



Université d'Antananarivo

Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo

**Mention Information Géographique et Aménagement du
Territoire**

Parcours : Géomètre Topographe



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

GEOMETRE TOPOGRAPHE, GRADE MASTER

Etudes sur la technique d'interférométrie dans la zone Ankorondrano

Présenté par : RASAMISON Toky Niriana Herman

Président du Jury : Monsieur RABETSIAHINY, Maître de conférences enseignant à
l'ESPA.

Rapporteur : Professeur RABARIMANANA Mamy, Responsable de la Mention
Information Géographique et Aménagement du territoire.

Encadreur : Madame RAHAJANIRINA Michelle, Chef de Service de l'Imagerie et de
Photogrammétrie au FTM.

Examineurs : Madame RANDIANANDRAINANA Noëlle

Monsieur RAJAONARISON Désiré

Date de soutenance: 23 Aout 2017

Université d'Antananarivo

Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo

Mention Information Géographique et Aménagement du Territoire

Parcours : Géomètre Topographe

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

GEOMETRE TOPOGRAPHE, GRADE MASTER

« Etudes sur la technique d'interférométrie dans la zone Ankorondrano »

Présenté par : RASAMISON Toky Niriana Herman

Président du Jury : Dr RABETSIAHINY, enseignant chercheur au sein de l'ESPA.

Rapporteur : Professeur RABARIMANANA Mamy, Responsable de la Mention
Information Géographique et Aménagement du territoire.

Encadreur : Madame RAHAJANIRINA Michelle, Chef de Service de l'Imagerie et de
Photogrammétrie au sein du FTM.

Examineurs : Madame RANDIANANDRAINANA Noëlle

Monsieur RAJAONARISON Désiré

REMERCIEMENT

Tout d'abord, je rends gloire à Dieu, Qui m'a toujours conduit durant la réalisation de ce mémoire. Ensuite, ce mémoire est réalisé grâce à l'appui et à la contribution de nombreuses personnes qui ont donné des soutiens moraux et matériels.

Mes vifs remerciements et sincères reconnaissances s'adressent particulièrement à :

- Professeur ANDRIANAHARISON Yvon, Responsable de Domaine de l'ingénieur de l'Ecole Supérieur Polytechnique d'Antananarivo qui n'a ménagé ses efforts pour la bonne marche de l'école.
- Professeur RABARIMANANA Mamy, Responsable de la mention IGAT qui cherche toujours le bien de notre département, et m'a guidé avec patience et bienveillance dans l'élaboration de ce mémoire et a consacré ses temps précieux pour nous encadrer.
- Madame RAHAJANIRINA Michelle, qui m'a guidé avec patience et bienveillance dans l'élaboration de ce mémoire et a consacré ses temps précieux pour nous encadrer.
- Docteur RABETSIAHINY, malgré ses lourdes et ses multiples obligations a bien voulu accepter de présider le jury.
- Les examinateurs qui ont bien voulu évaluer ce travail : Monsieur RAJAONARISON Désiré, Enseignant à l'ESPA ainsi que Docteur RANDRIANANDRAINANA Noëlle, Enseignant à l'ESPA.
- Mes professeurs de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo (ESPA) pour les nombreuses formations qu'ils nous ont dispensé.
- Toute ma famille qui n'a pas ménagé ses efforts pour me soutenir, m'encourager et me donner la force et la volonté de réussir.
- Tous mes fidèles amis pour leurs aides et leurs encouragements.
- Tous ceux qui, de près ou de loin, m'ont prêté mains fortes pour une franche collaboration.

SOMMAIRE

REMERCIEMENT	i
SOMMAIRE	ii
LISTES DES FIGURES	iv
LISTE DES ABREVIATIONS.....	vi
LISTE DES EQUATIONS	vi
INTRODUCTION	2
Chapitre I. RADAR (Radio Detection and Ranging).	4
A. PRESENTATION DU SYSTEME.....	4
B. GENERALITE SUR LE SYSTEME RADAR.....	11
C. PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT DES RADAR.....	17
D. LE RADAR A OUVERTURE SYNTHETIQUE ou SAR.....	17
Chapitre II. INTERFEROMETRIE.	33
A. NOTION D'INTERFERENCE.	33
B. PRINCIPES ET LIMITES DE LA MESURE DES DEPLACEMENTS PAR INTERFEROMETRIE RADAR.....	34
Chapitre III. APPLICATION DE L'INTERFEROMETRIE A L'ETUDE DE LA DEFORMATION DU SOL A ANKORONDRANO ATSINANANA.....	57
A. ETUDE GEOLOGIQUE ET MORPHOLOGIQUE.....	58
B. LES INFORMATIONS FOURNIES PAR L'INTERFEROMETRIE RADAR DIFFERENTIELLE.	60
C. LA DEFORMATION ACTUELLE ET LES POTENTIALITES DE L'INTERFEROMETRIE RADAR A ANKORONDRANO.....	67
CHAPITRE IV. DISCUSSIONS SUR LA METHODE.	77
A. CARACTERISTIQUE DE LA TECHNIQUE DE L'INTERFEROMETRIE.	78
B. DISCUSSION	80
CONCLUSIONS GENERALES	82

Bibliographie.....	84
ANNEXE	92
Tables des matières	94

LISTES DES FIGURES

Figure 1:interaction de l'onde électromagnétique et la scène radar	12
Figure 2 : répartitions des fréquences radar	14
Figure 3 : Configuration de l'image radar en mode stripmap.....	15
Figure 4: Configuration de l'image radar en mode ScanSAR	16
Figure 5: Configuration de l'image radar en mode Spotlight	16
Figure 6: configuration géométrique dans l'axe de l'azimut	18
Figure 7: configuration géométrique du radar SAR	19
Figure 8: Configuration géométrique du radar SAR dans le plan distance	20
Figure 9: Résolution d'un radar.....	20
Figure 10 : distorsion géométriques d'une image radar	21
Figure 11: Surface d'un pixel pour un sol plat	22
Figure 12: surface d'un pixel pour un sol avec une pente	23
Figure 13: Acquisition des images SAR.....	24
Figure 14:mesure de la phase par le radar	26
Figure 15: réponses d'une cible ponctuelle	27
Figure 16 : construction de la réponse d'amplitude et phase d'une cellule de résolution	30
Figure 17: image d'amplitude et de phase.....	31
Figure 18: expérience d'Young	33
Figure 19: sensibilité à la composante du déplacement suivant la direction de visée du satellite.	36
Figure 20: Acquisition d'un couple interférométrique d'après Massonnet et Inglada	37
Figure 21: Acquisition simultanée	38
Figure 22: cas d'une acquisition non simultanée	39
Figure 23: déformation du sol.....	40
Figure 24 : combinaison de deux visées pour mieux contraindre le déplacement et ambiguïté de la phase.....	42
Figure 25:influence de l'angle de visée lors d'un déplacement homogène.	43
Figure 26: influence de la base sur la géométrie de l'image	44
Figure 27: Influence de la ligne de base sur la mesure du déplacement.....	45
Figure 28: influence de la base sur la phase interférométrique	46
Figure 29:les données orbitales des images utiliser dans cette étude.	51
Figure 30: comparaison de l'image de cohérence avec l'amplitude et la phase.	52

Figure 31: Couverture de SENTINEL 1A sur la scène avec une couverture de 250km.	58
Figure 32:organigramme de travail.....	62
Figure 33: image de cohérence et interférogramme de 2016-2017 Bperp=58m et Nombre de jours 48jrs.....	64
Figure 34: image de cohérence et interférogramme de 2016-2017 Bperp=124m et Nombre de jours 552jrs.....	65
Figure 35: phase topographique soustrait.	66
Figure 36: interférogramme filtré.	67
Figure 37: interférogramme de 2015.	69
Figure 38:déplacement observée dans la zone.	70
Figure 39: Somme de deux interférogrammes.....	71
Figure 40: MNT Interférométrique de 2016-2017.....	72
Figure 41: A gauche : image d'amplitude de la ville de Paris. A droite : combinaisons interférométriques couvrant la période 1997-1999. Le paramètre ha correspond à l'altitude d'ambiguïté des interférogrammes.	73
Figure 42:(a) et (b) interférogrammes sur la ville de Paris.	74
Figure 43:déplacements verticaux à Taiwan.....	75

LISTE DES ABREVIATIONS

DVR : Direction vers le Radar
EM: Electromagnétique
ERS: Earth Ressources Space
ESA: European Spatial Agency
FTM: Foiben-Taosaritanin'i Madagasikara
GPS: Global Positioning System
JERS: Japan Earth Ressources Space
MNT : Modèle Numérique du Terrain
PS : Permanent Scatterers
SAR : Synthetic Aperture Radar
SER : Surface Equivalent Radar
SEASAT: Sea Satellite
SNAP: Sentinel Toolbox

LISTE DES EQUATIONS

Equation 1: Equation Radar
Equation 2: Surface Equivalente Radar d'un objet
Equation 3 : Distance Maximale de détection radar
Equation 4: efficacité du radar
Equation 5 : résolution en azimuth
Equation 6 : résolution en distance
Equation 7 : Surface d'un pixel sur un terrain plat
Equation 8 : largeur de l'empreinte au sol
Equation 10= Equation 6
Equation 11 : taille d'une cellule de résolution
Equation 12 : résolution en distance SAR
Equation 13 : résolution en azimuth SAR
Equation 14 : décomposition de la phase interférométrique
Equation 15 : phase géométrique
Equation 16 : Ambiguïté de la phase
Equation 17 : phase interférométrique pour une cible élémentaire

Equation 18 : incertitude sur la phase

Equation 19 : phase interférométrique en un pixel

Equation 20 : différence de phase entre 2 cibles

Equation 21 : DVR

Equation 22 : différence de phase entre deux acquisitions simultanées

Equation 23 : Relation entre la phase et l'orbite des acquisitions

Equation 24 : différence de phase entre deux acquisitions non simultanées

Equation 25 : différence de phase dans le cas d'une bonne cohérence

Equation 26 : phase affectée par le déplacement d

Equation 27 : phase interférométrique après correction d'éloignement

Equation 28 : phase interférométrique avec correction topographique

Equation 29 : Altitude d'ambiguïté H_a

Equation 30 : Influence de la base sur la stabilité de la phase

Equation 31 : Erreur de la phase

Equation 32 : Estimation de la cohérence

Equation 33 : Phase interférométrique en chaque pixel

INTRODUCTION

La géologie de la haute terre centrale est constituée d'alluvion fluviale récente. Ces vallons à sols hydromorphes sont tourbeux et sableux en amont du réseau, plus argileux en aval, pour passer à des véritables alluvions argileuses. Le plateau porte de sol ferrallitique rouge très bien drainés. Ils se prolongent par des altérites très épaisses (10 à 30 mètres au-dessus du socle sain). Ce manteau d'altération loge une nappe phréatique altérite permanente située entre 8 et 15 mètres dont l'ampleur de fluctuation est de l'ordre de 3 mètres. Cette nappe émerge en bas de versant et alimente le bas fond.

Le fokontany d'ankorondrano se trouve dans cette zone géologique décrite ci-dessus qui n'est pas faite pour les grandes constructions. Or, depuis quelques années, cette zone fait place à des constructions de grands bâtiments (par exemple la tour orange, tranofitaratra..). Alors, l'objet de notre étude va se baser sur la conséquence de ces constructions sur la stabilité du sol. De ce point de vue, c'est une zone exemplaire pouvant montrer des déformations et de modes variés. Si l'information donnée par la géologie reste primordiale dans l'étude de la stabilité d'une zone, celle-ci passe aussi, pour une grande part, par l'étude des déformations actuelles de la surface.

L'interférométrie radar est une technique relativement récente permettant de mesurer une partie du vaste spectre des déformations de surface induites par divers phénomènes. Cette technique permet de mesurer actuellement des déformations centimétriques (avec une grande sensibilité sur la composante verticale), sur des bandes de sol larges de 250 km (SENTINEL 1A), couvrant la quasi-totalité des surfaces émergées. L'information est fournie sous forme d'image avec une résolution spatiale décimétrique et la répétitivité des mesures varie du jour au mois. Depuis la première application de l'interférométrie radar à l'étude de phénomènes tectoniques par Massonnet et al. [1993], l'intérêt et le potentiel de cette technique ont été largement démontrés par diverses applications régionales [Massonnet et Feigl 1998; Bürgmann et al. 2000a; Zebker et al. 2000].

Ce mémoire se positionne donc d'une part sur la déformation du sol et d'autre part, sur l'utilisation d'un outil de télédétection, le radar. Cette utilisation implique une technique particulière pour mesurer des déplacements de la surface terrestre. Toutefois, ce mémoire ne se place pas dans une problématique exclusivement liée à la déformation.

L'objectif principal de ce mémoire est de montrer comment l'utilisation de cette technique de télédétection peut permettre d'avancer, par rapport aux connaissances existantes,

compréhension et évolution des déformations dans la zone d'étude. Nous cherchons à savoir comment, où et dans quelle mesure l'interférométrie radar peut être appliquée. L'interférométrie radar utilise deux images radar d'une même zone, acquises dans des conditions similaires mais à des dates différentes. L'obtention de l'information sur les déplacements se fonde sur l'existence de différences mesurables entre les deux images, engendrées par certains déplacements finis de la surface terrestre ayant lieu entre les deux acquisitions. Les images radar utilisées sont obtenues à partir d'un radar à ouverture synthétique (abrégié en SAR : Synthetic Aperture Radar). En pratique, les images acquises à partir de satellites sont actuellement les plus utilisées en interférométrie radar. Nous limiterons donc notre étude à ce type d'image, et nous insisterons plus particulièrement sur l'utilisation des images issues des satellites SENTINEL-1 qui ont été exploitées dans nos études sur la zone d'étude.

Dans l'idéal, un tel sujet ferait appel à une étude exhaustive qui éprouverait différentes mises en œuvre de l'interférométrie et les appliquerait à sur une zone très plus vaste. Pour des raisons pratiques liées au nombre d'images dont nous pouvions disposer, une telle étude n'était pas envisageable; des choix ont donc dû être faits.

Nous avons adopté dans ce mémoire le plan décrit ci-dessous.

Le chapitre I explique la généralité sur le système radar, le principe de fonctionnement du radar et le radar à ouverture synthétique(SAR). Dans le chapitre II, on traite le principe et limite de mesure interférométrique, le principe de la mesure de déplacement, puis les sources d'erreur en interférométrie et enfin le choix des données. Dans le chapitre III, on parlera du contexte géologique et géomorphologique de la zone, puis on verra les informations fournies par l'interférométrie radar enfin la relation entre la géologie de la zone et les informations fournies par l'interférométrie radar. Pour enfin aborder dans le chapitre IV une discussion sur la méthodologie appliquée et la limite de l'utilisation de la technique.

Chapitre I. RADAR (Radio Detection and Ranging).

Dans ce chapitre, nous allons tout d'abord présenter les grandeurs qui permettent de caractériser un système radar. Ensuite, nous expliquons les différentes configurations, pour l'acquisition des signaux, qui permettent de réaliser une image radar. Puis, nous exprimons les différentes formes d'onde qui sont émises par un système radar imageur. Enfin, nous détaillons plus précisément le principe du radar à ouverture synthétique et nous présentons différentes méthodes permettant d'obtenir une image à haute résolution.

A. PRESENTATION DU SYSTEME

La télédétection se divise en deux branches la télédétection optique qui utilise le rayonnement visible et la télédétection radar dans le domaine des hyperfréquences. On limite le domaine radar de $[3 ; 60]$ cm et le domaine optique de $[0.5 ; 4]$ μm .

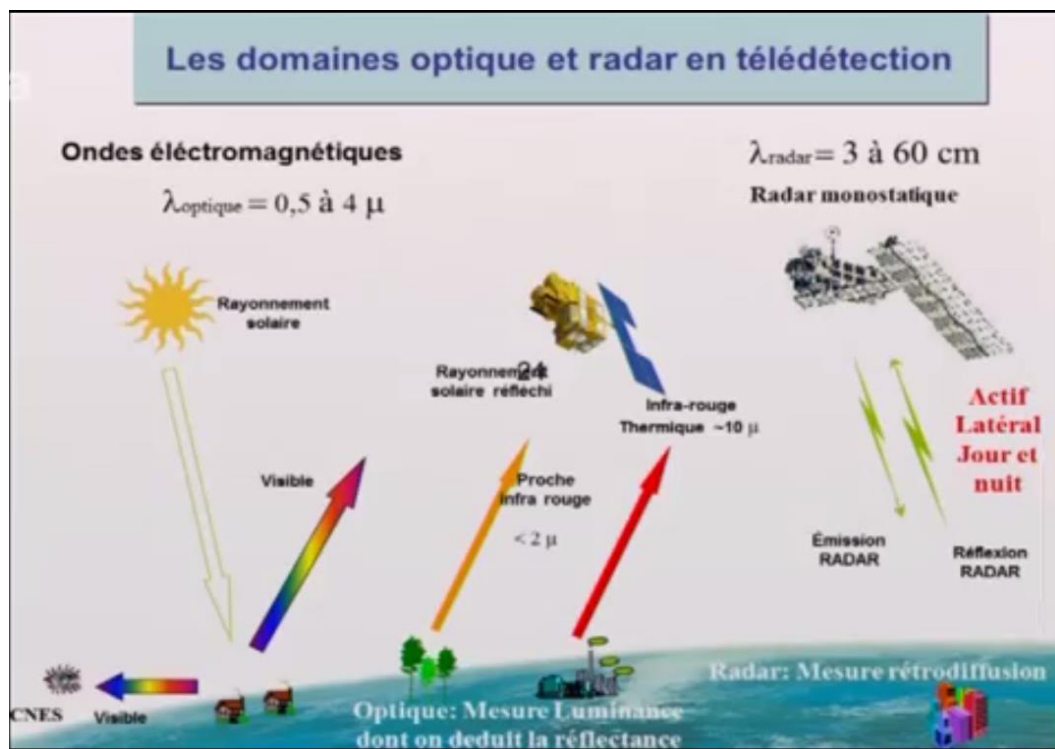


Figure 1: présentation du système

Un radar est un système qui permet de détecter et localiser des objets. Ce terme radar est l'acronyme de radio détection and ranging. De nos jours, le terme radar ne se limite plus au système de détection et de localisation mais englobe aussi de nouveaux systèmes électroniques basés sur l'émission et la réception d'ondes électromagnétiques. Parmi ce nouveau système qui exploite l'onde électromagnétique se trouve le radar imageur. Un système radar est un système actif qui possède sa propre source d'émission, celui-ci est alors opérationnel par tout temps et

notamment dans les pays très nuageux. Le système, en plus d'un récepteur, comprend un émetteur de rayonnement.

Un certain nombre de radars imageurs exploitent le principe de la synthèse d'ouverture. Leur capacité à recevoir et collecter des signaux en amplitude et en phase offre des possibilités de très haute résolution pour l'imagerie ainsi que des mesures interférométriques (élévation du terrain). De plus, la capacité de pénétration de l'onde électromagnétique émise dans certaines bandes, liée aux caractéristiques de cette onde, offre aussi des possibilités de détection d'objets à travers les nuages et la nuit.

1. Les composantes principales du radar.

i. Le transmetteur

Le transmetteur est un appareil électronique qui génère une impulsion électromagnétique de la gamme des ondes radio qui sera envoyé à l'antenne pour diffusion.

Il produit l'onde de radiofréquence à une puissance moyenne et de pointe désirée; Émet des ondes sur une gamme de fréquences; Émet de façon stable là où les fréquences désirées afin de permettre un traitement reproductibles des données ; Être modulable en fréquence ou en phase pour les besoins de la formation de l'impulsion; Être fiable, facile à entretenir et efficace pour une très longue durée de vie.

ii. Récepteur

Le récepteur reçoit les échos de retour qui ont été perçus par l'antenne. Il transforme le signal à haute fréquence du faisceau en un signal modulé de fréquence intermédiaire qui contient l'information des échos, l'amplifie et les transmet ensuite au système de traitement du circuit radar qui en retirera ensuite les cibles d'intérêt.

Le récepteur a pour rôle d':

- Amplifier les signaux reçus sans y ajouter de bruit de fond ou distorsion;
- Optimiser la probabilité de détection de signaux grâce à une bande passante adaptée;
- Avoir une large plage d'intensités qu'il peut traiter sans saturation;
- Rejeter les signaux d'interférence pour optimiser l'extraction de l'information

iii. L'antenne

L'antenne est une des parties les plus importantes d'un radar. Elle réalise les fonctions essentielles suivantes :

- Elle transfère la puissance de l'émetteur à des signaux dans l'espace avec l'efficacité voulue et là selon la répartition nécessaire. Le même processus est appliqué à la réception.
- Elle permet d'obtenir le diagramme de rayonnement souhaité. En général il sera suffisamment étroit dans le plan horizontal pour obtenir la précision et la résolution demandée en azimut.
- Elle doit assurer la mise à jour de la position de la cible à la fréquence voulue. Dans le cas d'une antenne à balayage mécanique, cette mise à jour se fera au rythme de la rotation de l'antenne. Une vitesse de rotation élevée peut poser des problèmes mécaniques importants, notamment pour les équipements qui émettent dans des bandes de fréquences nécessitant l'utilisation d'antennes imposantes et pouvant peser plusieurs tonnes.
- Elle doit mesurer sa direction de pointage avec une grande précision.

a) Gain d'antenne

Le gain est le rapport entre l'énergie irradiée dans une direction particulière et l'énergie totale émise par l'antenne dans toutes les directions. Il s'agit donc du taux de concentration de l'énergie dans une direction donnée par rapport celui d'une antenne isotrope. Plus l'antenne est directionnelle, plus le gain est grand. Le gain s'applique également à la réception et à la même valeur.

2. Quelques définitions sur les termes utiliser dans le domaine radar.

i. L'Effet Doppler

Cet effet fut proposé par Johann Christian Doppler (1803-1853 /Autrichien), confirmé sur les sons par le chercheur néerlandais Christoph Hendrik Diederik Buys Ballot .Il est également proposé par Hippolyte Fizeau sur les ondes électromagnétiques.

L'effet Doppler est le décalage entre la fréquence f_e de l'onde émise et de la fréquence f_r de l'onde aperçue par un observateur lorsque celui-là et la source sont en mouvement l'une par rapport à l'autre. Cet effet apparait toujours sur l'onde réfléchié par un objet en mouvement, relativement à la source.

ii. Le chatoiement

L'imagerie cohérente, qui suppose l'illumination de la scène observée par une source cohérente et que l'on rencontre tout aussi bien en imagerie radar (ondes électromagnétique) a des propriétés bien particulières dès lors que l'on s'intéresse au signal rétrodiffusé par une

surface ou par un volume. En effet, la prise en compte d'un grand nombre de cibles élémentaires, censées représenter le milieu diffusant, conduit à l'apparition du phénomène de chatoiement (en anglais : speckle). La conséquence la plus remarquable est que la rétrodiffusion d'un milieu homogène est en général un signal non constant et d'apparence bruitée.

iii. Equation radar

a) Equation Radar

Le principe de fonctionnement du diffusomètre est lié à la relation mathématique appelé aussi équation radar. Cette équation réunit la puissance de l'onde transmise par l'antenne, la distance séparant l'antenne et la cible, les caractéristiques de l'antenne et de la surface visée. Pour une antenne qui sert à la fois réception et à la transmission l'équation prend la forme :

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \quad \text{Équation 1}$$

Où P_r la puissance capté par l'antenne réceptrice en watts ;

P_t est la puissance émise par l'antenne émettrice en watts ;

G est le gain de l'antenne en Db. ;

λ est la longueur d'onde du signal ;

R distances Antenne-cible ;

Et σ est la surface équivalente radar en mètre carré.

b) Surface équivalente radar (SER).

La SER d'un objet représente la capacité de celui-ci à renvoyer l'onde électromagnétique incidente vers l'antenne de réception. Dans le cas monostatique, il est possible de décrire, l'expression de la SER comme étant le rapport entre la puissance reçue par le radar (sous la forme du module au carré du champ $\vec{E}_s$) et la puissance émise par le radar avec le module au carré du champ $\vec{E}_i$. Dans le cas où on se situe suffisamment loin de l'objet, la SER de l'objet peut s'écrire avec :

$$\sigma = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|\vec{E}_s|^2}{|\vec{E}_i|^2} \quad \text{Équation 2}$$

$\vec{E}_i$ est le champ électrique de l'onde électromagnétique incidente, $\vec{E}_s$ est le champ électrique de l'onde réfléchie.

La SER de l'objet dépend alors de plusieurs paramètres liés :

- aux caractéristiques géométriques de l'objet,
- à la position de l'émetteur par rapport à la cible,
- à la position du récepteur par rapport à la cible,
- aux matériaux composant l'objet,
- à l'orientation angulaire de l'objet par rapport à l'émetteur et au récepteur,
- de la polarisation à l'émission et à la réception,
- de la fréquence porteuse du système imageur.

La SER est donc le rapport entre l'énergie reflétée dans la direction du radar par une cible et celle d'une sphère lisse de 1 m² émettant de manière égale dans toutes les directions.

c) Distance maximale de détection

Après mise en forme nous pouvons exprimer la distance R sous la forme suivante:

$$R = \sqrt[4]{\frac{P_S * G^2 * \lambda^2 * \sigma}{P_E * 4\pi^3}} \quad \text{Équation 3}$$

Tous les paramètres qui influencent la propagation de l'onde émise par le radar ont été pris en compte dans cette équation théorique. Cependant, avant qu'elle soit réellement utilisable dans la pratique, par exemple pour déterminer l'efficacité d'un radar, il convient d'y apporter d'autres précisions. Pour un radar donné, la plupart des grandeurs (P_S , G , λ) peuvent être considérées comme des constantes puisqu'elles ne varient que dans des fourchettes très étroites. D'autre part, la surface équivalente radar variant énormément dans le temps, pour des raisons pratiques nous la poserons égale à 1 m². Soit P_{Emin} la puissance minimum du signal autorisant sa détection par le radar. Tout signal de puissance inférieure ne peut être exploité puisqu'il est noyé dans le bruit du récepteur. Ce signal de puissance minimum P_{Emin} est donc celui qui permet au radar d'atteindre sa portée maximum de détection R_{max} comme indiqué par l'équation (10) ci-dessus.

$$R_{max} = \sqrt[4]{\frac{P_S * G^2 * \lambda^2 * \sigma}{P_{Emin} * 4\pi^3}}$$

Les tubes n'ont pas tous exactement les mêmes qualités. Les tolérances limites acceptées lors de la production peuvent générer, d'un tube à l'autre, des variations de la puissance attendue, et donc de la portée théorique. Cette équation permet notamment de visualiser rapidement l'influence des caractéristiques d'un système radar sur sa portée de détection:

- Le gain d'antenne (G) et la longueur d'onde, la même antenne est utilisée à l'émission et à la réception, sont au carré sous une racine quatrième ce qui veut dire que la portée maximale est directement proportionnelle à la racine carrée de ces deux paramètres. En pratique, les antennes plus grandes nécessitent de plus longs câblages, les pertes le long de ces lignes et celles dues à l'utilisation d'une nouvelle antenne imparfaitement ajustée au système original privent jusqu'à la moitié de l'amélioration attendue.
- Une diminution de la puissance minimum détectable (P_{Emin}) par le récepteur se traduit par un allongement de la portée maximum du radar. Pour chaque récepteur il existe un niveau de puissance minimum à partir duquel il peut détecter un signal. Cette puissance minimum à partir de laquelle le récepteur peut fonctionner est appelée Signal Minimum Détectable (SMD).
- Les deux paramètres antérieurs sont des constantes pour un radar donné. Leur influence peut être calculé une fois pour toute. Par contre, la portée maximale dépend directement d'un variable changeante, soit la surface équivalente radar σ de la cible. Celle-ci peut varier grandement selon les dimensions de la cible et l'angle de vue par rapport au radar. Donc un radar a un R_{max} pour chaque type de cibles ou inversement, on peut calculer le σ minimal pour un R_{max} .

d) Pertes

Lors de l'élaboration de l'équation du radar, nous avons considéré des conditions de propagations idéales, libres de toute perturbation. Cependant, dans la pratique, la propagation est affectée par de nombreuses pertes qui peuvent considérablement réduire l'efficacité du radar.

$$R_{max} = \sqrt[4]{\frac{P_s G^2 \lambda^2 \sigma}{P_{Emin} (4\pi)^3 L_{total}}} \quad \text{Équation 4}$$

Ce facteur L regroupe les pertes suivantes:

L_D = atténuations internes dans les circuits à de l'émetteur et du récepteur

L_f = pertes dues aux fluctuations de la surface équivalente

L_{Atm} = pertes atmosphériques lors de la propagation de l'onde électromagnétique en direction de la cible (et sur le trajet retour).

e) Influence du sol

Une forme plus complète (mais moins couramment utilisée) de l'équation du radar prend en compte des paramètres supplémentaires, comme l'influence des réflexions sur le sol, mais néglige la sensibilité du récepteur et les absorptions atmosphériques.

iv. Résolution

La résolution d'un radar est sa capacité de distinguer deux cibles très proches l'une de l'autre, en azimut ou en distance. Les radars de contrôle d'armes, qui demandent une grande précision, doivent être capables de distinguer des cibles espacées de quelques mètres. Résolution et précision ne doivent pas être confondues. La précision est le degré de correspondance entre la position et la vitesse de la cible mesurée par le radar à un instant t et la position et la vitesse réelle de cette même cible au même instant. Les radars de veille, généralement moins précis, ne peuvent faire de distinction qu'entre des cibles espacées de quelques centaines, voire même milliers, de mètres. Les radars météorologiques ne repèrent pas des cibles individuelles mais plutôt obtiennent le retour de toutes les précipitations dans un volume sondé ce qui donne une moyenne des intensités dans ce volume. La résolution est traditionnellement divisée en deux parties: la résolution en distance et la résolution angulaire (en azimut).

a) Cellule de résolution

Les résolutions en distance et en azimut conduisent à la notion de cellule de résolution (figure 15). Le sens de cette cellule est très clair: à moins qu'il soit possible d'exploiter un éventuel effet Doppler, il est impossible de distinguer (l'une de l'autre) deux cibles se trouvant à l'intérieur d'une même cellule de résolution. On considère généralement que le volume de l'impulsion est fixé par l'angle d'ouverture ν et par la résolution en distance ΔR correspondant à Δt de la longueur de l'impulsion τ . Donc $\Delta R = c\tau/2$. (C'est à dire la durée du signal à la sortie des circuits de compression d'impulsion, tel qu'il a été obtenu par modulation interne). Plus le spectre de l'impulsion émise est large et l'angle d'ouverture étroit, plus la cellule de résolution est petite et plus l'équipement radar est protégé des interférences.

À partir des caractéristiques du signal reçu, il est possible de déterminer les résolutions du système radar. La résolution correspond à la distance minimale entre deux réflecteurs à partir de laquelle il est possible de les discriminer sur une image radar. On définit deux résolutions : la résolution en distance, δ_{rg} , et la résolution en azimut δ_{az} . Le principe de la résolution en

distance et en azimut est décrit sur la figure 7. La résolution en azimut est directement liée aux caractéristiques géométriques de prise de vue et de l'antenne :

b) Résolution en azimut

La résolution en azimut rapportée à une distance entre deux cibles peut être calculée par la formule suivante :

$$\delta_{az} = \frac{\lambda_c R}{D} \text{ Équation 5}$$

Où R est la distance radar-cible, D est la dimension en azimut de l'antenne et λ_c la longueur d'onde associée à la fréquence porteuse

c) Résolution en distance

La résolution en distance est la capacité d'un système radar à distinguer deux ou plusieurs cibles situées dans la même direction mais à des distances différentes.

Dans le cas de la résolution en distance, l'équation donnant la distance minimale δ_{rg} pour détecter deux réflecteurs est décrite avec :

$$\delta_{rg} = \frac{c * t}{2} \text{ Équation 6}$$

Où t est le temps d'impulsion.

B. GENERALITE SUR LE SYSTEME RADAR

Un système radar est un système électronique qui émet et reçoit des ondes électromagnétiques. Les ondes incidentes sont émises vers une région d'intérêt. Les éléments constituant la région d'intérêt présentent un comportement diélectrique face aux ondes électromagnétiques incidentes et rétrodiffusent les ondes incidentes en fonction de leurs caractéristiques diélectriques. Ces ondes réfléchies sont alors reçues et détectées par le système radar. Afin de récupérer les informations sur les objets de la région d'intérêt, ces ondes électromagnétiques reçues par l'antenne sont alors traitées par des méthodes de traitement du signal.

Le résultat du traitement des ondes électromagnétiques par ces méthodes dépend de plusieurs caractéristiques :

- La longueur d'onde λ_c des signaux émis et qui influence les phénomènes physiques observés,

- La forme d'onde utilisée qui va avoir une incidence sur le rapport signal sur bruit ainsi que sur la performance générale du système radar,
- Le mode d'acquisition qui définit les méthodes d'imagerie possibles ainsi que la précision des images produites,
- L'interaction des ondes incidentes avec la cible.

1. Interaction entre l'onde EM et la scène radar

L'interaction entre une onde électromagnétique émise par un radar et un objet est schématisée sur la figure 1. Une partie de l'onde électromagnétique est absorbée par la cible. Le reste de ce rayon incident est rétrodiffusé par l'objet comme une nouvelle onde électromagnétique ayant des caractéristiques différentes (amplitude, phase). Dans le cas général décrit par la figure 1, où on considère que l'objet se trouve suffisamment loin de la source pour considérer l'approximation en champ lointain, la conséquence de l'interaction de l'onde électromagnétique avec l'objet est décrite par l'équation radar (1) qui décrit la puissance P_r reçue par le radar.

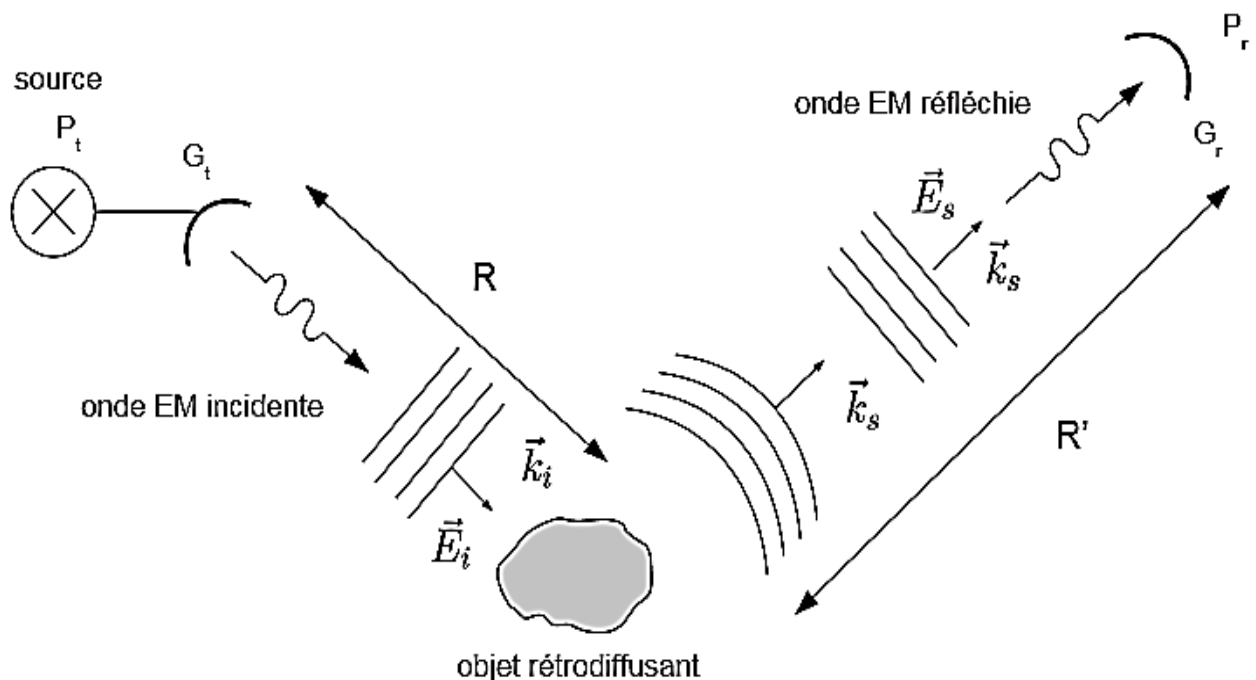


Figure 2: interaction de l'onde électromagnétique et la scène radar

Les mesures effectuées par le radar sont représentées par une amplitude et une phase à cause de la propriété de l'onde électromagnétique. L'amplitude est liée à qualité de la cible par exemple l'énergie rétrodiffusée entre un avion et un oiseau ne sont pas les mêmes. La phase est

liée à des distance de propagation entre l'antenne et les différentes cibles dans un pixel est qui est très importante dans les domaines de polarimétrie et interférométrie qu'on verra dans la suite.

2. Fréquence de la porteuse de l'onde électromagnétique

La bande couverte par les systèmes radar est limitée. En effet, les radars conventionnels fonctionnent sur une bande spectrale allant de 3 MHz à 300 GHz. Cette largeur spectrale est découpée en bandes de fréquences désignées par une lettre comme indiqué sur la figure 2. Les longueurs d'onde, λ , associées vont alors de 100 mètres à 1 millimètre. La longueur d'onde est définie à l'aide de la fréquence de la porteuse f par $\lambda = c/f$ avec c la célérité de l'onde dans le vide. Si on considère les systèmes de télédétection, les bandes radars les plus utilisées sont:

- la bande L pour des systèmes satellitaires telles que le satellite JERS-1 ou le satellite SEASAT,
- la bande C pour des systèmes aéroportés, ou satellitaires, avec les satellites RADARSAT-1 & 2, ERS-1 & 2, Sentinel 1A et 2B
- la bande X pour des systèmes aéroportés avec les capteurs STAR-1 & 2 et des systèmes satellitaires, avec le satellite TerraSAR-X, Cosmo Skymed.

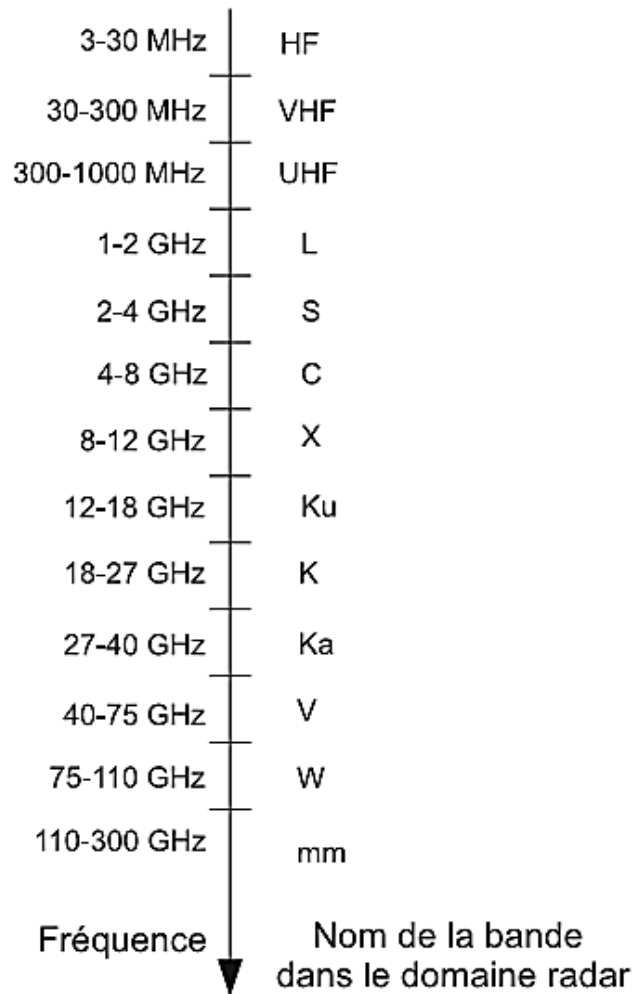


Figure 3 : répartitions des fréquences radar

3. Modes d'acquisition pour les radars

Les systèmes radar possèdent différentes modes d'acquisitions possibles selon les besoins d'utilisations. Les différentes modes d'acquisitions sont :

- Mode stripmap : dans ce mode d'acquisition l'antenne pointe dans une direction fixe, durant toute la durée de l'acquisition et le porteur se déplace suivant la direction azimutale, comme montré sur la figure 4. Ce mode d'acquisition permet de générer une image de la zone éclairée (région d'intérêt) par le radar pendant la durée de l'acquisition ;
- Mode scanSAR : ce mode d'acquisition est une variante du mode stripmap. Lors du déplacement de l'antenne dans la direction azimutale, le radar effectue un balayage dans le domaine distance, comme indiqué sur la figure 5. Ce mode d'acquisition permet d'avoir une largeur de fauchée supérieure à celle proposée avec le mode stripmap ;

- 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, comme montrée sur la figure 6.
- 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 ;
- 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.

Dans notre étude, on va utiliser le mode interférométrique qui est le mode d'acquisition de Sentinel 1A.

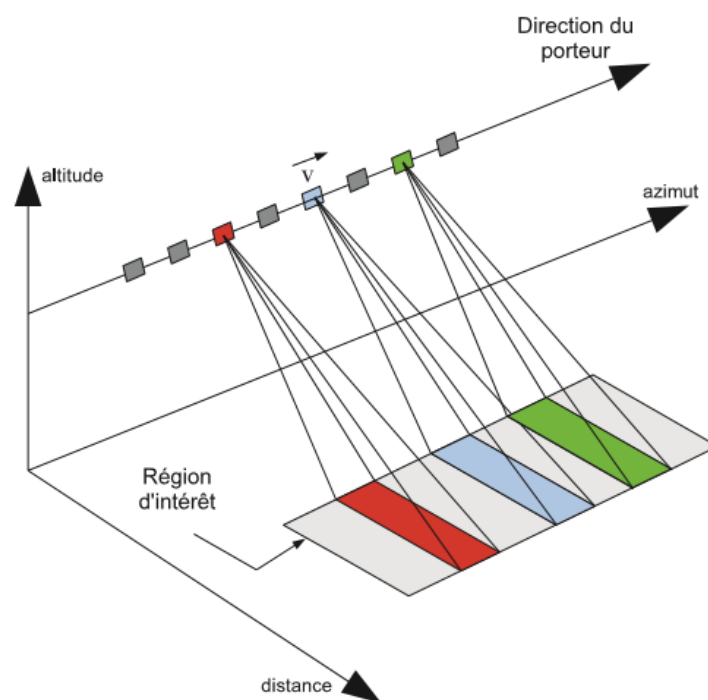


Figure 4 : Configuration de l'image radar en mode stripmap

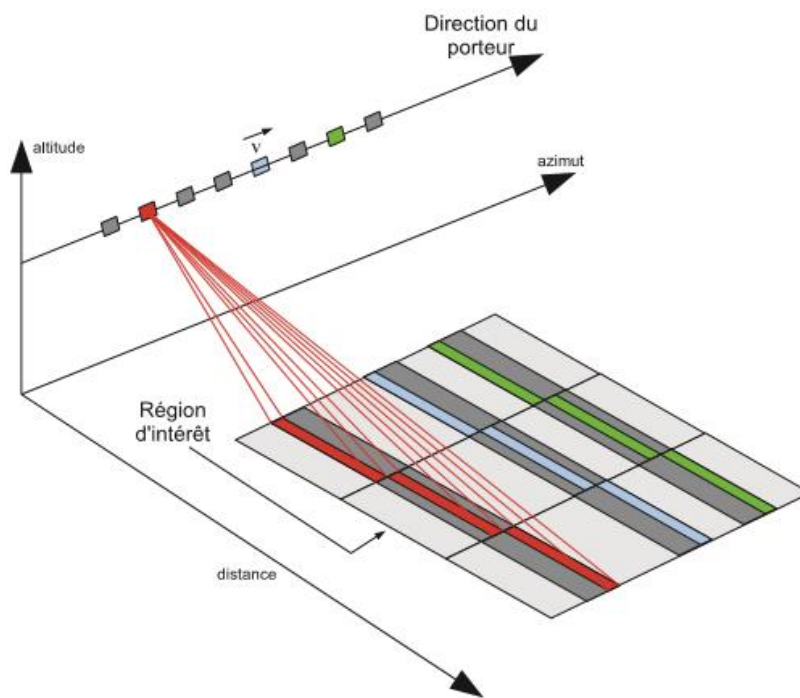


Figure 5: Configuration de l'image radar en mode ScanSAR

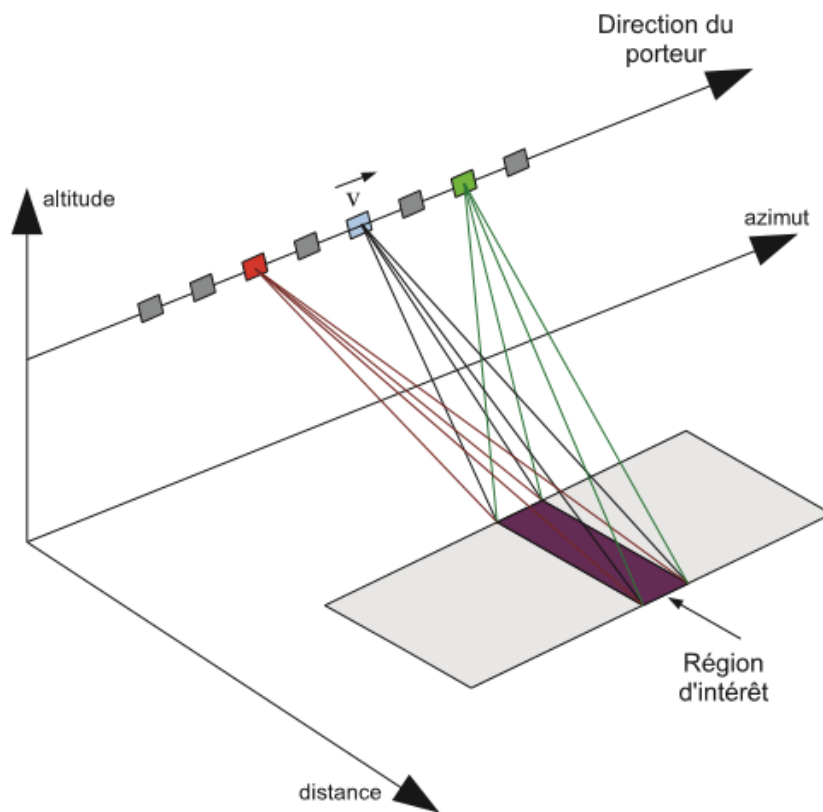


Figure 6: Configuration de l'image radar en mode Spotlight

C. PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT DES RADAR

Le Radar est une technique de mesure par rétrodiffusion en utilisant des ondes électromagnétiques émises par une antenne et reçues généralement par la même antenne pour un radar monostatique.

Le système, en plus d'un récepteur, comprend un émetteur de rayonnement. Ceci présente le grand intérêt de maîtriser la source de rayonnement et ainsi de pouvoir paramétrer la source du signal (longueur d'onde, polarité, instant, durée et type de l'impulsion, angle d'incidence...). La connaissance de l'instant d'émission d'un signal (typiquement, une brève impulsion) et de l'instant de réception du signal rétrodiffusé par un objet est possible. On peut donc mesurer le temps d'aller-retour de l'onde entre le radar et l'objet et en déduire la distance radar-objet, connaissant la vitesse de l'onde. En réponse à une même impulsion émise par le radar, des objets, situés à des distances différentes du radar, renverront des signaux décalés dans le temps. En mesurant, au cours du temps, les signaux rétrodiffusés par ces objets, le radar permet de différencier les objets en fonction de leur distance au radar. Le radar peut émettre des ondes cohérentes, dans un domaine de fréquence tel qu'elles ne sont pas arrêtées par les nuages. En retour, non seulement l'amplitude mais aussi la phase de ces ondes cohérentes peut être mesurées.

1. Nature de la mesure en rétrodiffusion

Il s'agit d'onde électromagnétique cohérente et polarisée pour la détection des cibles et classification en distance latérale (ranging). La cohérence est une propriété importante des ondes émises par le radar cette cohérence signifie qu'il y a une stabilité en phase qui permet de comparer l'onde retour et l'onde émises et en déduire le temps de parcours puis une distance. La mesure en rétrodiffusion dépend des caractéristiques de l'onde et des surfaces imagées (pente, rugosité, effet de relief...). La rugosité qui influence fortement la quantité d'énergie rétrodiffuse et la direction de vissée. Les mesures effectuées par le radar sont représentées par une amplitude et une phase.

D. LE RADAR A OUVERTURE SYNTHETIQUE ou SAR

1. Introduction

Le radar SAR se classifie dans le type du radar imageur. Ce type de système basé sur le principe radar est complémentaire aux systèmes imageurs basés sur des capteurs optiques ainsi que des mesures interférométriques.

La technique du radar à ouverture synthétique (SAR pour Synthetic Aperture Radar) est une technique dite à haute résolution. En effet, cette technique permet d'obtenir des résolutions en distances et en azimuth de l'image radar. Cette méthode est basée sur la double focalisation en distance et en azimuth. La haute résolution en distance est obtenue grâce à l'utilisation des propriétés des signaux émis. La haute résolution en azimuth est liée à la combinaison des différents signaux reçus à différents instants.

2. Principe de l'antenne synthétique

L'intérêt de l'ouverture synthétique est d'obtenir une bonne résolution en azimuth à partir d'une antenne de petite longueur. De manière plus générale, le but est d'obtenir des résolutions très fines avec des antennes dont les dimensions sont restreintes. Le principe de l'antenne synthétique est basé sur le déplacement de l'antenne d'émission entre les différentes acquisitions.

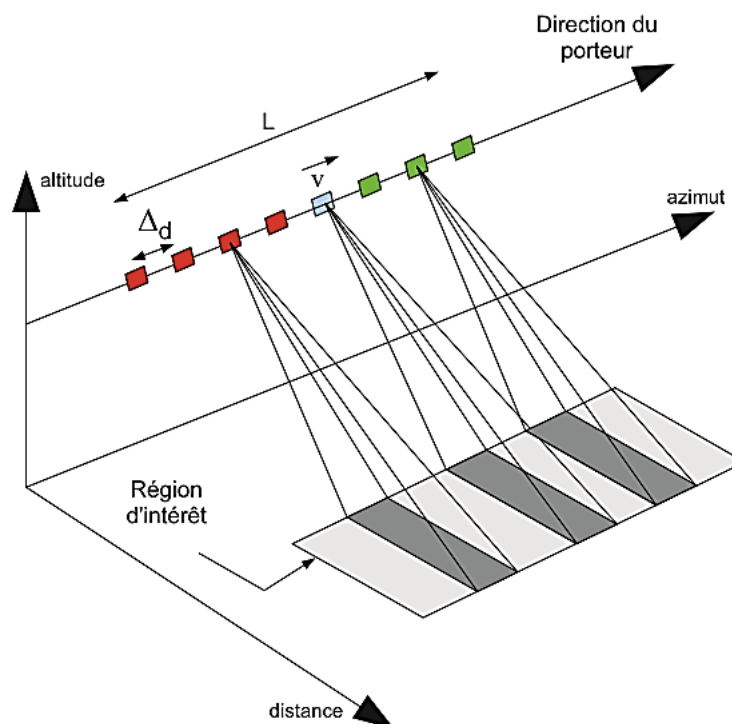


Figure 7: configuration géométrique dans l'axe de l'azimut

Sur la figure 6, l'antenne d'émission se déplace d'une distance totale L , suivant l'axe azimuthal, par rapport à la région d'intérêt. 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-récepteur-récepteur" pour chaque position de l'antenne d'émission.

3. La géométrie

On considère la configuration géométrique du radar SAR sur la figure 7. La géométrie liée à l'antenne radar est décrite par les angles d'ouverture en élévation β_e et en azimuth β_{az} . Ces angles déterminent l'empreinte au sol de notre radar. L'angle β_e détermine la largeur de fauchée W_s du radar en distance et l'angle β_{az} détermine la largeur de fauchée azimuthale W_{az} . Les largeurs de fauchée en distance et en azimuth déterminent les distances maximales d'observation de notre radar dans ces deux dimensions. Le réflecteur n est situé au sol aux coordonnées $(x_{sol,n}, y_{sol,n})$ dans l'espace distance-azimut. Lors du processus d'imagerie radar, la cible est imagée suivant l'axe de visée (slant), décrit sur la figure 8. L'image du réflecteur n situé sur le sol, point rouge sur l'image, est alors projetée sur cet axe de visée et est repérée avec les coordonnées (x_n, y_n) dans l'espace slant-azimut, point vert sur l'image.

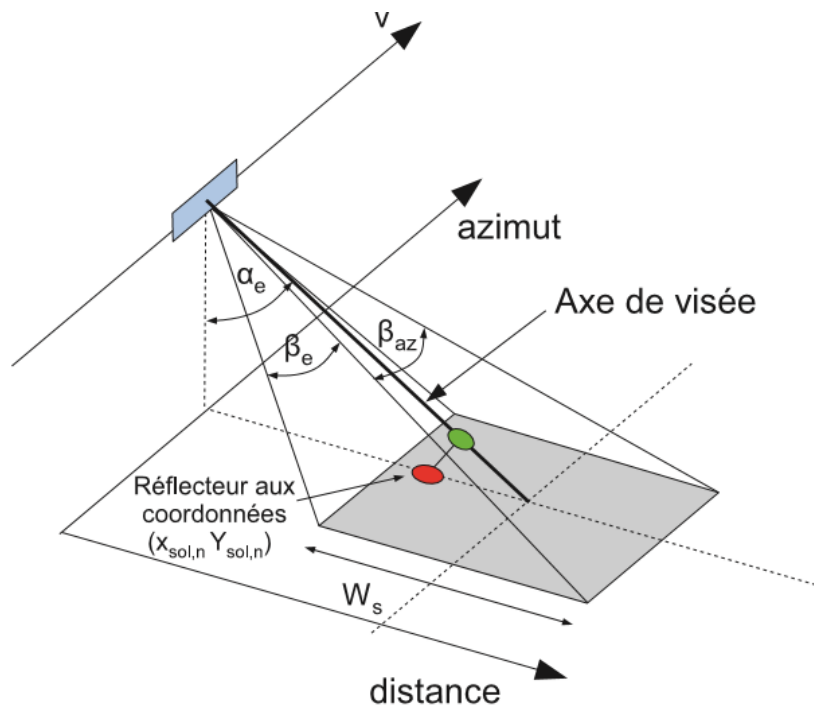


Figure 8: configuration géométrique du radar SAR

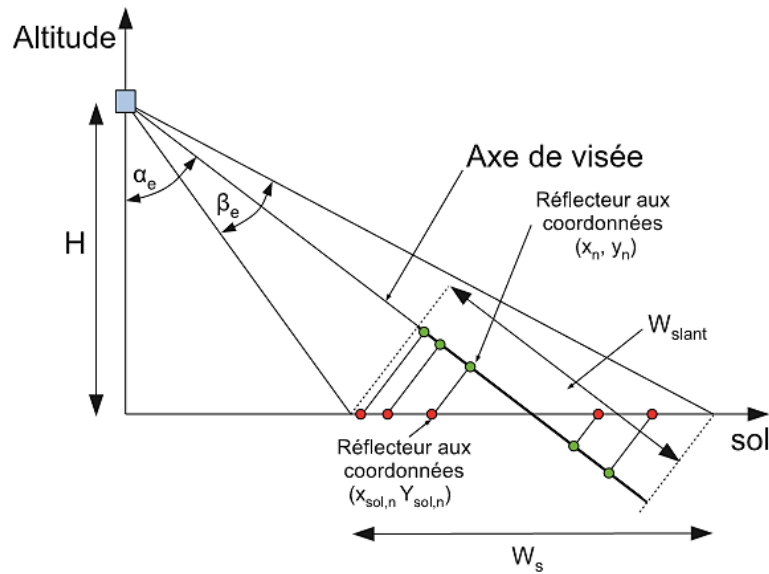


Figure 9: Configuration géométrique du radar SAR dans le plan distance

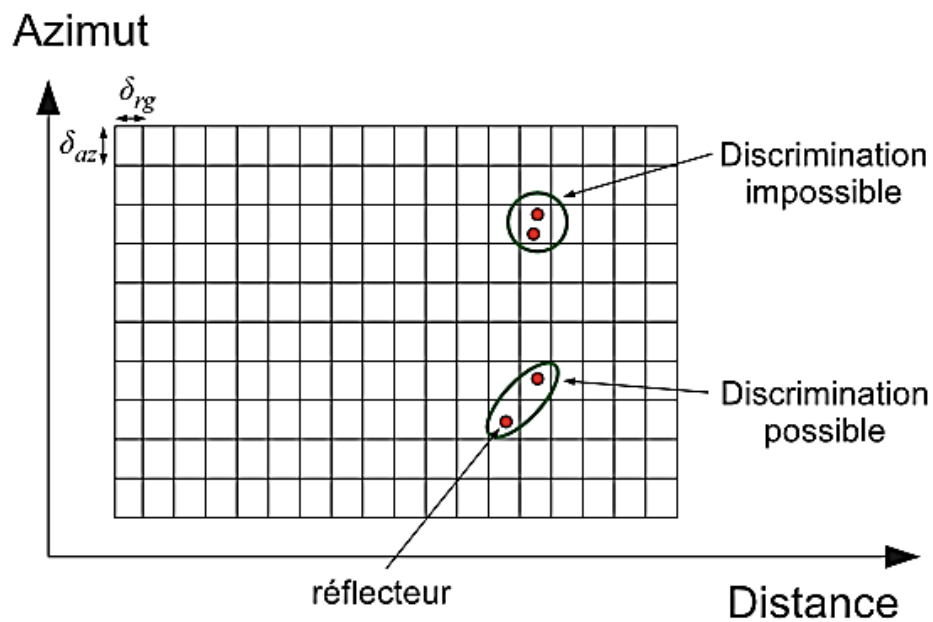


Figure 10: Résolution d'un radar

i. Distorsions géométrique des images radar

Dans le cas du radar, le paramètre important pour l'ordonnancement des pixels est la distance. Pour pouvoir distinguer deux objets équivalents l'un de l'autre il faut que la différence de distance radar-objet soit supérieure à un certain seuil qui caractérise la résolution (en distance) de l'instrument.

Si la visée du radar est latérale, comme c'est le cas dans les images SAR, les géométries des deux types d'images peuvent se rapprocher à la condition que le terrain présente peu de relief.

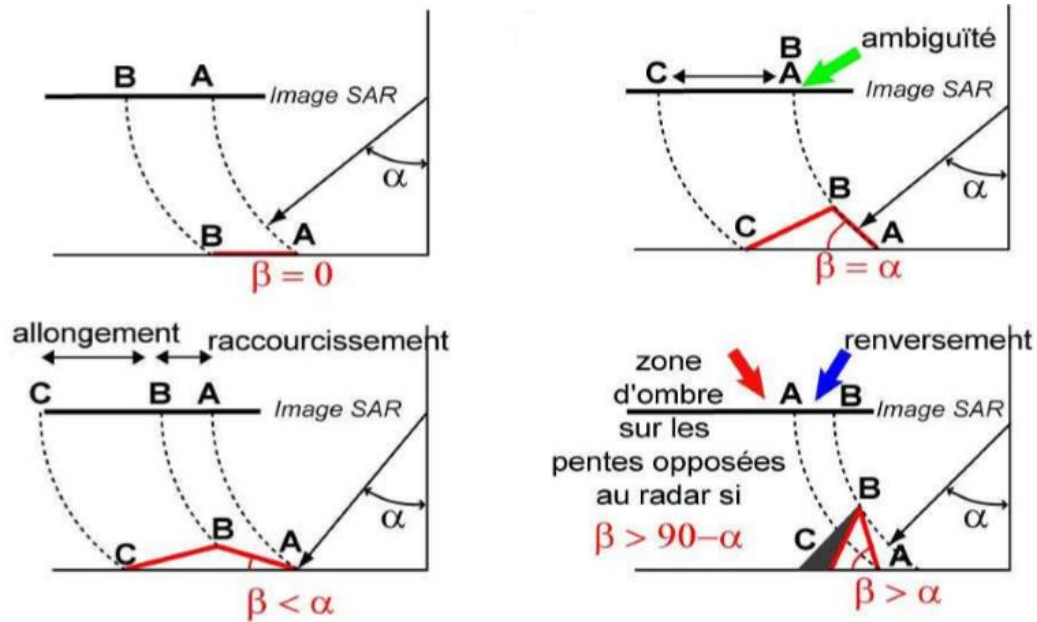


Figure 11 : distorsion géométriques d'une image radar

Pour un sol plat c'est-à-dire présente peu de relief, la surface du pixel est :

$$S_{pixel} = \frac{Rr}{\sin i} * \frac{l}{2} \quad \text{Équation 7}$$

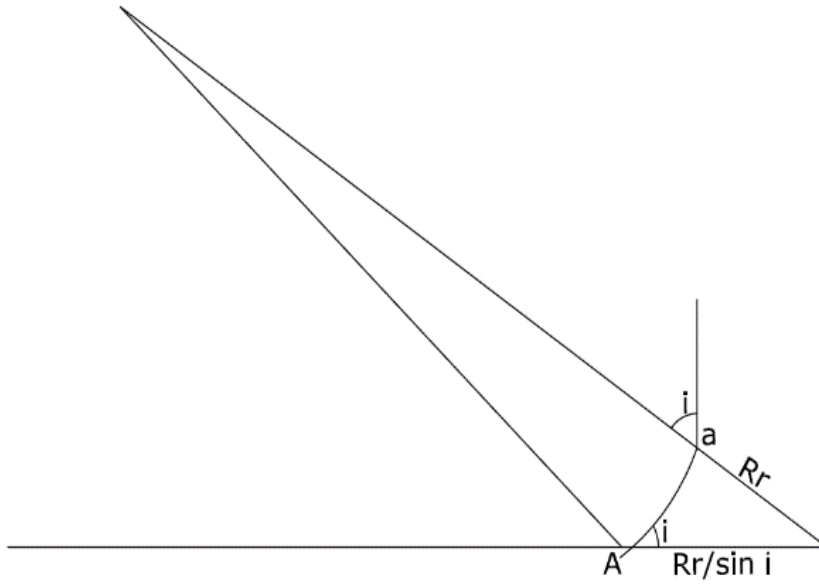


Figure 12: Surface d'un pixel pour un sol plat

S'il y a une pente p la surface sera $S_{pixel} = \frac{Rr}{\sin(i-p)} * \frac{l}{2}$ si on compacte

$$S_{pixel} = S_{plat} * \frac{\sin i}{\sin(i-p)} \quad \text{Équation 8}$$

On en déduit que si la surface de pixel augmente le nombre de pixel dans l'image diminue pour une même zone alors on voit un phénomène de compression.

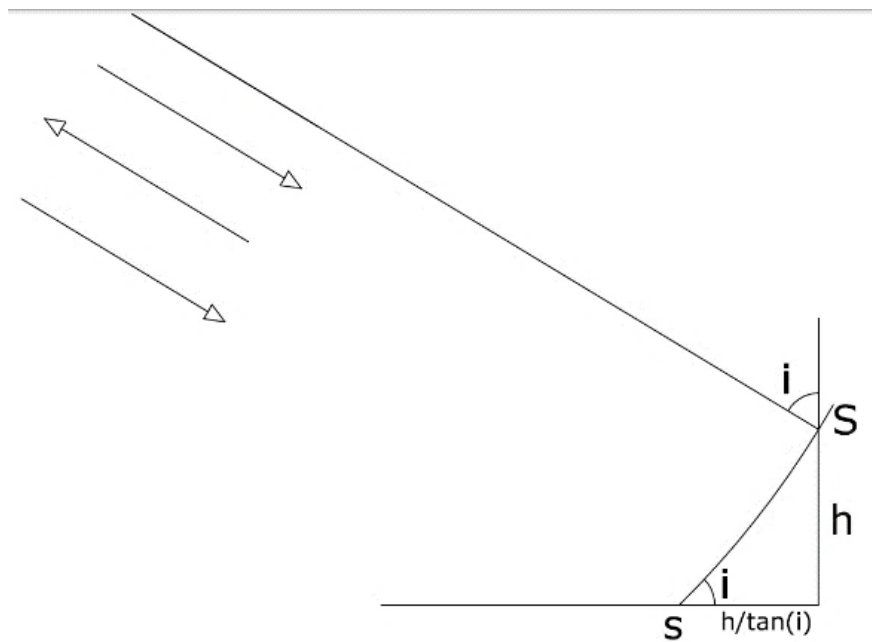


Figure 13: surface d'un pixel pour un sol avec une pente

Déplacement d'un point en altitude

On aura un déplacement $h/\tan(i)$

- Si $p > i$ renversement de relief = repliement
- Si $p' > \frac{\pi}{2} - i$ on aura une ombre.

Le relief du terrain observé a une influence sur la géométrie de l'image obtenue par le radar. Puisque de l'angle d'incidence est suffisamment oblique, la partie élevée d'un objet est plus proche du capteur que sa base ce qui implique que sa réponse sera reçue avant la base. On peut en retenir que la taille d'une cellule de résolution d'une image SAR est très dépendante de la pente du sol illuminé. Dans certains cas limites, un même pixel peut correspondre à la réponse de zones non contiguës de la surface (effet de renversement ou "lay-over"), ou encore une zone d'ombre radar peut apparaître dans l'image (figure 10).

4. Les imageries SAR

i. L'acquisition des données brutes

Au cours du déplacement du satellite, l'antenne du radar émet régulièrement de brèves impulsions qui illuminent le sol. La surface ainsi éclairée, renvoie vers le satellite une partie du rayonnement émis. En retour à l'antenne, ce rayonnement rétrodiffusé est mesuré (phase et amplitude) par le radar.

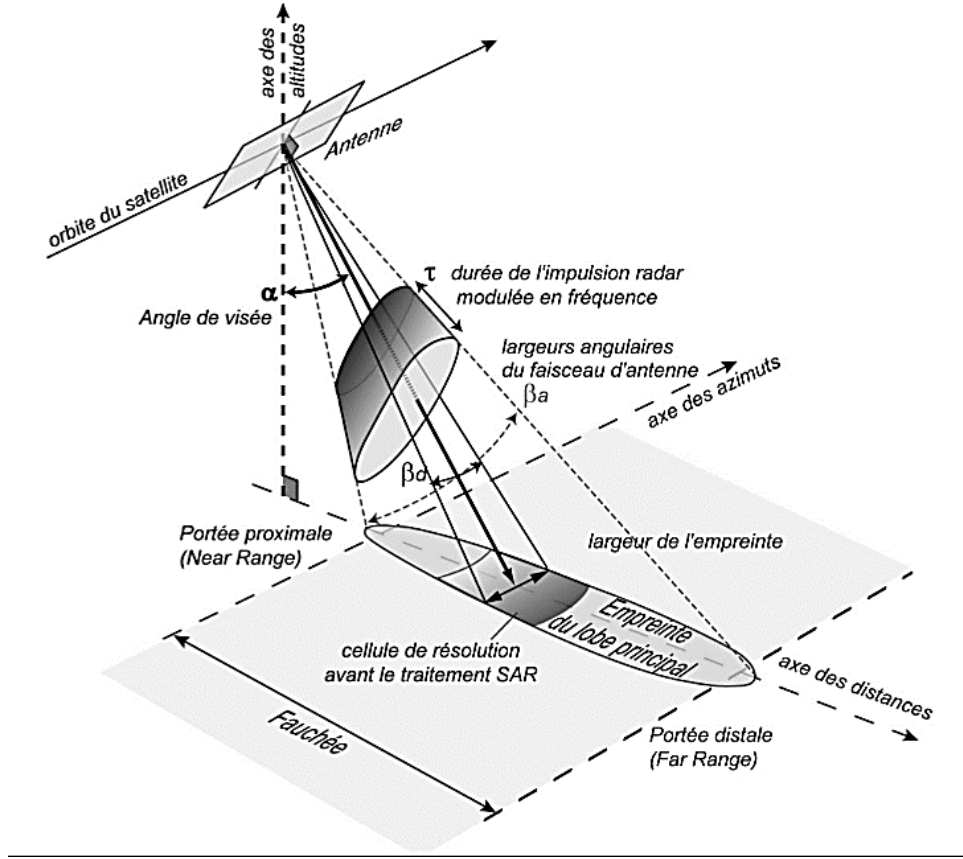


Figure 14: Acquisition des images SAR

La taille et la forme de l'empreinte dépendent des caractéristiques de l'antenne et notamment de ses dimensions. Plus l'antenne est grande et plus le faisceau est fin (ce qui correspond à des angles β_a et β_d petits sur la Figure 15). La largeur de l'empreinte au sol L_e , à une distance D est [Hanssen 2001, p. 26] :

$$L_e = \frac{\lambda}{L_a} D \quad \text{Équation 9}$$

Avec λ la longueur d'onde utilisée, et L_a la largeur de l'antenne. Cette largeur définit la résolution en azimuth R_a du radar avant le traitement SAR. En effet, le radar ne peut faire la distinction entre les différents points de l'empreinte situés à une même distance du radar.

En distance, la résolution suivant la direction de visée R_d est donnée par :

$$R_d = \frac{c\tau}{2} \quad \text{Équation 10}$$

Avec τ la durée de l'impulsion, et c la vitesse de la lumière.

La taille de la cellule de résolution au sol, dépendant de l'angle d'incidence θ (figure 13) est déterminée par:

$$R_d = \frac{c\tau}{2 \sin \theta} \text{ Équation 11}$$

ii. Les images SAR

L'une des caractéristiques des images SAR est que grâce à l'onde cohérentes non seulement l'amplitude est mesurée mais aussi la phase. L'information portée par l'amplitude représente la capacité du sol à rétrodiffuser l'onde radar de façon plus ou moins forte. La phase, information supplémentaire disponible et nécessaire en imagerie SAR, est plus délicate à interpréter. La phase dépend de nombreux facteurs de natures différentes : le trajet-aller-retour de l'onde, l'atmosphère traversée, mais aussi la disposition relative des objets constituant la cellule de résolution et leurs propriétés physiques. Cependant, la phase est une information potentiellement très riche qui est exploitée par l'interférométrie radar en combinant l'information de phase de deux images.

Des informations sur la distance entre le radar et une cellule de résolution au sol sont donc accessibles par deux paramètres disponibles en imagerie SAR. Tout d'abord, la position du pixel dans l'image SAR est directement liée à la distance entre le radar et la cellule de résolution correspondante. Typiquement, la précision sur la distance fournie par ce paramètre est de l'ordre de plusieurs mètres. Le deuxième type d'information est la mesure de la phase associée au pixel. Celle-ci contient intrinsèquement une mesure très précise (de l'ordre de quelques millimètres) sur la distance radar-cellule de résolution, mais il s'agit d'une mesure ambiguë et beaucoup plus délicate à utiliser. L'interférométrie radar se sert de ces deux types d'information pour mesurer les déplacements du sol. La grande sensibilité au déplacement de l'interférométrie radar est ainsi rendue possible par le fait que le radar est conceptuellement un instrument de mesure de distance.

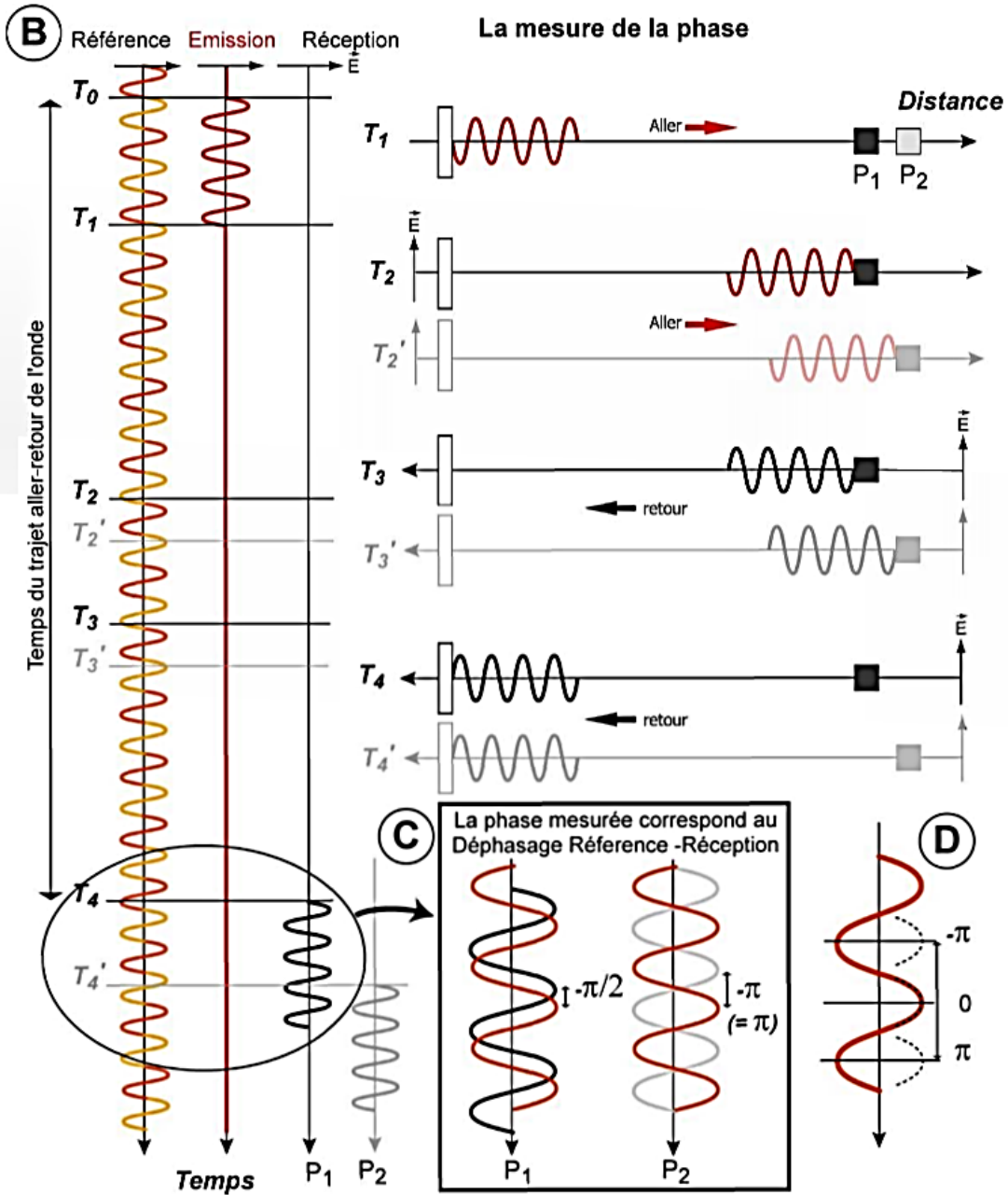
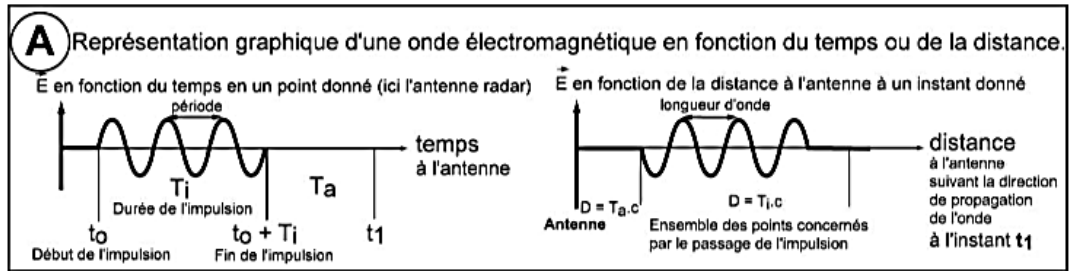


Figure 15: mesure de la phase par le radar

5. Le traitement SAR

Nous avons vu dans le premier chapitre que chaque "pixel" de donnée brute correspondait à une cellule de résolution de plusieurs kilomètres carrés. Le traitement SAR va permettre d'obtenir une résolution métrique. Si l'on se place du point de vue d'un objet précis au sol, la réponse de cet objet est contenue dans plusieurs centaines de pixels de données brutes (voir Figure 15). En chaque pixel, elle est mélangée avec les réponses de tous les autres objets de la cellule de résolution correspondante.

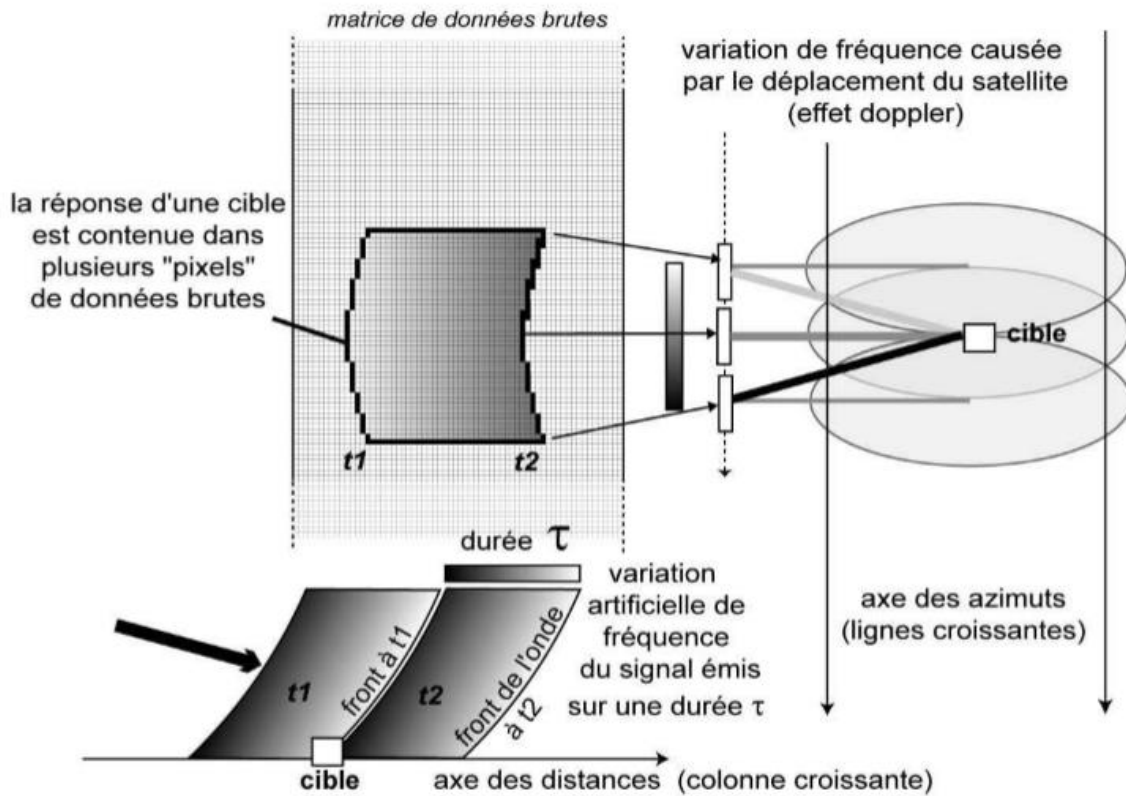


Figure 16: réponses d'une cible ponctuelle

L'extraction de la réponse d'une cellule de résolution SAR se fait en deux étapes. Ces étapes sont appelées synthèse ou focalisation. La compression en distance permet d'obtenir une résolution R_{dsar} suivant la direction de visée, telle que :

$$R_{dsar} = \frac{c}{2B} \quad \text{Équation 12}$$

En azimut, l'amélioration de la résolution est obtenue grâce à la modulation de fréquence de l'onde radar créée par le déplacement du satellite par rapport au sol. La résolution en azimut après focalisation, $R_a sar$, devient alors égale à la moitié de la longueur de l'antenne L_a :

$$R_{asar} = \frac{L_a}{2} \quad \text{Équation 13}$$

Dans le traitement SAR, le choix de certains paramètres permet d'obtenir des images SAR légèrement différentes, à partir de mêmes données brutes.

6. Caractéristiques du contenu de l'image SAR complexe

Nous avons évoqué précédemment les caractéristiques géométriques de l'image qui ont déjà été évoqué précédemment : l'effet de la visée latérale sur la géométrie de l'image, la résolution de l'image SAR, le choix de la visée de restitution et ses conséquences. Ici on s'intéresse à la mesure complexe, c'est-à-dire à l'amplitude et à la phase contenues dans chaque pixel de l'image SAR. L'étude de la mesure d'une cible élémentaire permettra d'introduire le cas, plus délicat, de la mesure d'une cellule de résolution effectivement contenue dans le pixel. Nous insisterons plus particulièrement sur la phase qui a un rôle primordial en interférométrie radar.

i. La mesure complexe d'une cible élémentaire

Si on considère une cible élémentaire, l'amplitude de l'écho reçu dépend de l'amplitude du signal émis, de l'atténuation de l'onde dans l'atmosphère, et de la capacité de la cible à renvoyer le signal vers le radar. Cette capacité dépend évidemment des propriétés physiques de l'objet. Le constant diélectrique du matériau, sa teneur en eau, son état de surface, par exemple, joue un grand rôle dans la rétrodiffusion [Henderson et Lewis 1998].

La phase correspond au déphasage entre l'onde émise et l'onde reçue. Plusieurs facteurs contribuent à ce déphasage. En vue de l'utilisation de la phase en interférométrie, il est pratique de décomposer la phase de la phase suivante :

$$\varphi = \varphi^0 + 2k\pi \text{ avec } \varphi^0 \in [-\pi, \pi]$$

$$\varphi = \varphi_{geo} + \varphi_{atm} + \varphi_{obj} \quad \text{Équation 14}$$

φ^0 Correspond à la phase mesurée en radians. C'est une mesure du déphasage φ , mesure connue à un nombre entier de cycle près, c'est-à-dire modulo 2π (on dit qu'il y a ambiguïté de la phase mesurée). φ_{geo} , la phase géométrique, correspond au déphasage qui serait causé si l'onde suivait un trajet aller-retour rectiligne dans le vide suivant la direction de visée restituée et avec une réflexion sur la cible élémentaire qui ne modifierait pas la phase de l'onde. φ_{atm} , la phase atmosphérique, représente la phase qu'il faut ajouter au cas précédent en prenant en compte la propagation de l'onde dans l'atmosphère réelle. φ_{obj} , la phase objet, représente le

déphasage introduit par la réflexion sur la cible élémentaire (dépendant des propriétés de la cible). La phase géométrique est reliée à la distance radar-cible D par la relation suivante :

$$\varphi_{geo} = \frac{2D}{\lambda} \cdot 2\pi \quad \text{Équation 15}$$

L'ambiguïté de la phase est un point très important. Ainsi, si l'on ne prend en compte que φ_{geo} , l'ambiguïté fait que si la cible est située à la distance D ou à toute autre distance D' telle que :

$$D' = D + k \frac{\lambda}{2} \quad \text{Équation 16}$$

Où k est un nombre entier.

ii. La mesure complexe d'une cellule de résolution

A chaque pixel de l'image correspond une mesure complexe du signal rétrodiffusé par l'ensemble d'une cellule de résolution. Comme la longueur d'onde utilisée est petite devant la taille de la cellule de résolution, de nombreux diffuseurs (ou cibles) élémentaires contribuent à la réponse de la cellule.

La source du signal étant cohérente, il se produit des phénomènes d'interférences constructives ou destructives(A.1) entre les différents rais d'onde renvoyés vers le radar. La mesure correspond à la somme complexe de ces différentes réponses. Les mesures de phases et d'amplitudes sont quasiment imprédictibles car elles dépendent de très nombreux paramètres qui ne sont pas constants à l'intérieur de la cellule de résolution. Chaque cible élémentaire est à une distance différente du radar. Sur la figure 17, on voit la complexité de la possibilité de réflexion multiples et la diffusion volumique.

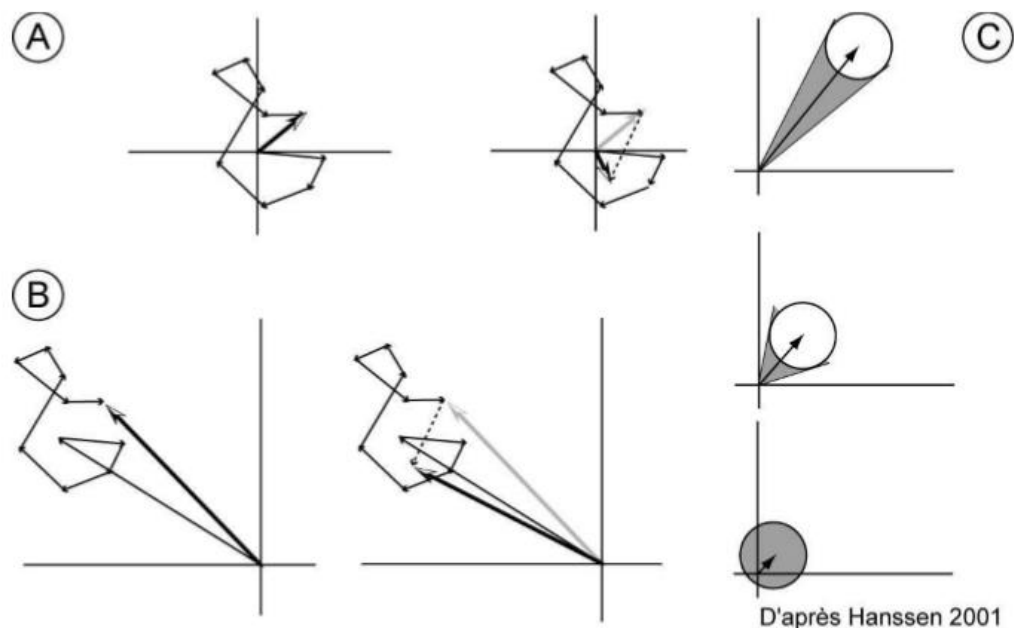


Figure 17 : construction de la réponse d'amplitude et phase d'une cellule de résolution

A – La réponse propre d'une cellule de résolution correspond à la somme des réponses élémentaires des objets contenus dans la cellule. L'ajout d'un objet (flèche en pointillé) peut considérablement modifier la phase et l'amplitude mesurée. B – Même configuration que dans A, mais cette fois il y a un objet qui domine dans la réponse. Dans ce cas, la réponse enregistrée dans le pixel sera moins sensible à l'ajout d'un objet. C – illustration du rôle de l'amplitude sur la variabilité de la phase pour une erreur donnée sur la mesure complexe (l'erreur est identique sur la composante réelle et imaginaire). Dans le cas du bas, où l'amplitude est trop faible, la phase perd toute signification. C, D'après Hanssen [2001, p. 51].

La phase qui contient l'information de distance entre le radar et la cible, est le paramètre fondamental pour la mesure de déplacement par Insar. L'amplitude joue un rôle très important car la variabilité de la phase est fonction de l'amplitude (figure 17). Ainsi, en interférométrie radar, on préfère travailler sur des données en représentation complexe. La phase et l'amplitude d'un pixel sont assez sensibles à des modifications même mineures du contenu de la cellule de résolution en fonction de la répartition et du type des cibles élémentaires (Figure 17). Ceci peut être nuancé suivant la répartition et le type des cibles élémentaires présentes. En effet, si la réponse d'une cible élémentaire domine les autres, alors l'amplitude et la phase du pixel seront beaucoup plus stables devant une petite modification du contenu de la cellule de résolution.

Pour l'amplitude, cette construction du signal, au niveau de la cellule de résolution, se traduit par la présence de chatoiement (I.3) sur l'image SAR (voir figure 18), couramment

appelé "speckle" d'après son équivalent anglais. Le speckle peut être considéré comme un bruit multiplicatif (c'est-à-dire d'autant plus fort que la réponse de la cellule est intense).

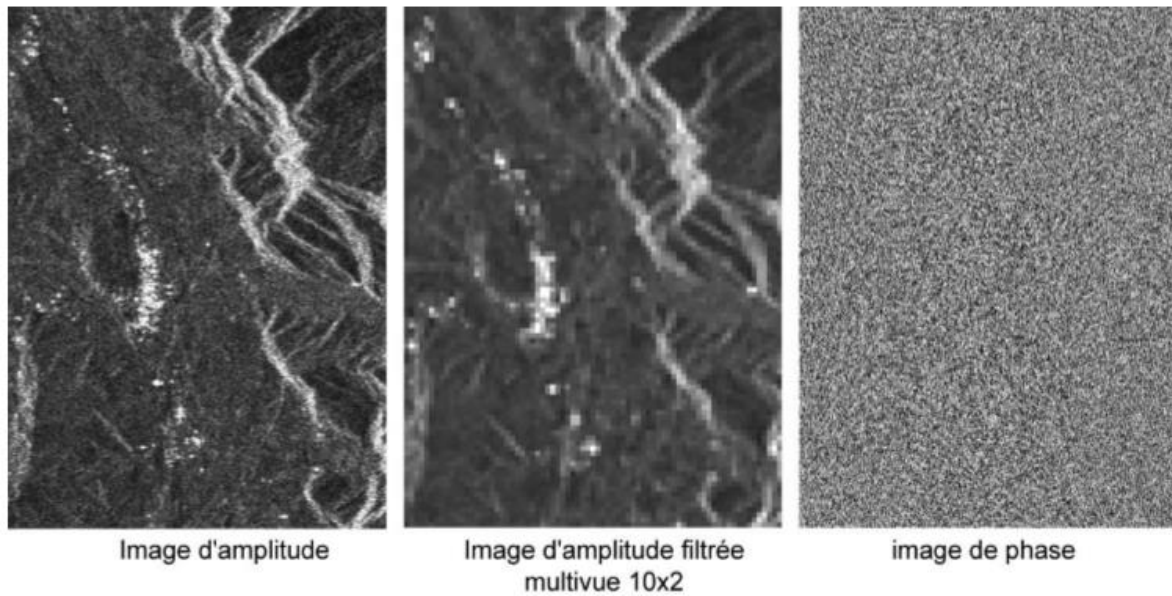


Figure 18: image d'amplitude et de phase

Pour réduire le bruit de speckle, le filtre le plus couramment utilisé est une moyenne spatiale de l'amplitude sur une fenêtre donnée de pixel, qui entraîne en contrepartie une perte de résolution (Figure 18). L'addition des amplitudes des différentes images permet de réduire le bruit, mais toujours au dégrade la résolution. L'image d'amplitude obtenue est appelée image d'amplitude multi vue.

La phase étant connue de façon ambiguë et résultante de facteur plus nombreux et moins homogènes que ceux contrôlant l'amplitude, l'image de phase seule n'est pas interprétable en termes d'information sur le milieu observé (figure 18). Pour une cellule de résolution, on peut effectuer une décomposition de la phase similaire à celle d'une cible élémentaire :

$$\varphi = \varphi_{geo} + \varphi_{atm} + \varphi_{cons} \quad \text{Équation 17}$$

Ici, φ_{geo} , la phase géométrique, est plus délicate à définir. Car, le trajet aller-retour de l'onde varie légèrement d'une cible à l'autre dans la cellule de résolution. φ_{atm} , la phase atmosphérique, représente toujours la phase qu'il faut ajouter au cas précédent en prenant en compte la propagation de l'onde dans l'atmosphère réelle. En pratique, celle-ci varie très peu d'une cible à l'autre de la cellule. φ_{cons} La phase de construction pixellaire, représente la phase à ajouter en prenant en compte tous les autres effets liés au contenu de la cellule de résolution.

Elle dépend de l'angle d'incidence de l'onde sur la cellule de résolution, qui est déterminé par la direction de visée d'acquisition choisie (et non par la direction de visée de restitution. Ainsi la phase dépend de l'orientation de l'instrument et de sa position au moment de l'acquisition, ce qui a des répercussions en interférométrie radar.

iii. Les Sources d'erreur

La phase des images SAR comporte une certaine incertitude liée à la mesure instrumentale mais aussi aux erreurs et approximations dues au traitement SAR [Just et Bamler 1994; Arnaud 1997].

Alors l'équation devient :

$$\varphi = \varphi_{geo} + \varphi_{atm} + \varphi_{cons} + \varphi_{err} \quad \text{Équation 18}$$

où φ_{err} est l'erreur faite sur la phase. Pour le satellite ERS, le bruit thermique lié à l'instrument crée une incertitude d'environ 12° soit $1/30$ e de cycle ou encore 1 mm si on interprète la phase en terme de distance [Hanssen 2001, p. 40].

Chapitre II. INTERFEROMETRIE.

Nous avons dans le chapitre précédent les bases d'un système radar et les caractéristiques d'une image SAR. On a vu que la réponse radar est composée d'une amplitude et de la phase. L'amplitude est porteuse d'information sur la distance. Tandis que la phase porte une information supplémentaire qui peut être lue par une technique qui est l'interférométrie.

Dans ce chapitre, on va analyser cette technique qui se base sur la mesure de la phase grâce à une onde cohérente. Alors premièrement, on va faire un rappel sur la notion d'interférence, ensuite le principe et limites de la mesure de déplacement par interférométrie radar enfin les sources d'erreur possibles.

A. NOTION D'INTERFERENCE.

1. Condition d'interférence.

Pour observer une interférence avec de la lumière, il faut que deux sources de lumière soit : de même longueur d'onde λ et cohérente.

2. Interférences lumineuses

Les phénomènes d'interférences résultent de la superposition de 2 ondes lumineuses. Mais le phénomène d'interférences ne peut se produire que si les conditions suivantes sont satisfaites : il faut que les ondes soient cohérentes, même fréquence.

Soit S une source ponctuelle monochromatique éclairant 2 fentes S1 et S2 proches l'une de l'autre, mais assez éloignées de S. S1 et S2 jouent le rôle de sources cohérentes, c'est à dire qu'elles sont dans le même état vibratoire. S1 et S2 diffractent la lumière. Dans la région de l'espace où les 2 faisceaux se superposent, on peut observer des franges d'interférences.

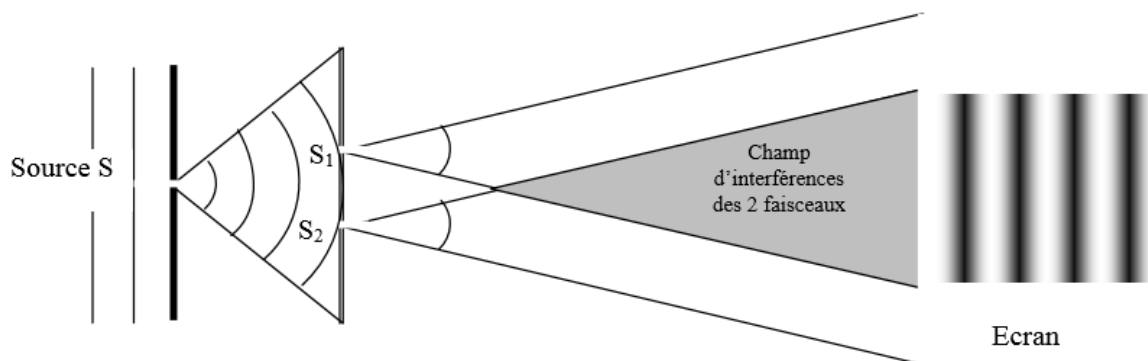


Figure 19: expérience d'Young

C'est cette propriété de l'onde électromagnétique qui sera utilisé dans le système radar. On verra un peu plus loin que la cohérence est importante pour les traitements SAR.

i. Interférences constructives et destructives.

Une frange est dite constructive lorsqu'on observe une frange brillante sur l'écran. Elle est dite destructive lorsqu'on observe des franges sombres.

B. PRINCIPES ET LIMITES DE LA MESURE DES DÉPLACEMENTS PAR INTERFEROMETRIE RADAR

Nous avons vu dans le chapitre II.A le phénomène physique exploité en interférométrie radar pour mesurer le déplacement. Et dans le chapitre I.C les caractéristiques du SAR pour permettre la mesure de déplacement. La mesure des déplacements, telle que nous l'envisageons, sera donc fortement contrainte par les spécificités de l'imagerie SAR et de l'interférométrie radar différentielle. Nous aborderons les principes de l'interférométrie radar en partant d'une configuration idéale (pas de perturbation), puis nous introduirons les différents changements non liés aux déplacements, responsables des perturbations de la mesure ainsi que les sources d'erreurs. Les possibilités d'estimer et de réduire l'incertitude sur la mesure, liée à ces différentes perturbations, seront alors abordées.

1. Principes de la mesure de déplacement

Les premières observations de déplacement utilisant l'interférométrie radar ont été faites par Gabriel et al. [1989] à partir du satellite SEASAT : il s'agit de l'observation de faibles variations de la surface de champs cultivés, liées au gonflement du sol lorsqu'ils sont arrosés et à leur compaction lorsqu'ils sèchent. Mais la première application qui a vraiment lancé l'utilisation de l'interférométrie radar différentielle pour des applications à la tectonique est la mesure du déplacement co-sismique du séisme de Landers (1992, Californie) à partir de données ERS-1 par Massonnet et al. [1993].

Nous présentons ici les principes de l'interférométrie différentielle appliquée à la mesure de déplacement du sol, en utilisant les images SAR présentées précédemment.

Nous avons vu que la phase mesurée dépendait en partie du trajet aller-retour de l'onde. Si l'on déplace l'ensemble de la cellule de résolution d'une fraction de longueur d'onde vers le radar, la différence entre la phase mesurée avant et la phase mesurée après le déplacement permettra de déterminer ce déplacement.

Partons du cas idéal où le satellite repasse exactement au même endroit et échantillonne la scène exactement de la même façon, sans changements ni des éléments de la cellule de résolution, ni de l'état de l'atmosphère. Dans ce cas idéal, les deux images sont identiques aux erreurs de mesures près. Si l'on effectue la différence de phase pixel à pixel entre les deux images, la nouvelle image obtenue, appelé interférogramme, a en chacun de ses pixels une différence de phase de zéro. Cette différence de phase est souvent appelée phase interférométrique, nous la noterons $\Delta\varphi^0$. En pratique, la phase interférométrique en un pixel de coordonnées (x, y) de l'interférogramme est déterminée par l'argument du produit conjugué :

$$Z_1 Z_1^* = \rho_2 \rho_1 e^{i(\phi_2 - \phi_1)} \quad \text{Équation 19}$$

où Z_1 et Z_2 sont les mesures complexes au pixel (x,y) de chaque image du couple.

Considérons, entre la première et la deuxième acquisition, un déplacement de l'ordre de quelques centimètres suffisamment faible par rapport à la taille de la cellule de résolution. Ainsi, on peut considérer que les pixels (x,y) des deux images correspondent toujours à la même cellule de résolution. Le déplacement est une translation identique de tous les éléments de la cellule.

Puisque φ_{atm} et φ_{cons} sont constants alors la phase interférométrique peut s'écrire :

$$\varphi_{2geo} - \varphi_{1geo} = \Delta\varphi = \Delta\varphi^0 + 2k\pi \quad \text{Équation 20}$$

$\Delta\varphi^0$ est la phase interférométrique observée comprise entre $-\pi$ et π et $\Delta\varphi$ la phase interférométrique exacte qui peut être n'importe quel nombre réel.

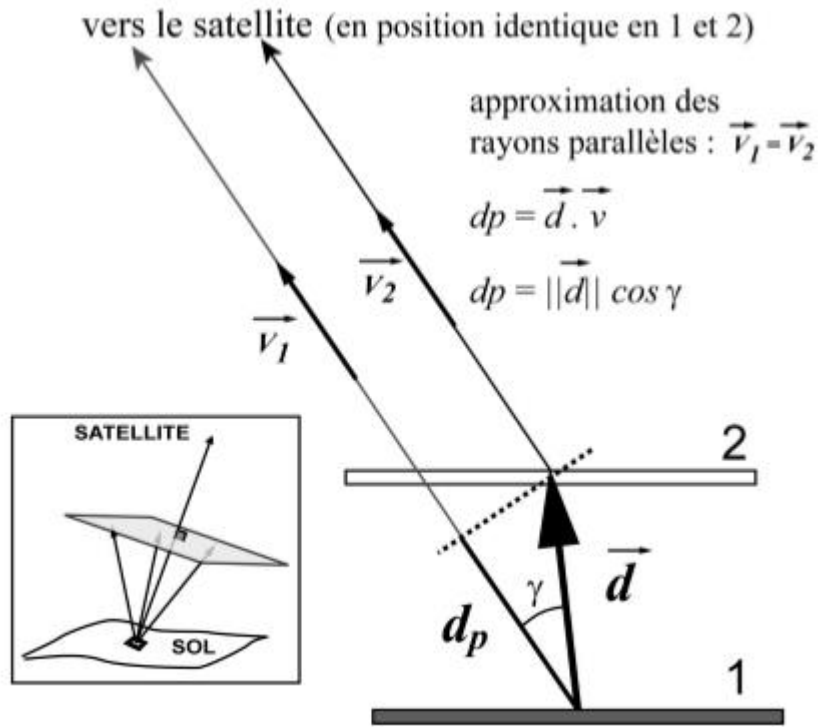


Figure 20: sensibilité à la composante du déplacement suivant la direction de visée du satellite.

La cellule de résolution se déplace suivant le vecteur d entre le premier et le deuxième passage du satellite. La phase mesurée est sensible à la composante de ce déplacement suivant la direction de visée du satellite. Le déplacement d_p étant très petit devant la distance sol-satellite, on peut considérer les directions de visée locales des deux acquisitions comme identiques. Le plan gris représente l'ensemble des déplacements ayant un même d_p .

Si l'on considère la composante d_p du déplacement suivant la direction de visée locale sur la figure 20. On peut établir une relation entre le déplacement et la phase interférométrique mesurée :

$$d_p = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta\varphi_{geo} = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta\varphi^0 + k \frac{\lambda}{2} \quad \text{Équation 21}$$

Avec k comme nombre entier ; d_p le déplacement vers le radar (DVR).

D'une façon générale, l'opération consiste à recaler les images que ce soit dans le cas du simultanés ou non.

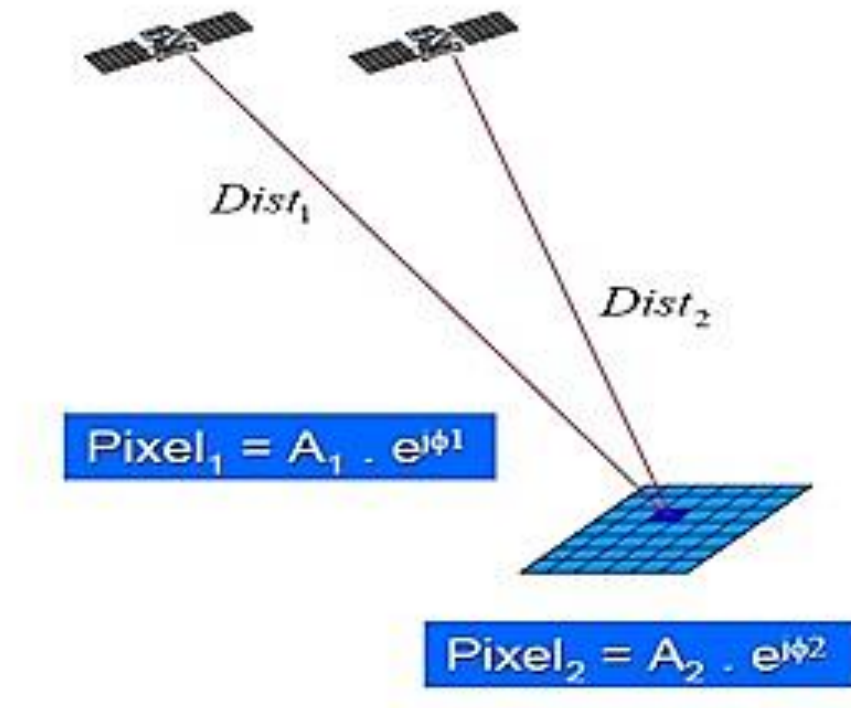


Figure 21: Acquisition d'un couple interférométrique d'après Massonnet et Inglada

$$\Delta\varphi_c^0 = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{4\pi}{\lambda} (D_1 - D_2) + \varphi'_1 - \varphi'_2 \quad \text{Équation 22}$$

$\varphi_1 - \varphi_2$ La différence de phase entre les deux acquisitions ; λ Longueur d'onde ; $\varphi'_1 - \varphi'_2$ Appelé aussi cible élémentaire; ce sont les morceaux de pixel qui ne sont pas de même distance. D_1 et D_2 représente le chemin optique.

Cas général

$\varphi_{1cible\ élémentaire} \neq \varphi_{2cible\ élémentaire}$ C'est pour les cas des acquisitions non simultanées car si on revient sur les lieux ce n'est pas évident que les objets restent à la même place (Exemples d'acquisitions simultanées : Terrasar X, navette SRTM) par contre si on est dans le cas d'acquisition simultanés les cibles élémentaire vont être voisines $\varphi_{1cible\ élémentaire} \cong \varphi_{2cible\ élémentaire}$.

- Le cas de simultanés

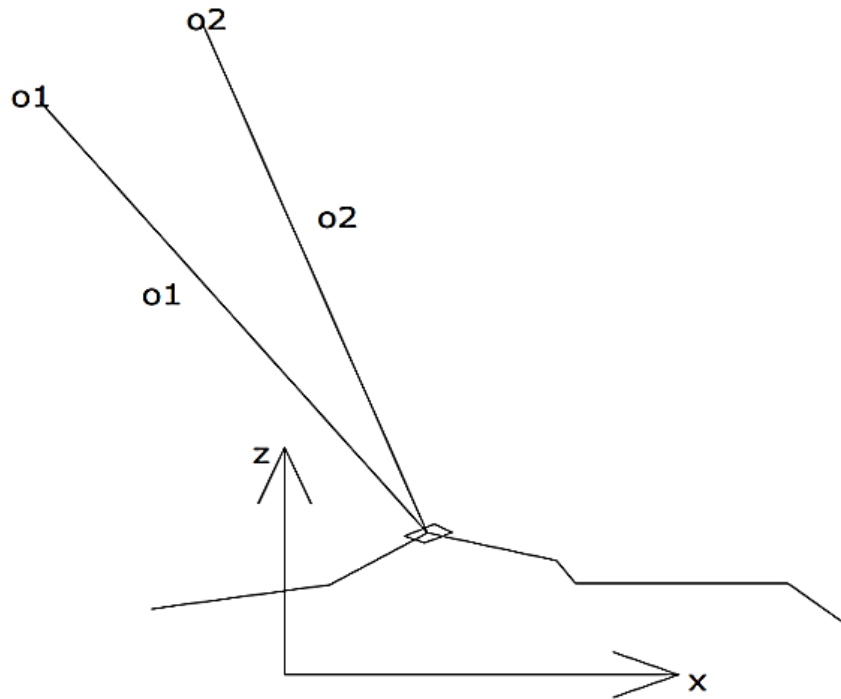


Figure 22: Acquisition simultanée

De cette figure on va voir une fonction qui dépend du positionnement x , de la forme du terrain et de $O1$ et $O2$

$$\varphi_1 - \varphi_2(m) = f(x, z, o_1, o_2)$$

Si les 2 orbites sont très lointaines on va considérer que x, z varie peu alors on va dire que $f(x_0, z_0, o_1, o_2)$ est le point de référence. Donc c'est une constante

α et β Terme complémentaire sur la variabilité de z et x autour de la valeur centrale, ils dépendent de $O1 ; O2$ et $(x_0 ; y_0)$

$$\varphi_1 - \varphi_2 = f(x_0, z_0, o_1, o_2) + \alpha(x - x_0) + \beta(z - z_0) \quad \text{Équation 23}$$

$\alpha(x - x_0)$ Ce terme dépend de la variable x parce qu'il est inutile car c'est un terme déterministe.

$\beta(z - z_0)$ Ce terme dépend de la variable z . Donc le terme utile est $\varphi_1 - \varphi_2(\text{utile}) = \beta(z - z_0)$.

- Dans le cas non simultané

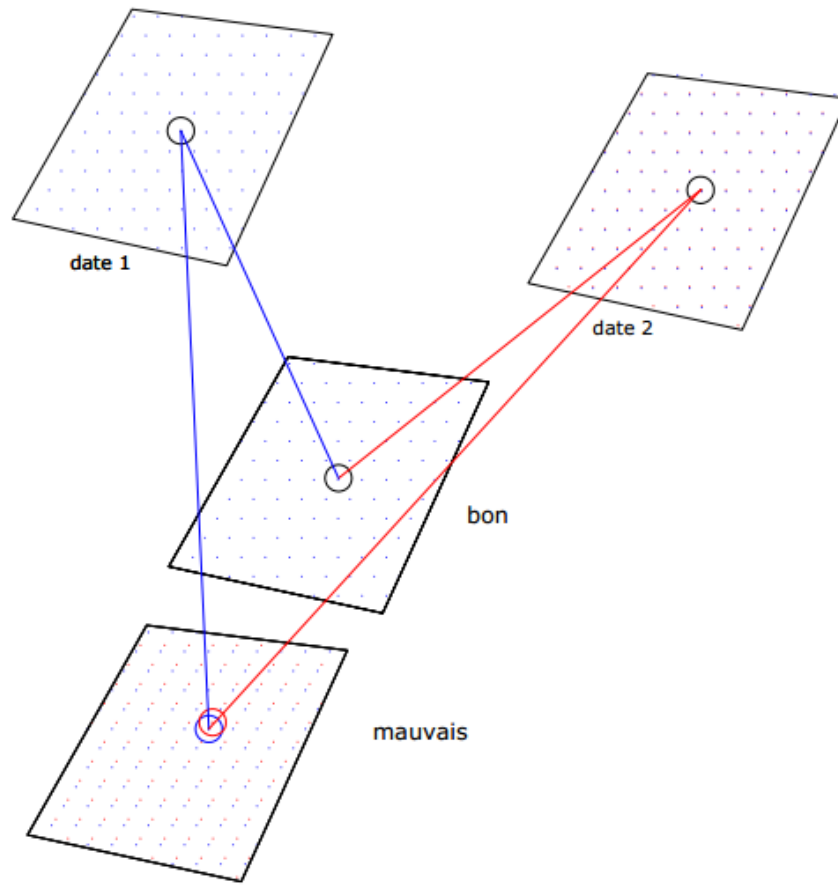


Figure 23: cas d'une acquisition non simultanée

Dans le cas d'une acquisition non simultanées, on a la différence de phase :

$$\varphi_1(date1) - \varphi_2(date2) = \frac{4\pi}{\lambda} (D1 - D2) + \varphi'_1 - \varphi'_2 \text{ .Équation 24}$$

φ'_1 et φ'_2 Cible élémentaire $\varphi_1(date1)$ Phase du premier passage et l'autre lors de deuxième passage de Sentinel 1.

Pour évaluer la qualité de résultat entre les deux dates, c'est liée au positionnement des cibles à l'intérieur des pixels ;

- Si $\varphi'_1 = \varphi'_2$ les cibles élémentaires n'ont pas bougé, la surface n'a pas évolué à l'échelle centimétrique.
- si $\varphi'_1 \neq \varphi'_2$ Il y a une discordance des cibles élémentaire de l'ordre de cm

$\varphi'_1 - \varphi'_2$ Ce terme sera connu par le calcul de la cohérence et on doit s'intéresser au comportement de φ'_1 et φ'_2 pour faire le calcul de $\varphi'_1 - \varphi'_2$.

Estimation de la cohérence

- la cohérence élevée $\varphi'1 = \varphi'2$ c'est le bon cas qui permet de calculer la différence de phase
- Si la cohérence est faible $\varphi'1 \neq \varphi'2$ c'est mauvais c'est-à-dire déplacement l'ordre de cm.

Considérons maintenant qu'on est dans le cas de cohérences élevées. Dans le cas de cohérences élevées, puisqu'on a deux dates différentes, on aura une possibilité de déplacement de pixel ce qui résulte que on pourrait avoir un déplacement $\vec{d}$ par exemple un affaissement de la surface.

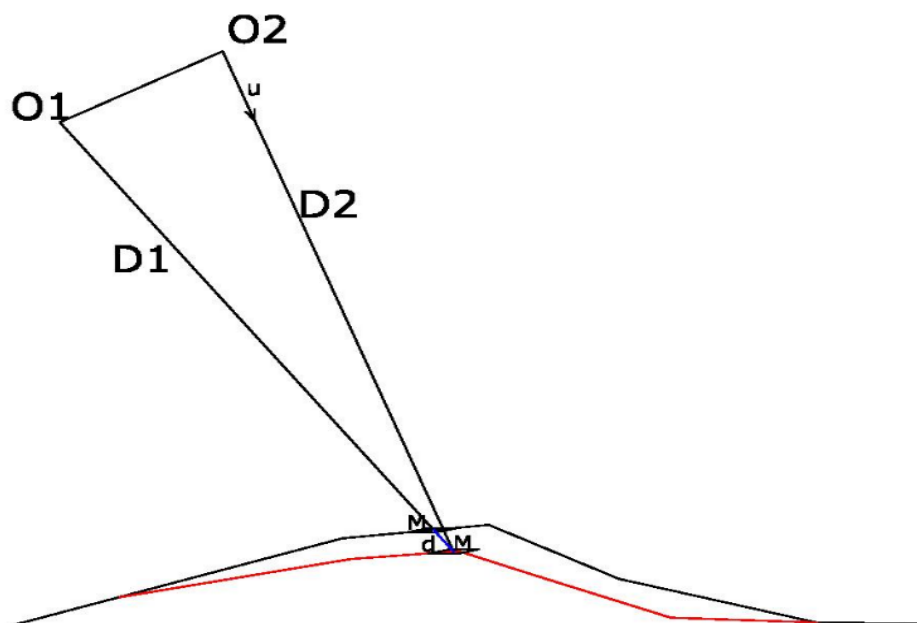


Figure 24: déformation du sol

$\vec{d}$: Vecteur de déplacement ; $\delta D2 = \vec{d} \cdot \vec{u2}$

Donc la formule devient :

$$\varphi1 - \varphi2 = \frac{4\pi}{\lambda} (D1 - D2) + 0 \quad \text{Équation 25}$$

D2 va être affecté par une augmentation de longueur $\delta D2 = \vec{d} \cdot \vec{u2}$ dans le cas général on aura

$$(\varphi1 - \varphi2) = \frac{4\pi}{\lambda} \left(-\vec{d} \cdot \vec{u2} \right) + \beta(z - z0) \quad \text{Équation 26}$$

Voilà le résultat d'un cas non simultanés et cohérence élevées. On a un terme qui $\frac{4\pi}{\lambda} \left(-\vec{d} \cdot \vec{u2} \right)$ dépend du déplacement et $\beta(z - z0)$ dépend de l'altitude du lieu. Avec une longueur d'onde

λ est centimétrique que la qualité de mesure envisageable $\vec{du}^2$ donne une qualité infra centimétrique $\frac{4\pi}{\lambda}$ c'est-à-dire avec une longueur d'onde de l'ordre de cm on est susceptible de trouver un déplacement de l'ordre de mm.

Après corrections des effets d'éloignement latéral calculés pour un terrain plat :

$$\Delta\varphi_c^0 = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{h_{Bortho}}{R \sin(i)} + \frac{4\pi}{\lambda} \vec{du} + \Delta\varphi_{atmP} + \Delta\varphi_{intP} \quad \text{Équation 27}$$

Il est important de souligner que les informations fournissent par les radars imageur est indépendant de la distance entre antenne-cible. Cela est dû au fait qu'on compare des longueurs d'onde.

i. Information de déplacement disponible.

On peut déjà tirer quelques conséquences de ce cas idéal. Seulement une composante du vecteur déplacement peut être ainsi obtenue et un déplacement orthogonal au vecteur de visée ne produit pas de changement de phase (par exemple un déplacement horizontal suivant la direction d'azimut). Cependant, en combinant plusieurs angles de visée, à partir du même radar ou de radars différents [Massonnet et al. 1996a], on peut obtenir davantage d'informations (voir Figure 22). Trois visées différentes sont nécessaires pour déterminer pleinement le déplacement. En pratique, pour des raisons de disponibilité, seulement deux visées, correspondant aux visées en orbite descendante ou montante d'un même satellite, sont le plus souvent utilisées [Jacobs et al. 2002; Pritchard et al. 2002].

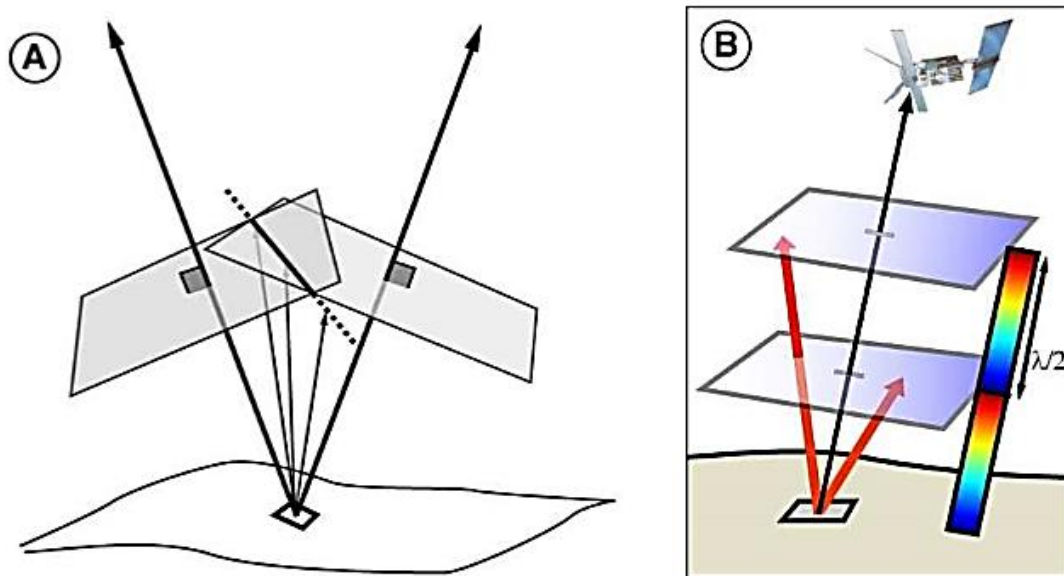


Figure 25 : combinaison de deux visées pour mieux contraindre le déplacement et ambiguïté de la phase.

A- En combinant deux visées différentes, l'ensemble des déplacements possibles est restreint à une droite dans l'espace contre un plan pour une seule visée. Une troisième visée différente permettrait de déterminer complètement le déplacement. B – Pour une seule visée, l'ambiguïté de la phase induit que le déplacement peut se situer dans l'un des plans parallèles espacés d'une demi-longueur d'onde.

- Conséquences de l'ambiguïté de la phase.

Nous avons vu au paragraphe précédent que le DVR est, dans notre cas idéal, connu à une demi-longueur d'onde près (2,8 cm pour SENTINEL 1A) en un pixel donné à cause de l'ambiguïté de la phase (figure 24).

- Influence de la variation d'angle de visée sur l'image.

La Figure 25 illustre ce problème. Du fait de la variation de l'angle d'incidence dans le plan perpendiculaire à l'orbite, des déplacements identiques de cellules de résolution localisées sur différentes colonnes de l'interférogramme se traduiraient par une évolution de $\Delta\varphi^0$ entre ces pixels. Ainsi, par exemple un déplacement homogène de l'ensemble de la scène (par exemple une translation due au mouvement des plaques) se traduirait par un gradient de $\Delta\varphi^0$ sur l'interférogramme. Cet effet, purement géométrique, est dû au fait que, en termes de DVR, on ne mesure pas exactement la même chose à chaque colonne de l'interférogramme.

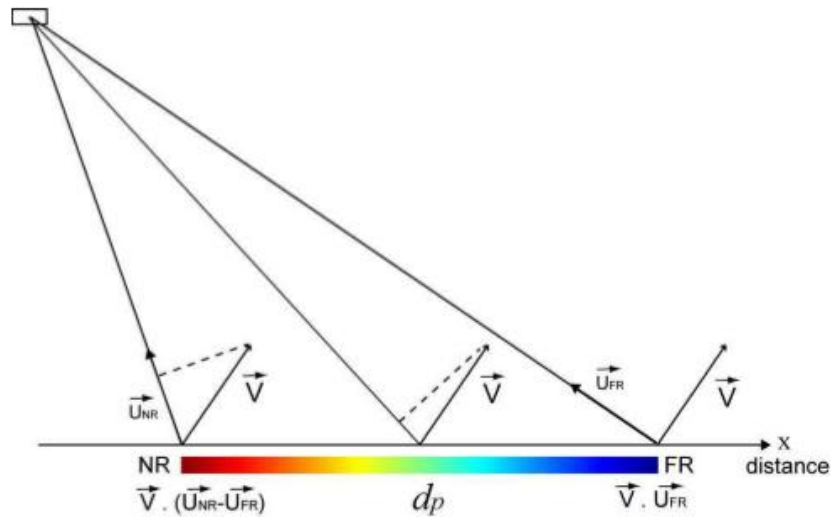


Figure 26: influence de l'angle de visée lors d'un déplacement homogène.

Suivant l'axe des distances, différents points ont le même déplacement V . A cause de la variation de vecteur de visée local U , il y a une variation du déplacement vers le satellite qui n'est pas due à un déplacement relatif entre les pixels.

2. Prise en compte de la géométrie réelle de prise de vue

Dans le cas idéal vu précédemment, le satellite, lors de l'acquisition de la deuxième image SAR d'un couple interférométrique, repassait exactement suivant la même orbite que lors de la première acquisition et avec exactement la même orientation. En réalité, cela n'est pas le cas ; les différences de géométrie de prise de vue ont des conséquences importantes en interférométrie radar, rendant sa mise en œuvre plus compliquée.

i. Influence de la base sur la géométrie des images

Jusqu'à présent, nous avons considéré des différences de phase pixel à pixel en partant du principe que les deux pixels mis en jeu dans l'opération, correspondaient à une même cellule de résolution. Or, à partir du moment où le couple présente une base non nulle, la géométrie des images est légèrement différente et il n'est plus possible d'effectuer une différence de phase directement de pixel à pixel (voir Figure 16). Les distorsions d'une image par rapport à l'autre ne sont pas homogènes sur l'image, car elles dépendent aussi de la pente locale et donc de la topographie.

Du fait de la différence de point de vue entre les deux acquisitions, sur une portion commune des images, l'angle d'incidence ne sera pas le même d'une image à l'autre. La taille de la cellule de résolution sera donc différente : une même surface apparaîtra dilatée en distance sur l'image

1 par rapport à l'image 2. La superposition des deux images pixel à pixel n'est pas possible : il faudra rééchantillonner une des deux images.

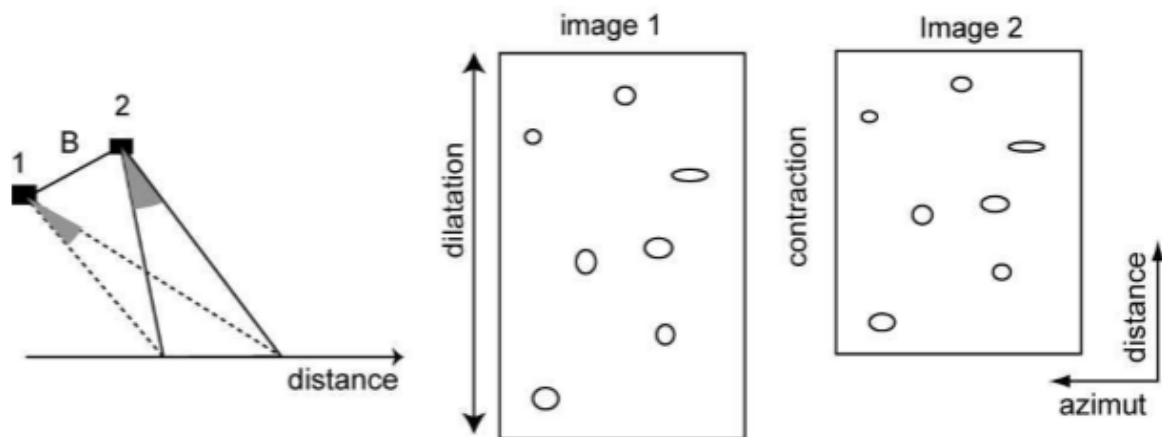


Figure 27: influence de la base sur la géométrie de l'image

Ces distorsions géométriques doivent être corrigées, afin que la différence soit effectuée sur deux mesures de phase correspondant à une même cellule de résolution.

ii. Influences de la topographie

Considérons une situation équivalente à celle du cas idéal, à une différence près : maintenant, au deuxième passage, au lieu de repasser suivant la même orbite, le satellite suit une orbite exactement parallèle à la première mais non confondue avec elle.

En l'absence de tout déplacement, la mesure de phase en une même cellule de résolution est différente entre le premier et le deuxième passage. Cette différence dépend de la position de la cellule de résolution et de la position du satellite à chaque passage. La distance entre les deux positions du satellite est appelée la base du couple interférométrique (baseline en anglais).

Si la position des satellites est parfaitement connue ainsi que la position du point (par exemple à partir d'un MNT), il est possible de modéliser la différence de phase $\Delta\phi_{topo}$ induite par cet effet. Il est pratique de décomposer cet effet en deux contributions : celle liée uniquement à une surface de référence (ellipsoïde, géoïde, sphère, terre plate, etc.) et celle liée à l'altitude du point par rapport à cette surface de référence. C'est sur ce principe que des MNT peuvent être fabriqués à partir de couples d'images SAR. En interférométrie radar, on soustrait la différence de phase causée par cet effet géométrique de la phase interférométrique.

Le satellite acquiert la première image suivant l'orbite 1 et la deuxième suivant l'orbite 2. P° correspond à la situation équivalente où le point P se trouve sur la surface de référence. H_p

est l'altitude du point P par rapport à cette surface. B_{perp} est la base perpendiculaire ou base effective du couple. La base introduit une différence entre D_1 et D_2 qui est directement liée à la position du point P. Un déplacement du point P peut également introduire une différence. D'après Hanssen [2001].

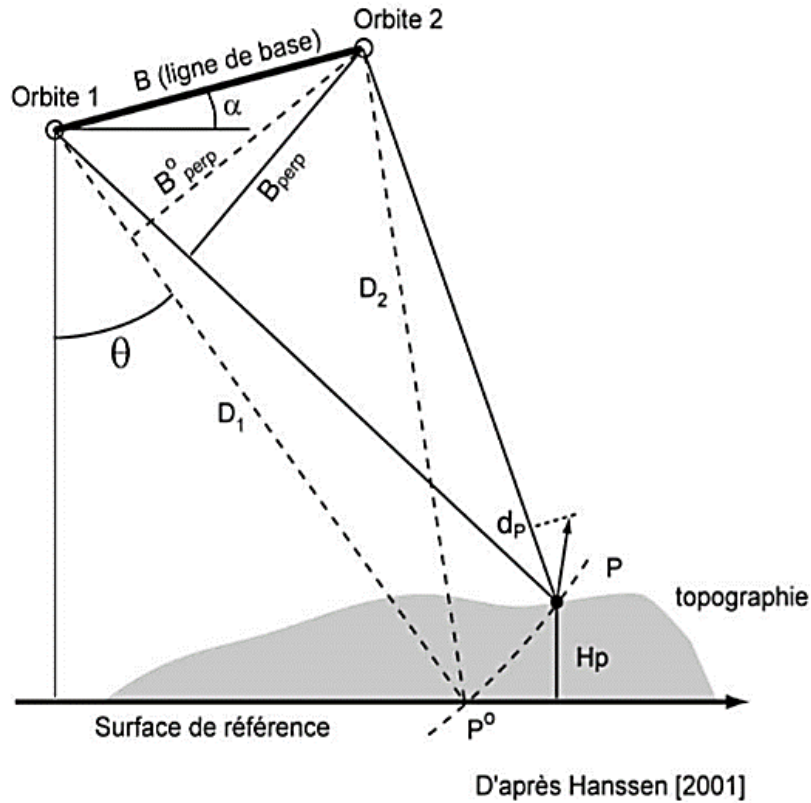


Figure 28: Influence de la ligne de base sur la mesure du déplacement

En partant de la Figure 27, on montre que l'on peut exprimer la phase interférométrique au point P, avant correction de l'effet topographique, $\Delta\varphi_{nc}^0$ [Hanssen 2001, p. 34 et suiv.] par :

$$\Delta\varphi_{nc}^0 + 2k\pi = \frac{4\pi}{\lambda} (B \sin(\theta_p^0 - \alpha) - d_p - \frac{B_{\text{perp}}^0}{D_1 \sin \theta^0} H_p) \quad \text{Equation 28}$$

La position des deux satellites est parfaitement connue ainsi que l'altitude du point avant le déplacement, la seule inconnue est d_p le déplacement du point vers le radar.

$B \sin(\theta_p^0 - \alpha)$; correspond à la différence de phase qu'il y aurait sans déplacement, et si la surface observée était la surface de référence. Ce terme domine dans l'interférogramme non corrigé, il se traduit par de nombreuses franges parallèles à l'axe des azimuts (voir Figure 23).

$\frac{B_{perp}^0}{D_1 \sin \theta^0} H_p$; correspond à la différence de phases causée par l'altitude de la surface observée par rapport à la surface de référence. La différence d'altitude entre chaque courbe est donnée par une quantité appelée altitude d'ambiguïté. Elle est définie telle que [Massonnet et Rabaute 1993] :

$$Ha = \frac{\lambda D_{1p} \sin \theta_p^0}{2B_{perp}^0} \quad \text{Équation 29}$$

Plus la base est petite, plus l'altitude d'ambiguïté est grande et donc la sensibilité de l'interférogramme au relief est faible.

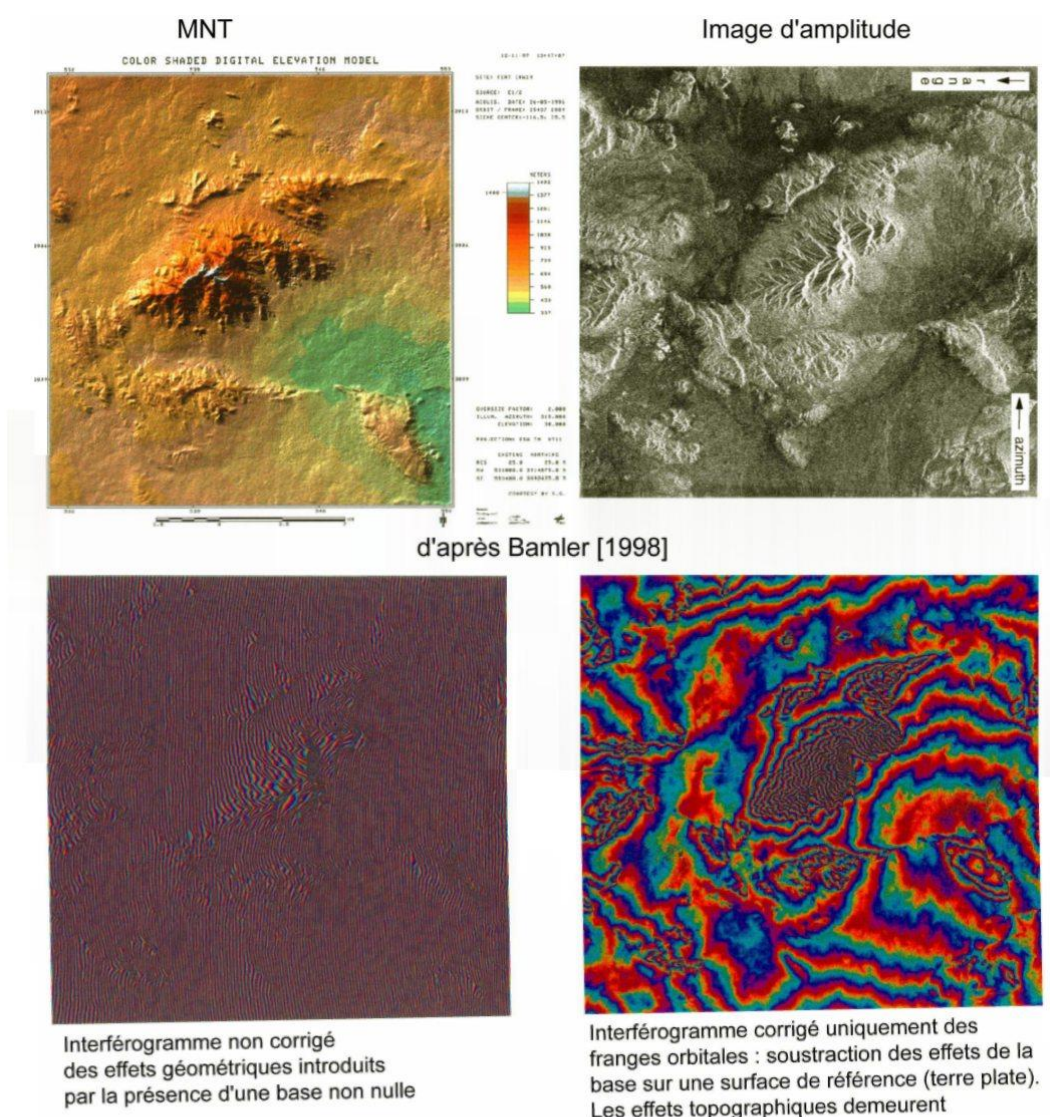


Figure 29: influence de la base sur la phase interférométrique

Pour l'étude des déplacements, il faut donc soustraire de l'interférogramme cet effet géométrique. Si l'on connaît la topographie et la baseline, on est alors capable de modéliser la phase liée à la topographie $\Delta\varphi_{topo}$, et donc de la soustraire. Pour cela, un MNT couvrant la zone d'étude est nécessaire. Une autre solution consiste à utiliser l'information sur la topographie contenue dans un interférogramme exempt de déformation pour effectuer l'opération. Cette opération de soustraction des franges orbitales et topographiques de l'interférogramme est à l'origine du terme interférométrie radar différentielle.

iii. Influence d'orbites non parallèles et de l'orientation de l'instrument.

Si les orbites ne sont pas parallèles comme nous l'avions supposé jusqu'à maintenant, de nouvelles différences dans la géométrie des images apparaîtront. Il y aura aussi une variation de la base sur l'image.

iv. Influence de la base sur la stabilité de la phase interférométrique d'un pixel.

La base du couple interférométrique fait qu'au sein d'une même cellule de résolution l'angle d'incidence est différent pour les deux acquisitions. La phase de construction est dépendante de l'angle d'incidence, qui change d'une image à l'autre. La différence de phase $\Delta\varphi^0$ corrigée des effets topographiques devient :

$$\Delta\varphi_c^0 + 2k\pi = \Delta\varphi_{geo} + \Delta\varphi_{atm} + \Delta\varphi_{cons} \quad \text{Équation 30}$$

Ici $\Delta\varphi_{atm}$ reste constante mais plus $\Delta\varphi_{cons}$.

v. L'évolution temporelle du milieu observé.

Entre deux acquisitions le sol ne peut conserver son état de surface et ainsi que l'atmosphère. Naturellement, les différentes propriétés qui caractérisent le sol et l'atmosphère sont susceptibles d'évolution au cours du temps, ce qui n'est pas sans conséquences pour l'interférométrie radar.

a) Changement lié au sol

Toute modification notable des caractéristiques physiques ou géométriques des cibles élémentaires constituant une cellule de résolution est susceptible de modifier sa phase de construction. Par exemple, la position d'un objet dans la cellule peut modifier la phase mesurée [Zebker et al. 1994b]. Ceci fait que la composante $\Delta\varphi_{cons}$ de la phase interférométrique sera également modifiée. L'évolution d'une surface modifiant la phase de construction dépend beaucoup du type de surface concerné et des conditions climatiques. Ainsi les étendues d'eau, dont la surface est très mouvante, ont une réponse interférométrique complètement bruitée

par $\Delta\varphi_{cons}$. Par contre, les constructions anthropiques, comme les habitations ou les infrastructures de transport, présentent une grande stabilité dans le temps et sont de ce fait particulièrement intéressantes en interférométrie radar différentielle [Usai et Klees 1999; Usai 2000].

b) L'influence de l'atmosphère

L'atmosphère traversée par le rayonnement émis par le radar peut être très changeante d'une acquisition à l'autre.

3. Prise en compte des sources d'erreurs

Pour finir notre revue des différentes composantes qui interviennent dans la mesure de la phase, nous abordons les sources d'erreurs possibles. Bien que les effets atmosphériques ou ceux créés par la base du couple interférométrique puissent être considérés comme des erreurs du point de vue de la mesure du déplacement à partir de la phase interférométrique, ils font naturellement partie du signal de phase.

i. Erreur sur la phase des images SAR.

Nous avons déjà vu que la mesure de la phase par l'instrument était entachée d'une incertitude inhérente à toute mesure instrumentale. Le traitement SAR peut lui aussi introduire des erreurs [Bamler et Just 1993] ; ce type d'erreur se traduit par un biais de phase et une diminution du rapport signal à bruit dans l'interférogramme. Pour l'utilisation d'images SAR en interférométrie, il est préférable de focaliser les images avec une même méthode car, lors de la différence de phase des deux images, certaines erreurs peuvent se compenser. Nous avons également vu qu'il était préférable de traiter les deux images avec un même angle de visée d'acquisition afin de réduire le rapport signal à bruit de l'interférogramme [Arnaud 1997].

ii. Erreur de recalage.

En principe, la différence de phase doit s'effectuer à partir de deux mesures d'une même cellule de résolution. Or nous avons vu qu'à partir du moment où les acquisitions se faisaient sur des orbites différentes, la géométrie des images était légèrement différente. Donc, les images ne sont pas directement superposables à la précision souhaitée, qui est de l'ordre du 10ème de pixel [Just et Bamler 1994]. Il est ainsi nécessaire de recalibrer finement une des deux images (qui est alors souvent appelée image esclave) sur l'autre (image maîtresse) ce qui nécessite un rééchantillonnage de l'image SAR complexe.

iii. Erreur dans la suppression de la composante topographique.

L'interférométrie radar différentielle repose sur la suppression de la composante topographique introduite par la présence d'une base perpendiculaire dans le couple d'acquisitions. En pratique, cette suppression peut se faire de deux manières différentes. La première méthode consiste à modéliser la composante topographique à partir d'un Modèle Numérique de Terrain et de la connaissance des orbites. Une erreur ε dans le MNT se propage alors dans l'interférogramme différentiel.

Cet effet peut s'exprimer grâce à l'altitude d'ambiguïté H_a . L'erreur sur la phase introduite dans l'interférogramme s'écrit :

$$\Delta\varphi_{errtopo} = \frac{2\pi\varepsilon}{H_a} \quad \text{Équation 31}$$

La précision requise pour le MNT est donc fonction de la base du couple. Plus celle-ci est grande, plus le MNT devra être précis. Cependant, aussi précis soit-il, un MNT fournit en chaque pixel une altitude moyenne qui ne correspond pas forcément à celle à laquelle est sensible le radar. Par exemple, si une petite cible domine la cellule de résolution c'est l'altitude précise de cette cible qu'il faudrait prendre en considération et non l'altitude moyenne de la cellule de résolution. Toutefois, cette limitation n'est en pratique vraie que si l'on utilise des grandes lignes de base.

La deuxième méthode consiste à obtenir la composante topographique à partir d'un interférogramme où l'on suppose les autres composantes (déplacement, atmosphère) négligeables. Puisque la phase topographique est proportionnelle à la base du couple, il faut ensuite adapter cette phase obtenue à partir d'une certaine base à la base de l'interférogramme, pour pouvoir la soustraire.

Dans les deux méthodes, les erreurs sur la connaissance des orbites (ε_{orb}) se propagent dans l'interférogramme. Pour pouvoir obtenir une précision millimétrique sur le déplacement par interférométrie radar différentielle, on pourrait s'attendre à ce que la précision requise pour les orbites soit du même ordre de grandeur. En fait, la précision réelle des orbites est actuellement moindre. Par exemple, pour ERS, les meilleures orbites ont une précision autour de 5 à 10 cm.

iv. Erreurs liées aux traitements effectués sur l'interférogramme.

Afin d'améliorer la qualité d'un interférogramme, il est fréquent de recourir à des filtrages, qui peuvent introduire des erreurs. D'autre part, il est souvent nécessaire de dérouler la phase

interférométrie pour s'affranchir de l'ambiguïté de la phase. Il peut aussi être pratique de remettre l'interférogramme qui est dans la même géométrie que l'image SAR maîtresse dans un référentiel cartographique. Toutes ces opérations sont des sources d'erreurs potentielles supplémentaires.

4. L'incertitude sur la mesure du déplacement.

Une première estimation de l'incertitude sur un interférogramme peut se faire visuellement. L'aspect plus ou moins bruité d'un interférogramme permet en effet de détecter les zones susceptibles de contenir de l'information, en les distinguant des zones où aucun signal ne semble présent. Dans un premier temps, nous envisagerons le cas où un seul interférogramme est disponible, en distinguant les possibilités de connaître et de réduire l'incertitude uniquement à partir du choix des données et de l'interférogramme. Les notions de cohérence et de décorrélation, fondamentales pour cette analyse, seront présentées. Ensuite, nous aborderons le cas où plusieurs interférogrammes sont disponibles sur une même zone. Cette situation offre des possibilités beaucoup plus favorables concernant l'estimation et la réduction de l'incertitude.

i. Pour un interférogramme.

a) Les choix de données

Le choix des données et la connaissance de la zone d'étude choisie fournissent un premier moyen, en amont de l'étude, pour avoir une idée de l'incertitude associée à la mesure de déplacement. Nous distinguerons ici le choix des images, ainsi que la sélection des données topographiques et orbitales. Ces informations, obtenues lors du choix des données, restent très générales. En pratique, elles permettent surtout de sélectionner les données qui pourront être utilisées pour construire un interférogramme potentiellement utilisable, mais elles ne fournissent pas une estimation a priori de l'incertitude sur le déplacement.

- Le choix des images

Pour un satellite donné, le choix des images formant un couple interférométrique repose principalement sur deux critères : les dates d'acquisition et la base perpendiculaire du couple.

Concernant les dates, ce choix dépend évidemment du phénomène que l'on souhaite observer. Le déplacement doit être suffisamment grand et représentatif entre les deux dates d'acquisition. Mais cette exigence entre parfois en contradiction avec l'augmentation du bruit

de l'interférogramme causé par les changements du sol avec le temps. Le choix d'une base petite pour le couple permet également de réduire l'incertitude liée à $\Delta\varphi_{cons}$.

Dans cette étude on a utilisé une base de 124m pour l'image 2015-2016 et de 48m pour l'image 2016-2017.

- Influence des données topographiques

Nous avons déjà vu comment les erreurs sur la topographie se propagent dans l'interférogramme proportionnellement à la base du couple. Ainsi, la qualité exigée des données topographiques dépendra de la base du couple interférométrique.

- Influence orbitale

La réduction de l'erreur ε_{orb} passe évidemment par l'utilisation de données orbitales les plus précises possibles. La connaissance de l'incertitude sur les données orbitales (souvent donnée sous la forme d'une erreur quadratique moyenne sur la composante radiale et perpendiculaire) permet d'estimer les erreurs à grande longueur d'onde [Hanssen 2001, p. 123-123].

File Name	Mst/Slv	Acquisition	Track	Orbit	Bperp [m]	Btemp [c]
S1A_IW_SL...	Master	12Dec2016	93	14340	0.00	0.00
S1A_IW_SL...	Slave	29Jan2017	93	15040	58.11	-48.00
S1A_IW_SL...	Slave	09Jun2015	93	6290	124.26	552.00

Figure 30: les données orbitales des images utilisées dans cette étude.

b) Connaissance de l'incertitude sur l'interférogramme

Jusqu'à présent nous avons étudié les différentes composantes de la phase interférométrique en les distinguant par leur origine. En pratique, sur un interférogramme, les choses se présentent différemment. Puisque toutes les composantes sont mélangées, on ne peut les différencier selon leur origine. On peut par contre analyser le signal de phase en le décomposant suivant ces différentes signatures spatiales : signaux à grande, moyenne ou petite longueur d'onde, signal régulier ou aléatoire, etc.

- Identification des zones exploitables : la notion de cohérence.

La cohérence est une estimation locale de la corrélation entre les deux images complexes utilisées pour former l'interférogramme. La cohérence γ est donnée par l'amplitude du coefficient de corrélation complexe γ_c :

$$\gamma_c = \frac{E[Z_1 Z_2^*]}{\sqrt{E[|Z_1|^2] \cdot E[|Z_2|^2]}} \quad \text{Équation 32}$$

Où Z_1 et Z_2 sont les deux signaux radar. $E[\]$ représente l'espérance mathématique. L'intérêt de la mesure de corrélation complexe est qu'elle tient compte à la fois de la stabilité de phase et de la variation d'amplitude. La cohérence, amplitude de γ_c , varie entre 0 et 1. Si les fenêtres de pixels sont identiques à une différence de phase près, alors la cohérence vaut 1. La cohérence est donc liée à la variabilité de la phase interférométrique à l'intérieur de la fenêtre (la phase du coefficient de corrélation complexe correspond à l'espérance de la phase interférométrique sur la fenêtre). Lorsque les signaux ne sont plus corrélés, la cohérence diminue et tend vers 0. Il y a un lien direct entre la cohérence et le rapport signal à bruit (RSB) de l'interférogramme (voir Figure 20, et [Zebker et Villasenor 1992]). La cohérence est faible sur la mer et sur les zones où la végétation domine. Il y a une forte cohérence sur les zones urbaine (figure 20). L'image d'amplitude (à gauche) montre qu'il existe une bonne corrélation entre forte amplitude et bonne cohérence.

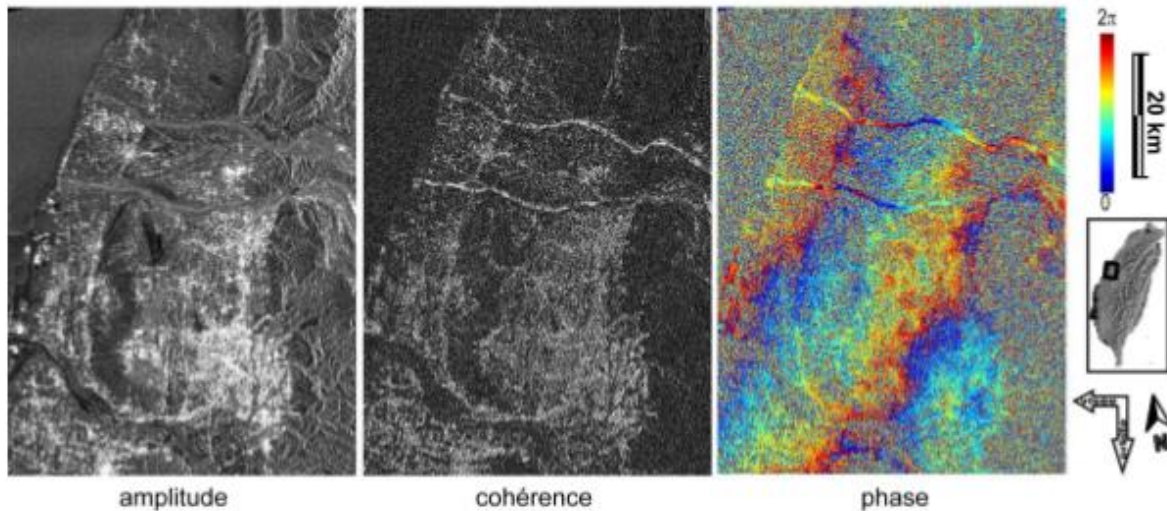


Figure 31: comparaison de l'image de cohérence avec l'amplitude et la phase.

Il est important de noter les limitations de l'utilisation de la cohérence pour obtenir l'incertitude sur le déplacement, causée par la décorrélation. La cohérence étant donnée sur une fenêtre de pixels, si une cellule de résolution ne subissant pas de décorrélation est entourée de cellules

fortement décorrélées, elle sera aussi considérée comme étant décorrélée. Mais l'utilisation de plusieurs interférogrammes permet de résoudre partiellement ce problème.

- L'identification des perturbations dans les zones exploitables.

Dans les zones où la cohérence est forte, la phase interférométrique correspond principalement à la somme de trois termes : $\Delta\varphi_{DVR}$, $\Delta\varphi_{atm}$ et ε_{orb} (voir Figure 27). Sur un interférogramme seul, l'extraction du terme de déplacement est délicate et nécessite souvent des hypothèses concernant le déplacement que l'on cherche à observer. L'identification des perturbations se base essentiellement sur leurs signatures spatiales.

ε_{orb} Crée un gradient de phase interférométrique relativement constant sur l'image. Si le déplacement attendu est relativement local, il peut se distinguer de cet effet affectant l'ensemble de l'image.

$\Delta\varphi_{atm}$ peut également produire un gradient sur l'image (voir Figure 28) mais aussi des variations plus locales, souvent sans variation brusque de la phase et non corrélé aux caractéristiques du sol. Ainsi, la présence d'une discontinuité linéaire de la phase, corrélée à des caractéristiques du sol, peut être interprétée en termes de déplacement. En pratique, c'est l'incertitude liée à l'atmosphère qui est la plus difficile à déterminer.

- c) Réduction de l'incertitude.

Pour réduire les incertitudes d'un interférogramme seul, plusieurs stratégies existent suivant que l'on s'attaque à l'incertitude liée à la décorrélation ou à celle liée aux perturbations atmosphériques et orbitales.

- Filtrage de bruit de décorrélation.

La manière la plus simple de réduire globalement le bruit de décorrélation, qui par nature n'est pas corrélé d'un pixel à l'autre de l'interférogramme, est d'effectuer une moyenne spatiale complexe sur une fenêtre de pixels au détriment de la résolution. Cette moyenne peut s'effectuer à plusieurs étapes, soit au moment de la focalisation en effectuant une pré sommation des données brutes, soit au moment de faire le produit complexe des deux images, ou encore à partir d'un interférogramme déroulé. En effet, il faut éviter d'effectuer la moyenne sur l'interférogramme directement afin de respecter le saut de phase dû à l'ambiguïté de la phase. Cette opération se fait au détriment de la résolution et est inefficace lorsque le bruit excède un cycle de phase.

- Réductions des autres perturbations

Les erreurs orbitales ϵ_{orb} montrent des variations à grandes longueurs d'onde de la phase, elles peuvent être modélisées et soustraites en estimant les différences de phases interférométriques entre quelques pixels suffisamment éloignés entre eux et non affectés par des déplacements. . L'élimination de l'erreur peut être faite directement par soustraction de la perturbation modélisée à l'interférogramme ou alors en corrigeant une des orbites par rapport à l'autre et en recalculant l'interférogramme [Massonnet et Feigl 1998].

- ii. Cas d'une série d'interférogrammes.

Lorsque l'on possède plus de deux images SAR d'une même zone, il est possible de les combiner pour former une série d'interférogrammes. Ainsi, N images peuvent être utilisées dans $N \times (N-1)/2$ couples. L'incertitude sur le déplacement à partir d'un seul interférogramme est difficile à estimer. Cependant, le recoupement des informations issues de plusieurs interférogrammes va permettre d'améliorer la précision de la mesure.

La disponibilité de plusieurs interférogrammes peut fournir plusieurs mesures d'un même déplacement permettant de réduire les perturbations. Lorsque l'on cherche à étudier des déplacements de la surface qui sont limités dans le temps, les mêmes déplacements sont alors présents dans tous les interférogrammes qui utilisent des images acquises avant et après ces déplacements. Ceci multiplie le nombre de franges du signal par le nombre d'images additionnées, mais, en contrepartie, le bruit augmente lui aussi [Sandwell et Price 1998].

- a) Réduction globale des perturbations.

La disponibilité de plusieurs interférogrammes peut fournir plusieurs mesures d'un même déplacement permettant de réduire les perturbations non systématiques de celui-ci et d'obtenir une estimation statistique de son incertitude. Différents cas sont envisagés suivant la nature des déplacements étudiés.

Pour un phénomène limite dans le temps, lorsque l'on cherche à étudier des déplacements de la surface qui sont limités dans le temps, les mêmes déplacements sont alors présents dans tous les interférogrammes qui utilisent des images acquises avant et après ces déplacements. C'est le cas, par exemple, des déplacements co-sismiques.

b) Séparation des différentes composantes pour isoler les déplacements

• Présentation

L'approche séparée, perturbation par perturbation, n'est souvent pas possible car les perturbations se superposent dans chacun des interférogrammes. De plus, elle nécessite souvent un déroulement préalable des interférogrammes, ce qui pose des problèmes dans le cas d'une grande base du couple ou d'un interférogramme. Nous résumons ici la méthode dite des "Permanent Scatterers" (PS) [Ferretti et al. 1999b; 2000b; 2001; Colesanti et al. 2003a] qui a été la première à être développée et qui a fait l'objet de nombreuses validations à partir de différents satellites [Colesanti et al. 2000; Ferretti et al. 2000a; Ferretti et al. 2000c; Colesanti et al. 2003c].

• La technique des "Permanent Scatterers" (PS).

La technique permet de séparer les composantes de déplacement, d'atmosphère et d'orbite (de façon indistincte), d'erreur de topographie et de bruit résiduel, à partir d'un système linéaire d'équations résolu de façon itérative. Son intérêt est qu'elle peut s'appliquer sur des interférogrammes à long terme et avec une grande base. Pour cela, la méthode s'appuie sur des cellules de résolution ayant une grande stabilité dans leur réponse, ce qui implique qu'elles aient une faible décorrélation quel que soit l'interférogramme. Ces "Permanent Scatterers" correspondent souvent au cas où un réflecteur ayant une petite surface domine largement dans la réponse de la cellule de résolution. Dans ce cas, l'amplitude du pixel est également stable (voir Figure 17) car moins affectée par le phénomène de "speckle". Une première détermination des pixels qui seront utilisés se fait donc sur ce critère, en retenant les pixels dont l'amplitude est stable sur une série d'images SAR [Ferretti et al. 2001].

L'étape suivante est la formation des interférogrammes différentiels : à partir de N images SAR (généralement 20 à 30 images) N-1 interférogrammes (linéairement indépendants) ayant tous la même image maîtresse sont produits. En chaque pixel d'un interférogramme, la phase interférométrique est exprimée de la façon suivante :

$$\Delta\varphi = K_1 B_{\text{perp}} \varepsilon_{MNT} + K_2 T \vartheta + \text{res} \quad \text{Équation 33}$$

; Avec K1 et K2 sont des constantes, T l'intervalle de temps de l'interférogramme, v est la vitesse moyenne du point en direction du radar, et res est le résidu comprenant le bruit. Les inconnues sont ε_{MNT} , v et res ; ε_{MNT} et v étant identiques pour tous les interférogrammes. L'ensemble des interférogrammes fournit pour chaque pixel un système de N-1 équations. Mais

ce système ne peut être résolu directement car il n'est pas linéaire à cause de l'ambiguïté de la phase. Il est donc nécessaire de dérouler la phase.

En résumé, La principale quantité observée en interférométrie radar correspond à la mesure d'une double différence de phase, spatiale et temporelle. La première différence est temporelle, s'effectue entre la phase de deux images SAR. Ce qui n'est pas directement utilisable en termes de déplacement, à cause notamment de l'ambiguïté de la phase, de l'incertitude sur les orbites et des effets atmosphériques à grande longueur d'onde. Une deuxième différence est spatiale, est réalisée, cette fois entre deux pixels d'un interférogramme.

Chapitre III. APPLICATION DE L'INTERFEROMETRIE A L'ETUDE DE LA DEFORMATION DU SOL A ANKORONDRANO ATSINANANA.

Dans la partie précédente, nous avons vu comment et à quelles conditions l'interférométrie radar permet la mesure des déplacements de la surface terrestre. Dans ce chapitre, l'objectif est d'examiner la stabilité du sol, dans le fokontany Ankorondrano Antsinanana, et quels phénomènes sont susceptibles d'être étudiés par interférométrie.

Pour bien commencer notre étude, nous commencerons par la présentation de la zone d'étude. Et on fera une étude sur géologique et morphologique de la zone. Ensuite, nous donnerons un aperçu sur la déformation actuelle et les potentialités de l'interférométrie radar dans la zone, et enfin on verra les différents résultats de chaque opération

Localisation géographique de la zone d'intérêt

Le 3^{ème} arrondissement est composé de 34 quartiers. 12 % de la population y vivent d'après la mairie d'Antananarivo. Le 3^{ème} arrondissement est délimité à l'est par Ankatso, au nord par Andravoahangy, au sud par Antanimena et à l'ouest par Ankorondrano. Le fokontany d'Ankorondrano Atsinanana se trouve dans le 3^{ème} arrondissement (voir Annexe). . On a sur la figure 31: La couverture SENTINEL pour la faisabilité de l'étude.



Figure 32: Couverture de SENTINEL 1A sur la scène avec une couverture de 250km.

A. ETUDE GEOLOGIQUE ET MORPHOLOGIQUE.

1. Contexte géologique

Pour comprendre le comportement de sol, la connaissance de la géologie de la zone est importante. La Région Analamanga occupe la partie septentrionale du Bloc Structural d'Antananarivo, et une partie de la bordure méridionale de la Nappe de Tsaratanana avec celle d'Andriamena. Les plaines sont surtout constituées par des formations d'origine lacustre dominées par les argiles dont l'épaisseur peut atteindre dans certains secteurs plus de 15 mètres. Elles sont, avec des intercalations de petits niveaux, gréseux et/ou tourbeux. Ces zones d'alluvions lacustres, généralement fertiles, jouent un rôle important pour l'occupation humaine. Elles sont surtout utilisées pour la riziculture; mais dans les parties où l'eau est

difficilement maîtrisable, ces argiles et tourbes, en particulier sur la capitale, sont exploités pour la fabrication des briques cuites.

Pour la zone d'étude, on y observe des sols hydromorphes anciens argilo sableux plus ou moins lessives ou lavés sont tourbeux et sableux. En amont du réseau plus argileux en aval pour passer à de véritables alluvions argileuses brunes à grisâtres de décantation puis plus riches en sables et micas au niveau des grandes vallées.

2. Contexte géomorphologique

La géomorphologie structurale de la haute terre centrale d'Antananarivo est assez connue grâce à plusieurs études qui ont été accomplies par des chercheurs depuis des années. Antananarivo est située dans la région des Hauts-plateaux de Madagascar dont la principale caractéristique géomorphologique est l'existence d'une zone en relief, les collines latéritiques, et de zones basses, les plaines alluviales comme la plaine de Betsimitatra dans laquelle s'écoulent l'Ikopa, la Mamba, la Sisaona, l'Andromba, , avec parfois des marécages comme ceux rencontrés juste en amont du seuil de Bevomanga, dus en général à des difficultés d'écoulement des eaux (Rakotondrainibe J. H.). Jeanne et Jean Marc Hoeblich, 1983 ont mentionné dans son article une organisation du relief d'Antananarivo, formé d'échines et des vallées grossièrement parallèles entre elles et de direction NNO-SSE.

Les Hautes Terres correspondent à des réseaux de reliefs en creux ou de bas-fonds dominés par des reliefs résiduels composés de roches dures. Le paysage est formé des collines convexes entre lesquelles circule un réseau hydrographique très dense. Elles sont occupées par des roches ferralitiques à plusieurs variantes fonction de la roche mère (Roederer, 1971). Une couche latéritique à épaisseur variable recouvre la majorité de la surface et ceci rendait difficile la tâche des chercheurs sur l'étude détaillée de la plaine (G. Noizet, 1970). Les bas-fonds sont occupés par des sols hydromorphes, plus ou moins tourbeux et prioritairement utilisés pour la riziculture (Roederer, 1971). De vastes étendus de plaines plus ou moins importantes, d'altitude autour de 1250 m, se distribuent un peu partout autour des zones habitées ou des cours d'eau: les plaines de Betsimitatatra, Mahitsy, environ d'Ambatomanga, Ambohimiadana, Ambohimambola, en bordure de l'Ikopa, de Varahina, de Sisaony. Ces plaines correspondent à d'anciennes zones lacustres d'âge quaternaire.

B. LES INFORMATIONS FOURNIES PAR L'INTERFEROMETRIE RADAR DIFFERENTIELLE.

Pour étudier les apports de l'interférométrie radar sur le mouvement du sol à Ankondrano, nous avons choisi de nous intéresser à quelques cas possibles. Le choix de la zone d'étude s'est fait autour de deux raisons : sensibilité de la mesure d'interférométrie sur une zone urbaine, et l'étude de déplacement. Nous décrivons ici la méthode interférométrique et les données que nous avons employées pour réaliser ces études.

1. Méthodologie INSAR adoptée

i. Choix de la méthode

Comme nous l'avons évoqué au chapitre I, il y a plusieurs méthodes et mises en œuvre pour produire un interférogramme différentiel à partir d'images SAR. Parmi les grandes approches du problème on distingue l'interférométrie différentielle utilisant 3 ou 4 images [Zebker et al. 1994a] pour réaliser un interférogramme sans avoir recours à un MNT, de l'interférométrie différentielle n'ayant besoin que de deux images et d'un MNT [Massonnet et Rabaute 1993]. L'adjectif "différentiel", attribué à la technique, vient du fait qu'elle nécessite la connaissance de la topographie pour soustraire les effets liés au relief qui gênent l'identification de déplacements du sol. Dans la première méthode, l'information sur la topographie est fournie par un interférogramme non différentiel, alors que dans l'autre cas un MNT est utilisé.

La deuxième approche permet de s'affranchir des problèmes d'atmosphère ou de décorrélation inhérents à tout interférogramme. Cependant, elle exige un MNT de bonne qualité afin de limiter les erreurs topographiques lorsque la base de l'interférogramme devient trop importante. La disponibilité d'un MNT de bonne qualité sur la zone d'étude grâce à FTM nous a permis d'envisager la seconde approche.

- Description de la méthode.

La formation de l'interférogramme s'effectue en plusieurs sous-étapes. Tout d'abord une des deux images est choisie comme image dite "maîtresse" dans notre étude l'image maîtresse est celle du 2015. L'heure d'acquisition de la première ligne de l'image et la portée proximale (distance entre le satellite et les cellules de résolution de la première colonne) sont finement estimées à partir de l'orbite de l'image maîtresse et du MNT. Cela revient à caler précisément l'image maîtresse par rapport au MNT. La précision obtenue est de l'ordre de la moitié de la maille du MNT utilisé. Ensuite l'image dite "esclave" est rendue parfaitement superposable à l'image maîtresse. Pour cela, un modèle de déformation théorique entre les deux images est

calculé à partir des données orbitales et du MNT et des mesures de corrélation locales des deux images SAR. Ce modèle permet d'affiner l'heure d'acquisition de la première ligne et la portée proximale de l'image esclave. On obtient généralement une précision à la fois globale et locale du recalage meilleur que le vingtième de pixel. Une fois l'image esclave reéchantillonnée, l'interférogramme est formé en calculant la différence de phase entre les deux images dont est soustraite la phase topographique modélisée à partir des orbites et du MNT. En sortie, SNAP fournit l'image du produit des amplitudes des deux images, l'image de cohérence et l'image de phase, en géométrie SAR et éventuellement en géométrie MNT (figure 30).

Voici l'organigramme de travail lors de notre traitement pour avoir le déplacement dans la zone.

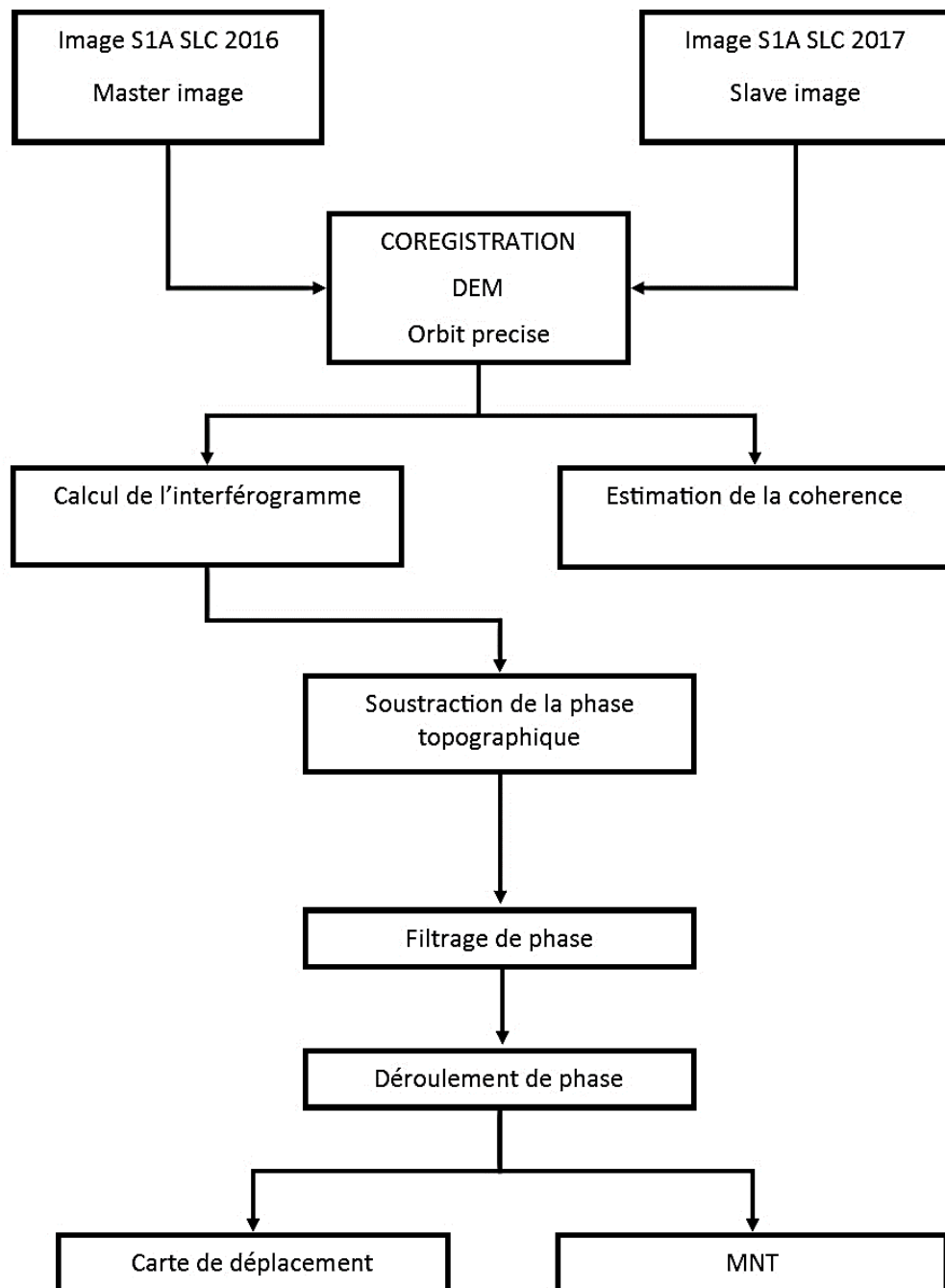


Figure 33:organigramme de travail

ii. Le choix de données SAR.

Durant notre travail, les données SAR exploitables en interférométrie radar couvrant Antananarivo provenaient essentiellement de quatre satellites ERS-1, ERS-2, RADARSAT et SENTINEL 1A et 1B. SENTINEL est opérationnel depuis 2015 et fonctionne également avec une longueur d'onde de 5,6 cm. Ses données sont caractérisées par la disponibilité d'une grande variété de modes d'acquisition avec notamment le choix entre plusieurs angles de visée allant de 20° à 49°, et plusieurs modes de résolution. Les données des satellites S1A et S1B sont compatibles entre elles et forment la plus importante base de données allant de 2013 à aujourd'hui. L'angle d'incidence non modulable, est de 23° au milieu de l'image, la longueur d'onde utilisée est de 5,6 cm.

Les images Sentinel sont téléchargeables sur le site de l'ESA. Mais ils sont très volumineux et nécessitent une grande capacité de l'ordinateur. Alors on a utilisé des images entre 2015-2017 dans cette étude. Ainsi pour la présente étude nous avons utilisé 3 images SAR, Sentinel 1A, toutes en orbites ascendants.

Nous avons choisi de n'utiliser que les données du Satellite SENTINEL. Nous justifions ce choix par plusieurs raisons. Le choix des données SENTINEL s'est imposé par le fait que les données SENTINEL offraient les meilleurs couples en termes de base et d'écart temporel pour notre étude. Un autre argument en faveur des données SENTINEL était leur disponibilité car ils sont gratuits.

iii. Les données orbitales et MNT

Nous avons utilisé les données orbitales fournies par ESA qui sont téléchargées sur leur site.

Le Modèle Numérique de Terrain (MNT), que nous avons utilisé à un pas de 40 m et une précision de 10 m en zone de haute montagne, de 5 m en zone de moyenne montagne et de 2 m en zone de plaine. Ce MNT a été réalisé à partir de photos aériennes et localement à partir de la digitalisation de plan topographique par FTM au 1/5000.

2. Le traitement.

• Calcul de l'interférogramme

A partir de ces 3 images, 2 interférogrammes ont été formés. La qualité des interférogrammes est globalement bonne, en raison de la bonne cohérence permise par l'urbanisation de la zone d'étude surtout celle de 2016-2017. Pour bien voir la différence de l'intervalle sur la qualité de l'interférogramme, on a généré deux interférogrammes à partir des

3 images. La date d'acquisitions de la première image est le 9 juin 2015, la deuxième le 12 décembre 2016 et la troisième 29 janvier 2017. Notre image maitresse est l'image prise en 2015 pour le premier interférogramme et celle de 2016 pour le deuxième interférogramme. Suite à ça, on a deux interférogrammes bien distincts.

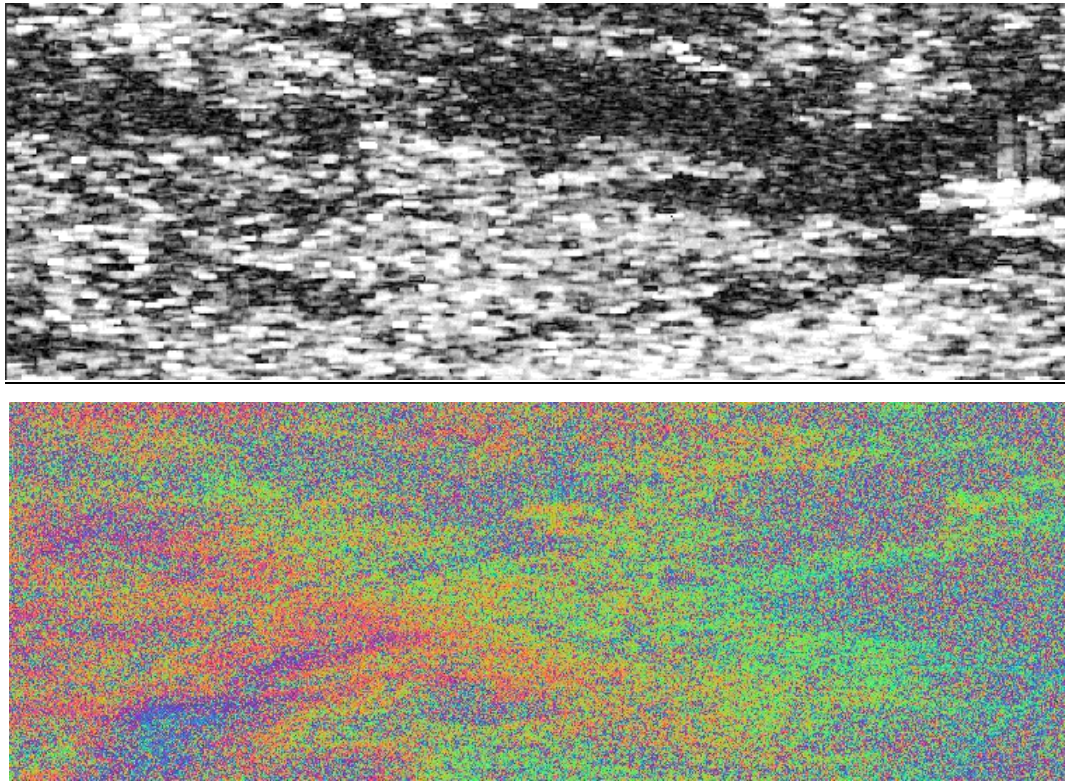


Figure 34: image de cohérence et interférogramme de 2016-2017 $B_{\text{perp}}=58\text{m}$ et Nombre de jours 48jrs.

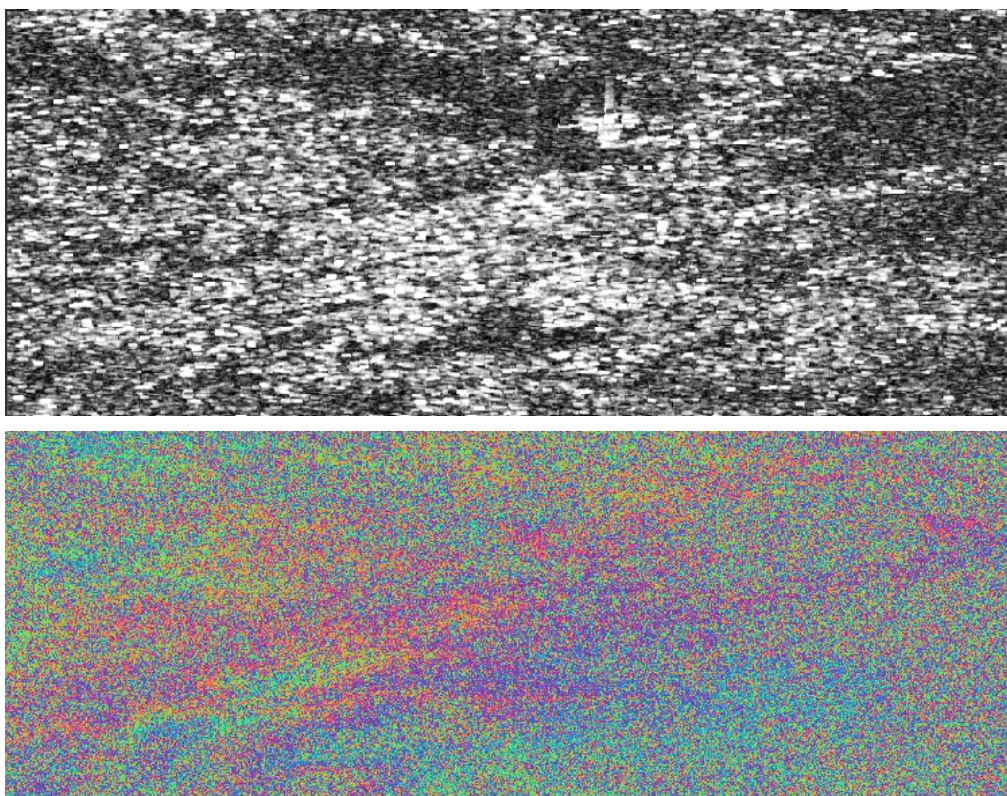


Figure 35: image de cohérence et interférogramme de 2015-2016 $B_{\text{perp}}=124\text{m}$ et Nombre de jours 552jrs.

On voit sur ces deux figures l'influence de la base et l'intervalle de l'acquisition qui a un impact sur la qualité de l'interférogramme. On remarque sur la figure 28, il y a plus de bruit par rapport à la figure 30. L'estimation de la cohérence est très importante pour évaluer la qualité de l'interférogramme. La cohérence fournit une évaluation de l'homogénéité spatiale d'un interférogramme sur une fenêtre donnée. Pour utiliser la dimension temporelle offerte par une série d'interférogrammes, une première possibilité consiste à déterminer les pixels pour lesquels la cohérence est toujours en dessous d'un certain seuil dans l'ensemble de la série. Cette approche est parfois appelée méthode du masque de cohérence. Ainsi, il est possible de sélectionner les pixels qui restent stables, c'est-à-dire ceux où la décorrélation reste faible quelle que soit la base ou l'intervalle temporel du couple. Ces pixels seront évidemment à privilégier pour mesurer le déplacement [e.g. Beauducel et al. 2000].

La valeur de la cohérence comme on a dit précédemment varie entre 0 et 1. Mais les informations ne sont pas encore quantifiées, alors il faut procéder à une soustraction de la phase topographique et au filtrage de phase.

- Soustraction de la phase topographique

Le principe de cette estimation est d'arriver à mettre en évidence une relation linéaire entre les bases des interférogrammes et les différences de phase interférométrique entre deux pixels dont on connaît l'altitude.

Cette opération consiste à estimer et soustraire la phase topographique de l'interférogramme. Cette opération est effectuée après la génération de l'interférogramme. Il nécessite également une entrée DEM, SRTM peut être utilisé, ou tout autre DEM externe supporté.

Dans la première étape, le DEM est codé en radar aux systèmes de coordonnées de l'image maître. Par point DEM, les coordonnées maîtresses (valeur réelle) et la phase de référence calculée sont enregistrées dans un fichier. Ensuite, la phase de référence est interpolée à la grille entière de ces coordonnées maîtresses. Une interpolation linéaire basée sur une triangulation Delaunay est utilisée.

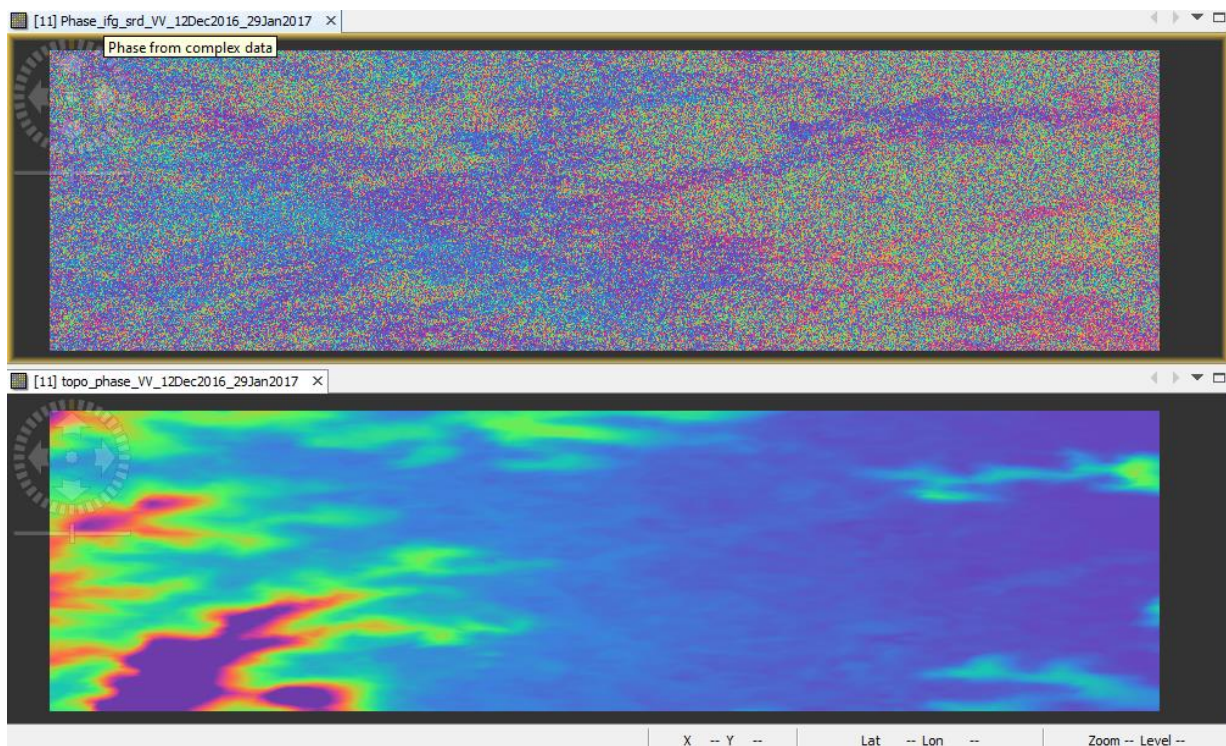


Figure 36: phase topographique soustrait.

- Filtrage de phase

Le filtrage de phase est une technique de prétraitement qui réduit considérablement les résidus dans la phase de déroulement de la phase ultérieure et améliore la précision de déballage

de la phase. La méthode mise en œuvre dans cet opérateur est un algorithme adaptatif non linéaire proposé par Goldstein et Werner [1] en 1998.

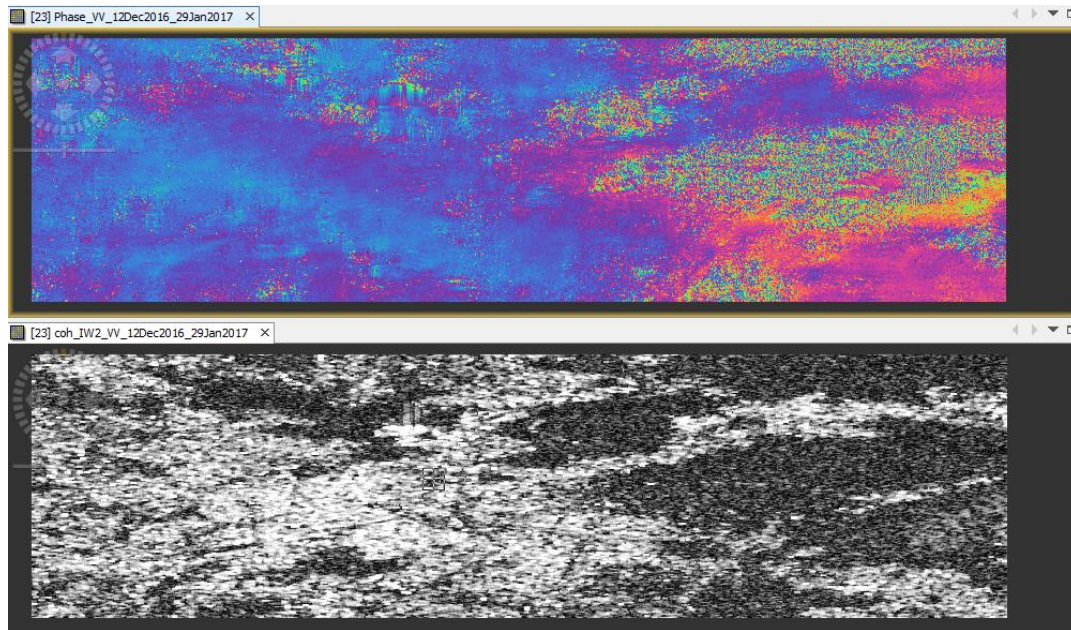


Figure 37: interférogramme filtré.

Après le déroulement de la phase, voici le déplacement observé dans un délai de 1mois.

C. LA DEFORMATION ACTUELLE ET LES POTENTIALITES DE L'INTERFEROMETRIE RADAR A ANKORONDRANO.

La partie A précédente a présenté le cadre géologique d'Ankorondrano, où le type de sols pourrait engendrer un mouvement s'étendant sur une longue durée. La déformation actuelle s'inscrit aussi dans ce cadre. Toutefois, en raison de la très courte durée d'observation, cette déformation actuelle n'est pas nécessairement représentative des déformations observées à l'échelle des temps géologiques.

Ce concept amène à distinguer deux types de déformation : la déformation en relation avec la géologie et la déformation causées par les charges sur la zone.

Avant de présenter les données disponibles sur les déformations dans la carte de déplacement, nous exposerons certaines limitations de l'interférométrie spécifiques dans notre zone. Ceci permettra de discuter ensuite des potentialités de mesure des déformations actuelles par interférométrie et de l'intérêt de cette approche par rapport aux données existantes.

1. Facteur limitant l'observation interférométrique sur la zone d'intérêt.

Au Chapitre II, nous avons examiné, d'un point de vue général, les limitations de l'observation des déplacements par interférométrie radar. Cette partie traite plus spécifiquement les limitations qui sont liées aux caractéristiques géographiques. Trois d'entre elles, les principales sont abordées ci-dessous : l'occupation du sol.

- Occupation du sol.

Les caractéristiques physiques du sol et leur évolution sont déterminantes dans l'observation interférométrique. Celle-ci s'étend sur une surface d'environ 5ha occupée par environ 5055 d'habitants en 2003. La population se concentre essentiellement dans le centre-ville, régions très fortement urbanisées. Ce qui entraîne une occupation très inégale du territoire. La conséquence sur l'image est les effets de repliement et d'ombre.

Afin d'aller plus loin que l'étude précédente dans la quantification des déplacements, nous avons entrepris de réaliser une compensation de l'ensemble des interférogrammes.

2. Les déformations actuelles.

i. Les informations fournies par l'interférométrie radar différentielle.

Parmi les différentes techniques géodésiques, l'interférométrie radar possède des caractéristiques bien spécifiques qui en font son intérêt. Ainsi, cette technique est bien adaptée à l'étude de déformations affectant de grandes surfaces et pouvant avoir une signature complexe avec des variations sur de courtes distances comme c'est le cas de notre étude. Pour l'étude de déformations, l'interférométrie peut s'appliquer à l'analyse des événements de moyennes amplitudes en fournissant des informations sur les déformations à petite longueur d'onde ayant lieu en champ proche ou lointain.

ii. Les déplacements observés.

- Etude de 2015-2016 (nombres d'images : 2 ; Bperp : 124m ; nombre de jours : 552jours)

Les résultats de la compensation sont illustrés dans la Figure 34 par une série d'interférogrammes compensés, exprimés par rapport à l'image 6290. L'interférogramme nous révèle un déplacement vers le radar de l'ordre de -28 à 26 mm durant la période de 552 jours.

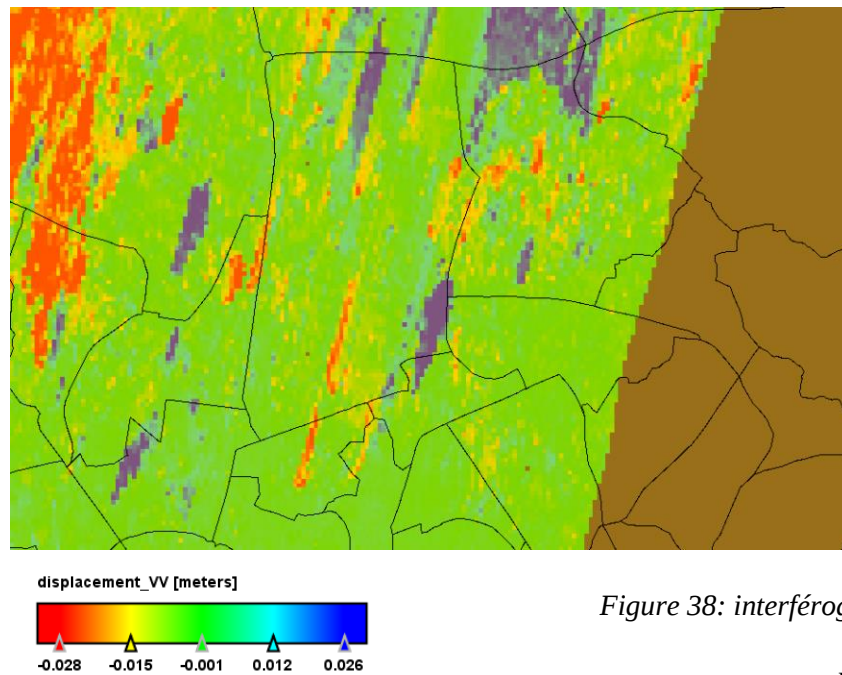


Figure 38: interférogramme de 2015

avec limite fokontany.

- Etude de 2016-2017 (nombres d'images : 2 ; Bperp : 58m ; nombre de jours : 48jours).

Comme nous l'avons attendu, avec une si courte durée, il n'y a pas d'évolution. L'observation de phénomène de subsidence sur un période de 1 mois de 2016-2017 nous révèle un mouvement de -36 à 07mm sur la zone d'étude.

Une déformation qui n'est pas régulière dans le temps représente le cas le plus général (celle de notre étude). Il n'est alors possible d'obtenir des informations que sur les déplacements cumulés ayant eu lieu entre les différentes dates d'acquisition successives. Pour étudier l'évolution de ces déplacements cumulés au cours du temps à partir d'une date d'acquisition donnée, il faut prendre en compte les interférogrammes formés avec l'image correspondant à cette date et les différentes images qui lui succèdent. Cependant, souvent, plus l'intervalle de temps augmente, la décorrélation temporelle est forte, jusqu'à rendre l'interférogramme illisible (voir Figure 28). Un problème similaire se pose lorsque la base d'un interférogramme est trop grande, provoquant une décorrélation spatiale trop importante.

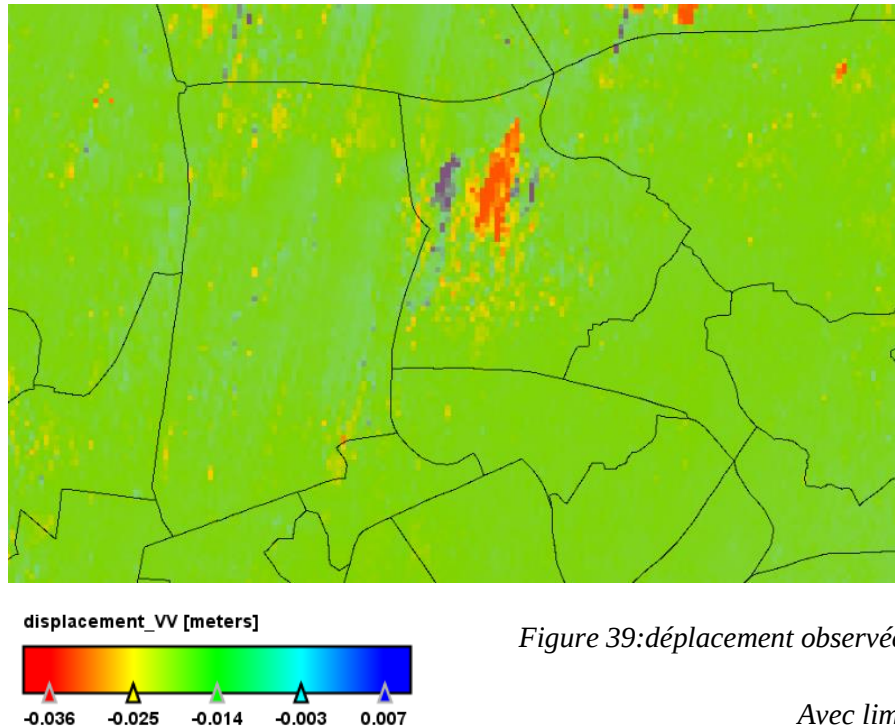


Figure 39: déplacement observée dans la zone

Avec limite fokontany.

Pour améliorer l'information fournie par ces interférogrammes très bruités, il est possible de reconstituer un interférogramme équivalent mais de meilleure qualité à partir d'interférogrammes à plus court intervalle de temps ou avec des bases plus petites. Pour cela, on utilise le processus suivant, décrit ici pour trois images A, B et C. Avec ces images, il est possible de réaliser trois couples : AB, AC et BC. Pour le déplacement, on peut écrire que la somme des interférogrammes AB et BC donne un interférogramme équivalent à AC (figure 39). Ceci est également vrai pour les erreurs topographiques et orbitales ainsi que pour les erreurs atmosphériques. Par contre, concernant les erreurs de décorrélation temporelle ou spatiale, ce n'est plus le cas. Ainsi en additionnant deux images AB et BC où la décorrélacion

est faible, on peut obtenir un pseudo-interférogramme AC où la décorrélation est plus faible que dans le véritable interférogramme.

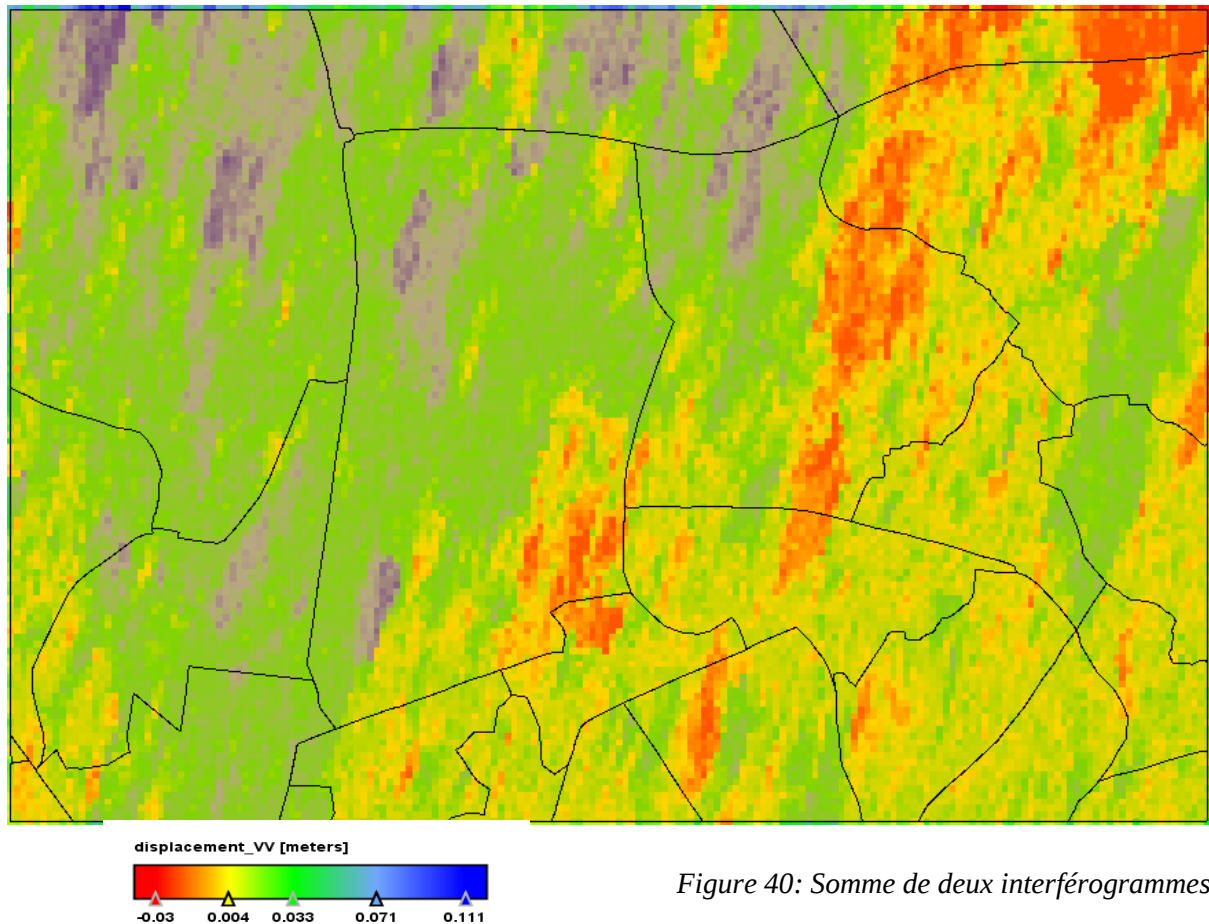


Figure 40: Somme de deux interférogrammes

Avec limites fokontany.

Toutefois, il faut noter que la somme des deux interférogrammes contient un bruit plus important que celui présent dans AB ou BC. Si on effectue la somme sur des interférogrammes non déroulés, lorsque le gradient de franges et/ou le bruit de l'interférogramme résultant deviennent trop grands, l'interférogramme peut devenir illisible [Massonnet et al. 1996c]. Ce phénomène rend l'opération inutile. Le déroulement des interférogrammes peut alors s'avérer utile.

L'observation de l'évolution temporelle du phénomène est limitée par les dates d'acquisition des images SAR disponibles. On a seulement accès aux déplacements finis entre deux dates. Ainsi, nous pensons que cette étude mériterait d'être approfondie, en optimisant la corrélation d'images SAR à l'étude des déplacements.

- Comparaison avec la topographie

L'un des points le plus frappant qui ressorte de nos résultats est la similitude entre la déformation actuelle et la topographie. La Figure 41 illustre cette ressemblance.

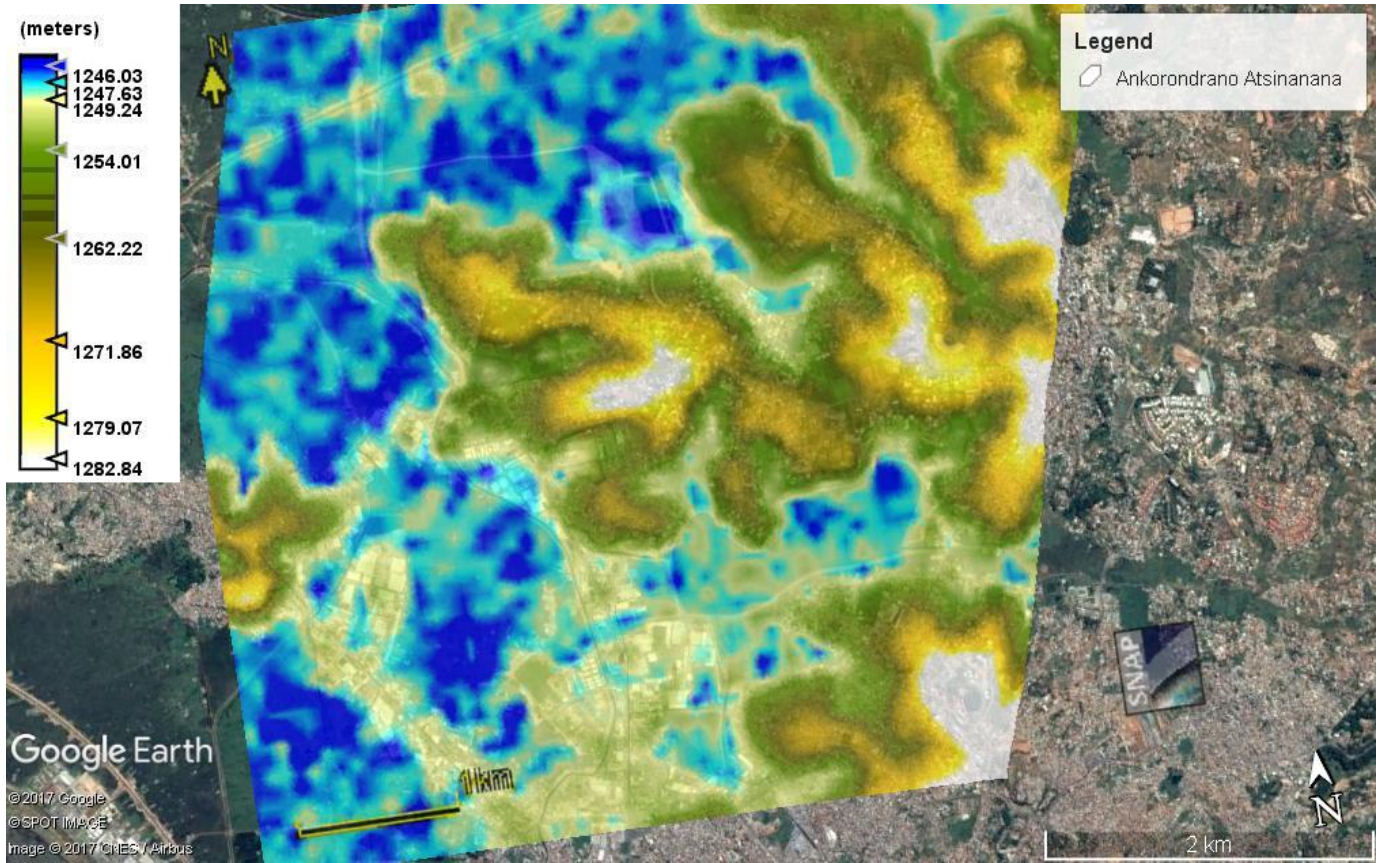


Figure 41: MNT Interférométrique de 2016-2017

- Discussion.

En partant des résultats obtenus pour la période 2015-2016,

Pour expliquer les déformations, on va analyser la géologie qu'on a vue précédemment. On s'est penché sur la caractéristique des sols dans la zone, les sols hydromorphes. Ils sont caractérisés par une saturation régulière en eau. Elles sont généralement sur les points topographiques de bas niveau ce qui est notre cas dans la zone d'étude. Du fait de son topographie et la forte probabilité de l'existence d'une nappe phréatique, la zone est donc en mouvement permanent avec la variation d'eau et le sol devient très compressibles due à son teneur en ce qui engendre une instabilité.

Des remblayages ont été faits sur cette zone récemment pour faire place à ces constructions. Les poids de ces bâtiments amplifient par les vibrations des trafics ce qui est

fréquent dans cette zone. Tous ces phénomènes en plus de la variation d'eau dans la nappe entraînent ces faibles déformations.

Sur l'interférogramme de 2016-2017, comme on a dit précédemment, sur un court intervalle on s'attendait à un résultat presque nulle. On a fait cette étude de 2016-2017 pour voir la différence entre la qualité des interférogramme en fonction de la base et de la cohérence. Voici une étude similaire faite dans la ville de paris mais qui a utilisé des images SAR nombreux.

- Application à l'étude de la ville de Paris (*Techniques innovatrices d'interférométrie radar pour la surveillance opérationnelle de déformation des sols par rapport à des risques géologiques*).

La figure 42 montre une série d'images ERS de la ville de Paris couvrant la période Août 1997 – Octobre 1999. Parmi toutes les combinaisons possibles, certaines présentent un intérêt plus particulier à la fois pour les périodes couvertes, mais aussi pour leur qualité en termes de rapport signal sur bruit (paires en rouge).

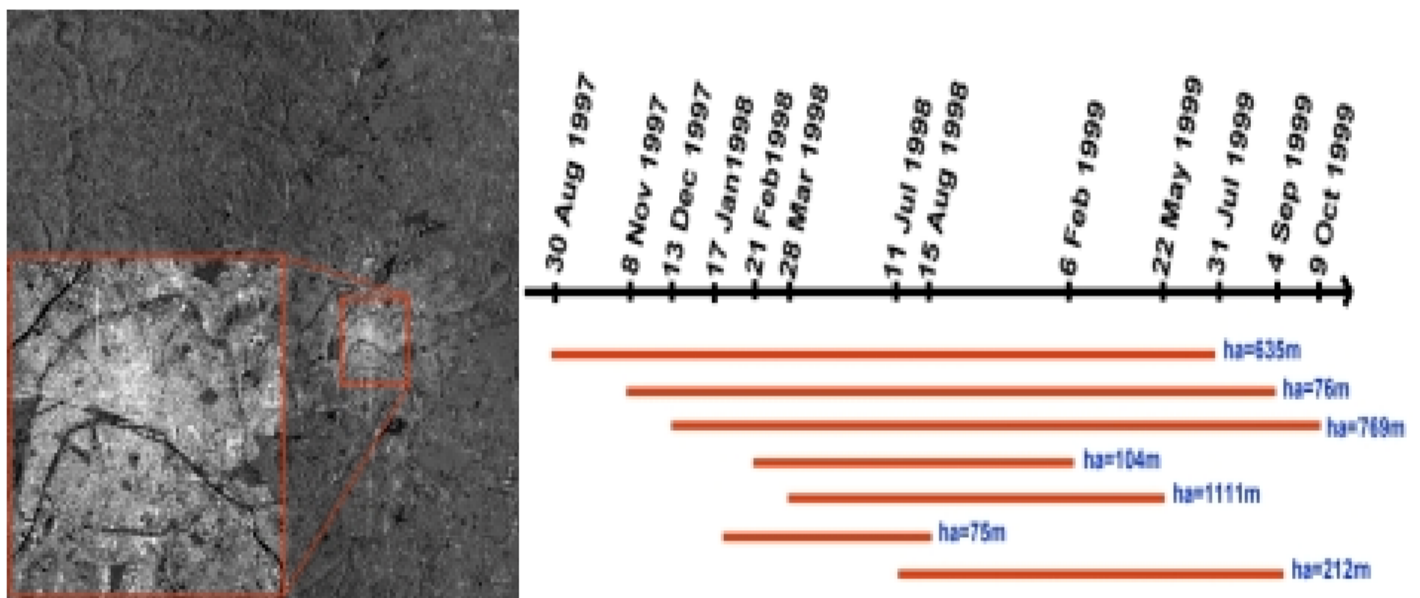


Figure 42: A gauche : image d'amplitude de la ville de Paris. A droite : combinaisons interférométriques couvrant la période 1997-1999. Le paramètre ha correspond à l'altitude d'ambiguïté des interférogrammes.

Une zone de subsidence d'amplitude 1.5 cm (figure 42) avait été détectée par interférométrie radar par Fruneau et Sarti (2000) au même endroit durant la période 1993-1996.

Cette période correspond à un grand chantier souterrain ayant nécessité le pompage d'une importante quantité d'eau souterraine, probablement à l'origine de la subsidence observée à l'époque. La corrélation du soulèvement avec la remontée du niveau piézométrique durant l'été suggère que le soulèvement correspond au réajustement partiel des terrains ayant subsidé lors des travaux de pompage 1998 (Le Mouélic et al. 2002).

Par rapport à cette étude effectuée à Paris sur la gare St Lazare en Août 1997 – Octobre 1999 qui a utilisé 30 images ERS, il y a une différence car on sait que plus le nombre d'image est nombreux alors plus la précision est meilleure suivi d'autre condition bien sûr. A Paris ils ont pu observer un profil temporel de la gare grâce au 30 images ERS.

Le traitement d'un plus grand nombre d'images permet de reconstituer l'historique des déformations sur la période d'étude, et ainsi de remonter à l'évolution dynamique des mouvements du sol. Pour suivre l'évolution dans un intervalle de temps déterminé, il faut utiliser au moins 25 images radar.

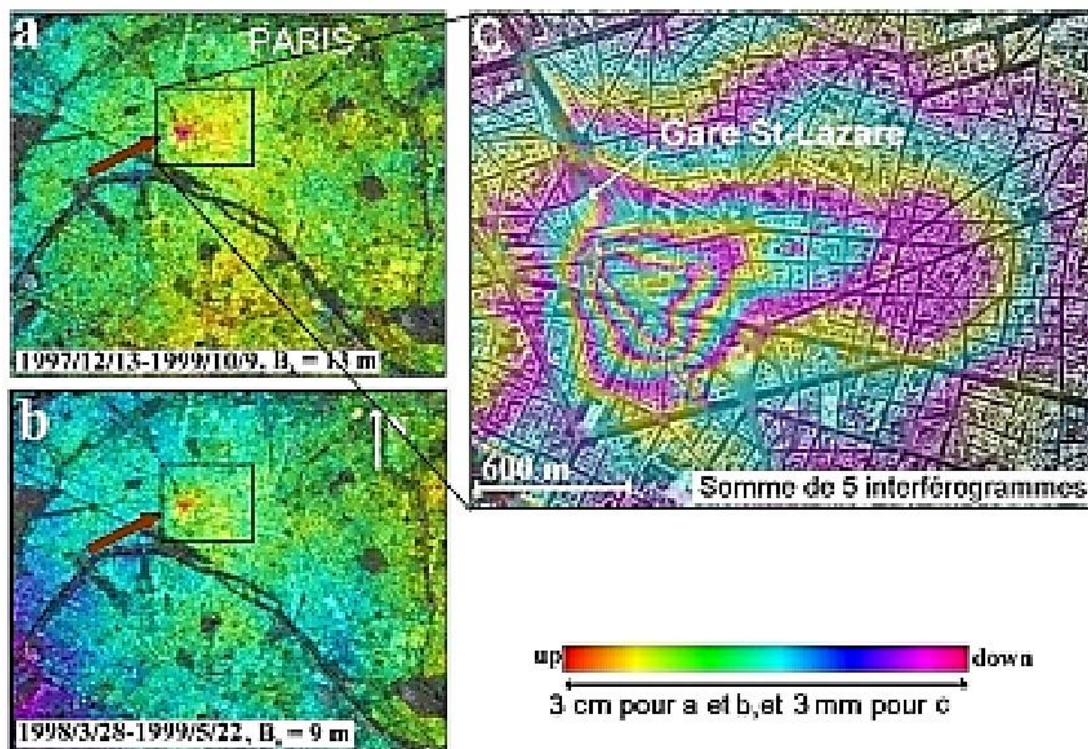


Figure 43:(a) et (b) interférogrammes sur la ville de Paris.

3. La place de la technique par rapport à nivellement et le GPS.

Madagascar possède des réseaux classiques, locaux ou couvrant toute l'île, mesurés par la géodésie terrestre (nivellement, triangulation ou trilatération). La mesure régulière de ces réseaux peut mettre en évidence des déplacements dans l'île.

Le réseau GPS fournit une vision globale des déplacements ayant lieu dans une zone. Bien que les stations GPS enregistrent les trois composantes du déplacement, la composante

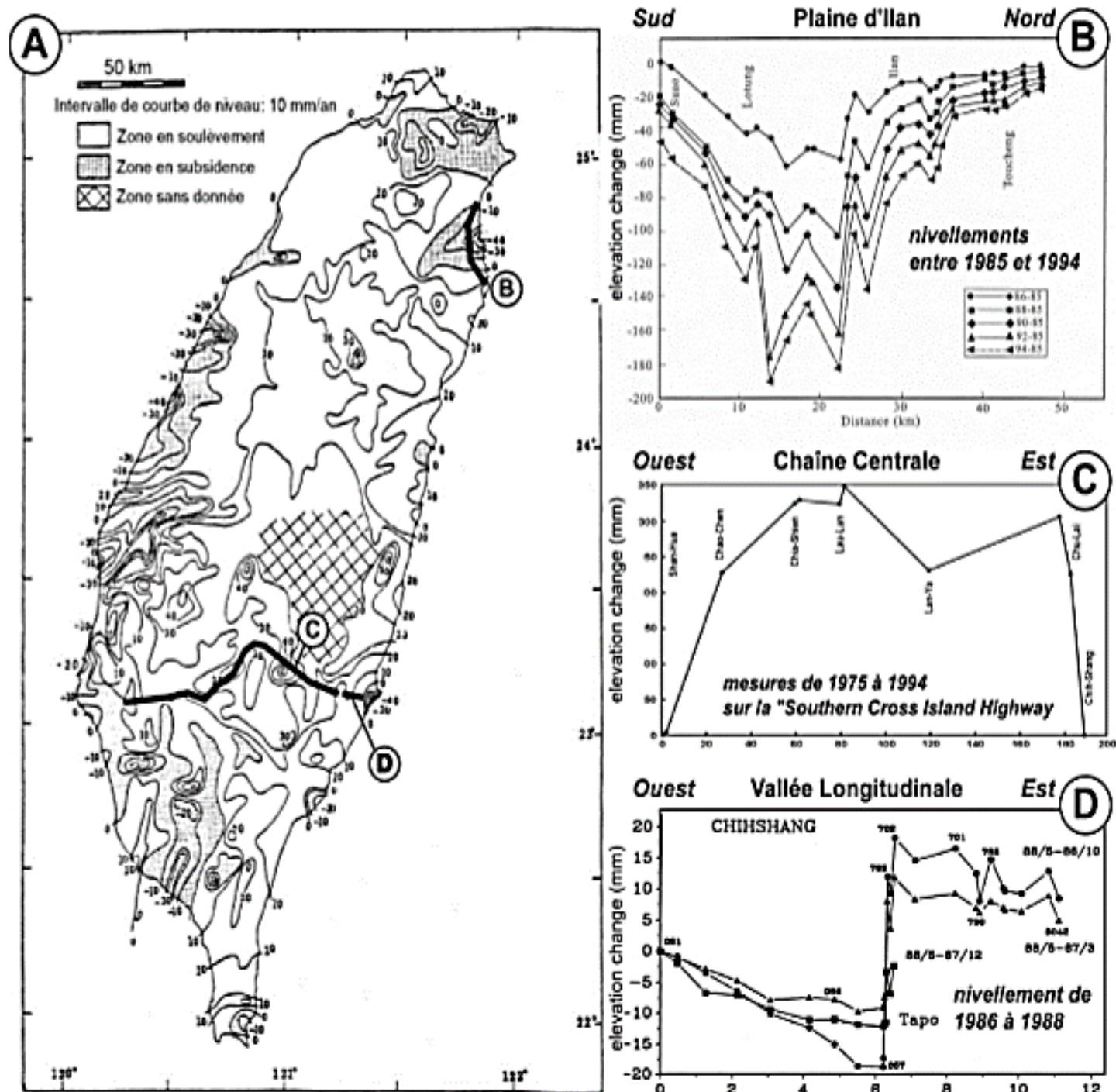


Figure 44: déplacements verticaux à Taiwan

A - Carte des déplacements verticaux, issue de la comparaison de deux triangulations du réseau géodésique (1921 et 1979) d'après Chen [1984]. Les traits noirs épais indiquent la localisation des profils B, C et D.

B - Données de nivellement dans la plaine d'Ilan entre 1985 et 1994. D'après Liu [1995].

C - Variation d'altitude calculée à partir de mesures de nivellement effectuées le long de la "southern Cross-Island Highway" entre 1975 et 1994, d'après Liu et al, (données disponibles sur Internet à l'adresse suivante : <http://www.sinica.edu.tw/~iuggwww/IAG/activities/iesas.htm>).

D - Variation d'altitude calculée à partir de données de nivellement effectuées entre 1986 et 1988, en suivant une ligne E-W traversant la Vallée Longitudinale (d'après Yu et Liu [1989]). La discontinuité de la faille de la Vallée Longitudinale apparaît clairement.

Les données de triangulation sont nettement moins précises que celles de nivellement en ce qui concerne les déplacements verticaux. Ceci expliquerait les différences significatives entre les données de nivellement disponibles et la carte (voir Figure 44).

4. Intérêt et limites des données interférométriques

L'ordre de grandeur des déformations à Ankorondrano est compatible avec les capacités de l'interférométrie. L'interférométrie est particulièrement sensible aux déplacements verticaux, ce qui complète bien les capacités du GPS. Pour l'étude de telles déformations, la forte densité d'échantillonnage de l'interférométrie radar est un atout par rapport aux autres méthodes existantes. Cette caractéristique permet de traiter de problématiques concernant la continuité des déformations.

CHAPITRE IV. DISCUSSIONS SUR LA METHODE.

Dans le chapitre précédent, nous avons vu les mesures données par les interférogrammes et l'influences qui ont été cités dans le deuxième chapitre sur la qualité de l'interférogramme. Comme on a dit dans l'introduction, le but principal de cette étude est la technique d'interférométrie. Ainsi dans ce chapitre, on va faire une discussion sur la méthodologie.

Bamler et Hartl [1998] soulignent la difficulté de définir l'interférométrie radar (fréquemment abrégé en INSAR ou InSAR), devenue un terme assez générique du fait de la variété des applications qui y font référence actuellement. Ils proposent d'utiliser le terme interférométrie radar pour désigner "toutes les méthodes qui emploient au moins deux images SAR complexes afin d'obtenir des informations supplémentaires sur les objets présents dans une seule image SAR, en exploitant l'information de phase du signal SAR".

Les principaux critères pour différencier ces différentes méthodes et leurs mises en œuvre sont : le type de support du radar (sol, avion, navette spatiale, satellite) et les paramètres d'acquisition qui changent entre la première et la deuxième image. En effet, pour apporter de l'information, la deuxième image doit avoir au moins un paramètre d'acquisition différent de la première : cela peut être soit l'instant d'acquisition, soit la position et l'orientation du radar, soit la fréquence ou la polarité de l'onde (émise ou reçue) ou encore le mode d'acquisition [Bamler et Hartl 1998]. Le choix de ces paramètres, pas toujours possible, dépend de l'application envisagée : topographie [Zebker et Goldstein 1986 ; Madsen et al. 1993 ; Tarayre 1996 ; Ferretti et al. 1999a ; Rabus et al. 2003], caractérisation de l'état du sol et cartographie thématique [Wegmuller et Werner 1997b ; Strozzi et al. 2000 ; Wegmuller et al. 2000 ; Reigber et al. 2001], atmosphère [Hanssen et al. 1999 ; Hanssen 2001 ; Moiseev et Hanssen 2003], courant océanique de surface [Goldstein et Zebker 1987 ; Ainsworth et al. 1995] ou bien déplacements du sol [Massonnet et Feigl 1998].

Pour l'étude des déplacements, idéalement, le seul paramètre d'acquisition qui doit changer entre les deux images est la date d'acquisition. Comme principal résultat, l'interférométrie radar différentielle fournit une image d'une zone couverte par le couple d'images SAR, appelée interférogramme, qui peut être lue comme une carte des déplacements du sol par rapport au satellite (figure 34). A ce jour, les seules images SAR couvrant des surfaces suffisamment grandes et avec une répétition temporelle suffisante pour l'étude de déformations du sol, sont celles acquises depuis des satellites. Un tableau récapitulant les caractéristiques des différentes missions SAR par satellites est donné en Annexe 1. Il existe

aussi de nombreux radars imageurs aéroportés (avion ou navette spatiale). Leurs couvertures spatiales restent cependant très réduites, ainsi que leurs possibilités d'obtenir des images d'une même zone à des dates différentes [Zebker et al. 1992 ; Rosen et al. 1996]. L'utilisation d'avion en interférométrie radar différentielle reste actuellement délicate en raison des problèmes liés à la stabilité de la plate-forme durant l'acquisition des images SAR [Reigber et Scheiber 2003].

Mais s'il est possible de parfaitement maîtriser la position et l'orientation du radar, ce qui n'est pas toujours praticable lorsque l'instrument est à bord d'un satellite. La plupart du temps, la date d'acquisition n'est pas le seul paramètre d'acquisition changeant entre les deux images. : Il faudra donc prendre en compte les différences entre les deux images, causées par les changements de position et d'orientation du satellite. Aux changements introduits par les paramètres d'acquisition, il faut ajouter tous les changements du milieu observé qui ne sont pas liés purement au déplacement de la surface. Il s'agit par exemple des changements relatifs à l'atmosphère et aux objets présents à la surface. La prise en compte de tous ces changements "parasites" entre les deux images SAR, qui se superposent à ceux liés au déplacement, est donc indispensable.

A. CARACTERISTIQUE DE LA TECHNIQUE DE L'INTERFEROMETRIE.

Pour pouvoir faire une analyse de la méthodologie, il est préférable de résumer les caractéristiques de la technique adoptée.

La principale quantité observée en interférométrie radar différentielle correspond à la mesure d'une double différence de phase, spatiale et temporelle. La première différence (temporelle), $\Delta\varphi$, s'effectue entre la phase de deux images SAR. Cette différence n'est pas directement utilisable en termes de déplacement, à cause notamment de l'ambiguïté de la phase, de l'incertitude sur les orbites et des effets atmosphériques à grande longueur d'onde. Pour résoudre ce problème, une deuxième différence (spatiale), $\Delta(\Delta\varphi)$, est réalisée, cette fois entre deux pixels d'un interférogramme. La mesure devient relative. Dans la quantité $\Delta(\Delta\varphi)$, différentes couches d'information sont présentes : les déplacements finis du sol ; la géométrie de prise de vue du couple (position du satellite à chaque passage) et le relief ; les changements des états atmosphériques entre les deux instants d'acquisition ; les changements de l'état de la surface observée. Parmi ces différentes informations, ce que certains considèrent comme un signal peut représenter des perturbations pour d'autres. Tout dépend de l'objectif de l'étude. Pour notre propos, la déformation est le signal et les autres composantes sont les perturbations, sources d'incertitude.

De ce point de vue, les points importants à retenir, concernant les caractéristiques de la mesure en termes de déplacement, sont :

- La quantité mesurée qui est le déplacement vers le radar (DVR), c'est-à-dire la composante du vecteur déplacement réel selon la direction de visée du radar. Des déplacements différents peuvent donner le même DVR : c'est une première ambiguïté de la mesure.
- La mesure du déplacement qui est connue à un nombre entier de demi-longueurs d'onde près : c'est une deuxième ambiguïté de la mesure.
- Le déplacement vers le radar qui est donné de façon relative : le DVR d'un point est déterminé par rapport à un autre point présent sur l'interférogramme.
- La mesure du déplacement qui est entachée d'une imprécision qui a de multiples origines et qui peut être suffisamment grande pour rendre la mesure non significative.

Concernant les limites de la mesure, les points importants à retenir sont :

- L'extension d'un phénomène observable est limitée par la taille de la cellule de résolution de l'interférogramme, qui est celle des images SAR (environ 5x25 m en terrain plat pour ERS). Cette taille varie fortement selon la pente du terrain, suivant la direction des distances. L'extension maximale est limitée à la zone couverte par le couple d'images SAR utilisé, elle peut être étendue en concaténant plusieurs scènes.
- Selon le relief, la mesure n'est pas accessible en tout point de la zone observée à cause des zones d'ombre, ou bien elle est difficilement interprétable, à cause de l'ambiguïté des zones de renversement.

B. DISCUSSION

On a vu précédemment les caractéristiques de la méthode d'interférométrie différentielle. On sait que cette méthode est très précise mais qui dépend beaucoup de nombreux paramètres.

Concernant le choix de la date d'acquisition, on a vu que l'intervalle entre deux dates a une conséquence sur la base interférométrique. La qualité de l'interférogramme varie selon la distance des orbites. Dans notre étude, on a choisi 3 images entre 2015-2017. Les deux images entre 2015-2016 avec 552 jours d'intervalle et une baseline perpendiculaire de 124m tandis qu'entre 2016-2017 avec 48 jours et une baseline perpendiculaire de 58m. On a fait exprès ce choix pour voir l'influence de la base sur la qualité de l'interférogramme. On a dit dans le chapitre précédent, la base et la date agit de façon paradoxale car un intervalle de temps suffisamment long implique que la base est très longue ce qui entraîne une stabilité de l'interférogramme mais qui a une conséquence sur la phase à cause des évolutions sur la réalité en surface.

L'incertitude sur la mesure du déplacement est variable sur un même interférogramme et peut être suffisamment grande pour rendre la mesure non significative. Une estimation de cette incertitude est donc indispensable. On peut distinguer : L'incertitude liée à l'erreur sur la phase, l'évolution de l'état de surface et à la différence d'angle de visée entre les deux acquisitions (fonction de la base du couple, du relief, et du type de surface). Cela crée un bruit de décorrélation sur l'interférogramme dont la valeur de cohérence donne une première estimation. La nature des cellules de résolution est un facteur important de cette incertitude. Certains pixels particuliers ont une décorrélation toujours faible quel que soit l'interférogramme ("Permanent Scatterers"). L'incertitude liée aux erreurs faites lorsque la phase topographique est soustraite de l'interférogramme : les erreurs orbitales (temporellement décorrélées, variant lentement et régulièrement sur l'interférogramme) et les erreurs de MNT (proportionnelles à la base). L'incertitude liée aux changements d'état atmosphérique entre les acquisitions (temporellement décorrélée mais spatialement corrélée).

L'estimation des deux dernières sources d'incertitude est difficile à partir d'un seul interférogramme mais peut être améliorée en utilisant une série d'interférogrammes. La réduction de ces incertitudes est possible suivant plusieurs stratégies qui dépendent du phénomène observé et du nombre d'images disponibles.

L'opération de déroulement, nécessaire lorsque des sauts de phase sont présents dans l'interférogramme, n'est pas possible lorsque le gradient de la phase interférométrique est trop

fort : la variation de la phase doit être inférieure à π entre deux pixels voisins quelle qu'en soit la cause. Puisque la mesure du déplacement est relative d'un pixel à l'autre, le gradient des déplacements pose deux autres limites : Il faut que le déplacement d'un pixel par rapport à l'autre soit suffisamment fort pour ne pas être masqué par les incertitudes. Il faut que le déplacement d'un pixel par rapport à l'autre soit suffisamment faible pour permettre l'opération de déroulement. De plus, il faut que la phase interférométrique due au déplacement varie peu à l'intérieur de la cellule de résolution. Car en l'absence de stabilité de la phase dans la cellule, une incertitude, similaire à celle créée par la base, peut être introduite. Ces limites étant liées à la taille d'une cellule de résolution, elles dépendent fortement du relief de la zone observée.

CONCLUSIONS GENERALES

L'interférométrie radar est un outil de mesure des déplacements du sol ; ses potentialités ont été clairement démontrées durant cette dernière décennie et cette technique a déjà fait ses preuves dans son application à la tectonique active. L'analyse des images SAR acquises par les satellites radar d'observation de la Terre permet de déterminer des cartes de déformation du sol qui sont étendues, précises et denses.

L'interférométrie radar différentielle se démarque des autres sources de mesure des déplacements (GPS, réseaux géodésiques conventionnels, mesures de terrain, etc.) par son potentiel à effectuer un échantillonnage très dense d'observations (plusieurs centaines de mesures par kilomètre carré). Seule la technique de mesure des déplacements horizontaux par corrélation d'images peut rivaliser avec une telle couverture spatiale du sol. Toutefois, dans sa mise en œuvre actuelle, cette dernière technique est limitée à la mesure de forts déplacements horizontaux (supérieurs à 50 cm). L'utilisation d'images à plus haute résolution (photos aériennes ou images satellites à haute résolution) devrait permettre d'abaisser cette limite mais en restant au-delà de la précision centimétrique de l'interférométrie radar.

Le potentiel de l'interférométrie radar est très variable d'une région à l'autre, notamment en fonction des caractéristiques du terrain observé. A ankondrano, il ressort de notre étude, effectuée à partir de données radar SENTINEL 1A, que l'interférométrie radar peut fournir des mesures exploitables principalement dans les zones de plaine, car celles-ci sont urbanisées.

Dans les zones fortement urbanisées, comme c'est le cas au centre des grandes villes, la mesure peut être faite avec des interférogrammes couvrant plusieurs années. En dehors de ces zones, il apparaît que la mesure devient plus délicate.

Avant le présent travail, cette technique n'avait pas été appliquée à Madagascar, bien que l'île soit une région où la déformation active est importante. Les caractéristiques géographiques de l'île telles que son fort relief, son important couvert végétal ou son climat, se présentaient comme des facteurs défavorables à une telle étude. L'objectif de ce travail était d'évaluer les capacités de la technique à fournir des informations nouvelles sur un phénomène par rapport aux autres méthodes existantes, et de montrer comment s'intègrent ces informations dans une analyse d'un phénomène.

Au cours de ce travail, nous avons fait particulièrement référence aux données issues du satellite Sentinel. Sur le satellite Sentinel, il existe un mode par défaut qui permet des applications interférométriques. Ce n'est pas toujours le cas sur d'autres satellites (par exemple

RADARSAT) où un même instrument SAR utilise plusieurs modes d'acquisition mais incompatibles entre eux pour l'interférométrie. Dans ce cas, la nécessité d'une grande régularité des acquisitions entre parfois en contradiction avec la diversité des modes acquisition.

Le développement et le lancement de nouveaux satellites comme SENTINEL, améliore la constellation. Cette diversité donne de meilleures possibilités pour combiner des angles de visée différents afin de mieux contraindre le déplacement. La programmation d'un système d'observation spécifiquement dédié à l'étude des séismes et du cycle sismique est discutée depuis quelques années.

La principale limitation de la mesure des déplacements est la couverture spatiale, qui est limitée à l'agglomération. Afin d'améliorer l'étendue des mesures, l'approche de type "Permanent Scatterers" nous semble bien adaptée à la région. En effet, la principale limite de cette méthode est la nécessité de pouvoir disposer d'une densité suffisante de "Permanent Scatterers" (PS) dans les interférogrammes. Il ressort des études déjà effectuées avec cette méthode que la densité de Permanent Scatterers (étude sur Paris) est plus importante dans les zones urbaines qu'en dehors (même dans des régions désertiques). Nous pensons que la zone est suffisamment urbanisée pour assurer le maillage de PS nécessaire. Cette extension des mesures permettrait de mieux comprendre la relation entre le mouvement du sol et la géologie.

Bibliographie

1. Antonello, G., N. Casagli, P. Farina, J. Fortuny, D. Leva, G. Nico, A. J. Sieber et D. Tarchi (2003). A ground-based interferometer for the safety monitoring of landslides and structural deformations. in: IGARSS 2003. IEEE 2003 International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proc., Toulouse, France (21-25 July 2003), TU02_1020.
2. Arnaud, A. (1997). Etude et analyse des artefacts dans la construction de l'image interférométrique radar, Ph.D. Thesis, D. Massonnet th. dir., LIMA-IRIT, ENSEEIHT, France, 194 p.
3. Avouac, J. P., L. Bollinger, J. Lave, R. Cattin et M. Flouzat (2001). Le cycle sismique en Himalaya. conference-debat de l'academie des sciences, Failles et seismes, Paris, France (20 mars 2000), Comptes rendus de l'Académie des sciences (Serie II Sciences de la terre et des planètes) 333(9): pp. 513-529.
4. Baer, G., D. T. Sandwell, S. Williams, Y. Bock et G. Shamir (1999). Coseismic deformation associated with the November 1995, Mw=7.1 Nuweiba earthquake, Gulf of Elat (Aqaba), detected by synthetic aperture radar interferometry. Journal of Geophysical Research 104(B11): pp. 25221-25232.
5. Baer, G., U. Schattner, D. Wachs, D. T. Sandwell, S. Wdowinski et S. Frydman (2002). The lowest place on Earth is subsiding - An InSAR (interferometric synthetic aperture radar) perspective. Geological Society of America Bulletin 114(1): pp. 12-23.
6. Bamler, R. et D. Just (1993). Phase statistic and decorrelation in SAR interferograms. in: IGARSS'93. IEEE 1993 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Tokio, Japan (18-21 August) pp. 980984.
7. Bamler, R. et P. Hartl (1998). Synthetic aperture radar interferometry. Inverse Problems 14(4): pp. R1-R54.
8. Barrier, E. et J. Angelier (1986). Active collision in eastern Taiwan: The Coastal Range. Tectonophysics 125(1-3): pp. 39-72.
9. Bawden, G. W., W. Thatcher, R. S. Stein, K. W. Hudnut et G. Peltzer (2001). Tectonic contraction across Los Angeles after removal of groundwater pumping effects. Nature (London) 412(6849): pp. 812-815.

10. Beauducel, F., P. Briole et J. L. Froger (2000). Volcano-wide fringes in ERS synthetic aperture radar interferograms of Etna (1992-1998) : Deformation or tropospheric effect ?, *Journal of Geophysical Research* 105(B7): pp. 16391-16402.
11. Bechor, N., P. Segall, J. McGuire, Y. J. Hsu et S. B. Yu (2001). Post-seismic Slip Following the 1999 ChiChi Taiwan Earthquake. in: 2001 Joint Geosciences Assembly, Int. Symposium on earthquake and active tectonics Proc., Taipei p. 15.
12. Berardino, P., G. Fornaro, R. Lanari et E. Sansosti (2002). A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 40(11): pp. 2375-83.
13. Centre National d'Etudes Spatiales (C.N.E.S) (1997). PRISME/DIAPASON Software package, version 1.0. Toulouse, France, CNES.
14. Chang, C. P. (2001). Reconstruction de la croissance d'une chaîne de montagnes : le Sud de Taiwan, Ph.D Thesis, J. Angelier th. dir., Laboratoire de Tectonique (UMR 7072), Université Pierre et Marie Curie, Paris, France, 359 p.
15. Chang, C. P., C. T. Wang, T. Y. Chang, K. S. Chen, L. S. Liang, E. Pathier et J. Angelier (in revision, 2004). Application of SAR Interferometry to a large thrusting deformation: The 1999 Mw=7.6 Chichi earthquake (Central Taiwan). *Geophysical Journal International* (??): p.??
16. Chang, H. C., C. W. Lin, M. M. Chan et S. T. Lu (1998). An Introduction to the Active Faults of Taiwan: Explanatory Text of the Active Fault map (in Chinese with English abstract). CSG Publication. vol. 10, 103, Central Geological Survey of Taiwan, Taipei, Taiwan
17. Chang, S. L., P. T. Hsiao, J. Yuan et W. R. Chi (1983). The neogene series, tectonics evolution and petroleum potentialities of Southern Taiwan. *American Association of Petroleum Geologists Special Bulletin*: pp. 577-587.
18. Chen, K. C., B. S. Huang, J. H. Wang et H. Y. Yen (2002). Conjugate thrust faulting associated with the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake sequence. *Geophysical Research Letters* 29(8): pp. 118-1.
19. Chen, W. S., B. S. Huang, Y. G. Chen, Y. H. Lee, C. N. Yang, C. H. Lo, H. C. Chang, Q. C. Sung, N. W. Huang, C. C. Lin, S. H. Sung et K. J. Lee (2001). 1999 Chi-Chi earthquake; a case study on the role of thrust-ramp structures for generating earthquakes. Dedicated issue on the Chi-Chi, Taiwan earthquake of 20 September 1999, *Bulletin of the Seismological Society of America* 91(5): pp. 986-994.

20. Chen, W. S., Y. G. Chen, R. C. Shih, T. K. Liu, N. W. Huang, C. C. Lin, S. H. Sung et K. J. Lee (2003). Thrust-related river terrace development in relation to the 1999 Chi-Chi earthquake rupture, Western Foothills, central Taiwan. *Journal of Asian Earth Sciences* 21(5): pp. 473-480.
21. Chen, Y. G. et T. K. Liu (2000). Holocene uplift and subsidence along an active tectonic margin southwestern Taiwan. *Quaternary Science Reviews* 19(9): pp. 923-930.
22. Chen, Y. G., W. S. Chen, Y. Wang, P. W. Lo, T. K. Liu et J. C. Lee (2002). Geomorphic evidence for prior earthquakes: Lessons from the 1999 Chichi earthquake in central Taiwan. *Geology* 30(2): pp. 171174.
23. Chen, Y. G., Y. W. Chen, W. S. Chen, J. F. Zhang, H. Zhao, L.-P. Zhou et S.-H. Li (2003). Preliminary results of long-term slip rates of 1999 earthquake fault by luminescence and radiocarbon dating. *Quaternary Science Reviews* 22(10-13): pp. 1213-1221.
24. Deffontaines, B., O. Lacombe, H. T. Chu, F. Mouthereau, C. T. Lee, J. Deramond, J. F. Lee, M. S. Yu et P. M. Liew (1997). Quaternary transfer faulting in the Taiwan Foothills: evidence from a multisource approach. *Tectonophysics* 274(1-3): pp. 61-82.
25. Deffontaines, B., C. T. Lee, E. Pathier, J. Y. Yu, B. Fruneau, H. H. Chen, L. S. Liang, A. J. Chen, S. K. Chen, D. Raymond, C. L. Tseng, J. P. Rudant, Y. B. Tsai, J. Angelier, C. P. Chang, T. Y. Chang, F. C. Li, C. T. Wang et H. H. Hsi (2001a). Preliminary interferometric results on 921 chichi earthquake (central taiwan). in: *International Workshop on annual commemoration of Chichi earthquake Proc.*, Taipei (sept 2001) vol. 1 - Science aspect. pp. 105-110.
26. Deffontaines, B., C. S. Liu, J. Angelier, C. T. Lee, J. C. Sibuet, Y. B. Tsai, S. Lallemand, C. Y. Lu, C. S. Lee, S. K. Hsu, H. T. Chu, J. C. Lee, E. Pathier, R. F. Chen, C. T. Cheng, C. W. Liao, C. C. Lin et H. H. Hsu (2001b). Preliminary Neotectonic Map of Onshore-offshore Taiwan. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences (Supplementary Issue)*: pp. 339-350.
27. Deffontaines, B., E. Pathier, C. T. Lee, B. Fruneau, D. Raymond, J. Angelier et J. P. Rudant (2001c). Neotectonics and SAR Interferogram in Taiwan : Uplift of Tainan Anticline (SW Taiwan) and 921 Chichi Earthquake. in: *CEOS SAR Workshop Proc.*, Tokyo, Japan (2-5 April 2001) vol. CD-Rom, Abstr. 01-080.

28. Feigl, K. L., F. Sarti, H. Vadon, S. McClusky, S. Ergintav, P. Durand, R. Bürgmann, A. Rigo, D. Massonnet et R. Reilinger (2002). Estimating slip distribution for the Izmit mainshock from coseismic GPS, ERS-1, RADARSAT, and SPOT measurements. *Bulletin of the Seismological Society of America* 92(1): pp. 138-160.
29. Ferretti, A., C. Prati et F. Rocca (1999a). Multibaseline inSAR DEM reconstruction: The wavelet approach. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 37(2): pp. 705-715.
30. Ferretti, A., C. Prati et F. Rocca (1999b). Non-uniform Motion Monitoring Using the Permanent Scatterers Technique. in: *Fringe 99 workshop Proc.: Advancing ERS SAR Interferometry from Applications towards Operations*, Liège, Belgium (10 – 12 November 1999), ESA Special Publication, 478, European Space Agency.
31. Ferretti, A., F. Ferrucci, C. Prati et F. Rocca (2000a). SAR analysis of Building collapse by means of the permanent scatterers technique. in: *IGARSS 2000. IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proc.*, Honolulu, HI, USA (24-28 July 2000) vol. 7 pp. 3219-3221.
32. Ferretti, A., C. Prati et F. Rocca (2000b). Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 38(5): pp. 2202-2212.
33. Ferretti, A., C. Prati, F. Rocca et C. Colesanti (2000c). Validation of the permanent scatterers technique in urban areas. in: *ERS-ENVISAT symposium Proc.: looking down to earth in the new millennium*, Gothenburg, Sweden (16-20 Oct. 2000), ESA Special Publication, 461, European Space Agency.
34. Ferretti, A., C. Prati et F. Rocca (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 39(1): pp. 8-20.
35. Fruneau, B., F. Sarti, E. Pathier, B. Deffontaines et D. Raymond (2000). Study of surface displacements in urban context with SAR interferometry: Application to the cities of Paris (France) and Tainan (Taiwan). in: *ERS-ENVISAT symposium Proc.: looking down to earth in the new millennium*, Gothenburg, Sweden (16-20 Oct. 2000), ESA Special Publication, 461, European Space Agency.
36. Fruneau, B., E. Pathier, D. Raymond, B. Deffontaines, C. T. Lee, H. T. Wang, J. Angelier, J. P. Rudant et C. P. Chang (2001). Uplift of Tainan Tableland (SW

- Taiwan) revealed by SAR interferometry. *Geophysical Research Letters* 28(16): pp. 3071-3074.
37. Goldstein, R. M. et H. A. Zebker (1987). Interferometric radar measurement of ocean surface currents. *Nature (London)* 328(6132): pp. 707-709.
 38. Goldstein, R. M., H. A. Zebker et C. L. Werner (1988). Satellite radar interferometry: two-dimensional phase unwrapping. *Radio Science* 23(4): pp. 713-720.
 39. Goldstein, R. M. (1995). Atmospheric limitations to repeat-track radar interferometry. *Geophysical Research Letters* 22(18): pp. 2517-20.
 40. Goldstein, R. M. et C. L. Werner (1998). Radar interferogram filtering for geophysical applications. *Geophysical Research Letters* 25(21): pp. 4035-4038.
 41. Hall, R. (2002). Cenozoic geological and plate tectonic evolution of SE Asia and the SW Pacific: computer based reconstructions, model and animations. *Journal of Asian Earth Sciences* 20(4): pp. 353-431.
 42. Hanssen, R. F., T. M. Weckwerth, H. A. Zebker et R. Klees (1999). High-resolution water vapor mapping from interferometric radar measurements. *Science* 283(5406): pp. 1297-1299.
 43. Hanssen, R. F. (2001). *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis. Remote Sensing and Digital Image Processing*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 308.
 44. Henderson, F. M. et A. J. Lewis, Eds. (1998). *Principles and Applications of Imaging Radar. Manual of Remote Sensing 2*. New York, Wiley.
 45. Hernandez, B., F. Cotton, M. Campillo et D. Massonnet (1997). A comparison between short-term (coseismic) and long-term (1 year) slip for the Landers earthquake; measurements from strong motion and SAR interferometry. *Geophysical Research Letters* 24(13): pp. 1579-1582.
 46. Massonnet, D. et T. Rabaute (1993). Radar interferometry: limits and potential. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 31(2): pp. 455-64.
 47. Massonnet, D., M. Rossi, C. Carmona, F. Adragna, G. Peltzer, K. L. Feigl et T. Rabaute (1993). The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. *Nature (London)* 364(6433): pp. 138-142.
 48. Massonnet, D., F. Adragna et M. Rossi (1994a). CNES general-purpose SAR correlator. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 32(3): pp. 636-643.

49. Massonnet, D., K. L. Feigl, M. Rossi et F. Adragna (1994b). Radar interferometric mapping of deformation in the year after the Landers earthquake. *Nature (London)* 369(6477): pp. 227-230.
50. Massonnet, D. et K. L. Feigl (1995a). Satellite radar interferometric map of the coseismic deformation field of the M = 6.1 Eureka Valley, California earthquake of May 17, 1993. *Geophysical Research Letters* 22(12): pp. 1541-1544.
51. Massonnet, D. et K. L. Feigl (1995b). Discrimination of geophysical phenomena in satellite radar interferograms. *Geophysical Research Letters* 22(12): pp. 1537-1540.
52. Massonnet, D. et H. Vadon (1995). ERS-1 internal clock drift measured by interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 33(2): pp. 401-408.
53. Massonnet, D., K. L. Feigl, H. Vadon et M. Rossi (1996a). Coseismic deformation field of the M = 6.7 Northridge, California earthquake of January 17, 1994 recorded by two radar satellites using interferometry. *Geophysical Research Letters* 23(9): pp. 969-972.
54. Massonnet, D., W. Thatcher et H. Vadon (1996b). Detection of postseismic fault-zone collapse following the Landers earthquake. *Nature (London)* 382(6592): pp. 612-616.
55. Massonnet, D., H. Vadon et M. Rossi (1996c). Reduction of the need for phase unwrapping in radar interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 34(2): pp. 489-497.
56. Massonnet, D. et K. L. Feigl (1998). Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. *Reviews of Geophysics* 36(4): pp. 441-500.
57. Massonnet, D. (2001). Capabilities and limitations of the interferometric cartwheel. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 39(3): pp. 506-520.
58. Salvi, S., S. Stramondo, M. Cocco, M. Tesauro, I. Hunstad, M. Anzidei, P. Briole, P. Baldi, E. Sansosti, G. Fornaro, R. Lanari, F. Doumaz, A. Pesci et A. Galvani (2000). Modeling coseismic displacements resulting from SAR interferometry and GPS measurements during the 1997 UmbriaMarche seismic sequence. *Journal of Seismology* 4(4): pp. 479-499.
59. Sandwell, D. T. et E. J. Price (1998). Phase gradient approach to stacking interferograms. *Journal of Geophysical Research* 103(B12): pp. 30183-30204.

60. Sandwell, D. T., L. Sichoix, D. C. Agnew, Y. Bock et J. B. Minster (2000). Near real-time radar interferometry of the Mw 7.1 Hector Mine Earthquake. *Geophysical Research Letters* 27(19): pp. 31013104.
61. Sarti, F., H. Vadon et D. Massonnet (1999). A method for the automatic characterization of InSAR atmospheric artifacts by correlation of multiple interferograms over the same site. in: *IGARSS'99. IEEE 1999 International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proc.*, Hamburg, Germany (28 June-2 July 1999) vol. 4 pp. 1937-1939.
62. Sarti, F., Y. Arkin, J. Chorowicz, A. Karnieli et T. Cunha (2003). Assessing pre- and post-deformation in the southern Arava Valley segment of the Dead Sea Transform, Israel by differential interferometry. *Remote sensing of environment* 86(2): pp. 141-149.
63. Tsai, Y. B. (1986). Seismotectonics of Taiwan. *Memoirs of the Geological Society of China* 7: pp. 353-368.
64. Usai, S. et R. Klees (1999). SAR interferometry on a very long time scale: A study of the interferometric characteristics of man-made features. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 37(4): pp. 2118-2123.
65. Usai, S. (2000). An analysis of the interferometric characteristics of anthropogenic features. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 38(3): pp. 1491-1497.
66. Usai, S. (2001). A new approach for long term monitoring of deformations by differential SAR interferometry. (in english), R. F. Hanssen th. dir., Technische Universiteit Delft, Delft.
67. Usai, S. (2003). A least squares database approach for SAR interferometric data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 41(4): pp. 753-60.
68. Usai, S., E. Sansosti, L. Tampellini, S. Borgstrom, G. Ricciardi, J. Spaans, A. Pepe, S. Guarino, V. Maddalena, V. van Persie, P. Berardino, R. Lanari, G. Fornaro et F. M. Seifert (2003). MINERVA: an INSAR monitoring system for volcanic hazard. in: *IGARSS 2003. IEEE 2003 International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proc.*, Toulouse, France (21-25 July 2003), I_A12_13.
69. Zebker, H. A. et R. M. Goldstein (1986). Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar observations. *Journal of Geophysical Research* 91(B5): pp. 4993-9.

70. Zebker, H. A., S. N. Madsen, J. M. Martin, K. B. Wheeler, T. Miller, L. Yunling, G. Alberti, S. Vetrella et A. Cucci (1992). The TOPSAR interferometric radar topographic mapping instrument. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 30(5): pp. 933-940.
71. Zebker, H. A. et J. Villasenor (1992). Decorrelation in interferometric radar echoes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 30(5): pp. 950-959.
72. Zebker, H. A., P. A. Rosen, R. M. Goldstein, A. K. Gabriel et C. L. Werner (1994a). On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry: The Landers earthquake. *Journal of Geophysical Research* 99(B10): pp. 19617-19634.
73. Zebker, H. A., C. L. Werner, P. A. Rosen et S. Hensley (1994b). Accuracy of topographic maps derived from ERS-1 interferometric radar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 32(4): pp. 823-836.
74. Zebker, H. A., P. A. Rosen et S. Hensley (1997). Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps. *Journal of Geophysical Research* 102(B4): pp. 7547-7563.

ANNEXE

- Liste des missions SAR embarquées sur satellite (D'après ESA).

1992-1998 : lancement de ERS 1+2 et RADARSAT 1, les deux missions sont en bande C avec un cycle de 35 jours pour ERS et de 24 jours pour RADARSAT 1.

1998-2002 : lancement ENVISAT missions en bande C avec un cycle de 35jours.

2002-2007 : lancement de RADARSAT 2 avec une résolution en bande C avec un cycle de 24 jours. Et lancement de Cosmo Skymed (cycle 8 jours) et Terassar X (cycle 11jours) des satellites hautes résolutions qui opère avec une bande X.

2014-2015 : lancement de SENTINEL 1A et 1B avec une résolution en bande C avec un cycle de 6jours.

- Carte de localisation

GLOSSAIRE

Amplitude : éloignement maximum, par rapport à sa valeur d'équilibre, d'une quantité qui varie de façon oscillatoire autour de cette valeur.

Angle d'incidence : angle que fait le rayonnement incident avec le normal d'une surface déterminée.

Interpolation : création artificielle de valeurs numérique intermédiaires entre des valeurs existantes pour remplir l'espace spatial.

Isotrope : se dit d'un milieu qui a les mêmes propriétés optiques dans toutes les directions de l'espaces.

Orbite : Trajectoire que décrit, par rapport à un système de référence spécifié, le centre de masse d'un objet spatial soumis aux seules forces naturelles, essentiellement les forces de gravitation et les forces d'inertie.

Résolution spatiale : Selon le contexte, cette expression peut signifier la limite ou le pouvoir de résolution spatiale, celui-ci étant l'inverse de celui-là.

Résolution : Terme général employé pour évoquer, dans le cas d'un système de mesurage, l'aptitude à séparer deux niveaux d'un signal ; dans le cas d'une image ; l'aptitude à rendre distincts deux points voisins. Le terme de limite de résolution est plus précis.

Rétrodiffusion : Diffusion vers la source d'une partie d'un rayonnement électromagnétique, lorsque celui-ci traverse un milieu dispersant et suivant des directions dont les angles sont supérieurs à 90° de la direction initiale.

Sols hydromorphes : sol qui a une marque physique de saturation en eau.

Subsidence : en géologie est un affaissement lent de la lithosphère entraînant un dépôt progressif de sédiment sous une profondeur d'eau constante. Une subsidence peut être tectonique ou thermique.

Tables des matières

REMERCIEMENT	i
SOMMAIRE	ii
LISTES DES FIGURES	iv
LISTE DES ABREVIATIONS.....	vi
LISTE DES EQUATIONS	vi
INTRODUCTION	2
Chapitre I. RADAR (Radio Detection and Ranging).	4
A. PRESENTATION DU SYSTEME.....	4
1. Les composantes principales du radar.....	5
i. Le transmetteur	5
ii. Récepteur	5
iii. L'antenne	5
2. Quelques définitions sur les termes utiliser dans le domaine radar.	6
i. L'Effet Doppler	6
ii. Le chatolement	6
iii. Equation radar	7
iv. Résolution	10
B. GENERALITE SUR LE SYSTEME RADAR.....	11
1. Interaction entre l'onde EM et la scène radar	12
2. Fréquence de la porteuse de l'onde électromagnétique	13
3. Modes d'acquisition pour les radars.....	14
C. PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT DES RADAR.....	17
1. Nature de la mesure en rétrodiffusion	17
D. LE RADAR A OUVERTURE SYNTHETIQUE ou SAR.....	17
1. Introduction	17
2. Principe de l'antenne synthétique	18

3. La géométrie.....	19
i. Distorsions géométrique des images radar	20
4. Les imageries SAR.....	23
i. L'acquisition des données brutes	23
ii. Les images SAR	25
5. Le traitement SAR.....	27
6. Caractéristiques du contenu de l'image SAR complexe.....	28
i. La mesure complexe d'une cible élémentaire	28
ii. La mesure complexe d'une cellule de résolution	29
iii. Les Sources d'erreur.....	32
Chapitre II. INTERFEROMETRIE.	33
A. NOTION D'INTERFERENCE.	33
1. Condition d'interférence.	33
2. Interférences lumineuses	33
i. Interférences constructives et destructives.	34
B. PRINCIPES ET LIMITES DE LA MESURE DES DEPLACEMENTS PAR INTERFEROMETRIE RADAR.....	34
1. Principes de la mesure de déplacement.....	34
i. Information de déplacement disponible.	41
2. Prise en compte de la géométrie réelle de prise de vue.....	43
i. Influence de la base sur la géométrie des images	43
ii. Influences de la topographie.....	44
iii. Influence d'orbites non parallèles et de l'orientation de l'instrument.	47
iv. Influence de la base sur la stabilité de la phase interférométrique d'un pixel....	47
v. L'évolution temporelle du milieu observé.....	47
3. Prise en compte des sources d'erreurs	48
4. L'incertitude sur la mesure du déplacement.	50

i. Pour un interférogramme.....	50
ii. Cas d'une série d'interférogrammes.	54
Chapitre III. APPLICATION DE L'INTERFEROMETRIE A L'ETUDE DE LA DEFORMATION DU SOL A ANKORONDRANO AT SINANANA.....	57
Localisation géographique de la zone d'intérêt.....	57
A. ETUDE GEOLOGIQUE ET MORPHOLOGIQUE.....	58
1. Contexte géologique.....	58
2. Contexte géomorphologique	59
B. LES INFORMATIONS FOURNIES PAR L'INTERFEROMETRIE RADAR DIFFERENTIELLE.	60
1. Méthodologie INSAR adoptée	60
i. Choix de la méthode	60
ii. Le choix de données SAR.	63
iii. Les données orbitales et MNT	63
2. Le traitement.	63
C. LA DEFORMATION ACTUELLE ET LES POTENTIALITES DE L'INTERFEROMETRIE RADAR A ANKORONDRANO.....	67
1. Facteur limitant l'observation interférométrique sur la zone d'intérêt.	68
2. Les déformations actuelles.	68
i. Les informations fournies par l'interférométrie radar différentielle.	68
ii. Les déplacements observés.....	68
3. La place de la technique par rapport à nivellement et le GPS.....	75
4. Intérêt et limites des données interférométriques.....	76
CHAPITRE IV. DISCUSSIONS SUR LA METHODE.	77
A. CARACTERISTIQUE DE LA TECHNIQUE DE L'INTERFEROMETRIE.	78
B. DISCUSSION	80
CONCLUSIONS GENERALES	82
Bibliographie.....	84

ANNEXE	92
Tables des matières	94

Nom et prénoms : RASAMISON Toky Niriana Herman

Adresse : Lot IAD 76A Antanetibe Itaosy

Email : toki070591@gmail.com

Tel : 0346766829



Nombres de pages : 91

Nombres de figures : 74

Nombres de cartes : 01

Résumé

L'interférométrie radar différentielle est une technique de télédétection permettant d'obtenir des cartes de déformation du sol étendues, précises et denses. Ce travail expose comment l'utilisation de l'interférométrie radar différentielle à partir de données satellitaires permet d'améliorer notre compréhension des déformations. Le fokontany d'Ankorondrano Atsinanana se présente comme un terrain d'étude favorable, car les déformations tectoniques y sont particulièrement actives et les connaissances géologiques suffisamment fines pour pouvoir y contraindre les interprétations. Après avoir détaillé les principes et les limites de la mesure des déplacements du sol par l'interférométrie radar différentielle, le potentiel de la technique est évalué dans le fokontany.

Mots clés : radar, interférométrie, Ankorondrano, déplacement,

Abstracts

Differential radar interferometry is a remote sensing technique used to obtain extended, precise and dense ground deformation maps. This work explains how the use of differential radar interferometry from satellite data improves our understanding of deformations. The fokontany of Ankorondrano Antsinanana presents itself as a favourable study ground, because the deformations are particularly active there and the geological knowledge sufficiently fine to be able to constrain the interpretations. After having detailed the principles and limit of the measurement of the displacements of the ground by the differential radar interferometry, the potential if the technique is evaluated in the fokontany.

Keywords: radar, interferometry, Ankorondrano, displacement.