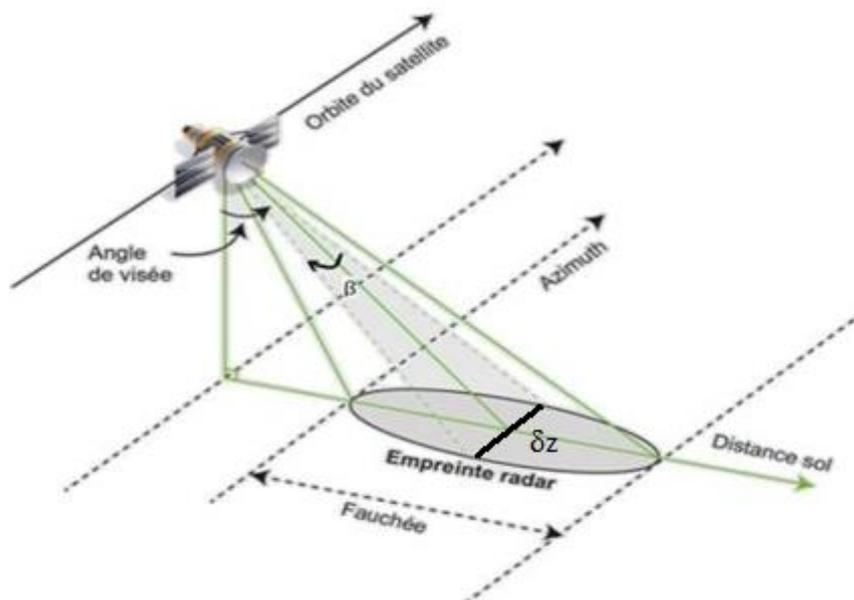


FIGURE I 7: RESOLUTION EN AZIMUT

I.5 Géométrie de visée :

La géométrie de la prise de vue des radars utilisée en télédétection est présentée (Figure I.8). On appelle axe azimut l'axe dirigé par le vecteur vitesse du porteur et axe en distance (ou « range » en anglais) l'axe orthogonal à ce vecteur et tangent à la surface du sol. Enfin, l'axe altitude est dirigé vers le haut et forme un repère orthogonal avec les deux autres axes. On appelle nadir la direction directement sous le radar. Intéressons-nous maintenant à l'illumination de la scène. La trace au sol du lobe de l'antenne est appelée fauchée. La visée latérale est une caractéristique commune à tous les radars SAR aéroportés et spatiaux.

La partie du couloir balayée la plus proche du nadir est appelée portée proximale (portée minimale sur l'image) tandis que la partie la plus éloignée est appelée portée distale (portée maximale sur l'image). L'angle d'incidence est défini comme étant l'angle entre le faisceau du radar et la normale à la surface du sol. L'angle de visée est l'angle moyen à partir duquel le radar illumine la surface.

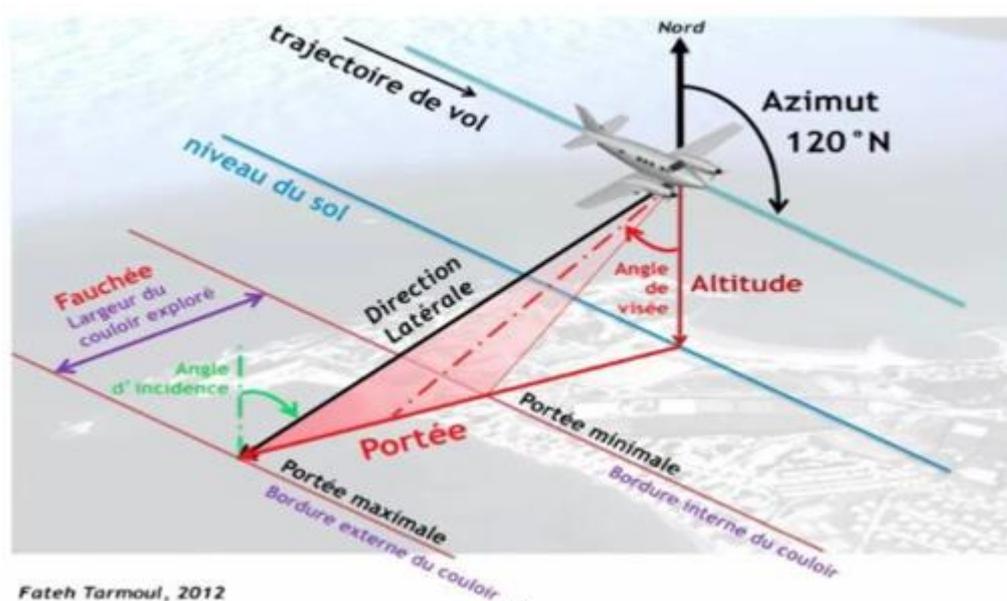


FIGURE I 8:GEOMETRIE DE VISEE D'UN RADAR AEROPORTE.

I.6 Modes d'acquisition pour les radars imageurs :

Les systèmes radars imageurs possèdent plusieurs modes d'acquisition possibles et dépendent des applications visées. Ainsi, les différents modes possibles sont [4] :

I.6.1 Mode stripmap :

Dans ce mode d'acquisition, l'antenne pointe vers une direction fixe lors de l'acquisition, tandis que la porteuse se déplace dans la direction azimutale. Ce mode d'acquisition peut générer des images de la zone éclairée du radar lors de l'acquisition. (figure I.2)

I.6.2 Mode spotlight :

ce mode est une autre variation du mode stripmap. Les résolutions en distance et en azimuth vont être améliorées en choisissant d'imager une portion de la région d'intérêt. Cette portion est illuminée le plus longtemps possible pendant la durée de passage du porteur. Pour cela la direction du faisceau d'illumination est contrôlée de manière électronique pour garder ce faisceau pointé vers la même zone à imager.

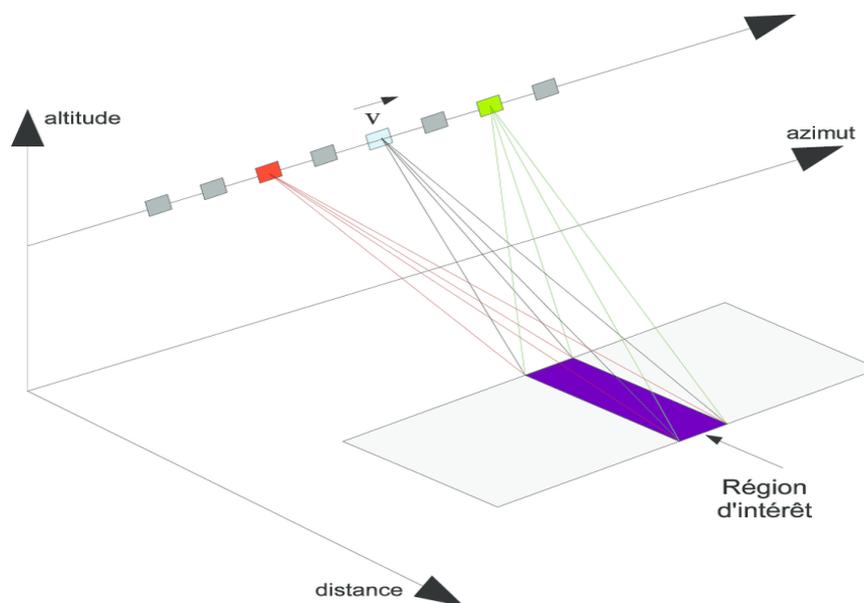


FIGURE I 9: CONFIGURATION DE L'IMAGERIE RADAR EN MODE SPOTLIGHT.

I.6.3 Mode scanSAR :

ce mode d'acquisition est une variante du mode stripmap. Lorsque vous déplacez l'antenne dans la direction azimuthale, le radar balaye dans la plage. Ce mode d'acquisition peut rendre la largeur de bande plus grande que la largeur de bande fournie par le mode stripmap. Cependant, cette augmentation de la largeur de la bannière altèrera la résolution azimuthale.

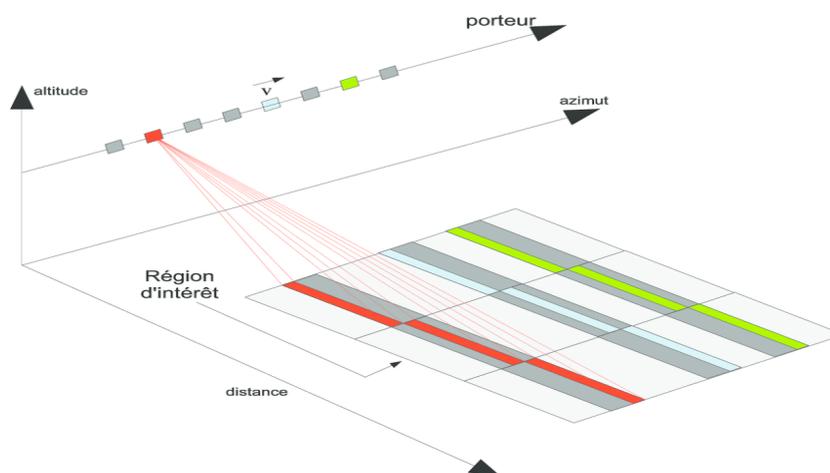


Figure I 10: configuration de l'imagerie radar en mode SCANSAR.

I.6.4 Mode interférométrique :

Ce mode d'acquisition est basé sur l'utilisation de deux récepteurs séparés afin de produire deux images de la région d'intérêt. Ces images radar sont alors combinées afin de créer l'interférogramme. À partir de cet interférogramme, il est possible de récupérer diverses informations telles que la hauteur des objets ou l'élévation du terrain.

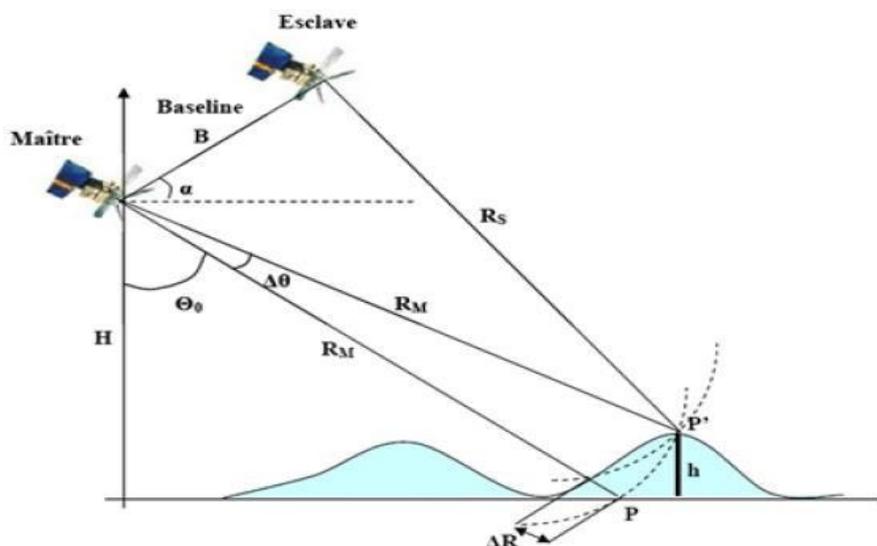


FIGURE I 11 configuration de l'imagerie radar en mode interférométrique.

I.6.5 Mode inverse :

Contrairement au mode stripmap, on considère ici que le radar est fixe et l'objet est en mouvement. Ce mouvement est alors utilisé pour produire une image de cet objet. Cette méthode d'acquisition permet en outre de faire du suivi d'objet à partir d'une station terrestre fixe.

I.7 Polarimétrie SAR :

La polarimétrie radar [5] est l'étude de l'effet d'une cible ou d'un milieu naturel sur l'état de polarisation d'une onde incidente. Les caractéristiques physiques d'une cible donnée, dont la constante diélectrique, la géométrie et la taille de ses composantes vont affecter la polarisation d'une onde rétrodiffusée.

La polarimétrie cherche à interpréter le signal reçu par un capteur radar polarimétrique pour en retirer de l'information sur la structure physique de la cible observée. Cette section décrit brièvement le principe de polarisation d'une onde ainsi que quelques méthodes de représentation du signal polarimétrique.

I.7.1 Polarisation d'une onde électromagnétique :

Polarisation, propriété de certaines radiations électromagnétiques dans laquelle la direction et l'amplitude du champ électrique vibrant sont liées d'une manière déterminée.

L'antenne du système radar peut être configurée pour transmettre et recevoir un rayonnement électromagnétique polarisé horizontalement ou verticalement. Les ondes émises et reçues avec la même direction de polarisation sont appelées Polarisation parallèle. **HH** signifie ondes transmises et reçues horizontalement **VV** représente l'onde émise et captée verticalement. Lorsque les ondes émises et reçues sont polarisées verticalement une à une l'une par rapport à l'autre, elles sont appelées polarisation croisée. Par exemple, **HV** signifie transmission horizontale et réception verticale, et **VH** signifie transmission verticale et réception horizontale.

Lorsque les ondes radar atteignent et se dispersent depuis la surface, la polarisation peut être modifiée. La modification dépend des propriétés de la surface. Cette transformation modifie l'apparence de la scène polarimétrique, ce qui permet souvent de déterminer le type de surface à partir de l'image.

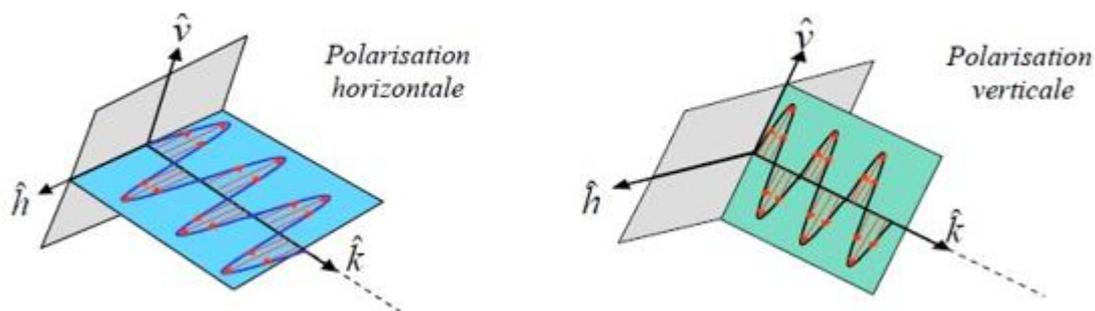


FIGURE I 12: ILLUSTRATION DES POLARISATIONS HORIZONTALE (A GAUCHE) ET VERTICALE (A DROITE).

I.7.2 Représentations polarimétriques d'une cible radar :

Lors de l'interaction entre une onde électromagnétique incidente et une cible radar, l'onde diffusée possède en général des propriétés polarimétriques différentes de celles de l'onde incidente. Cela est illustré par la figure I.14 où \vec{E}_t est le vecteur du champ électrique de l'onde transmise \vec{E}_i le champ incident de l'objet diffusant \vec{E}_s est le champ diffusé et \vec{E}_r est le champ reçu par l'antenne.

Pour une configuration de mesure donnée la modification de la polarisation due à la cible est modélisée sous la forme d'un opérateur matriciel.

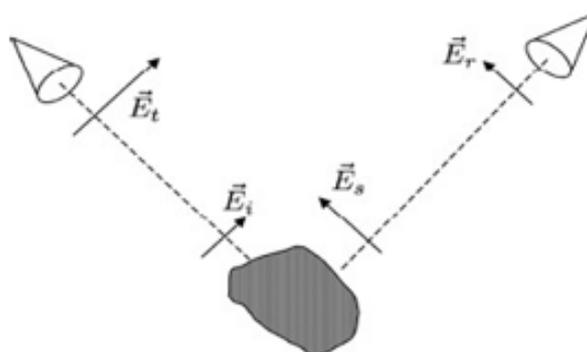


FIGURE I 9: DIFFUSION D'UNE ONDE PAR UN OBJET.

I.7.3 Matrice de diffusion :

Lorsqu'une onde polarisée horizontalement interagit avec une cible, l'onde diffusée peut avoir des composantes horizontales et verticales. Les propriétés de diffusion d'une cible sont contenues en totalité par la matrice de diffusion S [6] qui décrit comment la diffusion transforme le champ électrique de l'onde incidente au champ électrique de l'onde diffusée. La matrice est définie par l'équation :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E}_h^s \\ \mathbf{E}_v^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{E}_h^i \\ \mathbf{E}_v^i \end{bmatrix} \quad (\text{I.6})$$

Où l'indice supérieur « i » réfère à l'onde incidente. Une fois que l'on a mesuré la matrice, on pourra calculer l'amplitude et la polarisation de l'onde diffusée, quel que soit la polarisation de l'onde incidente exprimée par le vecteur $[\mathbf{E}_h^i, \mathbf{E}_v^i]$. on pourrait mesurer les quatre éléments à partir des canaux correspondants du système radar.

Dans le cas des radars mono-statiques, la plupart des cibles sont réciproques, ce qui veut dire que $S_{hv} = S_{vh}$, ou que la matrice de diffusion est symétrique et que seuls trois de ses éléments sont indépendants.

I.8 Concept de cohérence :

L'impulsion d'émission d'un radar cohérent démarre toujours à la même phase de sa période de référence. En revanche, un radar incohérent est un radar dont les impulsions ont une phase aléatoire. La cohérence dépend de l'appareil qui génère l'onde dans l'émetteur.

I.8.1 Radar incohérent :

Les émetteurs qui utilisent des oscillateurs de puissance (OP) (tels que des magnétrons) ne sont pas cohérents. En effet, lorsque des oscillateurs sont excités en envoyant un signal carré émis par un modulateur, leur phase d'auto-oscillation est aléatoire, et les impulsions successives ne sont pas liées entre elles.

Important: les auto-oscillateurs donnent une phase aléatoire et un radar incohérent.

I.8.2 Radar cohérent :

Les impulsions produites par l'émetteur de l'amplificateur de puissance (AP) ont toujours la même phase de démarrage et sont dites parfaitement cohérentes. Dans ce cas, l'onde est générée par une source radiofréquence permanente très stable (appelée générateur d'onde) à faible puissance, puis son signal de sortie passera par un amplificateur.

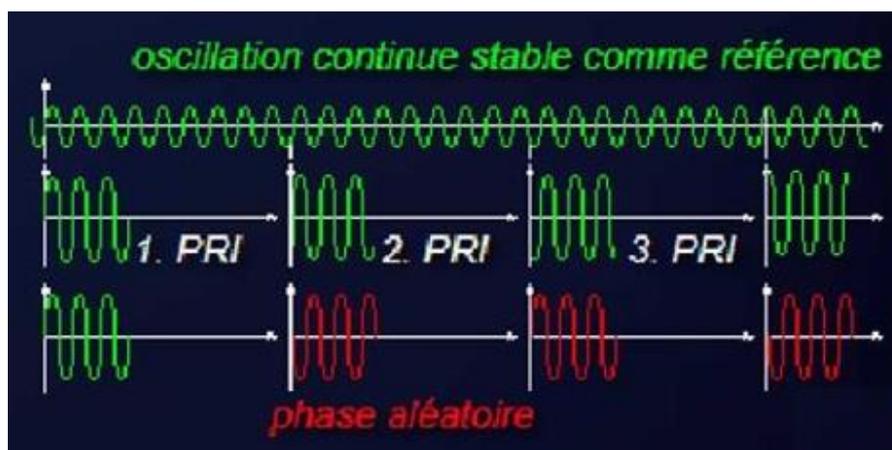


FIGURE I 10: ORIGINE DE LA COHERENCE, IMPULSIONS DE TRANSMISSION COHERENTES ET NON COHERENTES

I.9 Théorème de décomposition aux valeurs / vecteurs propres :

Cette méthode a été développée de façon indépendante par Barnes (1984) et Cloude (1985). L'extraction des valeurs propres et des vecteurs propres [7] de la matrice de cohérence permet de décomposer de façon unique une cible distribuée. Chaque valeur propre représente la puissance d'un mécanisme de diffusion dont la nature est définie par le vecteur propre associé à cette valeur propre. Les trois vecteurs propres étant orthogonaux entre eux, chacun permet de définir un mécanisme indépendant. La matrice de cohérence est décomposée en valeurs propres et vecteurs propres par:

$$[\mathbf{R}] = [\mathbf{V}][\mathbf{\Lambda}][\mathbf{V}]^{-1} = \sum_{k=1}^3 \lambda_k \vec{V}_k \vec{V}_k^H \quad (\text{I.7})$$

Où $\mathbf{\Lambda}$ et \mathbf{V} sont les matrices contenant les valeurs propres et les vecteurs propres respectivement. La matrice $\mathbf{\Lambda}$ est diagonale et ses éléments sont les valeurs propres λ_k qui sont réelles positives ou nulles et sont ordonnées de façon à ce que $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$. La matrice \mathbf{V} contient les vecteurs propres \vec{V}_k ortho-normaux et composés d'éléments complexes.

I.10 Interaction des ondes radar avec la végétation :

la longueur d'onde radar est une grandeur physique importante qui peut varier du millimètre à quelques mètres pour les SAR. Cette grande différence entre les fréquences basses et les fréquences élevées crée une variabilité dans la réponse radar qui peut être utilisée pour mieux caractériser les objets imagés. Deux phénomènes peuvent être mis en avant :

- De manière schématique on peut dire que l'onde interagit en priorité avec des éléments du même ordre de grandeur ou plus grands que la longueur d'onde.
- Les grandes longueurs d'onde ont un pouvoir de pénétration plus important dans les milieux.
- En choisissant correctement la longueur d'onde de notre radar, on peut donc étudier différents aspects d'une scène imagée.

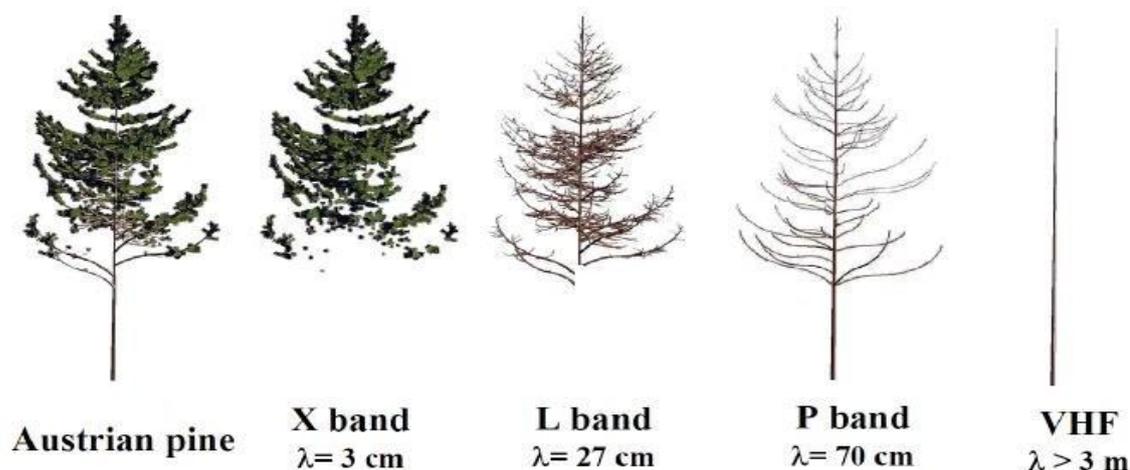


FIGURE I 11: Pénétration des arbres via différentes longueurs d'onde

I.10 .1 phénomène Rétrodiffusion :

L'intensité d'une onde radar rétrodiffusée dépend non seulement des paramètres liés au système radar (fréquence, polarisation, angle de visée...), mais également de la manière dont l'énergie électromagnétique interagit avec la scène observée.

Cette interaction est liée aux paramètres de la scène imagée (permittivité, topographie...) et rend la caractérisation de la scène difficile.

Dans le cas qui nous intéresse, celui des forêts, la réponse radar est principalement influencée par trois mécanismes de rétrodiffusion illustrés dans la Figure 6: l'interaction directe avec la surface (1), l'interaction du double-rebond (2) et enfin l'interaction de volume (3). Les propriétés diélectriques des éléments de la scène jouent également un rôle très important sur la rétrodiffusion, ce qui rend essentielle l'estimation aussi précise que possible de ces propriétés par des mesures terrain.

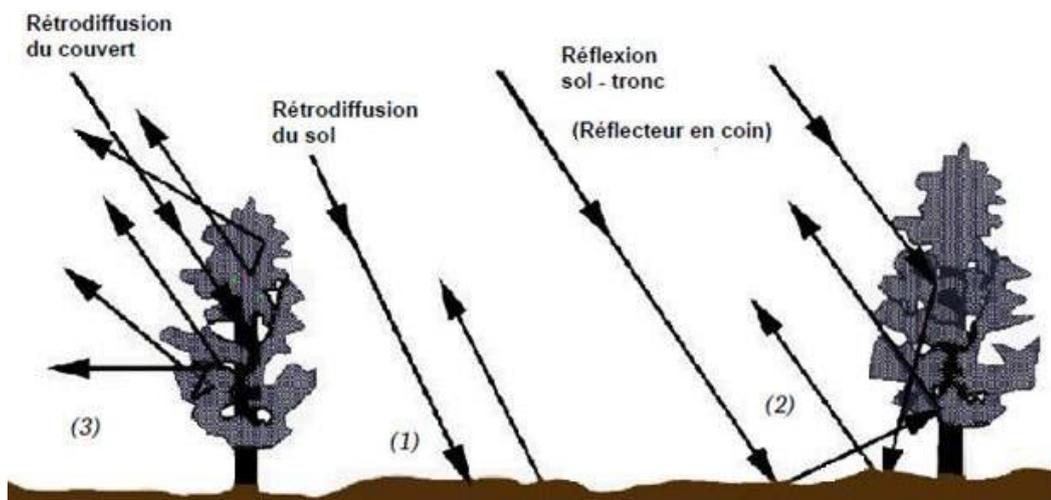


FIGURE I 12: MECANISME DE LA RETRODIFFUSION DANS UNE FORET.

I.10 .2 Interactions avec le volume :

En choisissant bien notre fréquence, l'onde radar peut pénétrer la partie supérieure de la canopée et il se produit un phénomène de diffusion volumique. L'énergie radar diffusée dans un volume est constituée de diffractions provenant des différents éléments diffuseurs des diverses couches à l'intérieur du volume. Dans le cas des forêts, la diffusion peut provenir des feuilles, des branches, ainsi que des troncs. Dans ce même cas, en bande P, les feuilles ne sont quasiment pas visibles et n'influent donc pas ou peu sur la réponse radar.

I.11 Interactions avec le sol :

Le fait qu'une surface apparaisse lisse ou rugueuse dépend de la longueur d'onde du radar. Lorsque le changement vertical de la surface est très faible par rapport à la longueur d'onde, nous l'appelons une surface lisse. Dans le cas contraire, on parle de surface rugueuse. Le critère de Rayleigh donne une indication qualitative de la rugosité de la surface. On considère qu'une surface est lisse si pour une longueur d'onde λ et une incidence θ données, la différence de hauteur Δh entre deux points de la surface est telle que :

$$\Delta h \sin \theta < \lambda / 8 \quad (\text{I.8})$$

La rugosité d'une surface joue sur la manière dont elle impacte l'image radar. Une surface lisse devant la longueur d'onde telle qu'une route apparaît en noir sur une image radar (faible intensité dans l'écho radar), tandis qu'une surface rugueuse apparaît brillante en contraste (forte intensité de l'écho radar). Dans le cas d'une surface lisse, l'énergie rayonnée est principalement dirigée loin du radar (angle de réflexion égal à l'angle d'incidence), on parle de réflexion spéculaire (Figure I.18 à gauche). Quand le sol est rugueux, le rayonnement se propage dans toutes les directions. De ce fait, une partie significative du signal est rétrodiffusée vers le radar (Figure I.18 à droite). La pente du terrain joue également un rôle dans la rétrodiffusion étant donné que l'angle d'incidence est considéré localement par rapport à la normale du sol.

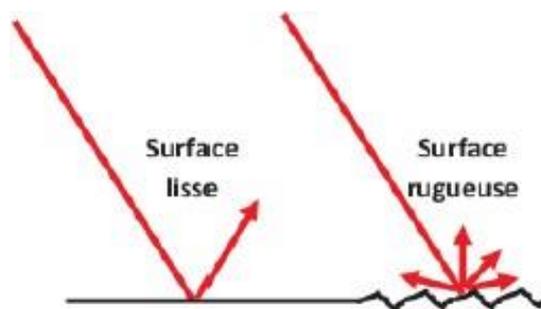


FIGURE I 13: INTERACTION SPECULAIRE (A GAUCHE) ET DIFFUSE (A DROITE) D'UNE SURFACE.

I.12 Le chatoiement :

Le chatoiement (appelé speckle en anglais) [8] dans les images radar résulte des interférences cohérentes entre les ondes réfléchies par les nombreux éléments rétrodiffusants dans une même cellule de résolution. Ce phénomène d'interférence peut être destructif ou constructif et s'apparente à une marche aléatoire. Dans toute l'image radar, il est courant de rencontrer aussi bien des parcelles où la seule texture présente est celle du speckle (zone homogène), que des parcelles présentant des variations spatiales propres à l'environnement autre que celles du speckle (zone hétérogène), comme le montre la figure 19, Il est alors indispensable de mettre en place une procédure de réduction de speckle pour une meilleure détection .

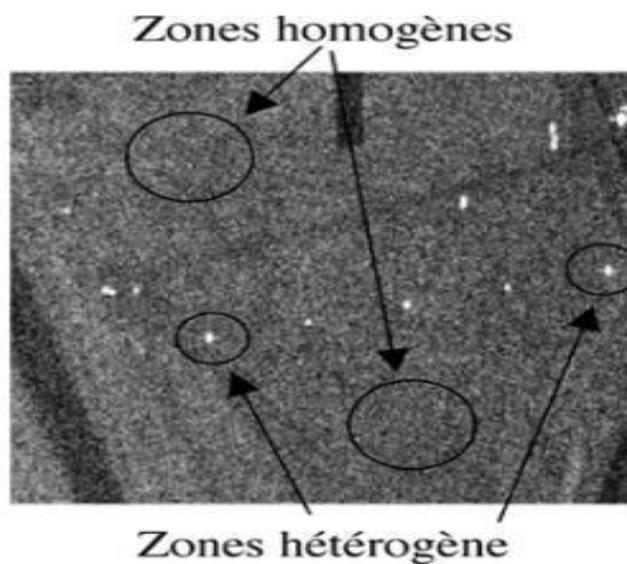


FIGURE I 14: Effet de speckle.

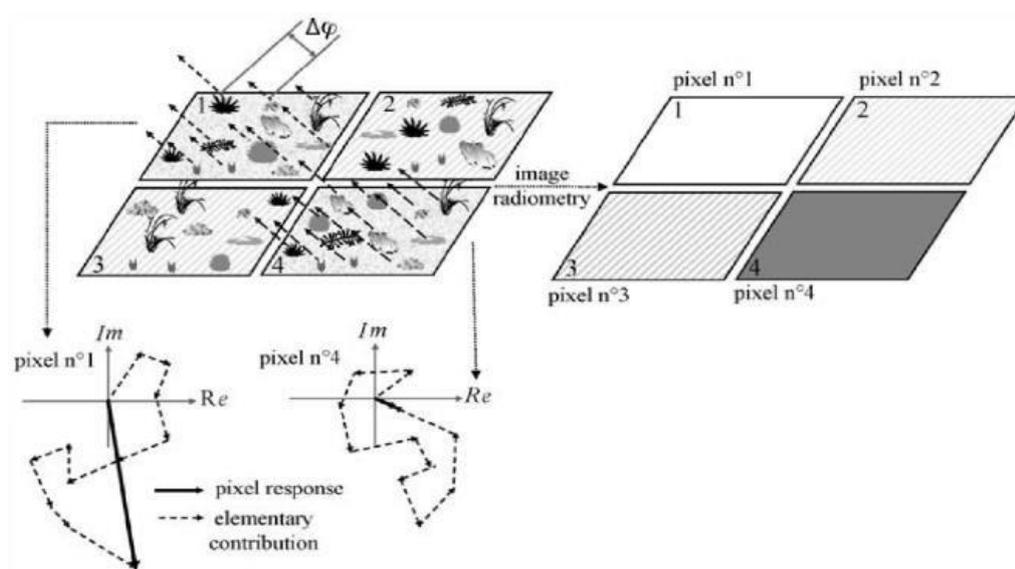


FIGURE I 15: SPECKLE DANS LES IMAGES SAR

I.13 Opération de filtrage :

Pour réduire le speckle on utilisons les deux méthodes suivantes :

I.13.1 Filtre de lee :

Le filtre de Lee , développé par Jong-Sen Lee, est un filtre adaptatif qui modifie ses caractéristiques en fonction des statistiques locales dans le voisinage du pixel actuel.

Le Filtre est effectué en calculant la moyenne des valeurs de la fenêtre de traitement et en remplaçant le pixel correspondant de l'image résultante par le résultat de l'opération mathématique. Il utilise de petites fenêtres (3×3 , 5×5 , 7×7). La fenêtre se déplace d'un pixel à la fois, selon les lignes et les colonnes, jusqu'à ce que l'image entière soit traitée. En calculant la moyenne d'une petite fenêtre autour de chaque pixel, on obtient un effet de lissage qui réduit le speckle [9] (Figure I.16).

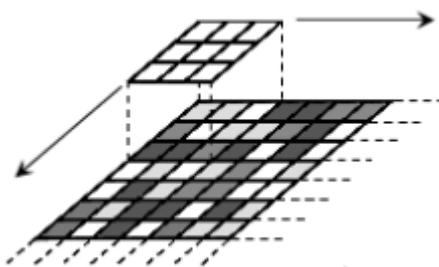


FIGURE I 16 : FILTRAGE SPATIAL.

I.13.2 Traitement multilook :

Cette technique consiste à acquérir plusieurs images différentes de la même scène. Chaque acquisition générera sa propre image de scène d'éclairage, et chaque image est sujette au Chatoisement. Afin de réduire cette dernière, nous prenons la moyenne de toutes les images pour obtenir une image plus claire.

I.14 Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre une étude générale sur le Radar à synthèse d'ouverture, la polarimétrie SAR qui permet de représenter une cible de façon analytique.

Dans le deuxième chapitre on va introduire l'interférométrie SAR, puis on va présenter une technique basée sur l'imagerie SAR 3-D, Cette technique assure une détection plus importante que l'Interférométrie SAR, elle s'appelle la Tomographie SAR, nous allons aussi présenter son état de l'art, la formulation du problème de la tomographie SAR.

CHAPITRE II :
L'INTERFEROMETRIE & LA
TOMOGRAPHIE SAR

CHAPITRE II : Interférométrie & la tomographie SAR

II.1 INTRODUCTION :

La tomographie et l'interférométrie SAR sont des techniques qui permettent d'étudier les diffuseurs de volume au moyen d'un radar à visée latérale et à ouverture synthétique (SAR).

À la fin des années 1970, les radars imageurs spatiaux ont commencé à jouer un rôle important dans la télédétection. D'abord pour l'étude des surfaces planétaires, puis avec le satellite de la NASA SEASAT, qui a été lancé en 1978, pour l'observation de la Terre. Dans les années 1980, les premières mesures de topographie InSAR ont prouvé la faisabilité de l'interférométrie à partir de données satellitaires.

L'interférométrie est une technique de traitement d'image radar SAR qui exploite la différence de phase de deux images radar SLC (Single Look Complex), afin d'extraire l'information altimétrique de chaque cible observée de la scène.

L'ensemble des informations altimétriques constituent le modèle numérique de terrain. Une onde est caractérisée par une longueur d'onde (λ) et une amplitude. Les satellites SAR envoient des ondes radar à longueur d'onde fixe. En raison des caractéristiques du sol, l'onde rétrodiffusée peut avoir une amplitude variable, mais sa longueur d'onde reste la même. En revanche, les satellites SAR sont capables d'enregistrer la phase du signal rétrodiffusé, qui sera comprise entre 0 et 2π . Cette phase dépend de deux paramètres principaux : (1) la phase pixellaire, qui dépend des propriétés du sol, de la végétation et des "cibles" présents..., et qui peut être différente pour deux pixels contigus, (2) la phase de trajet, qui ne dépend que de la distance entre le sol et le satellite. [3]

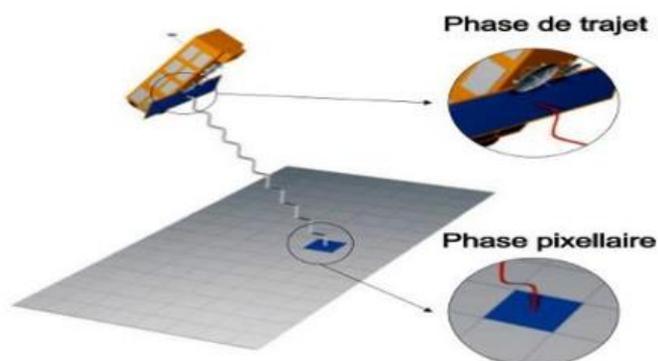


FIGURE II 1 : phase de trajet et phase pixellaire

II.2 Interférométrie SAR (InSAR) :

II.2.1 Principe de l'InSAR :

L'interférométrie SAR [10] est une technique qui exploite les données de phase du signal rétrodiffusé mais ne conserve que les informations pertinentes. En effet, on considère que certains termes des phases des deux signaux sont identiques sur au moins deux acquisitions, ce qui permet de les faire interférer et mesurer le déphasage à partir duquel seront extraites les propriétés géométriques des cibles observées.

Toutefois, il faut savoir que les conditions de faisabilité de l'interférométrie dépendent, d'un côté, de la géométrie d'acquisition (baseline) des couples interférométriques qui entraîne une décorrélation spatiale des deux signaux pour la même cible, et de l'autre des décalages temporels entre les acquisitions et leurs conséquences sur les phases d'erreurs dues aux changements des conditions atmosphériques et des états de surfaces, ce qui entraîne une décorrélation temporelle. [25]

II.2.2 Géométrie d'acquisition InSAR :

L'interférométrie est basée sur des paires d'images radar qui sont acquises pour la même zone géographique à des dates différentes mais avec des angles de vue très proches. La première image est appelée image maître et la seconde image est appelée image esclave. L'interférogramme résultant est basé sur les différences de phase pour chaque pixel entre les images maître et esclave.

A partir de des signaux rétrodiffusés et mesurés par le radar, des images de type SLC S1 et S2 sont générées. Leurs expressions respectives sont les suivantes:

$$\begin{cases} \mathbf{S}_1 = \mathbf{A}_1 \cdot e^{j\varphi_1} \\ \mathbf{S}_2 = \mathbf{A}_2 \cdot e^{j\varphi_2} \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

Après la superposition des deux images, le produit interférométrique est obtenu par la multiplication du premier signal par le conjugué du deuxième signal dont l'expression est la suivante :

La différence de phases $\varphi_1 - \varphi_2$ calculée pour tous les pixels est appelée "interférogramme". Elle est composée des termes suivants :

$$S_1 \cdot S_2^* = A_1 \cdot A_2 \cdot e^{j(\varphi_1 - \varphi_2)} \quad (\text{II.2})$$

$$\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \Delta\varphi_{\text{trajet}} + \Delta\varphi_{\text{propre}} + \Delta\varphi_{\text{atmosphere}} + \Delta\varphi_{\text{bruit}} \quad (\text{II.3})$$

Tel que :

$\Delta\varphi_{\text{trajet}}$: La phase de trajet. C'est le déphasage lié à la distance parcouru par l'onde aller-retour.

$\Delta\varphi_{\text{propre}}$: La phase propre. C'est le déphasage introduit au moment de l'interaction avec l'élément de surface. La différence de cette phase est considérée nulle entre deux acquisition, sauf dans le cas d'un changement de la nature du sol (rugosité, humidité, ...etc).

$\Delta\varphi_{\text{atmosphere}}$: La phase atmosphérique. Elle est due principalement à la couverture nuageuse mais elle est très souvent négligeable.

$\Delta\varphi_{\text{bruit}}$: La phase de bruit. Elle est produite par le système électronique d'émission et d'acquisition (temps de réponse des amplificateurs et autres dispositifs). Cette différence de phase est considérée nulle car le dispositif d'émission et d'acquisition est généralement le même.

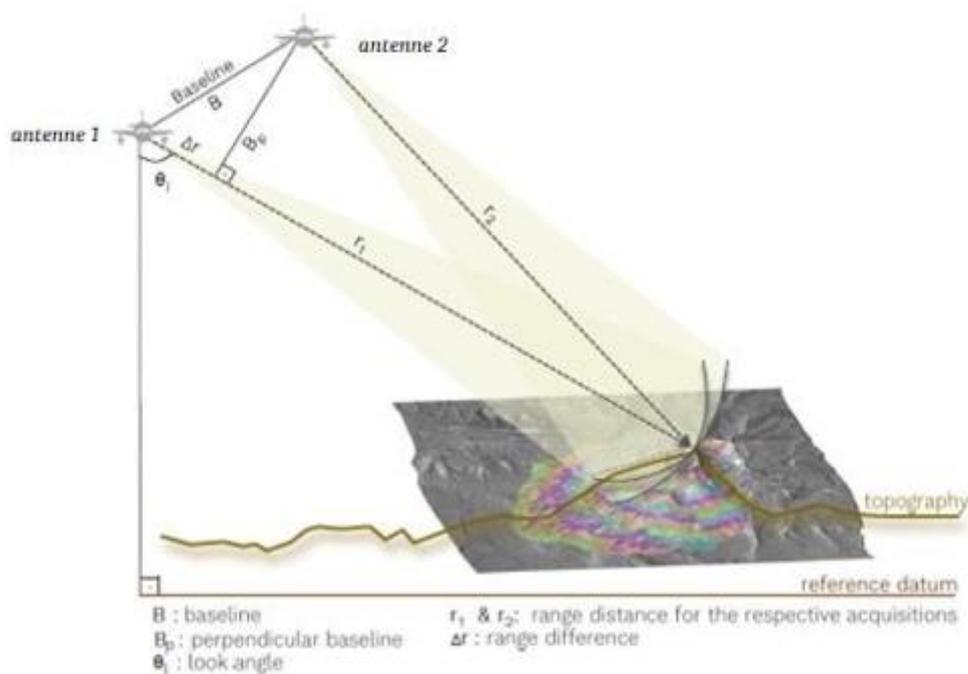


FIGURE II 2: GEOMETRIE DE L'INTERFEROMETRIE SAR

II.2.3 Paramètres mathématiques de l'INSAR :

L'interférométrie SAR dépend de deux paramètres principaux, qui sont la variation de la phase interférométrique $\partial\varphi(p)$ et l'altitude d'ambigüité $Z_{2\pi}$. L'obtention de cette dernière passe par la mise en évidence de la relation entre la $\partial\varphi(p)$ et l'altitude d'un point p quelconque $Z(p)$ (figure II.3).

Note : Dans ce qui suit, nous noterons λ la longueur d'onde de l'impulsion radar utilisée.

II.2.3.1 Variation de la phase interférométrique :

Les échos des cibles p et q à des altitudes respectives Z et $Z=0$ sont confondus pour une seule et même acquisition. Ceci est dû au fait que les deux cibles se trouvent sur le même front d'onde par rapport au capteur maître $C1$ (figure II.3). De plus, on ne peut pas mesurer la variation de l'angle de vue $\partial\theta$. Par contre, si deux passages sont effectués par un ou plusieurs capteurs avec des angles de vues différents, on pourra alors déterminer $\partial\theta$ à partir de la phase interférométrique [11].

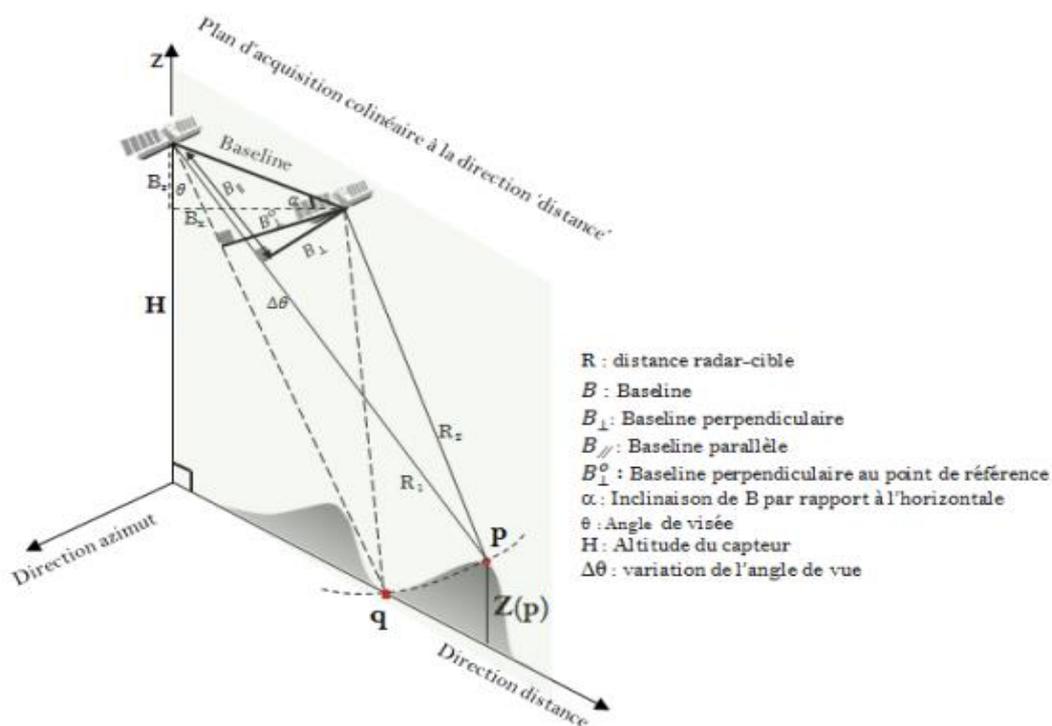


FIGURE II 3: MODELE GEOMETRIQUE DETAILLE DE L'INSAR

Les deux signaux S_1, S_2 sont composés d'un module, représentant la radiométrie, et d'une phase. L'analyse de cette phase indique qu'elle est composée de deux termes :

$$\varphi_{1,2}(x, r) = \varphi_{1,2_{propre}}(x, r) + \frac{4\pi}{\lambda} R_{1,2} \quad (\text{II.4})$$

Le premier terme de la phase d'une image SAR, $\varphi_{1,2_{propre}}(x, r)$, représente un déphasage dû à l'interaction entre l'onde et la surface, nommée phase propre, ayant un comportement aléatoire et difficile à estimer. Le second terme est dû à un déphasage qui est causé par le trajet emprunté par l'onde.

L'idée générale de l'interférométrie SAR est de considérer que la phase propre des deux images SAR est identique, $\varphi_{1_{propre}}(x, r) = \varphi_{2_{propre}}(x, r)$, car la différence des angles de vue est faible.

En utilisant la hauteur du satellite et la distance R_1 séparant le satellite aux points p et q, on peut calculer l'altitude Z_p (figure II.3). La phase interférométrique du point p est donnée par l'équation suivante :

$$\varphi(p) = \varphi_1(p) - \varphi_2(p) = \frac{-4\pi(R_1 - R_2)}{\lambda} = \frac{-4\pi\Delta R}{\lambda} \quad (\text{II.5})$$

La variation de cette différence par rapport aux deux capteurs introduit une variation de la phase interférométrique donnée par :

$$\partial\varphi(p) = \frac{-4\pi}{\lambda} \partial\Delta R \quad (\text{II.6})$$

Tel que $\Delta R \approx B \sin(\theta - \alpha)$. La variation $\partial\Delta R$ est fonction de la variation de l'angle de vue $\partial\theta$ et est donnée par

$$\partial\Delta R = B \sin(\theta^0 - \alpha) \partial\theta \quad (\text{II.7})$$

Tel que θ^0 est l'angle correspondant à la cible de référence.

Géométriquement, le terme $B \sin(\theta^0 - \alpha)$ représente la baseline perpendiculaire au point de référence et est notée B_{\perp}^0 (figure II.3). D'où :

$$\partial \Delta R = B_{\perp}^0 \partial \theta \quad (\text{II.8})$$

À partir des équations II.6 et II.8, on obtient la variation de la phase interférométrique dont l'expression est la suivante :

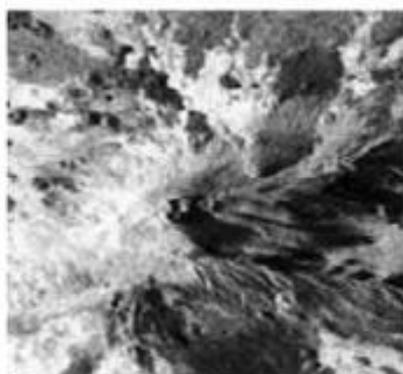
$$\partial \varphi(\mathbf{p}) = \frac{-4\pi}{\lambda} B_{\perp}^0 \partial \theta \quad (\text{II.9})$$

D'où :

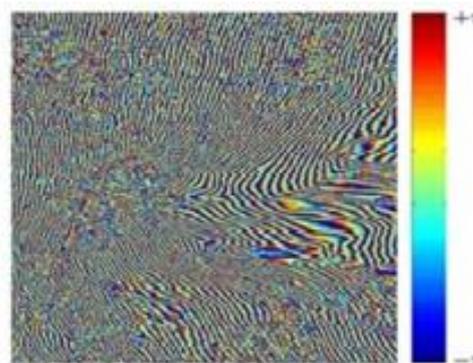
$$\partial \theta = \frac{-\lambda}{4\pi} \frac{\partial \varphi(\mathbf{p})}{B_{\perp}^0} \quad (\text{II.10})$$

I.2.3.2 La phase de la terre plate :

Comme le montre la figure II.4.(b), il est possible de dénoter de nombreuses franges. Ces franges sont dues au fait que deux points situés à une même hauteur mais à des positions radiales différentes n'ont pas la même valeur de phase interférométrique à cause de l'angle de vue du radar. Ainsi, même si le terrain étudié est totalement plat, l'interférogramme présente des franges. C'est en utilisant cette propriété qu'il est possible de calculer la phase de la terre plate.



(a) Image d'amplitude.



(b) Interferogramme.

FIGURE II 4: LE MONT ETNA , SICILE , ITALIE, (X-SAR)

Pour cela, deux cibles, \mathbf{P} et \mathbf{P}' , situées à la même hauteur mais à des positions différentes sont considérées (figure II.5). Cette hauteur est appelée hauteur de référence et correspond à la hauteur à laquelle des images SAR ont été générées. Cette configuration introduit un changement de l'angle d'incidence $\Delta\theta_R$, ainsi qu'un changement de la base orthogonale B_\perp .

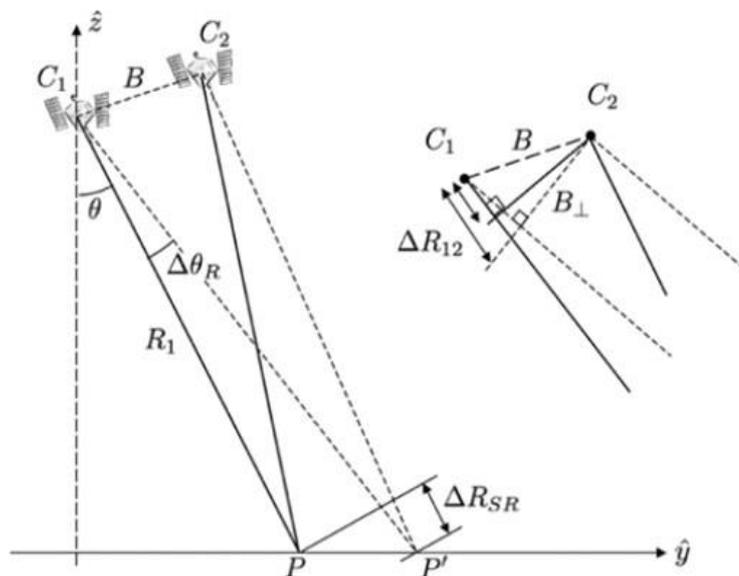


FIGURE II 5:GEOMETRIE UTILISEE POUR LA CALCUL DE PHASE DE LA TERRE PLATE

Pour pouvoir observer les effets dus uniquement à la topographie, il est nécessaire de séparer ces deux composantes. En utilisant une approximation faible angle, il est possible de montrer que la différence de phase interférométrique entre \mathbf{P} et \mathbf{P}' est proportionnelle à la différence de la distance radiale ΔR_{SR} :

$$\varphi_{fe} = \Delta\varphi_p - \Delta\varphi_{p'} \approx \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_\perp}{R_1 \tan \theta} \Delta R_{SR} \quad (\text{II.11})$$

Un interférogramme SAR d'un terrain plat montre des franges parallèles à la direction du vol. Dans le cas général, la phase topographique est superposée à l'interférogramme. La composante de la phase de la terre Plate peut être exactement estimée à partir de la géométrie utilisée pour acquérir les données et doit être soustraite de manière à analyser uniquement la phase topographique.

La figure II.6 montre la correction de la phase de la terre plate appliquée sur les données du Mont Etna. L'image (a) montre l'interférogramme original tandis que l'image (b) montre l'interférogramme après correction de la phase de la terre plate. Il est important de noter que la phase de la terre plate est une information de l'interférogramme. Par contre elle ne contient aucune information au sujet du processus de diffusion. De plus, il est nécessaire de l'enlever pour des algorithmes ayant besoin d'un faible taux de franges (les méthodes de déroulement de phase). [12]

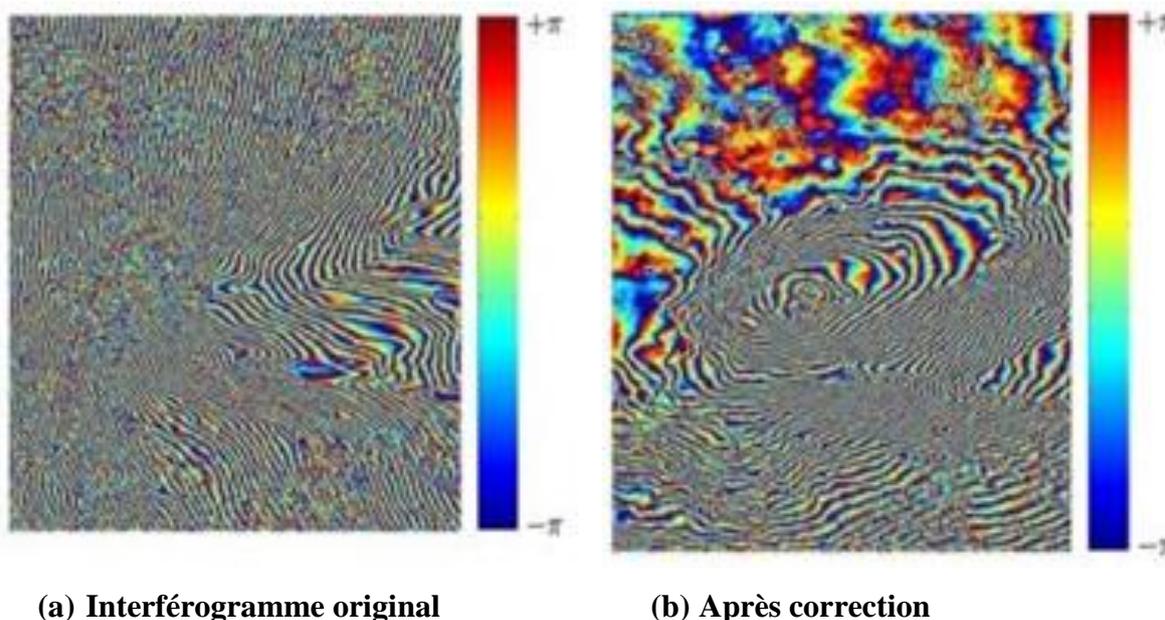


FIGURE II 6: CORRECTION DE LA PHASE DE LA TERRE PLATE

II.2.3.3 Relation Phase-Altitude :

La relation entre $\partial\phi(p)$ et l'altitude $Z(p)$ est déterminée en utilisant la configuration géométrique d'acquisition des couples de la manière suivante :

La hauteur du satellite par rapport au point de référence q est donnée par :

$$H_{sat} = R_1 \cos \theta \quad (\text{II.12})$$

La variation de cette hauteur par rapport à un point p distant de R_1 est exprimée par :

$$\partial H_{\text{sat}} = -Z(p) = -R_{1p} \sin \theta_p^0 \partial \theta \quad (\text{II.13})$$

D'où :

$$Z(p) = R_{1p} \sin \theta_p^0 \partial \theta \quad (\text{II.14})$$

En injectant l'expression II.10 de $\partial \theta$ dans l'équation II.14, on déduit l'altitude Z dont l'expression est donnée par :

$$z(p) = \frac{-\lambda}{4\pi} \frac{R_{1p} \sin \theta_p^0}{B_{\perp}^0} \partial \varphi(p) \quad (\text{II.15})$$

II.2.3.4 Altitude d'ambigüité :

• Si la variation de phase interférométrique est égale à 2π (i.e. si $\partial \varphi(p) = 2\pi$), la valeur de l'altitude $Z(p)$ est appelée altitude d'ambigüité et est notée $Z_{2\pi}$. Elle correspond à une frange sur un interférogramme et peut être utilisée comme unité de mesure interférométrique pour une baseline donnée. Voici son expression :

$$z_{2\pi} = \left| \frac{\lambda R_{1p} \sin \theta_p^0}{2B_{\perp}^0} \right| \quad (\text{II.16})$$

L'expression II.16 nous montre que l'altitude d'ambigüité est inversement proportionnelle à la baseline perpendiculaire. En d'autres termes, plus on augmente la baseline, plus l'altitude d'ambigüité sera réduite, ce qui offre une meilleure précision altimétrique.

II.2.4 Cohérence des interférogrammes et décorrélations :

L'étude d'un interférogramme s'accompagne d'une image de cohérence qui représente le coefficient de corrélation entre les deux images radar acquises. Le coefficient de corrélation indique les zones de variations sur une échelle de 0 à 1, plus le coefficient est élevée, plus l'interférogramme est exploitable. Le coefficient de corrélation est obtenu pour chaque pixel de coordonnées (i, j) sur une fenêtre de taille $k_1 \times k_2$ par l'équation suivante :

$$\gamma(i, j) = \frac{\sum_{i=1}^{K_1} \sum_{j=1}^{K_2} S_1(i, j) * S_2(i, j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{K_1} \sum_{j=1}^{K_2} |S_1(i, j)|^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{K_1} \sum_{j=1}^{K_2} |S_2(i, j)|^2}} \quad (\text{II.17})$$

On appelle décorrélation toute perturbation dans la différence de phase entre deux images SAR. Les décorrélations se traduisent par un bruit visible dans l'interférogramme et d'une baisse de la cohérence mesurée par le coefficient de corrélation. On distingue 3 principaux types de décorrélation :

1. Décorrélation spatiale :

Elle est due à la séparation des deux antennes radars, et l'observation sous des angles d'incidences légèrement différents. Même si les pixels des images SLC1 et SLC2 couvrent les mêmes cellules, le motif d'interférence des réflexions élémentaires varie en raison de l'évolution de la géométrie.

2. Décorrélation temporelle :

Spécifique à l'interférométrie multi-passes, elle est due au changement de l'état de la surface, phénomène difficile à prédire et à modéliser. Les modifications de la distribution des réflecteurs élémentaires et de leurs réponses peuvent provenir de causes très variées entraînant le déplacement des sources (la croissance de la végétation, le vent, l'exploitation agricole des sols) et/ou une modification des caractéristiques radio-électriques des cibles (humidité, température, . . . etc.). Ces paramètres mal maîtrisés sont un obstacle majeur aux applications topographiques de l'interférométrie. En revanche la mesure de corrélation peut fournir une information intéressante pour d'autres applications en classification (suivi des cultures, ...etc.).

3. Décorrélation thermique : Elle est due au bruit thermique additif lié au capteur, influant sur la précision de la mesure de la phase.

II.3 Tomographie SAR :

II.3.1 État de l'art de la tomographie SAR :

L'idée de l'imagerie tomographique a été présentée pour la première fois à la communauté des SAR dans les années 1990 [13] ; [14] comme un moyen de surmonter les limites de l'imagerie 2-D standard. Semblable à la tomographie axiale assistée par ordinateur (TAO) en imagerie médicale, elle utilise des images acquises à divers endroits pour former une ouverture synthétisée dans la dimension d'élévation.

La tomographie SAR suscite un grand intérêt pour la recherche en raison du grand nombre d'applications potentielles allant de la géologie, l'estimation de la biomasse, la foresterie, la détection de structures enterrées pour l'archéologie aux applications civiles.

La première expérience a été réalisée dans un laboratoire aux conditions expérimentales idéales ou en utilisant des systèmes aéroportés (Lin et Vesecky 1991) [15]. Depuis lors, la technique s'est considérablement développée.

Les recherches actuelles sont principalement menées pour explorer les applications de la tomographie SAR et pour développer de meilleures méthodologies de reconstruction tomographique.

Cependant, la recherche sur la tomographie SAR 3-D utilisant des systèmes spatiaux est encore assez limitée et n'a pas encore été bien évaluée. Néanmoins, les développements de la tomographie SAR pour les systèmes spatiaux permettront d'associer les vastes possibilités des techniques d'imagerie avancées.

La recherche sur la tomographie SAR utilisant des systèmes spatiaux n'en est qu'à ses débuts et les problèmes liés au traitement des données réelles doivent être examinés et résolus plus avant.

II.3.2 Principe de la Tomographie SAR :

La tomographie SAR [16] est l'extension de l'imagerie SAR 2-D à trois dimensions. Alors que l'imagerie SAR 2-D classique utilise une ouverture synthétique dans la direction de l'azimut, l'imagerie SAR 3-D est réalisée par une ouverture synthétique dans la direction de l'élévation en recueillant plusieurs images à partir de pistes parallèles. En utilisant des techniques d'interférométrie multibase sur la pile d'images SAR bien calibrées, il est possible de retrouver la localisation des diffuseurs dans la troisième dimension. Cette approche permet de séparer les diffuseurs cartographiés dans la même cellule de résolution, ce qui est susceptible de se produire dans les zones urbaines denses en raison du phénomène de " layover ".

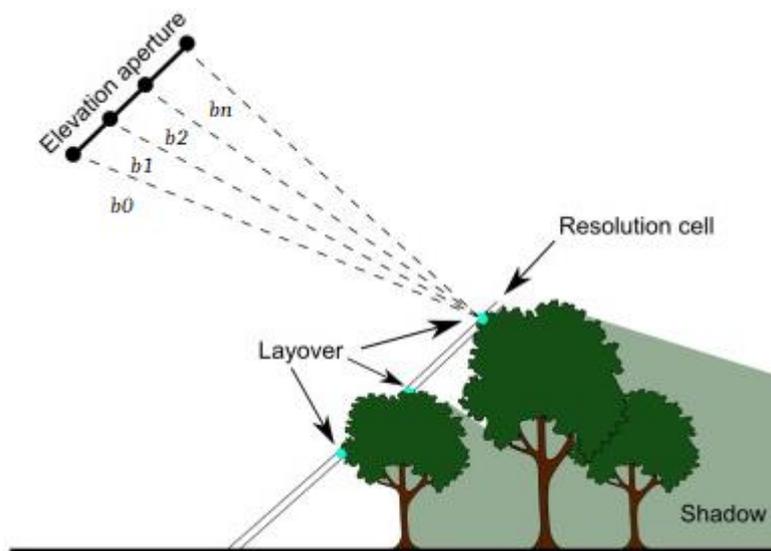


FIGURE II 7 :GEOMETRIE DE VISUALISATION DU RSO A VISEE LATERALE POUR UN SYSTEME A LIGNES DE BASE MULTIPLES ECLAIRANT UNE SCENE FORESTIERE.

Une pile tomographique SAR consiste en N images SAR SLC parfaitement co-registrées. Chaque image SAR de la pile correspond à une trajectoire légèrement différente du capteur sur la scène. Nous considérons que toutes les images ont été co-registrées par rapport à une image maître lors d'une étape de prétraitement. Chaque image est acquise sous un angle légèrement différent à chaque passage du capteur. Cette diversité angulaire induit une distance différente à chaque antenne et donc un déphasage différent qui peut être exploité pour retrouver la position 3D des diffuseurs.

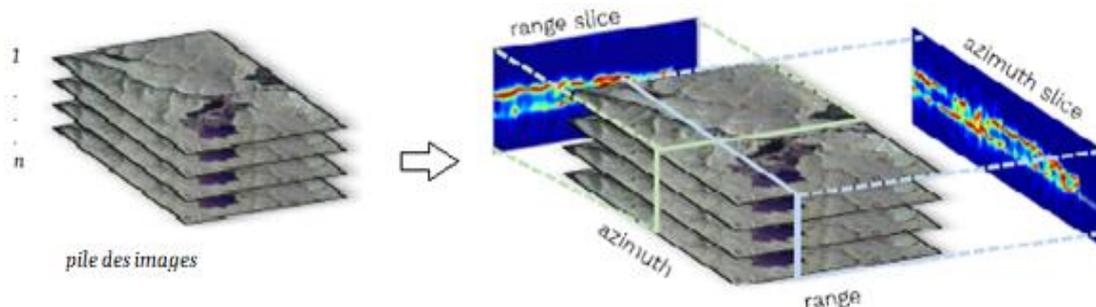


FIGURE II 8: construction d'un cube TomoSAR

II.4 Formulation du problème de la tomographie SAR :

II.4.1 Modèle géométrique de la tomographie SAR

La tomographie SAR utilise une pile d'images SAR SLC obtenues par de multiples lignes de base parallèles pour reconstruire les diffuseurs situés dans la même cellule de résolution azimuth-distance, mais à des endroits différents en altitude. La géométrie de la tomographie SAR à lignes de base multiples est représentée sur la Figure II.9.

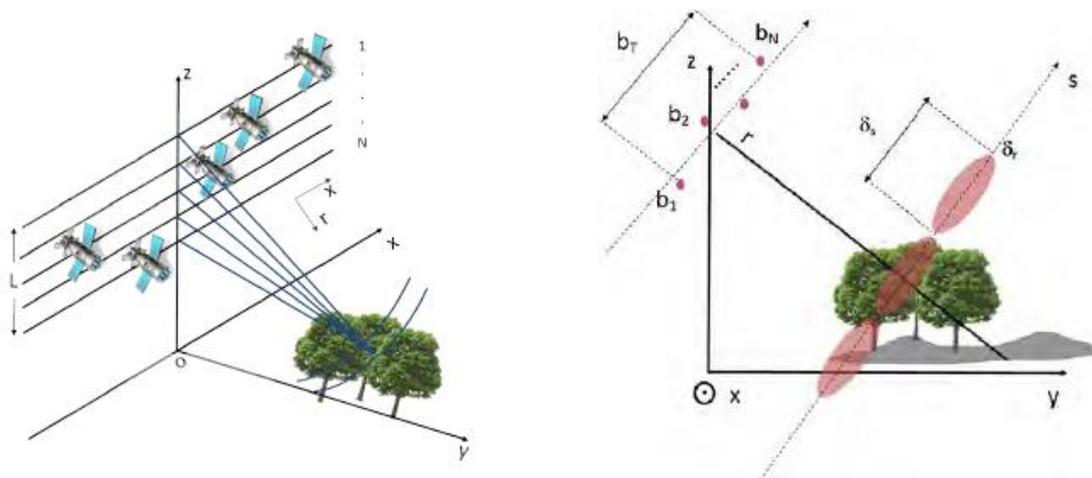


FIGURE II 9: géométrie de la tomographie sar à lignes de base multiples d'une zone forestière est vue par n capteurs sur une trajectoire de vol parallèle.

Pour le système illustré à la figure II 9, nous avons N passages SAR au-dessus d'une zone forestière pour permettre la tomographie SAR, chacun observant la scène sous un angle de vue légèrement différent. Tous les passages sont parallèles pour des raisons de simplicité. À chaque passage, le capteur se déplace dans la direction azimuthale x et transmet des impulsions cohérentes modulées en phase dans la direction de portée r à un intervalle de temps régulier. Y indique la direction de portée au sol et s indique la direction d'élévation. La distance séparant deux capteurs est appelée ligne de base. La distance de base entre le capteur principal et le n ème capteur, notée b_n , peut être décomposée en b_{kn} , une composante parallèle à la direction de la portée oblique, et une perpendiculaire b_n , alignée avec la direction de la portée transversale. Une seule image RSO SLC rassemble les échos acquis par le radar sur la zone souhaitée. Ensuite, chaque image a été focalisée, enregistrée sur une grille commune et aplatie en phase par rapport à une trajectoire commune. Le principal problème de la tomographie RSO est de développer des algorithmes de récupération pour obtenir des profils de réflectivité d'élévation à partir de la pile de données [20].

II.4.2 Modèle de signal de la tomographie SAR

Pour mettre au point l'algorithme d'extraction, il faut d'abord élaborer un modèle de signal reliant le signal obtenu au profil de réflectivité de l'élévation. La figure II.10 montre la géométrie simplifiée dans le plan de distance oblique et d'élévation seulement.

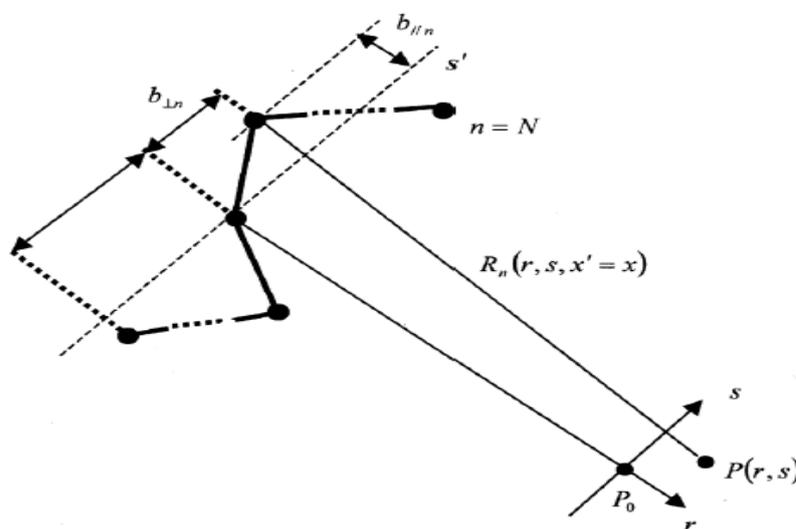


FIGURE II 10: géométrie d'acquisition multi-passe dans le plan d'inclinaison – élévation.

- s indique la direction de l'élévation
- r indique la direction de l'inclinaison
- $(b_{\parallel n}, b_{\perp n})$ est la position relative du $n^{\text{ième}}$ capteur.

Pour un diffuseur P situé à la position (r, x, s) ; avec la réflectivité $\gamma(r, x, s)$ et la distance au $n^{\text{ième}}$ capteur $R_n(r, s)$, l'écho radar résultant au $n^{\text{ième}}$ capteur du diffuseur P est

$$\gamma(r, x, s) e^{-j \frac{4\pi}{\lambda} R_n(r, s)} ** f(x, r) \tag{0-18}$$

où :

- $**$ représente l'opération de convolution
- λ est la longueur d'onde de fonctionnement.
- la fonction $f(x ; r)$ est la fonction d'étalement du point 2-D de post-focalisation (PSF).

En général, avec une haute résolution, la fonction est donnée par :

$$f(x, r) = \text{sinc} \left(\frac{r'}{\Delta r} \right) \text{sinc} \left(\frac{x}{\Delta x} \right) \tag{II.19}$$

Où :

- Δx et Δr sont les résolutions en azimuth et en distance, respectivement. Chaque pixel représente une zone dont l'extension essentielle en azimuth et en distance est donnée Δx et Δr par v et r . En se référant à la figure II.10 et en appliquant l'approximation de Fresnel, la distance peut être exprimée par :

$$R_n(r, s) = \sqrt{(r - b_{\parallel n})^2 + (s - b_{\perp n})^2} \approx r - b_{\parallel n} + \frac{(s - b_{\perp n})^2}{2(r - b_{\parallel n})} \quad (\text{II.20})$$

Maintenant qu'il s'étend à la situation avec de multiples diffuseurs, les échos radar reçus au $n^{\text{ème}}$ capteur de tous les diffuseurs de la zone peuvent être modélisés par l'intégrale sous la forme suivante :

$$y_n(x', r') = \iint dx dr f(x' - x, r' - r) \int ds \gamma(x, r, s) e^{[-j\frac{4\pi}{\lambda} R_n(r, s)]} \quad (\text{II.21})$$

C'est la relation fondamentale entre le signal multibaseline et le profil de réflectivité complexe. Par souci de simplicité, nous supposons que la post-focalisation (PSF) est approximativement la fonction Dirac 2-D (super haute résolution en portée et en azimuth). Ainsi, nous pouvons simplifier un problème d'estimation 3D à unidimensionnel, uniquement dans la direction de l'élévation s où, pour chaque image, l'intégrale s'applique à une région étendue en présence d'une pénétration souterraine. Le résultat après simplification est:

$$f(x' - x, r' - r) = \delta(x' - x) \delta(r' - r) \quad (\text{II.22})$$

$$y_n(x, r) = \int \gamma(x, r, s) e^{[j\frac{4\pi}{\lambda} R_n(s)]} ds \quad (\text{II.23})$$

Cela nous montre que le facteur de phase comprend un terme de phase quadratique. Cette distorsion peut être compensée en multipliant le signal reçu par le facteur de phase correspondant à l'écho de la cible d'élévation centrale P_0 . Cette étape est souvent appelée "*deramping*" dans le jargon du traitement SAR

En désignant g_n comme le signal reçu y_n après *deramping*, on obtient :

$$g_n = y_n e^{[j\frac{4\pi}{\lambda} R_n(0)]} = \int \gamma(s) e^{[-j\frac{4\pi}{\lambda} (R_n(s) - R_n(0))]} ds \quad (\text{II.24})$$

Où :

$$g_n = \int \gamma(s) e^{[-j\frac{4\pi}{\lambda} \frac{s^2}{2(r - b_{\parallel n})}]} e^{[j\frac{4\pi}{\lambda} \frac{b_{\perp n} s}{r - b_{\parallel n}}]} ds \quad (\text{II.25})$$

En insérant les équations on obtient :

$$g_n = \int \gamma(s) e^{-j\frac{4\pi}{\lambda} \frac{s^2}{(r-b_{//n})}} e^{j\frac{4\pi}{\lambda} \frac{b_{\perp n}s}{r-b_{//n}}} ds \quad (\text{II.26})$$

Notez que le signal *deramped* a un facteur de phase dépendant de s_2 . Si seule l'amplitude présente un intérêt, elle devient sans importance. Sinon, lorsque les caractéristiques de phase du signal sont importantes, ce terme doit être supprimé via une étape de compensation de phase post-traitement. Pour le reste de l'analyse, nous incorporons ce facteur dans la fonction de réflectivité inconnue, de sorte que la relation mathématique à considérer dans le texte suivant est :

$$g_n = \int \gamma(s) e^{j2\pi \frac{2}{\lambda r - b_{//n}} s} ds = FT[\gamma(s)]|_{\zeta_n} = g(\zeta)|_{\zeta_n} \quad (\text{II.27})$$

Où :

$$\zeta_n = \frac{2b_{\perp n}}{\lambda(r - b_{//n})} \approx \frac{2b_{\perp n}}{\lambda r} \quad (\text{II.28})$$

Nous pouvons voir que les signaux reçus à différents endroits de l'orbite, dans n'importe quelle position fixe en distance et en azimut, sont des échantillons de la transformée de Fourier (FT) de la fonction de réflectivité le long de la direction d'élévation à la fréquence décrite dans l'équation précédente. Ainsi, la réflectivité complexe le long de la direction d'élévation peut être récupérée en prenant simplement la transformée de Fourier des signaux reçus. Pour les données échantillonnées uniformément à un taux suffisant, les valeurs discrètes de la fonction de réflectivité le long de la direction de l'élévation peuvent être directement récupérées par une transformée de Fourier discrète (DFT) [21].

II.5 Données utilisés:



FIGURE II 11: IMAGE OPTIQUE DES DONNEES DE TEST A LA ZONE FORESTERIE DE TRACKNEBORN PAR GOOLE EARTHE

Dans cette thèse, nous avons évalué l'inversion des hauteurs par les deux méthodes mentionnées ci-dessus, en utilisant des données entièrement polarimétriques.

La donnée de la zone foresterie de Trackneborn que nous allons utiliser est acquise par le système SAR aérien de l'Institut des micro-ondes et des radars du Centre aérospatial allemand (DLR) : F_SAR ; il fournit des données d'images SAR de haute résolution dans les cinq bandes de fréquences différentes (X, C, S, L et P) , Dans notre cas en utilisant la bande **L** avec la polarisation **HV** , cette polarisation est la meilleure pour étudier les zones forestières .

La donnée que nous allons traiter consiste de 9 images (8 esclaves + 1 maître) ces images construisent le cube TomoSAR après un traitement de enregistrement des données.

Notez que nous avons utilisé le langage PYTHON pour implémenter les deux méthodes d'inversion sur la donnée que nous introduisons.

II.6 Lecture des images SAR :

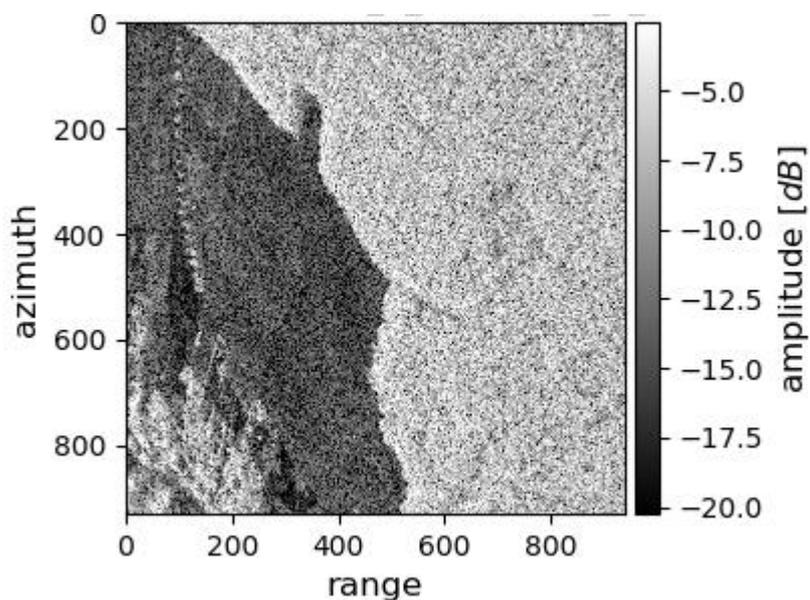


FIGURE II 12: IMAGE SAR D'AMPLITUDE [DB].

La figure II 12 représente l'image SAR d'amplitude de la région précédente (Fig.II.11) On note qu'il y a des zones sombres et des zones claires, la zone sombre représente la terre nue (pas de réflexion d'énergie), la zone claire à droite représente la végétation (forêt) et sur la gauche certaines zone urbain signifie qu'il y a des fortes réflexions.

II.7 Organigramme de l'algorithme music et Capon :

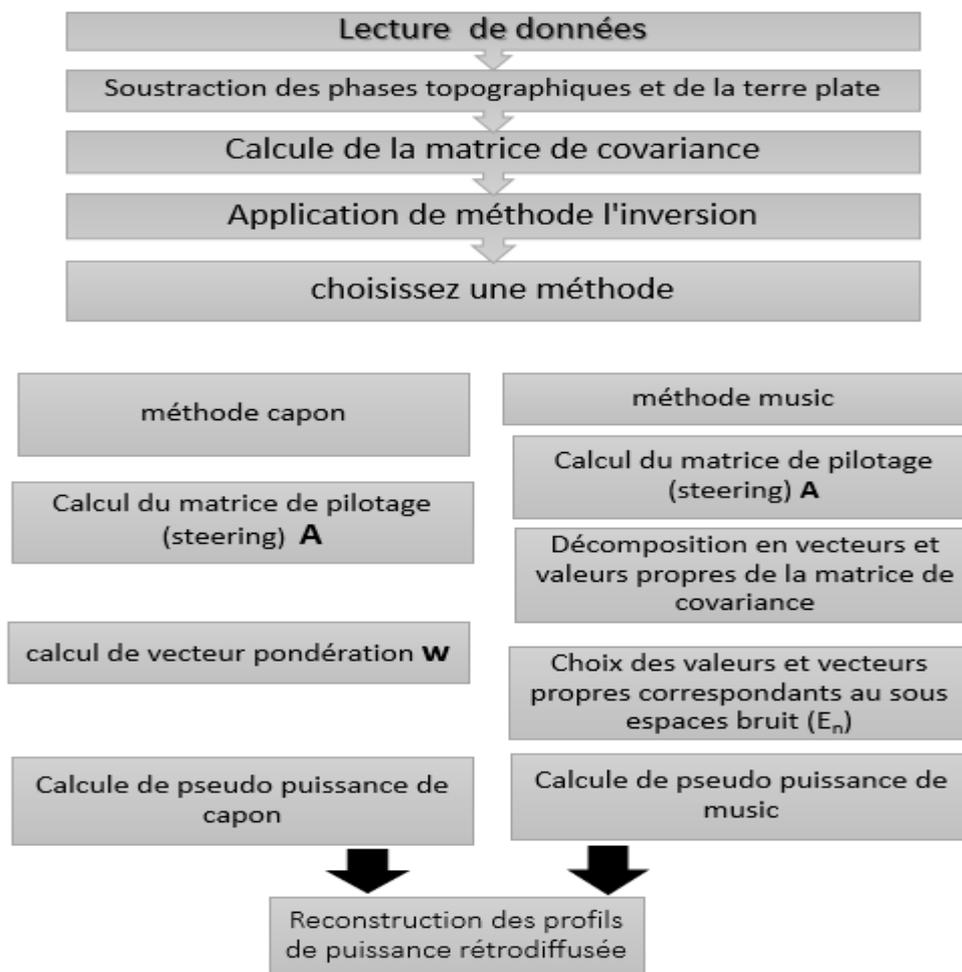


FIGURE II 13: DIAGRAMME L'APPLICATION DE LA TOMOGRAPHIQUE SAR EN UTELISANT MUSIC ET CAPON

II.8 Méthode d'inversion

Historique :

Dans de nombreux problèmes pratiques de traitement du signal, l'objectif est d'estimer à partir de mesures un ensemble de paramètres constants dont dépendent les signaux reçus. Il existe plusieurs approches de ces problèmes, notamment la méthode dite du maximum de vraisemblance de Capon (1969) et la méthode du maximum d'entropie de Burg. Bien qu'elles soient souvent efficaces et largement utilisées, ces méthodes présentent certaines limites fondamentales (notamment le biais et la sensibilité des estimations des paramètres), en grande partie parce qu'elles utilisent un modèle incorrect des mesures.

Pisarenko (1973) a été l'un des premiers à exploiter la structure du modèle de données, le faisant dans le contexte de l'estimation des paramètres de sinusoides complexes dans un bruit additif en utilisant une approche de covariance. Schmidt (1977), alors qu'il travaillait chez Northrop Grumman et indépendamment Bienvenu et Kopp (1979) ont été les premiers à exploiter correctement le modèle de mesure dans le cas de réseaux de capteurs de forme arbitraire. Schmidt, en particulier, a accompli cela en dérivant d'abord une solution géométrique complète en l'absence de bruit, puis en étendant intelligemment les concepts géométriques pour obtenir une solution approximative raisonnable en présence de bruit. L'algorithme résultant a été appelé MUSIC (MUltiple SIgnal Classification) et a été largement étudié.

II.8.1 Méthode de capon :

Est une astuce pour améliorer la résolution verticale et supprimer les lobes latéraux consiste à exploiter des techniques de super-résolution [22]. Tout d'abord, nous formulons le problème dans le cadre d'un système linéaire.

La géométrie d'acquisition représentée sur la figure II.10. Nous permettons de faire la reconstruction du profil tomographique dans le cadre du traitement du signal du réseau, où : le réseau transversal est synthétisé par les multiples passages SAR.

Le modèle peut être discrétisé le long de la dimension d'élévation. Considérons une cellule de résolution azimuth-distance ($x ; r$) qui contient K diffuseurs situés à différentes hauteurs. Pour le $k^{\text{ème}}$ diffuseur : s_k indique sa position en altitude et $\gamma(x, r, s_k)$ indique ses coefficients de réflectivité. Le signal reçu au $n^{\text{ème}}$ passage est :

$$y_n(x, r) = \sum_{k=1}^K \gamma(x, r, s_k) e^{j \frac{4\pi}{\lambda r} b_n s_k} \quad (\text{II.29})$$

Formulée plus en détail sous forme de matrice, l'équation du système est la suivante :

$$Y = \sum_{K=1}^K \gamma(x, r, s_k) a(s_k) = A\gamma \quad (\text{II.30})$$

Où :

- $Y = [y_1(x, r), y_2(x, r), y_n(x, r), \dots, y_N(x, r)]^T$ est le vecteur de mesure à N éléments.
- $\gamma = [\gamma(x, r, s_1), [\gamma(x, r, s_2), \dots, [\gamma(x, r, s_3),], [\gamma(x, r, s_k)]]]^T$ le vecteur à K éléments représente les coefficients de réflectivité des diffuseurs dans la dimension d'élévation .

- $a(s_k)$ le vecteur directionnel qui contient les informations de phase associées au diffuseur situé à s_k

$$a(s_k) = [e^{\frac{j4\pi b_1 s_k}{\lambda r}}, e^{\frac{j4\pi b_2 s_k}{\lambda r}}, \dots e^{\frac{j4\pi b_N s_k}{\lambda r}}]^T \quad (\text{II.31})$$

La matrice de direction A se compose de K vecteurs de direction correspondant chacun à un diffuseur dans la dimension d'élévation

$$A = [a(s_1), \dots a(s_k)] \quad (\text{II.32})$$

Par conséquent, il est possible d'appliquer des méthodes d'estimation spectrale spatiale pour obtenir une estimation du vecteur de réflectivité d'élévation γ . La formation de faisceau est une technique largement utilisée dans l'estimation spectrale spatiale (Monzingo et Miller 1980) [23], (Van Veen et Buckley 1988) [24]. Elle permet un filtrage spatial pour séparer le signal arrivant d'une direction souhaitée, et en même temps, supprimer les interférences et le bruit arrivant d'autres directions de visée. Un formateur de faisceau pondère généralement le signal de chaque capteur par un gain et un déphasage correctement conçus pour obtenir la sortie souhaitée, de la même manière qu'un filtre FIR. La figure II.14 suivante montre le schéma d'un filtre spatial :

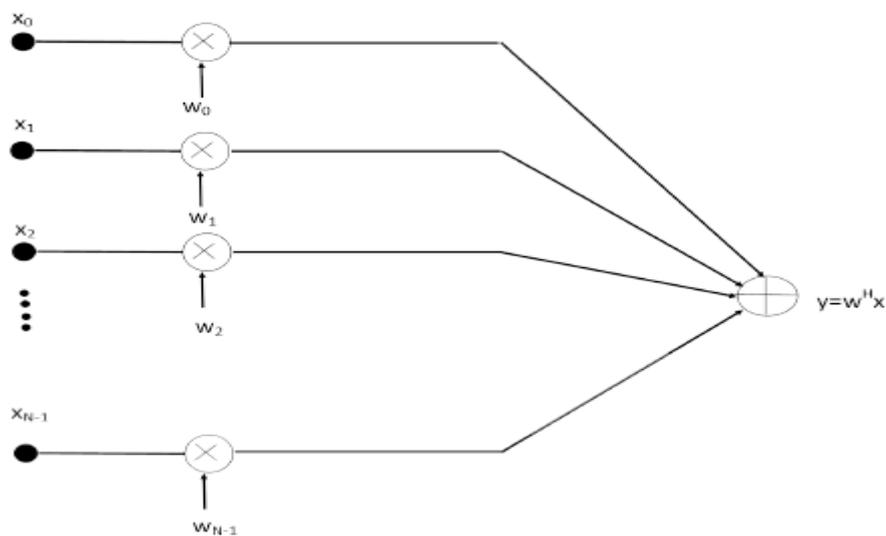


FIGURE II 14 : ILLUSTRATION D'UN SYSTEME DE FORMATION DE FAISCEAUX EN RESEAU

$$y_c = [s_k] = w^H Y = w^H a(s_k) \gamma(s_k) + \sum_{i \neq k}^K w^H a(s_i) \gamma(s_i) + w^H b \quad (\text{II.33})$$

où :

- Y est le vecteur de mesure.
- $w \in \mathbb{C}^N$ est le vecteur de poids (pondération).

- $Y_c[s_k]$ est la sortie du formateur de faisceau à la position s_k .
- $a(s_k) = [a_1k, a_2k, \dots, a_nk]^T$ est le vecteur de direction à la position s_k .
- b est le vecteur de bruit thermique additif.
- H désigne la transposition conjuguée.

Pour récupérer $\gamma(S_K)$, qui est le signal d'intérêt, il doit satisfaire la contrainte que $w^H a(s_k) = 1$. Les autres signaux, qui sont les interférences et le bruit, doivent être minimisés. Cela équivaut à minimiser la variance globale du signal reçu, y compris le signal souhaité, les interférences et le bruit. C'est ce qu'on appelle un formateur de faisceau à variance minimale. Le vecteur de pondération optimal w peut être résolu comme suit [22]:

$$w_{\text{capon}} = \operatorname{argmin}(w^H R_y w) \quad \text{s. t. } w^H a(s_k) = 1 \quad (\text{II.34})$$

La contrainte de l'optimisation ci-dessus est d'empêcher la distorsion du signal souhaité. Habituellement, la matrice de covariance R_y est estimée à partir d'échantillons multipoints. En désignant $Y(L)$ comme le vecteur de mesure à la lème vue, l'estimation est effectuée par:

$$R_y = \frac{1}{L} \sum_{n=1}^L Y(l)Y(l)^H \quad (\text{II.35})$$

Le beamformer Capon a une solution analytique donnée par :

$$w_{\text{capon}} = \frac{R_y^{-1} a(s_k)}{a(s_k)^H R_y^{-1} a(s_k)} \quad (\text{II.36})$$

Ainsi, la puissance de signal estimée résultante pour la formation de faisceau de Capon est :

$$P(s_k) = \frac{1}{a(s_k)^H R_y^{-1} a(s_k)} = (w_{\text{capon}})^H R_{yy} w_{\text{capon}} \quad (\text{II.39})$$

II.8.2 Méthode Music :

La méthode MUSIC (**M**U**l**tiple **S**Ignal **C**lassification) est utilisée pour décrire les techniques expérimentales et théoriques impliquées dans la détermination des paramètres des fronts d'onde multiples arrivant à un réseau d'antennes à partir de mesures effectuées sur les signaux reçus sur les éléments du réseau.

II.8.2.1 Principe de la méthode MUSIC :

La méthode MUSIC suppose qu'un vecteur de signal y est constitué p d'exponentielles complexes dont les fréquences ω sont inconnues, en présence d'un bruit blanc gaussien n tel que donné par le modèle linéaire

$$X = As + b \quad (\text{II.38})$$

Tel que :

- A est la Matrice des vecteurs de direction

$$A = [a(\omega_1), \dots, a(\omega_p)] \quad (\text{II.39})$$

$$a(\omega) = [1, e^{j\omega}, e^{j2\omega}, \dots, e^{j(M-1)\omega}]^T \quad (\text{II.40})$$

- le vecteur d'amplitude

$$S = [S_1, \dots, S_p]^T \quad (\text{II.41})$$

La matrice d'autocorrélation de Y donnée par :

$$R_y = AR_s A^H + \sigma^2 I \quad (\text{II.42})$$

Tel que δ^2 est la variance du bruit et R_s est l'autocorrélation de s.

La matrice d'autocorrélation R_y est traditionnellement estimée en utilisant la matrice de corrélation de l'échantillon

$$\widehat{R}_y = \frac{1}{N} Y Y^H \quad (\text{II.43})$$

Tel que N est le nombre d'observations du vecteur et $Y = [y_1, \dots, y_N]$. Compte tenu de l'estimation de R_y . MUSIC estime le contenu en fréquence du signal ou de la matrice d'autocorrélation en utilisant une méthode d'espace propre.

Depuis R_y est une matrice hermitienne, toutes ses composantes M vecteurs propres $\{e, e, \dots, e\}$ sont orthogonales l'une à l'autre, Si les valeurs propres de R_y sont triés par ordre décroissant, les vecteurs propres $\{e, \dots, e_p\}$ correspondant aux p valeurs propres les plus importantes (c'est-à-dire les directions de la plus grande variabilité) dans le sous-espace du signal E_s . Les $M - p$ vecteurs propres restants correspondent à une valeur propre égale à σ^2 et couvrent le sous-espace de bruit E_b , qui est orthogonal au sous-espace de signal, $E_b \perp E_s$

Notez que pour $M = p + 1$, MUSIC est identique à la décomposition harmonique de Pisarenko. L'idée générale de la méthode MUSIC est d'utiliser tous les vecteurs propres qui couvrent le sous-espace de bruit pour améliorer les performances de l'estimateur de Pisarenko.

Puisque tout vecteur de signal e qui réside dans le sous-espace du signal $e \in E_s$ doit être orthogonal au sous-espace du bruit $\perp E_b$, il doit être $a \perp e_i$ pour tous les vecteurs propres $\{e\}_{i=p+1}^M$ qui couvrent le sous-espace du bruit. Afin de mesurer le degré d'orthogonalité de par rapport à tous les $e_i \in E_b$, l'algorithme MUSIC définit une norme au carré.

$$d^2 = \| E_b^H A \|^2 = A^H E_b E_b^H A = \sum_{i=p+1}^M |a^H e_i|^2 \quad (\text{II.44})$$

où la matrice $E_b = [e_{p+1}, \dots, e_M]$ est la matrice des vecteurs propres qui couvrent le sous-espace de bruit E_b . $d^2 = 0$ est impliquée par la condition d'orthogonalité. Prendre la réciproque de l'expression de la norme au carré crée des pics aigus aux fréquences du signal. La fonction d'estimation de puissance pour MUSIC (ou le pseudo-spectre) est la suivante

$$P_{music} = \frac{1}{A^H E_N E_N^H A} \quad (\text{II.45})$$

Est A le vecteur direction. Les emplacements des p plus grands pics de la fonction d'estimation donnent les estimations de puissance pour les p composantes du signal

$$\hat{\omega} = \operatorname{argmax} P_{music} \quad (\text{II.46})$$

MUSIC est une généralisation de la méthode de Pisarenko, et elle se réduit à la méthode de Pisarenko lorsque $M = p + 1$. Dans la méthode de Pisarenko, un seul vecteur propre est utilisé pour former le dénominateur ; et le vecteur propre est interprété comme un ensemble de coefficients autorégressifs, dont les zéros peuvent être trouvés analytiquement ou avec des algorithmes polynomiaux de recherche de racines. En revanche, MUSIC suppose que plusieurs

fonctions de ce type ont été additionnées, de sorte que les zéros peuvent ne pas être présents. Au lieu de cela, il existe des minima locaux, qui peuvent être localisés en recherchant les pics dans la fonction d'estimation.

II.9 Conclusion :

L'InSAR utilise la différence de phase entre deux images à valeurs complexes provenant de différents angles de vue et formant une ligne de base, de sorte que la topographie de la zone peut être imagée. Mais cette technique a une limitation :

- il ne peut pas séparer la contribution de plusieurs cibles de la même cellule de résolution de cellule
- la reconstruction d'une phase topographique pour les zones à fortes pentes .

Pour surmonter cette limitation, des techniques SAR utilisant des acquisitions multiples, qui impliquent des variations de la vue (multi-baseline) ont été développées.

CHAPITRE III :

Applications et résultats

Chapitre III : APPLICATION ET RESULTATS

III.1 Introduction :

Pour extraire la hauteur des forets a partir des images SAR 2D nous synthétisons une 3ème dimension à partir de l'utilisation de la tomographie SAR basée sur différentes méthodes d'inversion, à savoir MUSIC, CAPON.

III.2 Implémentation et comparaison des deux méthodes music et capon

Pour étudier la différence entre les deux méthodes, nous prenons deux points de l'image réelle, le premier point **a (range 194, azimute282)** de la terre nue et le deuxième point **b(range 718, azimute803)** de la forêt , figure III.1.

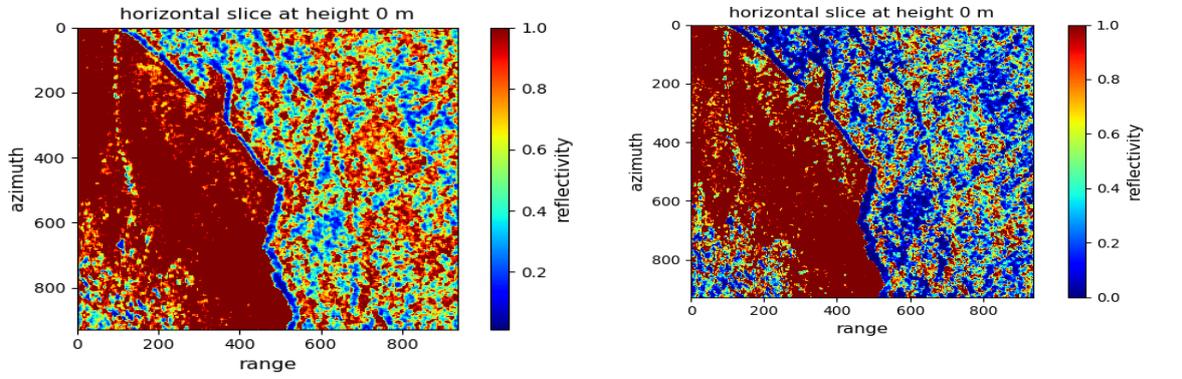


FIGURE III 1:IMAGE OPTIQUE (A) TERRE NUE (B)ZONE FORESTERIE

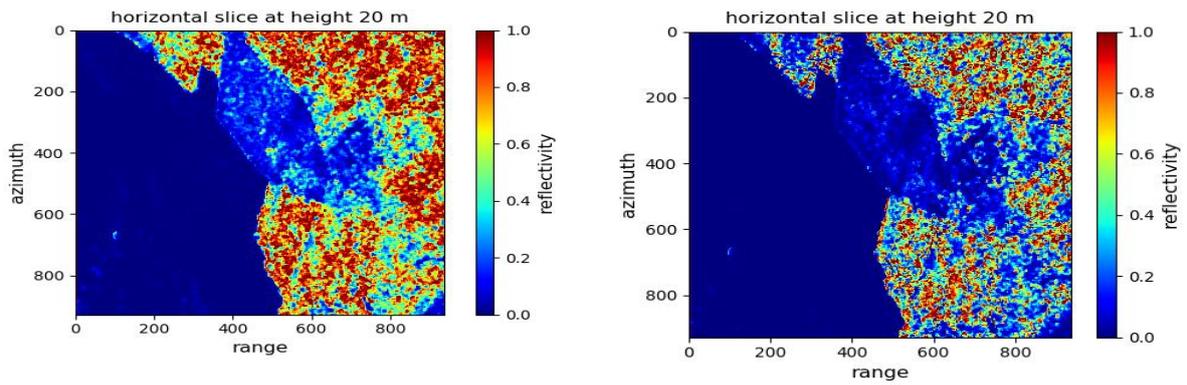
III.2.1 LES IMAGES TOMOGRAPHIQUES :

Capon

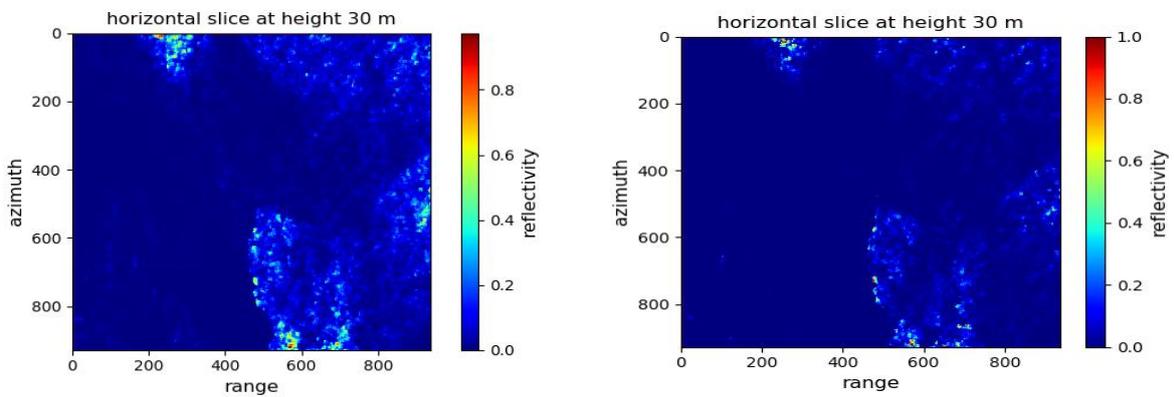
music



(a)



(b)



(c)

FIGURE III 2: LES IMAGES TOMOGRAPHIQUES HORIZONTALES QUI CORRESPONDENT A DIFFERENTES HAUTEURS.

La figure III 2 Représente les images tomographiques obtenus après le calcul de la matrice de covariance et application des deux méthodes d'inversion Capone et Music à la zone forestière de Trockenborn sur des différentes altitudes la barre situé à droites des images tomographiques représente les différentes couleurs correspond à différentes réflectivité. et on a obtenu les résultats suivantes :

- À 0m on remarque la présence de la couleur rouge sur la zone de la terre nue signifie une forte réflexion, sur la zone forestière on remarque un mélange des couleurs signifie une variabilité de puissance réfléchie.
- À 20m on remarque la présence de la couleur bleu sur la zone de la terre nue qui signifie une réflectivité nulle, sur la zone forestière, la zone mélangée est diminué avec une présence de la couleur bleu.
- À 30m, presque toute le zone et colorée en bleu signifie une absence de réflectivité, sauf des très petites régions dans la zone forestière colorés en vert signifie une faible réflexion.

D'après ces remarques on peut estimer La hauteur des arbres dans est donc d'environ (25-30) mètre.

III.5.2 PUISSANCE DES SIGNAUX REFLECHIS :

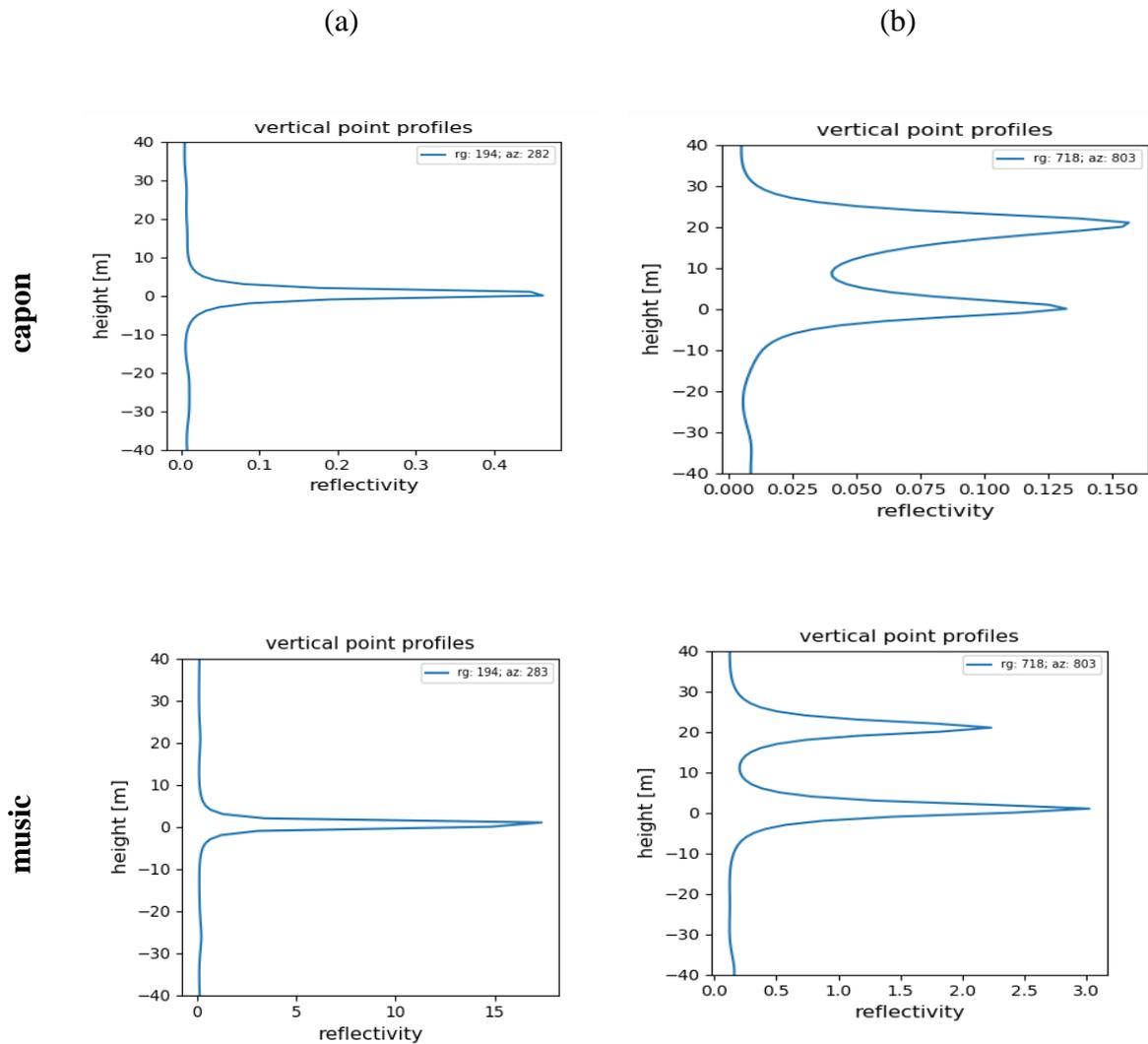


FIGURE III 3: LA DEFERENCE DES PUISSANCES REFLECHIS DE DEUX PIXELS

La figure III.3 Représente les puissances réfléchis des deux pixels, l'une correspond à la terre nue (a) et l'autre à la forêt (b). Les deux pixels sont représentés dans figure III.1, dans la terre nue, nous avons obtenu un pic correspondant aux signaux de réflexion au sol (0m). Par contre dans la zone forestière nous avons obtenu deux valeurs, l'un représente terre et l'autre représente la hauteur de la forêt. Donc une partie du signal est réfléchi à travers le volume de la forêt et l'autre partie est réfractée vers le sol puis réfléchi. On remarque que le pic sur la méthode MUSIC est plus mince que le pic dans la méthode CAPON, dans extraction plus précise.

III.2.3 LES PROFILS TOMOGRAPHIQUES :

III.2.3.1 En distance (range) :

La figure III.4 Représente des profils de distance (range) pour différentes azimuth: (a) azimuth 283, (b) azimuth 803, qui est représenté sur l'image optique, en (a) azimuth 283, nous remarquons que dans l'intervalle (0- 380 pixel) reste plat (0 m) et cela représente une zone nue. Dans l'intervalle (380-1000 pixels) nous remarquons des pics (jusqu'à 25 m), ce qui correspond à la hauteur des arbres (forêt). Pour l'image (b), l'intervalle (0-300 pixels), avec des élévations dans une zone urbaine allant de (10 à 15)metre. L'intervalle (300-500)pixels, n'a pas des élévations (0m). Pour l'intervalle (500 -1000)pixels, il y a des élévations jusqu'à 30 m, ce qui correspond à la hauteur des arbres (forêt).

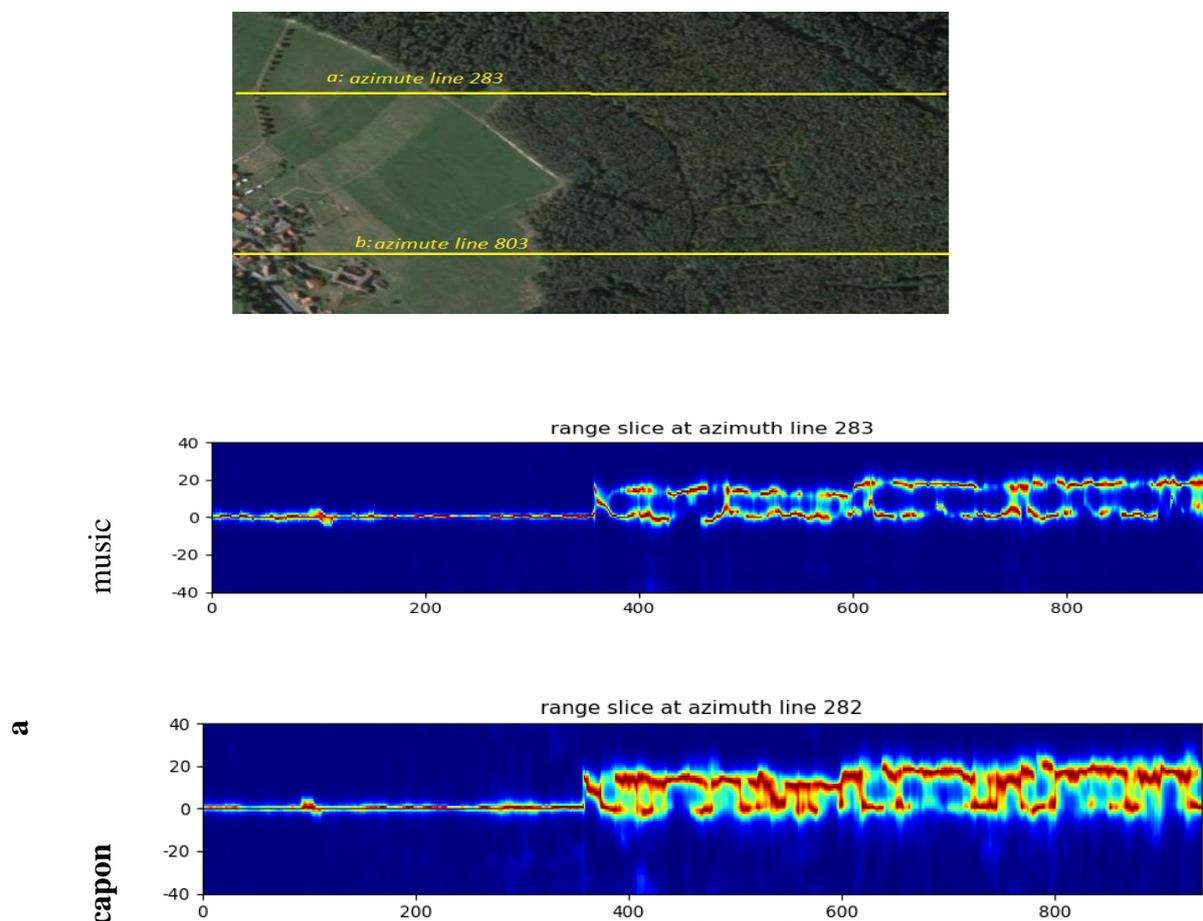


FIGURE III 4 A : IMAGES DE PROFILS EN DISTANCE (RANGE) POUR DIFFERENT AZIMUTES, (A) AZIMUTE 283

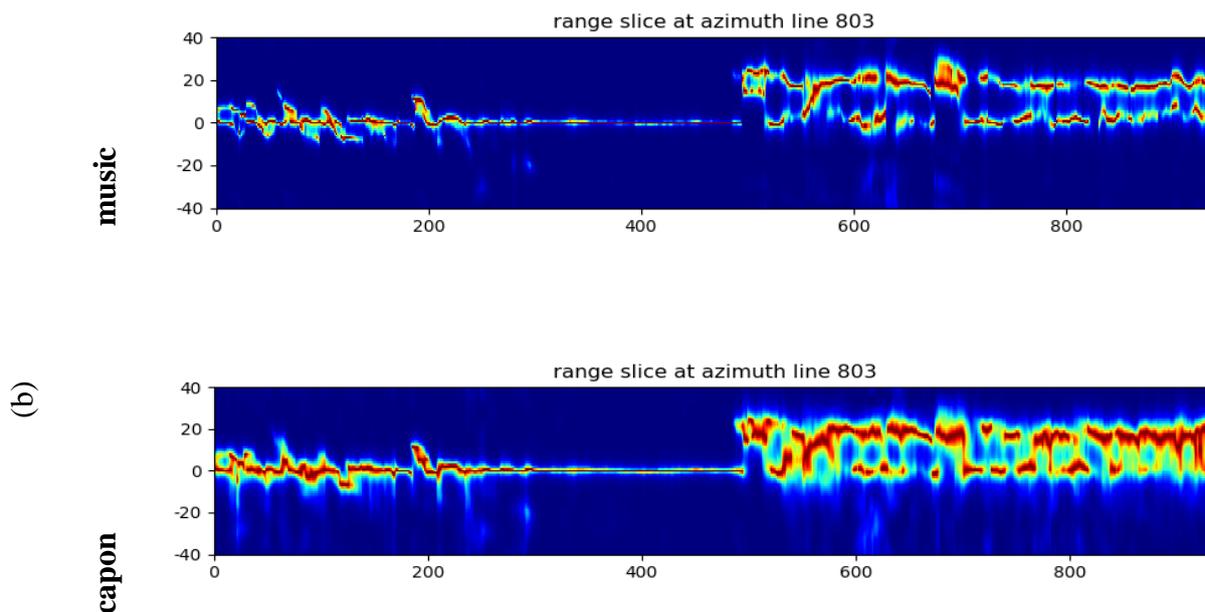


FIGURE III 4.B : IMAGES DE PROFILS EN DISTANCE (RANGE) POUR DIFFERENT AZIMUTES, (B) AZIMUTE 803

III.2.3.2 En azimute :

Figure III 5 Représente des profils en azimut pour différentes ranges : (a) range 194, (b) range 718, qui est représenté sur l'image optique, on remarque sur la figure III.5 (b) qu'il y a une élévation sur le profil dans toute l'intervalle jusqu'à 25m qui correspond à la hauteur des arbres (forêt). Pour figure III.5 (a), qui n'a pas d'élévation sur le profil (0 m), sauf pour les deux intervalles [0-100 pixels] et [800-1000 pixels]

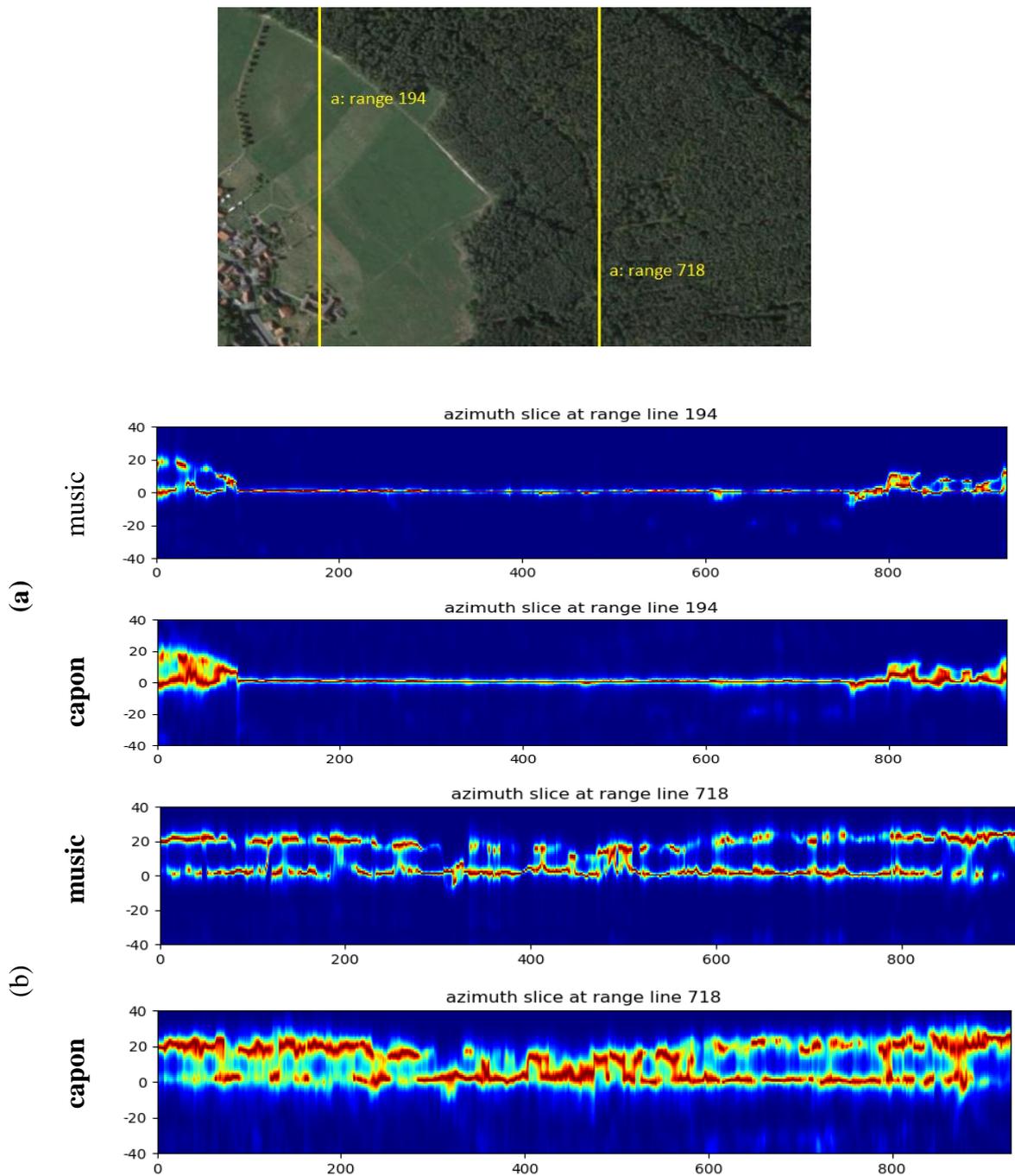


FIGURE III 5: IMAGES DE PROFILS EN AZIMUTE POUR DIFFERENT RANGES, (A) RANGE 194, (B) RANGE 718.

À partir des Figures (III.4 ;III.5) Nous avons remarqué que sur les profils des deux méthodes avec les mêmes positions que la méthode MUSIC est plus évidente et plus précise (résolution supérieur)que la méthode capon .

III.3 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les principes de MUSIC et Capon. Ensuite nous avons implémenté les deux méthodes pour extraire la hauteur de la forêt et comparer les résultats entre les deux méthodes obtenues, Nous avons remarqué que la mise en œuvre de la méthode MUSIC est plus efficace et meilleure que la méthode capon, Donc une résolution meilleur, alors une grande précision des altitudes.

Conclusion Générale

Conclusion Générale :

Ce projet nous a permis de nous initier au Radar , de intéresser à la technologie Radar SAR et de faire une étude applicative dans le domaine du Tomographie SAR .

Dans ce cadre, nous avons d'abord présenté le Radar à Synthèse d'Ouverture (SAR) en donnant ses types de plateformes, modes d'acquisitions et son modèle géométrique après on a introduit le domaine de polarimétrie SAR.

Puis, nous avons étudié l'interférométrie SAR, c'est une étape nécessaire pour l'exploitation des données radar.

Pour extraire la hauteur des forêts à partir des images SAR 2D nous synthétisons une 3ème dimension à partir de l'utilisation de la tomographie SAR basée sur différentes méthodes d'inversion, à savoir MUSIC, CAPON.

L'utilisation de la méthode MUSIC a montré son efficacité. Le choix de nombre de sources égales à 2 donne la meilleure résolution avec moins de bruit. Ces résultats obtenus peuvent être appliqués dans des applications comme : la classification et la reconnaissance des cibles.

Bibliographie :

- [1] J. C. Curlander and R. N. McDonough, Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing. New York: Wiley, 1991.
- [2] Ressources naturelles Canada, Radars aéroportés et spatioportés. www.rncan.gc.ca (consulté le 10 Juin 2017).
- [3] <https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/interferometrie-radar.xml>.
- [4] I. CUMMING ET F. WONG, DIGITAL PROCESSING OF SYNTHETIC APERTURE RADAR DATA. ARTECH HOUSE, 2005.
- [5] Polarimetric RADAR imaging from basics to applications , JONG SEN LEE – ERIC POTTIER , Taylor and Francis Group Boca Raton London New York.
- [6] Matrice de diffusion - Ressources naturelles Canada <https://www.rncan.gc.ca/sciences-terre/geomatique/imagerie-satellitaire-photos-aeriennes/imagerie-satellitaire-produits/ressourceseducatives/9538> .
- [7] Cloude SR & Pottier E (1996). A review of target decomposition theorems in radar polarimetry. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 34(2):498–518.
- [8] J.S. Lee, “Speckle suppression and analysis for synthetic aperture radar images,” Optical Engineering, vol. 25, no. 5, pp. 636-643, 1986.
- [9] Najeh Maher, Filtrage et analyse des images Radar, Université Laval, 1997, p. 27.
- [10] BAMLER AND P. HARTL, “SYNTHETIC APERTURE RADAR INTERFEROMETRY,” INVERSE PROBLEMS, VOL. 14, NO. 4, P. R1, 1998.
- [11] F. Li, R.M. Goldstein. Studies of multibaselines space borne interferometric synthetic aperture radars. In Proc. of IGARSS, Ann Arbor, 1987.
- [12] D. C. Ghiglia and M. D. Pritt, “Two-Dimensional Phase Unwrapping, Theory, Algorithms, and Software”, Wiley Inter Science, ISBN 0-471-24935-1.
- [13] P. Piau, “Performances of the 3d-sar imagery,” in Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1994. IGARSS’94. Surface and Atmospheric Remote Sensing: Technologies, Data Analysis and Interpretation., International, vol. 4. IEEE, 1994, pp. 2267–2271.
- [14] C. V. Jakowatz and P. Thompson, “A new look at spotlight mode synthetic aperture radar as tomography: imaging 3-d targets,” IEEE transactions on image processing, vol. 4, no. 5, pp. 699–703, 1995
- [15] Q. LIN, J. VESECKY, ESTIMATION WITH INTERFEROMETRIC SYNTHETIC APERTURE RADAR USING FIRING DETECTION, IEEE, 1991.
- [16] <https://eo-college.org/resource/sar-tomography/>

- [17] Mark H. Brady. Angle Resolution Techniques for Cellular Radio. EE 359 Wireless Communications, December 2001, 12p.
- [18] Suk Chan Kim, Ickho Song, Seokho Yoon, So Ryoung Park. DOA Estimation of Angle Perturbed Sources for Wireless Mobile Communications. In: IEICE Trans. Commun. Vol E83-B n°11 November 2000.
- [19] Mark H. Brady. Angle Resolution Techniques for Cellular Radio. EE 359 Wireless.
- [20] Y. Huang, L. Ferro-Famil et A. Reigber, « Under foliage object imaging using SAR tomography and polarimetric spectral estimators », in 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar, (Aachen, Germany), p. 1–4, 2010.
- [21] P. Pasquali, C. Prati, F. Rocca, M. Seymour, J. Fortuny, E. Ohlmer, and A. Sieber, “A 3-d sar experiment with emsl data,” in Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1995. IGARSS’95. ‘Quantitative Remote Sensing for Science and Applications’, International, vol. 1. IEEE, 1995, pp. 784–786.
- [22] J. Capon, “High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis,” Proceedings of the IEEE, vol. 57, no. 8, pp. 1408–1418, 1969.
- [23] R. A. Monzingo and T. W. Miller, Introduction to adaptive arrays. Scitech publishing, 1980.
- [24] B. D. Van Veen and K. M. Buckley, “Beamforming: A versatile approach to spatial filtering,” IEEE assp magazine, vol. 5, no. 2, pp. 4–24, 1988.
- [25] Johann CHAMPENOIS. Caractérisation des déformations tectoniques intersismiques de l’île de Taiwan par interférométrie radar.