

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
« HOUARI BOUMEDIENE »
FACULTE D' ELECTRONIQUE ET D'INFORMATIQUE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de MAGISTER

EN ELECTRONIQUE

Spécialité : Traitement du Signal et des Images

Par : **CHELBI SALIM**

Sujet

ESTIMATION DES ELEVATIONS ET DES MOUVEMENTS DE TERRAIN PAR INTERFEROMETRIE SAR

Soutenu publiquement le 18 mai 2008, devant le jury composé de :

Mme. F. YUCEF ETTOUMI
BELHADJ-AISSA
Mr. F. ALILAT
S. KAHLOUCHE
Mme. F.HOCINE

Professeur (USTHB)
Professeur (USTHB)
Maître de Conférences (USTHB)
Directeur de Recherche (CTS/ASAL)
Attachée de Recherche

Présidente Mme. A.
Directrice de thèse
Examineur Mr.
Examineur
Invitée.

Notations

SAR	Synthetic aperture radar.
PRF	Pulses repetition frequency
SLC	Single Look complex.
β	Angle d'ouverture de l'antenne.
θ	Angle de visée.
δ_r	Résolution en distance.
δ_a	Résolution en azimut.
θ_i	Angle d'incidence .
δ_{r-sol}	Résolution en distance projetée au sol.
c	Vitesse de la lumière.
τ	Durée de chirp.
H	Hauteur du radar.
λ	Longueur d'onde.
L	Longueur de l'antenne.
β	Ouverture de l'antenne.
R	Distance radar, cible.
NR	Portée distale.
FR	Portée proximale.
K	Taux de modulation.
f_c	Fréquence centrale du chirp.
B_{chirpe}	Largeur de la bande passante du chirp.
F_e	Fréquence d'échantillonnage.
L_s	Longueur de l'antenne synthétisée.
V	Vitesse du radar.
t	Constante du temps.
T	Période d'illumination d'une cible par le radar.
Φ	La phase du signal radar.
f_D	Fréquence Doppler.
B_D	Bande Doppler.
P_r	Puissance reçue par l'antenne.
P_e	Puissance émise par l'antenne.
G	Gain de l'antenne.
σ_0	Coefficient de rétrodiffusion.
A'	Surface apparente de rétrodiffusion.
α	Pente d'un relief.
S	Signal radar.
A	L'amplitude du signal radar.
φ	La phase du signal radar.
a_K	L'amplitude du signal issu d'un rétrodiffuseur élémentaire.
φ	La phase du signal issu d'un rétrodiffuseur élémentaire
i	Partie réel du signal radar S .
q	Partie imaginaire du signal radar.
M	nombre de vues.
x	(comme coordonnée spatiale) localisation en distance par rapport au nadir.
y	localisation en azimut.
θ_0	Angle de visée par rapport à l'ellipsoïde de référence.

h	Hauteur d'une cible.
$h_{2\pi}$	L'altitude d'ambiguïté.
α	L'angle entre le baseline et le plan horizontal.
B	Baseline.
$B_{\perp}$	Composante verticale du baseline.
$B_{//}$	Composante horizontale du baseline.
$\Delta\phi$	Différence de phase interférométriques entre deux points.
ΔR	Différence de chemins entre deux acquisitions.
$\Delta\phi_{\text{topo}}$	La phase topographique.
$\Delta\phi_{\text{flat}}$	La phase de la terre plate.
Ψ	Spectre croisé.
Lat	Latitude.
Lon	Longitude.
N	Constante qui représente la courbure de l'ellipsoïde.
e	Excentricité de la terre.
a	Petit axe de l'ellipsoïde de la terre.
b	Grand axe de l'ellipsoïde de la terre.
γ	Coefficient de corrélation entre deux images complexes.
m_A	Moyenne des amplitudes .
σ_A	Ecart type des amplitudes.
D_A	Coefficient de dispersion d'amplitude.

Table des Matières

Introduction générale	5
-----------------------------	---

Chapitre I : Imagerie radar

I.1. Principe de formation d'image radar	8
Principe d'acquisition d'une image radar à ouverture réelle.....	8
Résolution en distance.....	9
Résolution en azimuth.....	10
Principe du radar synthétique.....	11
Compression d'impulsion.....	12
Synthèse d'ouverture.....	13
I.2. Equation radar.....	16
I.3. Caractéristiques des images RSO.....	16
Distorsions géométriques.....	16
Raccourcissement des distances.....	16
Repliement	17
Ombres.....	17
Propriétés radiométriques.....	18
Image d'amplitude.....	20
Image de phase.....	20
I.4. Présentation des données.....	21

Chapitre II : interférometrie SAR

II.1. Géométrie interférométrique.....	23
II.2. Procéssus interférométrique.....	27
Superposition des deux images radar SAR.....	28
a- Localisation de la zone commune.....	29
b- La corrélation de phase.....	30
Géoréférencement des images SAR.....	31
Produits interférométrique.....	33
Cohérence interférométrique.....	33
Génération d'un interférogramme.....	34
Elimination des franges orbitales.....	35
a- Méthode géométrique.....	36
b- Méthode de la FFT.....	38
Filtrage de l'interférogramme.....	40
Déroulement de phase interférométrique.....	42

Chapitre III : Déroulement de phase interférométrique.

III.1. Principe de déroulement de phase.....	44
III.2. Approche locale.....	45
Méthode des lignes fantômes (ghost lines).....	52
III.3. Approche globale.....	53
Méthode des moindres carrés.....	53
Calcul de la solution.....	55
III.4. Approche mixte.....	58
La méthode markovienne.....	58
Définition.....	59
Modélisation Markovienne.....	60
Algorithmes d'optimisation.....	61

Chapitre IV : interférométrie différentielle.

IV.1. Principe de l'interférométrie différentielle(DINSAR).....	64
Méthode « deux passes ».....	65
Calcul de l'angle d'incidence.....	66
Simulation d'interférogramme.....	67
Méthode « multi passes ».....	69
IV.2. Approche des réflecteurs permanents (PS).....	74
Définition	74
Sélection des points diffuseurs.....	76
Calcul de l'erreur d'élimination de la composante topographique Δq	78
Calcul de la vitesse de déplacement V	80
Conclusion générale.....	81
Bibliographie	83

Introduction générale

La géodésie est une branche des sciences de la terre qui a bénéficié des avancées technologiques considérables à travers le nombre de satellites d'observation de la terre sur orbites. Le lancement du satellite européen ERS1 en 1991 a marqué un nouvel essor de la géodésie spatiale avec le développement de l'interférométrie radar INSAR (Interferometer Synthetic Aperture Radar).

INSAR utilise la différence de phase entre deux images radar prises dans des positions différentes (par une seule antenne avec des passages multiples ou par deux antennes en un seul passage). Cette technique exploite le changement de la longueur du trajet aller retour de l'onde pour un même point du sol lors des deux acquisitions.

L'interférométrie SAR a été utilisée en premier lieu dans la réalisation des modèles numériques de terrain par GRAHAM en 1974 [Burg-00], [Seym-04]. Le premier résultat pratique a été obtenu par ZEBKER et GOLDESTEN en 1986. Le nombre de recherches scientifiques dans ce domaine [Bara-04], [Yong-00] a permis de développer une nouvelle méthode qui est largement utilisée, c'est l'interférométrie radar différentielle DINSAR qui est basée sur l'utilisation de l'image de différence d'interferogrammes afin de trouver l'information de déformation issue d'un phénomène physique, tremblements de terre ou glissements du terrain. Elle est obtenue par l'utilisation de 03 images radar au minimum ou bien 02 images combinées avec les informations altimétriques.

Afin d'améliorer les résultats du DINSAR, une équipe de chercheurs italiens [Ferr-01] [Van-03], ont proposé une nouvelle approche dite méthode des « PSINSAR », Permanent Scatters for Interferometric Synthetic Aperture Radar. Elle répond aux limitations du DINSAR (conditions atmosphériques, baseline critique), Elle repose sur la détection des réflecteurs naturels ou permanent scatters suivie d'une étude le long d'une série d'interferogrammes différentiels afin de calculer le moindre changement topographique et estimer la vitesse de déplacement.

C'est dans ce contexte d'interférométrie et d'interférométrie différentielle que s'inscrit notre travail. Nous avons, à cet effet, étudié le processus interférométrique et nous avons développé à chaque niveau de ce processus les procédures de recalage du couple interférométrique, l'estimation des franges orbitales, la correction et le filtrage des interférogrammes ainsi que les procédures de déroulement de phase.

Dans cette dernière étape, nous avons développé une méthode locale avec évitement des résidus et une méthode globale basée sur les moindres carrés.

Par ailleurs, nous avons abordé l'interférométrie différentielle par une étude bibliographique sur les différents aspects de ce domaine, les contraintes et les limitations qui dépendent principalement de la précision des données et le nombre d'images nécessaires pour réaliser une carte de mouvement de terrain par l'interférométrie différentielle SAR.

Pour une première réalisation, nous avons simulé un interférogramme à partir d'un modèle numérique de terrain et nous avons implémenté une procédure de combinaison d'interférogrammes. Les méthodes développées ont été testées sur des images des satellites ERS1/ERS2 acquises sur la région d'Alger.

Le mémoire est structuré en quatre chapitres, le premier chapitre a porté sur une synthèse bibliographique sur l'imagerie radar, ses résolutions en distance et en azimut tout en montrant ses caractéristiques géométriques et radiométriques, et nous avons présenté à la fin de ce chapitre les données utilisées dans notre travail, à savoir, les interférogrammes simulés pour tester et valider nos algorithmes et les images radar SAR de la région d'étude.

Nous avons donné, dans le second chapitre, des notions sur l'interférométrie radar SAR. Les procédures de superposition, de filtrage et d'élimination des franges orbitales, sont présentées ainsi que les résultats obtenus.

Le troisième chapitre a porté sur l'étape de déroulement de phase qui est une étape critique dans la génération des modèles numériques de terrain. Nous avons présenté les trois approches, locale, globale et mixte. Nous avons mis en œuvre deux techniques: locale et globale, nous avons développé la méthode proche en proche avec évitement des résidus et une méthode globale basée sur les moindres carrés.

Dans le dernier chapitre, nous avons étudié le principe de l'interférométrie différentielle, ainsi que les méthodes d'obtention des interférogrammes différentiels traduisant l'information de déformation. À cet effet, nous avons développé la méthode « simple passe » en effectuant une simulation d'un interférogramme à partir d'un MNT existant que nous avons projeté dans la géométrie du couple d'images radar.

Comme les résultats de l'interférométrie différentielle sont limités à un seul sens de déplacement le long de la visée du radar et que les conditions atmosphériques sont variables d'une acquisition à une autre, nous avons présenté une étude théorique sur la méthode des réflecteurs permanents (PS : permanent scatters).

Nous avons terminé par une conclusion générale et les perspectives de ce travail qui est une initiation au domaine de l'interférométrie radar SAR.

Chapitre I : Imagerie radar

L'objectif de ce chapitre est de présenter quelques notions sur l'imagerie radar SAR, à savoir le principe d'acquisition, les résolutions en distance et en azimuth ainsi que les différentes distorsions géométriques dues à la géométrie d'acquisition et à la topographie de la surface observée.

Nous présentons à la fin de ce chapitre les images que nous avons utilisées pour effectuer nos tests.

I.1. Principe de formation d'image radar :

Principe d'acquisition d'une image radar à ouverture réelle :

Le radar à ouverture réelle est un radar à visée latérale, l'antenne portée par un avion vise le sol à une hauteur suivant un angle par rapport au nadir (l'axe perpendiculaire au radar sur le sol), (figure I.1). Cet angle est appelé angle de visée θ , le radar émet des trains d'impulsions avec une fréquence appelée PRF (Pulse Repetition Frequency), pour le cas du radar ERS la PRF=1679.902 Hz. Et cela le long de son déplacement suivant l'axe azimuthal. L'axe perpendiculaire à la direction azimuthale est nommé l'axe distant (radial ou transversal).

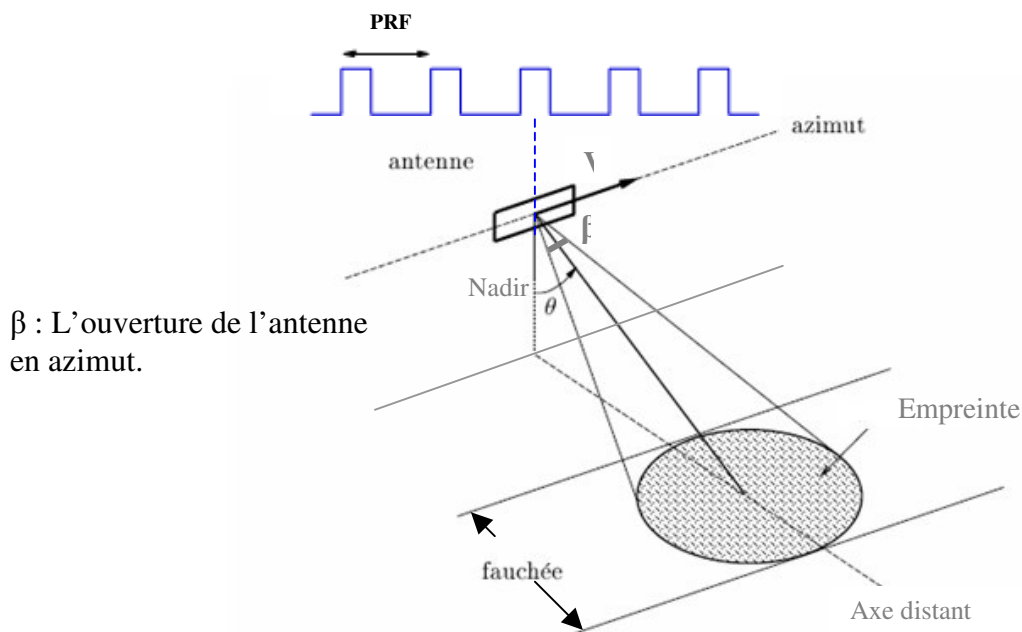


Figure I.1: Visée latérale d'un radar imageur

- **Résolution en distance**

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

$$\delta_r = \frac{c\tau}{2} \quad (\text{I.1})$$

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

$$\delta_{r-\text{sol}} = \frac{c\tau}{2 \cdot \sin(\theta_i)} \quad (\text{I.2})$$

La résolution en distance dans la formation d'image radar est en fonction uniquement de la durée τ de l'impulsion émise. Deux cibles seront différenciables si leurs échos ne se superposent pas. Pour cela, il faut que ces échos soient séparés d'une durée minimum égale à τ (figure I.2). La figure (I.2.a) représente le cas où les deux cibles sont suffisamment éloignées l'une de l'autre par rapport à la durée de l'impulsion pour que leurs échos soient éloignés. La figure (I.2.b) représente le cas contraire, les deux échos se chevauchent, car la distance radiale entre les deux cibles est inférieure à la longueur de l'impulsion émise.

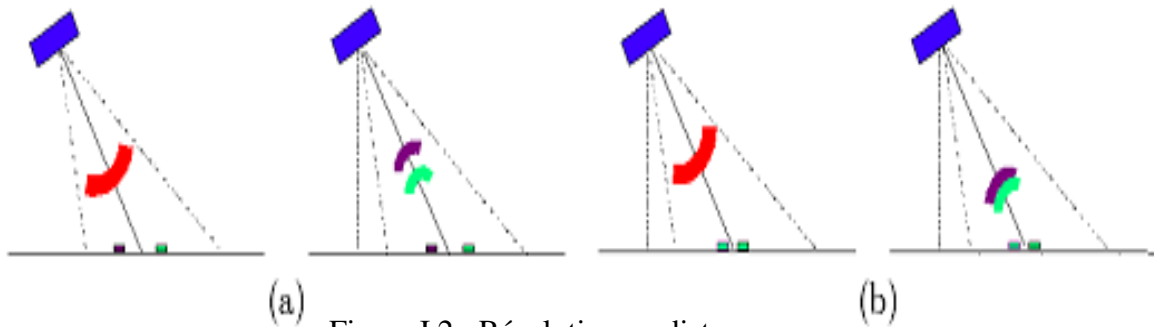


Figure I.2 : Résolution en distance.

- **Résolution en azimuth :**

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

$$\delta_a = \beta \cdot R = \frac{\lambda}{L} \cdot \frac{H}{\cos(\theta)} \quad (\text{I.3})$$

Avec
$$\beta = \frac{\lambda}{L} \quad (\text{I.4})$$

Où λ est la longueur d'onde, L est la longueur de l'antenne, R est la distance entre l'antenne et la cible, H est l'altitude du radar.

La résolution en azimuth δ_a est liée à la distance radiale R et de l'angle d'ouverture β du lobe principal du diagramme de l'antenne radar (figure I.3). En général, pour que deux cibles soient séparables en azimuth, il faut qu'elles ne soient pas dans le lobe d'antenne au même moment.

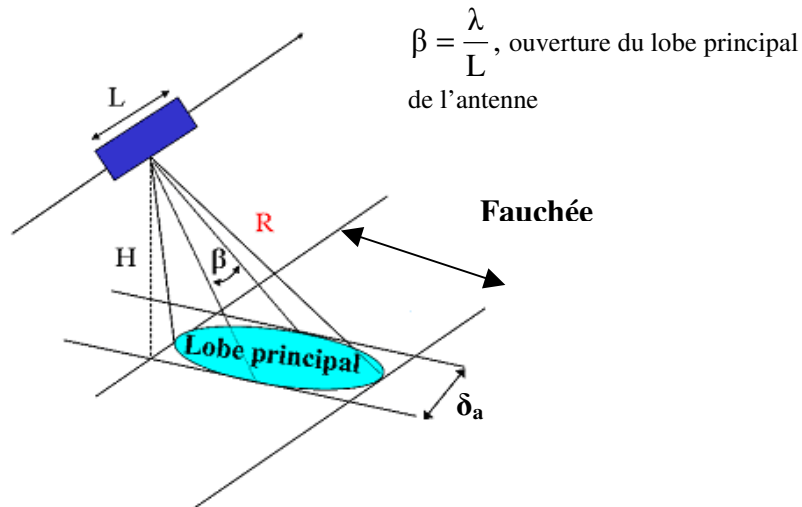


Figure I.3 : Résolution en azimuth

Si on considère les mêmes paramètres d'un radar imageur tel que ERS-1 à savoir : τ est de 37.1 μ s, $\lambda=5.66$ cm, l'altitude du satellite est 785 Km, la longueur de l'antenne est L=10m. On trouve respectivement les deux résolutions en distance et en azimuth au centre de la scène ($\theta=20^\circ$) comme suite : $\delta_r=5.5$ Km et $\delta_a=4.5$ Km.

Ces résolutions dépendent essentiellement de la dimension de l'antenne et de la durée de l'impulsion. Pour les améliorer il y a eu le développement de radar à synthèse d'ouverture.

Principe du radar synthétique :

Un radar à ouverture de synthèse est un système d'imagerie radar utilisant la compression d'impulsion pour simuler l'émission d'une onde de durée très courte afin d'améliorer la résolution en distance. La méthode d'ouverture de synthèse permet quant à elle, de simuler une antenne de très grande dimension en exploitant l'effet Doppler et d'améliorer ainsi considérablement la résolution en azimuth, [Noce-96], [Fanc-99], [Labe-90].

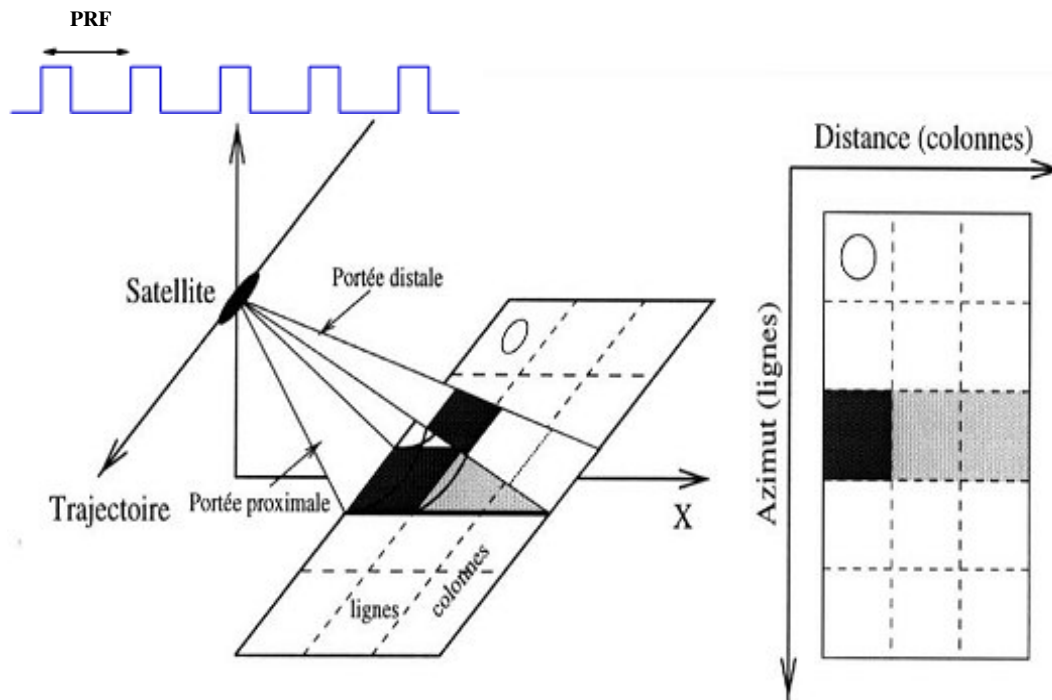


Figure I.4 : Géométrie d'acquisition d'une image radar à synthèse d'ouverture

D'après la figure I.4, chaque ligne de l'image correspond à une position orbitale donnée du satellite. La première ligne étant acquise au temps t_0 . Ainsi, les lignes suivantes seront séparées d'un intervalle de temps proportionnel au PRF.

Chaque colonne est repérée par sa distance au radar, la première colonne étant acquise à la distance NR (Near Range) ou portée proximale. Les colonnes suivantes, correspondant à des distances croissantes, sont séparées par la résolution δ_r jusqu'à la colonne la plus éloignée (portée distale).

Connaissant la trajectoire du satellite, un pixel de coordonnées (x, y) est donc localisé par rapport au premier pixel de la première ligne par les relations suivantes :

$$t_y = t_0 + \frac{y}{PRF} \quad (I.5)$$

$$R_x = NR + x\delta_r \quad (I.6)$$

Avec : t_y est le temps d'acquisition de la ligne (y) par rapport à la première ligne, R_x est la distance radiale du pixel par rapport au radar.

- **Compression d'impulsion :**

Pour améliorer la résolution en distance, on émet des signaux linéairement modulés en fréquence autour d'une fréquence centrale f_c . Ces signaux sont communément appelés chirp et sont définis pour un signal de durée τ par l'équation suivante :

$$e(t) = A \ell^{2j\pi \left(f_c t + \frac{k t^2}{2} \right)}, \forall t \in \left[-\frac{\tau}{2}, \frac{\tau}{2} \right] \quad (I.7)$$

K désigne le taux de modulation, il est défini par $K = B_{\text{chirp}}/\tau$, où B_{chirp} est la largeur de la bande passante du signal.

Le principe de la compression d'impulsions exploite la corrélation entre les échos réfléchis par la surface irradiée par un chirp, avec le signal émis par l'antenne. La réponse impulsionnelle du système est ainsi un sinus cardinal dont la largeur à -3dB (durée de l'impulsion à -3dB) est égale à $\tau = 1/B_{\text{chirp}}$, [Henr-03], [Fanc-99], [Labe-90], [Ambe-05]. La résolution radiale δ_r en distance du système devient :

$$\delta_r = \frac{c}{2B_{\text{chirp}}} \quad (I.8)$$

Nous reprenons le même exemple numérique pour le radar à ouverture réelle et le radar à compression d'impulsion, pour le premier la résolution en distance est $\delta_r = 5.5$ Km et la résolution au sol et de $\delta_{r_sol} = 14.2$ Km.

Pour le radar à compression d'impulsion, nous avons $B_{chirp} = 15.5$ MHz, on obtient alors $\delta_r = 9.7$ m et la résolution projetée au sol est de $\delta_{r_sol} = 24.8$ m.

Notons que l'échantillonnage est appliqué en respectant le théorème de Shannon. En effet, la fréquence d'échantillonnage en distance doit vérifier la condition $F_e \geq B_{chirp}$.

- **Synthèse d'ouverture :**

Elle permet de simuler une antenne virtuelle très grande L_s à partir de l'antenne originale L , et cela par une modulation linéaire en fréquence obtenue par l'effet Doppler issu du mouvement du radar par rapport à la scène observée [Fanc-99], [Labe-90], [Curl-91].

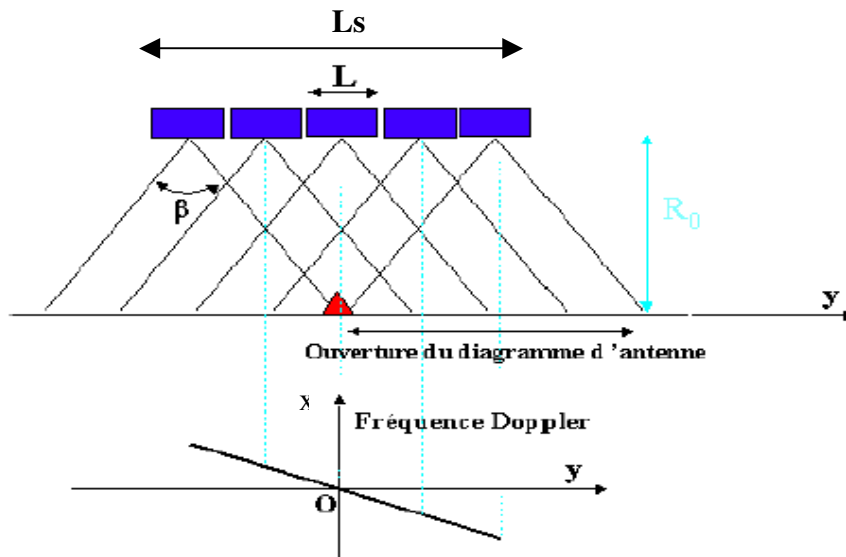


Figure I.5: Synthèse d'ouverture

Considérons un repère Oxy dans la figure I.5, tel que O est le centre positionné sur une cible fixe au sol et notons R_0 la distance minimale (à Doppler zéro) entre la cible et l'antenne, cette cible est illuminée plusieurs fois par l'antenne. A un instant donné t , la vitesse du porteur étant supposée constante, la position y de ce dernier dans le repère (Oxy) liée à la cible est donnée par : $y = v.t$.

La distance relative $R(t)$ du porteur et de la cible est :

$$R(t) = \sqrt{R_0^2 + y^2} = \sqrt{R_0^2 + (vt)^2} \approx R_0 + \frac{(vt)^2}{2R_0} \quad (\text{I.9})$$

Avec $R_0 \gg y$.

La phase instantanée $\varphi(t)$ de l'onde réfléchiée par la cible après le parcours aller-retour entre le capteur et la cible, est alors la suivante :

$$\varphi(t) = 2f_c \pi \left(t - \frac{2R(t)}{c} \right) \quad (\text{I.10})$$

Ce qui correspond à une fréquence instantanée $f(t)$:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi}{dt} \quad (\text{I.11.a})$$

Nous aurons alors :

$$f(t) = f_c - \frac{2f_c v^2 t}{cR_0} = f_c - \frac{2v^2 t}{\lambda R_0} \quad (\text{I.11.b})$$

La variation de la distance relative cible-porteur entraîne ainsi une variation de la vitesse relative du porteur par rapport à la cible et donc un effet Doppler. La portion du signal de plus haute fréquence correspond aux réflecteurs entrant dans le lobe, celle de la plus basse fréquence aux réflecteurs sortant du lobe.

La fréquence Doppler résultante à un instant t vaut :

$$f_D = f(t) - f_c = -\frac{2v^2 t}{\lambda R_0} \quad (\text{I.12})$$

L'onde reçue par la cible a ainsi une fréquence linéairement variable en fonction du temps et de la vitesse du porteur. Il peut être vu comme une chirp dont la bande de passante B_D est fonction de la durée d'illumination de la cible par l'antenne.

Le choix d'une résolution à -3dB du lobe d'antenne, nous donne la valeur de cette période T

d'illumination $T = \frac{R\beta}{v} = \frac{R\lambda}{Lv}$. On en déduit la bande Doppler:

$$B_D = \frac{2v^2 T}{\lambda R_0} = \frac{2v^2 R_0 \lambda}{R_0 \lambda L v} = \frac{2v}{L} \quad (\text{I.13})$$

Soit une durée d'impulsion :

$$\tau' = \frac{1}{B_D} = \frac{L}{2v} \quad (\text{I.14})$$

La résolution en azimut d'un système radar SAR correspond alors à la distance parcourue pendant cet intervalle τ' , à savoir :

$$\delta_a = v \tau' = \frac{L}{2} \quad (\text{I.15})$$

La résolution en azimut dépend ainsi uniquement de la taille de l'antenne réelle embarquée à bord du porteur. Contrairement aux cas des radars à antenne réelle, plus l'antenne est petite, meilleure est la résolution.

Dans le cas d'ERS avec $L=10\text{m}$, la résolution azimutale est de l'ordre de $\delta_a=5\text{m}$ au lieu de 4.5Km .

L'échantillonnage en azimut est effectué par la fréquence de répétition des impulsions (PRF). L'étendu spectrale en azimut étant égale à B_D , le théorème de Shannon implique la contrainte suivante sur la PRF :

$$PRF \geq B_D \quad \text{C'est-à-dire} \quad PRF \geq \frac{2v}{L} \quad (\text{I.16})$$

I.2. Equation radar :

Le signal reçu par l'antenne radar est proportionnel à l'onde émise, retardé par un temps $2R/c$, R étant la distance cible radar. Ce signal est soumis aux gains d'antenne G . Nous obtenons l'expression de la puissance reçue qui détermine l'équation radar :

$$P_r(\tau) = P_e(\tau - 2R/c) \frac{G^2 \cdot \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \sigma' \quad (I.17)$$

Avec : P_r est la puissance reçue et P_e est la puissance émise par le radar.

L'élément σ' caractérise la rétrodiffusion de la cible dans la direction de l'antenne. En général, nous utilisons surtout la notion de coefficient de rétrodiffusion $\sigma_0 = \sigma'/A'$, et A' représente la surface apparente de rétrodiffusion .

Le coefficient de rétrodiffusion radar σ_0 d'une cible donnée est lié à :

- La longueur d'onde λ .
- Les directions de polarisation des ondes incidentes et rétrodiffusées.
- Les propriétés géométriques de la surface observée.
- L'humidité et le type du sol.
- l'angle de visée.

I.3. Caractéristiques des images SAR :

Distorsions géométriques :

Vu que le radar est à une visée latérale et le relief terrestre est très variable, l'image radar présente plusieurs distorsions géométriques, à savoir le repliement, le raccourcissement et l'effet d'ombre.

- **Raccourcissement des distances :**

Ce phénomène se traduit au niveau des faibles pentes (la pente (α) est inférieur à l'angle de visée (θ)). Dans la figure (I.6.a), la pente (ab) va apparaître compressée et sa longueur (a'b') sera représentée de manière incorrecte. Le raccourcissement dépend de la pente du relief et l'angle de visée du radar, le maximum du raccourcissement arrive quand le faisceau radar est perpendiculaire à la pente du relief, et les deux points précédemment a et b seront observés simultanément.

- **Repliement:**

Ce phénomène apparaît lorsque la pente du relief (α) est supérieure à l'angle de visée de l'onde (θ), la partie inférieure de la pente du relief (a) sera imagée avant sa partie supérieure (b), voir la figure (I.6.b).

- **Ombres:**

Il s'agit d'absence du signal, ce phénomène intervient lorsque qu'une surface n'est pas illuminée par l'onde incidente parce qu'elle est cachée par un obstacle (grande pente de relief, bâtiments, etc.). Dans ce cas, aucun écho n'est enregistré au niveau du capteur et une zone noire en résulte sur l'image. La figure (I.6.c) explique l'effet d'ombre dans l'image radar, la partie (cd) n'est pas observée par le radar, elle est occultée par la face avant du relief (ab), donc elle sera représentée par une région noire.

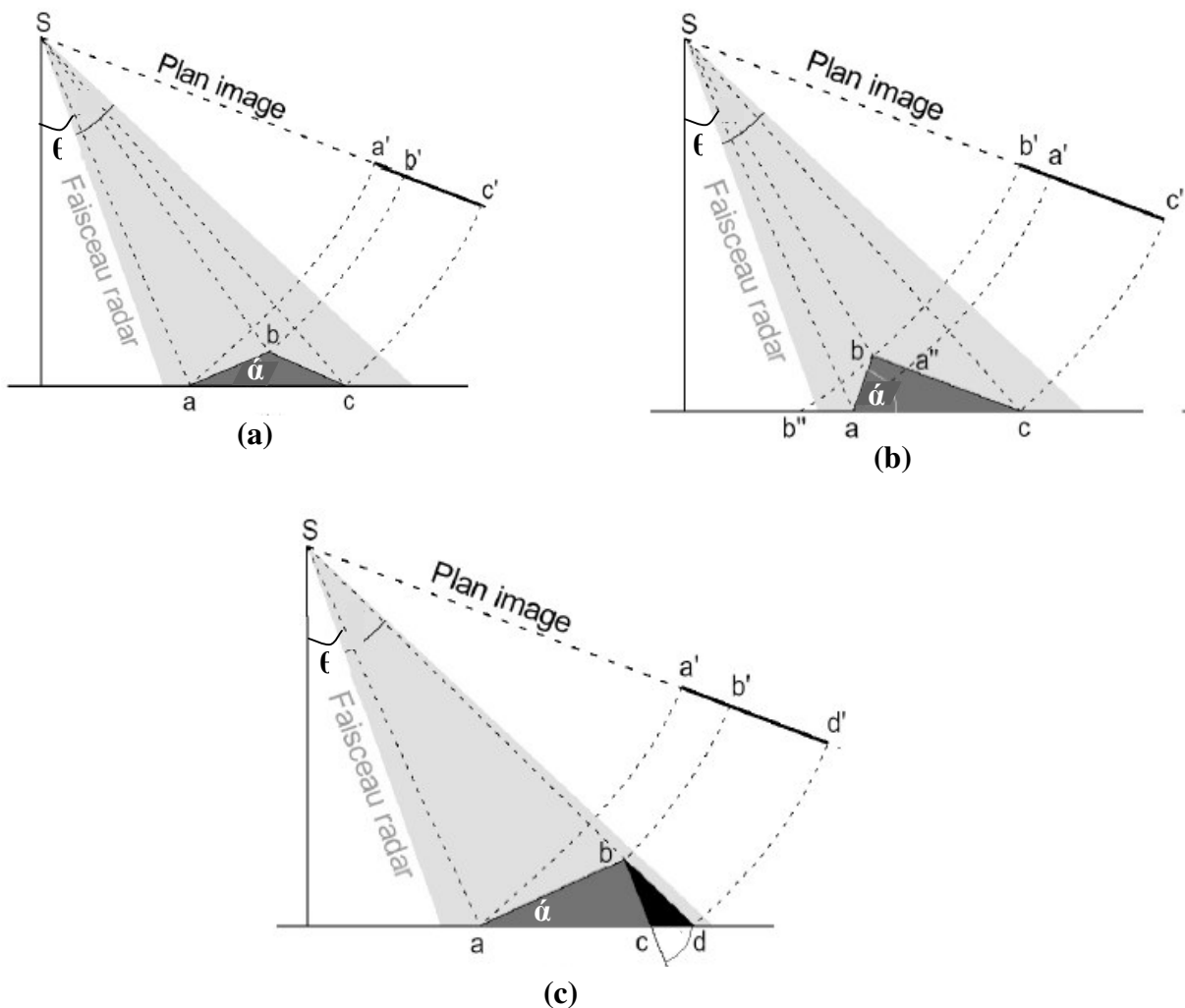


Figure I.6: Différentes distorsions géométriques.

Ces distorsions géométriques faussent l'information radar, leurs corrections font appel à des algorithmes de correction géométrique en utilisant des données externes tel que le modèle numérique du terrain [John-91].

En plus des déformations géométriques dues à la nature du terrain, nous avons d'autres déformations dues à la visée latérale. En effet, la résolution en distance d'une image SLC (Single Look Complex), varie tout en allant du coté proche du radar où l'angle d'incidence est égale à 19.42° et la résolution est de 17.72 m vers le coté loin du radar où l'angle d'incidence est égale à 26.47° et la résolution est de 23.76m, (pour le cas des radars ERS 1-2).

Propriétés radiométriques :

L'onde électromagnétique rétrodiffusée est reçue au niveau du capteur sous forme d'un signal complexe S de la forme $ae^{j\phi}$, ce signal étant représentatif de la surface au sol qu'observe le système imageur. A l'intérieur de cette cellule de résolution, dont la taille est grande par rapport à la longueur d'onde, se trouve un nombre considérable de N réflecteurs élémentaires, [Zine-05], ayant chacun réfléchi une onde électromagnétique et dont les signaux s'additionnent de façon cohérente pour former le signal rétrodiffusé exprimé par :

$$S = i + jq = Ae^{j\phi} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=1}^N a_k e^{j\phi_k} \quad (I.18)$$

Avec : a_k et ϕ_k sont respectivement l'amplitude et la phase d'un élément rétrodiffuseur à l'intérieur de la cellule de résolution.

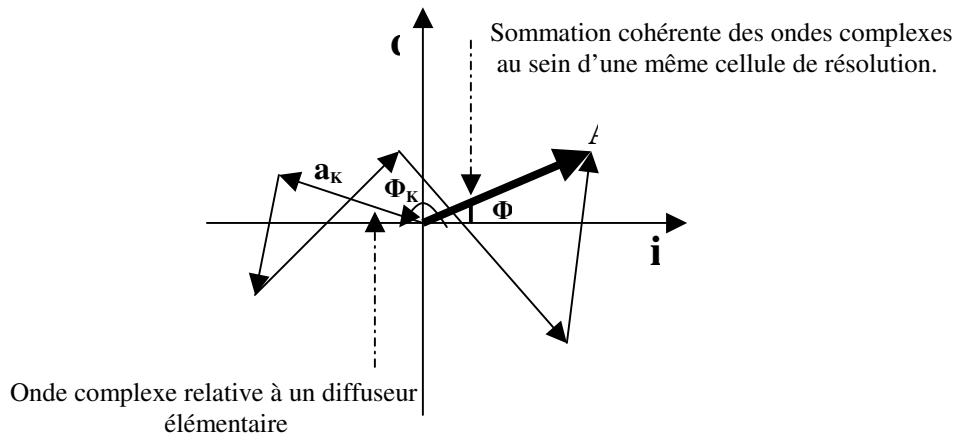


Figure I.7 : Construction de la réponse d'amplitude et de phase dans une cellule de résolution

En raison de l'interférence des ondes $Ae^{j\phi}$, comme nous le montre la figure I.7, le signal résultant peut avoir une amplitude très différente selon les cas : grande quand les réflecteurs sont en phase, très petite lorsque les réflecteurs sont en opposition de phase.

Ce phénomène inhérent à tous les systèmes d'imagerie cohérente a été l'objet de plusieurs études [Ambe-05], il apparaît sur les images sous la forme d'un bruit important connu sous le nom de chatoiement ou « speckle » qui dégrade fortement la lisibilité des images.

Il y a deux procédés pour l'atténuer, le premier est basé sur la technique de moyennage : soit spatiale, c'est regrouper les pixels (lignes et colonnes) à l'intérieur d'une fenêtre de taille donnée au détriment de la résolution spatiale ; soit spectrale, c'est diviser l'ouverture synthétique de l'antenne (diviser la bande Doppler) en M sous bandes, comme nous le montre la figure I.8. Pour avoir M images indépendantes, ayant chacune une résolution azimutale dégradée et elles seront moyennées.

Le second procédé consiste à filtrer ces images pour avoir une meilleure résolution radio métrique, et se base sur l'utilisation des filtres adaptatifs avec différentes modélisations [Ambe-05].

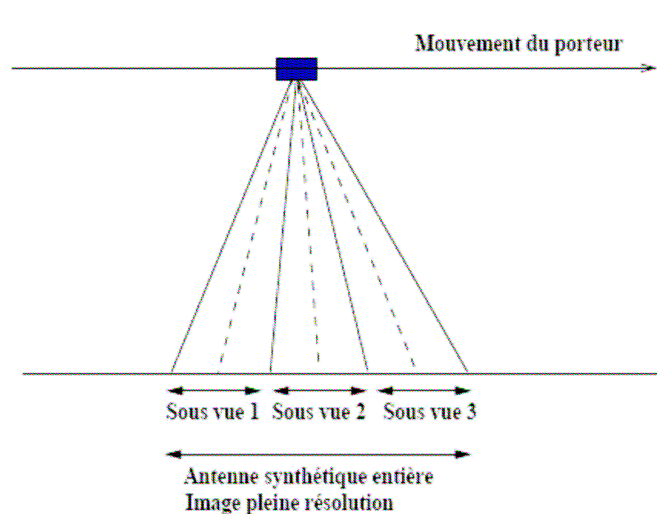


Figure I.8 : Principe de découpage en multi vues.

- **Image d'amplitude :**

Les images d'amplitude représentent la réponse du terrain à l'onde hyperfréquence émise par le radar, codée en niveau de gris. L'image d'amplitude est le module du signal complexe. La radiométrie du pixel, fonction de l'interaction onde surface, dépend de paramètres propres au radar (longueur d'onde, polarisation, angle d'incidence...) et des paramètres liés à la nature du sol (humidité, rugosité, inclinaison...), c'est le reflet du coefficient de rétrodiffusion.

- **Image de phase :**

La phase d'un signal radar rétrodiffusé est une information riche mais difficile à exploiter directement car elle est décomposée de plusieurs termes :

$$\varphi_{\text{totale}} = \varphi_{\text{trajet}} + \varphi_{\text{météo}} + \varphi_{\text{rétrodiffusion}} + \varphi_{\text{bruit}} . \quad (\text{I.19})$$

1. la phase du trajet φ_{trajet} , c'est le déphasage lié à la distance parcouru par l'onde,(aller retour).
2. la phase météo $\varphi_{\text{météo}}$ qui est un second déphasage produit par des conditions atmosphériques.
3. la phase de rétrodiffusion $\varphi_{\text{rétrodiffusion}}$ est le déphasage introduit au moment de l'interaction avec l'élément de surface, elle est dite aussi phase propre de la cible.
4. la phase du bruit φ_{brui} , introduit par l'instrumentalisation et les procédés d'acquisition.

Plusieurs techniques ont été développées afin d'exploiter toutes les informations apportées par l'image radar (phase, polarisation, intensité). Parmi ces techniques, celle qui étudie la signature du terrain en s'affranchissant de la partie géométrique de la phase : c'est la polarimétrie, et celle qui exploite la partie géométrique de la phase. C'est à ce dernier thème que s'inscrit notre travail de recherche. Il s'agit de l'exploitation de la phase des signaux radar pour modéliser la topographie ; deux applications sont enregistrées : la première est la génération des modèles numériques de terrain par l'interférométrie radar, la deuxième est la détection des déplacements effet de mouvement de terrain par l'interférométrie différentielle.

I.4. Présentation des données :

Nous présentons dans cette partie les données que nous avons utilisées ainsi que leurs caractéristiques. En effet, dans notre travail, nous avons utilisé un couple d'images acquises par les satellites ERS1-ERS2 en tandem de type SLCI (single look complex image) de la région d'Alger, leurs caractéristiques sont données dans le tableau I.1 :

Les satellites	ERS1	ERS2
Type de produit	SLCI (Single Look Complex Image)	
Date d'acquisition	03-01-1996	04-01-1996
Début de l'acquisition	10 :30 :49.399	10:30:51.284
Fin de l'acquisition	10 :31 :06.067	10:31:07.952
Orbite	23371	3698
Frame	2871	2871
mode	Descendant	Descendant
Track	00337	
Taille des images	4900×26581 pixels	4900×26544 pixels
Fréquence Doppler f_D	382.609 Hz	150.578 Hz
La hauteur de satellite H	785 Km	
PRF	1679.902 Hz	
Fréquence centrale de l'onde f_c	5.300 GHz	
Bande passante du chirp B_{chip}	15.55 MHz	
Station d'archive	Italian-IPAF	
Angle d'incidence θ_i (au centre)	23^0	
Distance radar - centre du lobe d'antenne	850 Km	
Fréquence d'échantillonnage en distance F_e	18.962468 MHz	
Inclinaison de l'orbite	98.516^0	

Tableau I.1 : Caractéristiques de prise de vue des deux images radar utilisées

En plus des images citées précédemment, nous avons aussi généré des images simulées pour tester nos algorithmes, figure I.9. Nous notons que ces images simulées sont de taille 256*256.

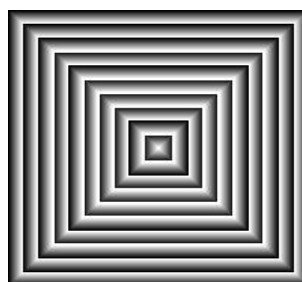
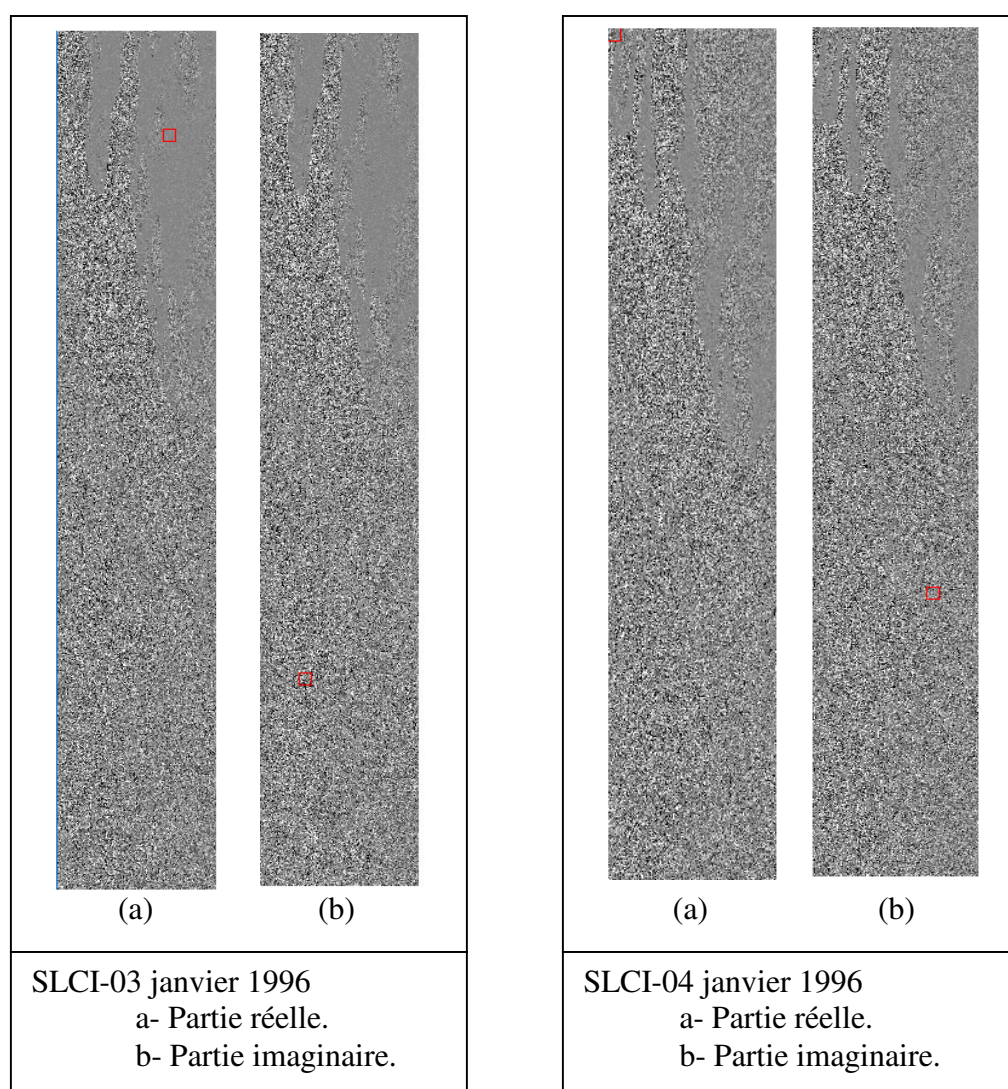


Image simulée

Figure I.9 : Les images utilisées

Chapitre II : Interférométrie SAR

L'interférométrie est une technique de traitement d'image radar SAR qui exploite la différence de phase de deux images radar SLC (Single Look Complex), afin d'extraire l'information altimétrique de chaque cible observée de la scène. L'ensemble des informations altimétriques constituent le modèle numérique de terrain. Par ailleurs, la combinaison du couple interférométrique avec d'autres données (couples interférométriques ou des informations altimétriques générées par des procédés conventionnels comme les courbes de niveaux) permet de restituer les déplacements ou mouvements de terrain survenus dans un intervalle de temps, c'est l'interférométrie différentielle.

II.1. Géométrie interférométrique :

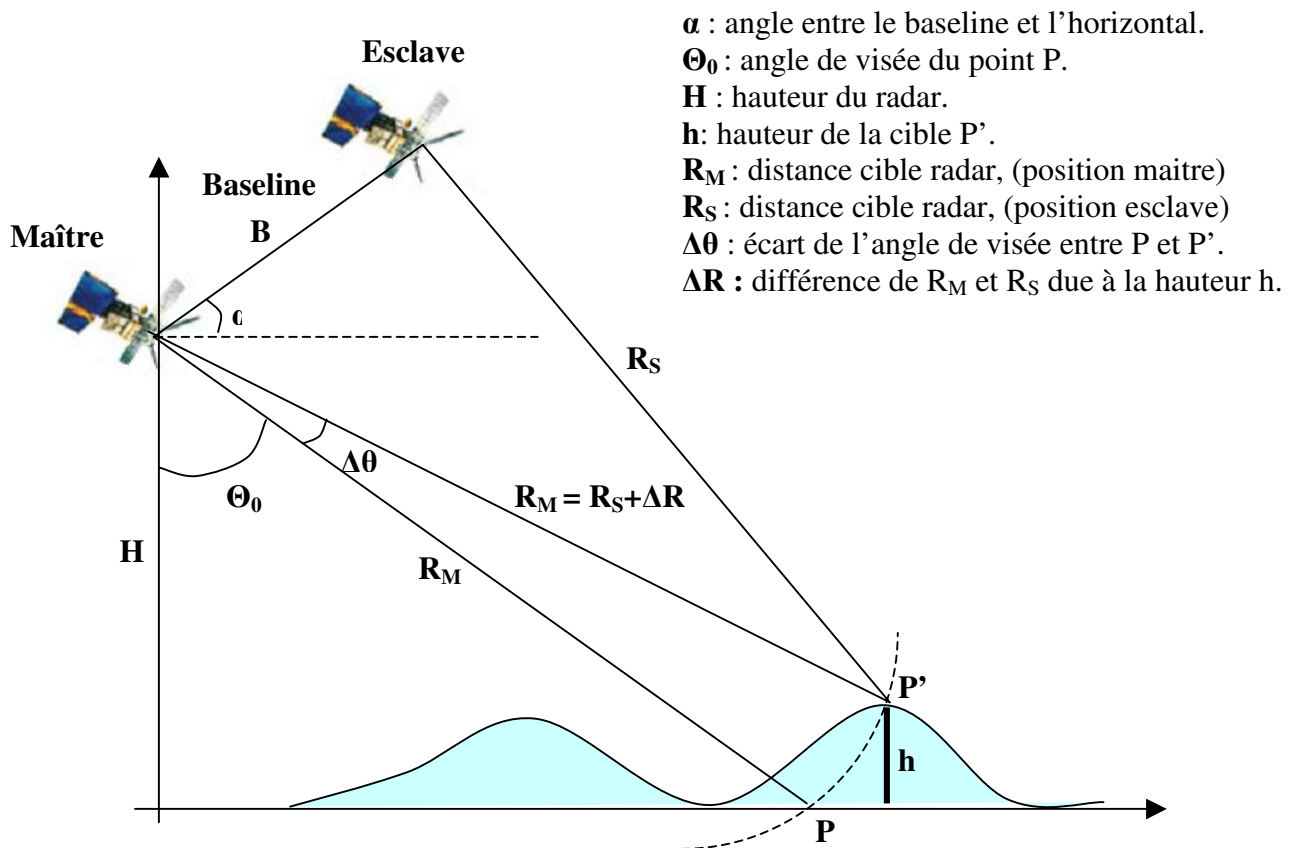


Figure II.1 : Géométrie d'acquisition d'un couple interférométrique

La figure II.1 représente la géométrie d'acquisition d'une scène par un système interférométrique. Le radar dans les deux positions maître et esclave, séparées par une ligne de base de longueur B, reçoit respectivement des signaux S_M et S_S :

$$S_M = A_M e^{j\varphi_M} \quad \text{et} \quad S_S = A_S e^{j\varphi_S}$$

Leurs phases se décomposent principalement en trois termes, un terme lié au double trajet radar cible, un terme de déphasage induit par l'interaction de l'onde radar avec la cible excitée (la phase de rétrodiffusion), et un terme qui englobe les bruits lors d'acquisition d'image.

$$\varphi_M = \frac{4\pi}{\lambda} R_M + \varphi_{\text{rétrodiffusion}} + \varphi_{\text{bruits}} \quad (\text{II.1})$$

$$\varphi_S = \frac{4\pi}{\lambda} R_S + \varphi_{\text{rétrodiffusion}} + \varphi_{\text{bruits}} \quad (\text{II.2})$$

L'image de différence de phase, obtenue après formation d'un interférogramme par le produit $S_M \cdot S_S^*$, elle est directement proportionnelle à la différence de trajet ΔR des deux signaux, et cela en considérant que la phase de rétrodiffusion des deux signaux S_M et S_S est identique car la différence des angles de vue est faible, ainsi l'égalité supposée de la phase du bruit qui englobe la phase instrumentale et la phase atmosphérique (nous supposons que les deux scènes acquises sous les mêmes conditions atmosphériques):

$$S_M \cdot S_S^* = A_M \cdot A_S \cdot e^{j(\varphi_M - \varphi_S)} = A_M \cdot A_S \cdot e^{j(\frac{4\pi}{\lambda} \cdot (R_M - R_S))} = A_M \cdot A_S \cdot e^{j(\frac{4\pi}{\lambda} \cdot \Delta R)} \quad (\text{II.3})$$

A partir de la géométrie interférométrique, il est possible de calculer la différence de trajet $\Delta R = R_M - R_S$ comme suit :

$$R_S^2 = R_M^2 + B^2 - 2BR_M \cos(90^\circ - \theta + \alpha) \quad \text{avec} \quad \theta = \theta_0 + \Delta\theta \quad (\text{II.4})$$

$$R_S = \sqrt{R_M^2 + B^2 - 2BR_M \sin(\theta - \alpha)} \quad (\text{II.5})$$

Comme la valeur du baseline B est très inférieur à R_M , on peut faire les approximations suivantes :

$$R_M + \Delta R = R_M - B \sin(\theta - \alpha) \quad (\text{II.6})$$

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

Ce qui nous donne l'expression de la phase interférométrique sous la forme suivante :

$$\Delta\varphi = -\frac{4\pi}{\lambda} B \sin(\theta - \alpha) \quad (\text{II.8})$$

Communément, il est utile de décomposer le baseline en deux termes, le baseline parallèle $B_{//}$ et le baseline orthogonale, $B_{\perp}$, [Sand -98], [Burg-00], (figure II.2)

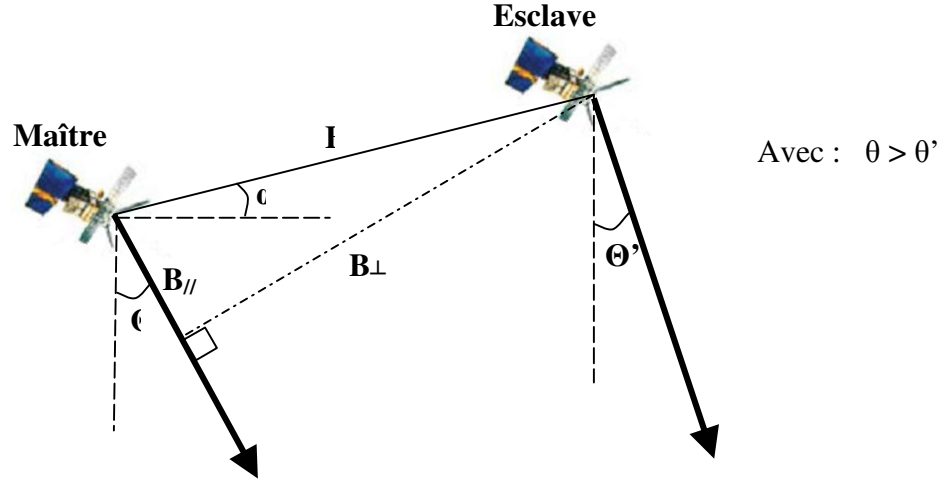


Figure II.2 : Baseline interférométrique

Les valeurs des deux baselines, parallèle et normale sont reliées à la valeur du baseline par :

$$B_{//} = B \sin(\theta - \alpha) \quad \text{et} \quad B_{\perp} = B \cos(\theta - \alpha)$$

Ainsi la phase interférométrique $\Delta\varphi$ peut s'écrire en fonction des baselines :

$$\Delta\varphi = -\frac{4\pi}{\lambda} (R_M - R_S) = -\frac{4\pi}{\lambda} \Delta R = -\frac{4\pi}{\lambda} B \sin(\theta - \alpha) = -\frac{4\pi}{\lambda} B_{//} \quad (\text{II.9})$$

La hauteur h est calculée en considérant deux cibles P et P' ayant la même distance radiale par rapport au satellite maître, mais positionnées à des hauteurs différentes $h = h_{p'} - h_p$ (figure II.1).

L'angle de visée varie donc de $\Delta\theta$, avec θ_0 est l'angle de visée du point P par rapport à l'ellipsoïde de référence. La phase interférométrique pour le point P' devient :

$$\Delta\varphi_{P'} = -\frac{4\pi}{\lambda} B \sin(\theta_0 + \Delta\theta - \alpha) \quad (\text{II.10})$$

$$\Delta\varphi_{P'} = -\frac{4\pi}{\lambda} B [\sin(\theta_0 - \alpha) \cdot \cos(\Delta\theta) + \cos(\theta_0 - \alpha) \cdot \sin(\Delta\theta)] \quad (\text{II.11})$$

En utilisant l'approximation $\cos(\Delta\theta) \approx 1$ et $\sin(\Delta\theta) \approx \Delta\theta$, nous aurons :

$$\Delta\varphi_{P'} = -\frac{4\pi}{\lambda} B \sin(\theta_0 - \alpha) - \frac{4\pi}{\lambda} \Delta\theta \cdot B \cos(\theta_0 - \alpha) \quad (\text{II.12})$$

Par ailleurs, nous avons :

$$\sin(\theta_0) = \frac{h}{R_M \cdot \Delta\theta} \quad (\text{II.13})$$

Finalement, la phase interférométrique du point P' est donnée par la relation suivante :

$$\Delta\varphi_{P'} = -\frac{4\pi}{\lambda} B \sin(\theta_0 - \alpha) - \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{h}{R_M \sin(\theta_0)} \cdot B \cos(\theta_0 - \alpha) \quad (\text{II.14})$$

$$\Delta\varphi_{P'} = -\frac{4\pi}{\lambda} B_{\parallel} - \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{h}{R_M \sin(\theta_0)} \cdot B_{\perp} = \Delta\varphi_{flat} + \Delta\varphi_{topo} \quad (\text{II.15})$$

La phase interférométrique est une somme de deux termes, le premier $\Delta\varphi_{flat}$ qui représente la phase de la terre plate déduite de la distance entre les deux orbites des deux radars maître et esclave, le second est $\Delta\varphi_{topo}$ qui représente la phase topographique.

La phase topographique dépend de la composante orthogonale du baseline, de la longueur d'onde ainsi que de la distance radiale.

De même, il est possible de définir la hauteur d'ambiguïté $h_{2\pi}$, c'est-à-dire la séparation altimétrique entre deux lignes de franges de l'interférogramme qui est la différence de 2π due uniquement à l'effet d'altitude, $\Delta\varphi_{topo} = 2\pi$:

$$h_{2\pi} = \frac{\lambda}{2} \frac{R_M \cdot \sin(\theta_0)}{B_{\perp}} \quad (\text{II.16})$$

Nous remarquons dans cette expression que l'altitude d'ambiguïté est inversement proportionnelle au baseline, d'où une faible altitude d'ambiguïté est synonyme d'une meilleure précision altimétrique liée à l'augmentation du baseline. En revanche, elle entraîne un nombre important de franges qui rend l'étape du déroulement de phase difficile.

Pour notre couple interférométrique, nous avons calculé la valeur du baseline, elle est égale à 39 m.

En pratique, la détermination de la phase topographique nécessite une procédure de prétraitement de la phase globale pour éliminer la phase due au baseline

II.2. Processus interférométrique :

La démarche globale des traitements interférométriques est schématisée par l'organigramme de la figure II.3, nous avons à cet effet étudié les différents niveaux du processus.

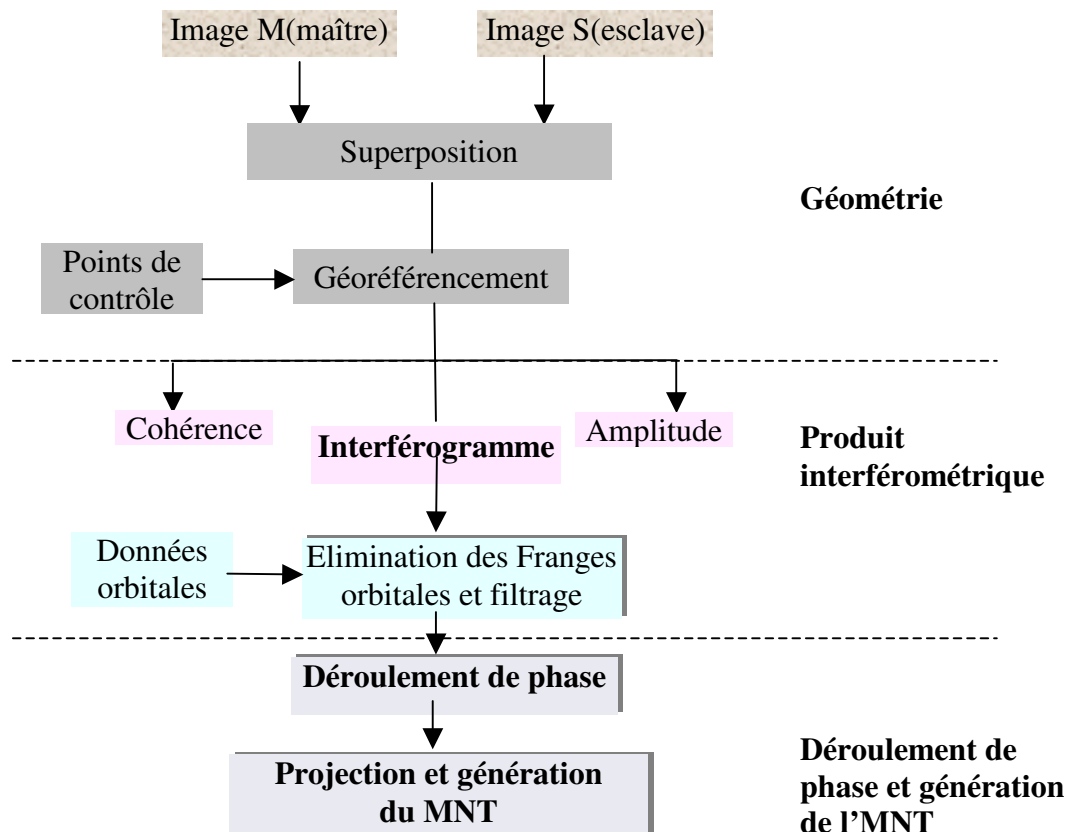


Figure II.3 : Processus de traitements interférométriques

Nous pouvons distinguer principalement 3 niveaux de traitement :

- La superposition et le géo-référencement du couple interférométrique.
- Génération du produit interférométrique à savoir : l'image de cohérence, l'interférogramme et les prétraitements (éliminations des franges orbitale et le filtrage).
- Déroulement de phase pour l'obtention du modèle numérique de terrain.

Dans un premier temps, nous avons extrait les informations concernant les paramètres de prise de vue de chaque image et qui sont nécessaires dans des étapes ultérieures.

Superposition des deux images radar SAR :

La qualité des résultats du processus interférométrique est conditionnée principalement par l'étape de la superposition géométrique du couple image. Comme nous l'avons montré, chaque cible au sol est imagée par les deux signaux radar (maître et esclave) et leur localisation aux mêmes coordonnées dans le couple est une étape primordiale.

Par ailleurs, les couples interférométriques sont acquis généralement selon deux modes : soit en double passe où le temps qui sépare les deux images est égal au temps de répétitivité du satellite ou bien avec deux satellites en tandem tel que ERS1/ERS2. Soit en simple passe, dans ce cas il s'agit de capteurs aéroportés (deux capteurs séparés par une distance B et embarqués par un avion).

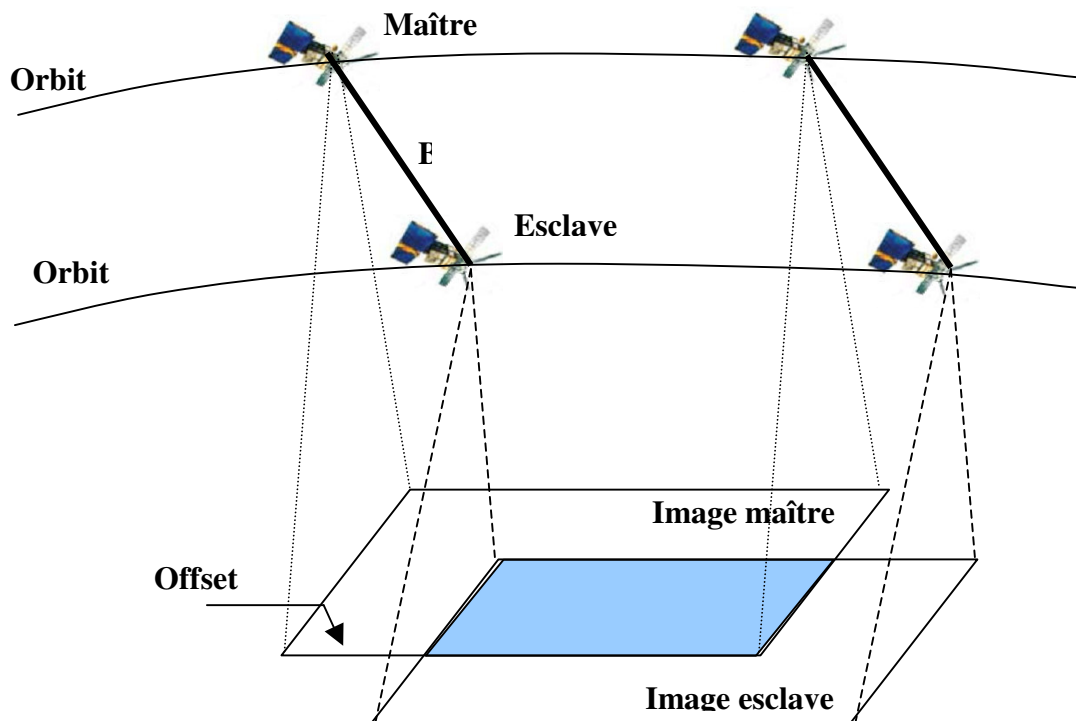


Figure II.4 : Image maître et esclave

Quelque soit le mode d'acquisition, la première opération est la délimitation de la zone commune des deux images par le calcul de l'offset de décalage en x et y. Le dernier peut être calculé selon deux étapes :

a. Localisation de la zone commune :

La première étape que nous avons développée, consiste à calculer les deux échelles de l'image maître suivant l'axe horizontal, axe des longitudes et selon l'axe vertical, axe des latitudes. Après, nous normalisons la différence de longitude du premier pixel des deux images maître esclave par l'échelle suivant l'axe des longitudes et cela pour trouver le décalage en colonnes.

Par analogie, on calcule l'écart ou l'offset en ligne mais cette fois ci en faisant la différence en latitude entre le premier pixel des deux images puis on fait le rapport avec l'échelle suivant l'axe des latitudes.

Nous avons utilisé le couple d'images acquises en tandem ERS1-ERS2 le 3 et 4 Janvier pour lequel l'image acquise le 3 Janvier est prise comme image maître.

L'échelle suivant l'axe horizontale : 22244×10^{-8}

L'échelle suivant l'axe verticale : 3510025×10^{-11}

Un décalage de 16 colonnes et 148 ligne.

Ensuite pour vérifier nos résultats, nous avons utilisé le logiciel BEST, qui est un utilitaire développé par l'Agence Spatiale Européenne (ESA) pour les manipulations des données SAR des satellites de l'ESA à savoir ERS1 et ERS2 et les images ASAR d'ENVISAT. Nous avons pris un point quelconque dans l'une des deux images qui a des coordonnées géographiques latitude et longitude , ses coordonnées dans les deux images maître et esclave sont respectivement, P (Xm, Ym) et P (Xs, Ys).

L'offset ou le décalage entre les deux images est calculé par la relation suivante :

$$\text{Offset}(X, Y) = P(X_m, Y_m) - P(X_s, Y_s) \quad (\text{II.17})$$

Pour notre cas l'offset est estimé à 159 lignes et 11 colonnes.

Cette différence est justifiée par les erreurs dans l'estimation de l'échelle, et n'influe pas sur les résultats car il s'agit de déterminer la partie commune du couple utilisé.

Après avoir extrait la même zone à partir des deux images radar, la deuxième étape de la superposition consiste à calculer la corrélation entre l'image maître et esclave dans le but de trouver le décalage entre ces deux images avec précision, et cela dans le plan de Fourier.

b. La corrélation de phase :

La transformée de Fourier traduit une translation en un déphasage fréquentiel. Pour calculer le décalage entre deux images, nous allons calculer le spectre croisé des deux images maître et esclave. Ceci revient à calculer le rapport des deux spectres. En suite, nous calculons la transformée inverse du rapport. Les coordonnées du maximum de la transformée inverse de Fourier du spectre croisé ne sont autres que les coordonnées du vecteur de translation que nous allons utiliser.

Soit F l'opérateur de Fourier, Soient $g_0(x, y)$ (resp. g') une image et $G_0(fx, fy)$ (resp. G_1) sa transformée. Soient t le vecteur de translation de coordonnées u et v , et t_r l'opérateur de translation correspondant ; nous posons g_1 image de g_0 par cette translation. Nous pouvons formuler cette procédure de la manière suivante, [Bapt-97], [Humb-05] :

$G_0(fx, fy)$ transformée de Fourier en deux dimensions de $g_0(x, y)$, par définition :

$$F[g_0(x, y)] = G_0(fx, fy) \quad (\text{II.18})$$

Translation de vecteur $t = (u, v)$ et définition de g_1 :

$$g_1(x, y) = t_r g_0(x, y) = g_0(x - u, y - v) \quad (\text{II.19})$$

Transformée G_1 de l'image déclarée g_1 :

$$G_1(fx, fy) = F[g_0(x - u, y - v)] = \ell^{-2j\pi(u fx + v fy)} \cdot G_0(fx, fy). \quad (\text{II.20})$$

Soit $\Psi(fx, fy)$, le spectre croisé obtenu par le rapport des spectres de g_0 et g_1 :

$$\Psi = \frac{G_1}{G_0} \quad (\text{II.21})$$

Le calcul de Ψ donne la formule suivante :

$$\psi(fx, fy) = \frac{G_1(fx, fy)}{G_0(fx, fy)} = \ell^{-2j\pi(u fx + v fy)}. \quad (\text{II.22})$$

Le calcul du spectre croisé Ψ donne donc une onde monochromatique. Cette onde est une fonction exponentielle complexe du plan ne comportant qu'un seul vecteur d'onde qui correspond au vecteur de translation $t = (u, v)$.

Une fois Ψ obtenu, on peut déterminer son vecteur d'onde en calculant sa transformée de Fourier inverse qui est un signal de Dirac au point $t = (u, v)$. La figure II.5 représente ce pic de Dirac obtenu en utilisant les deux images précédentes.

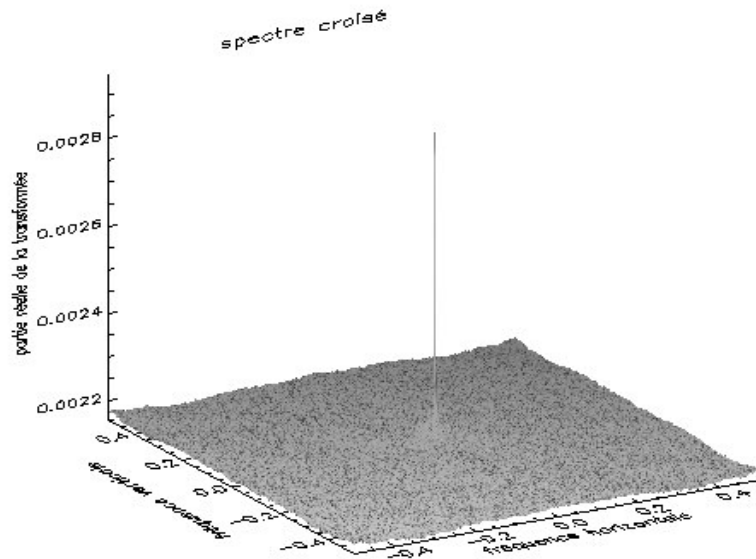


Figure II.5 : Pic de Dirac correspondant à la translation

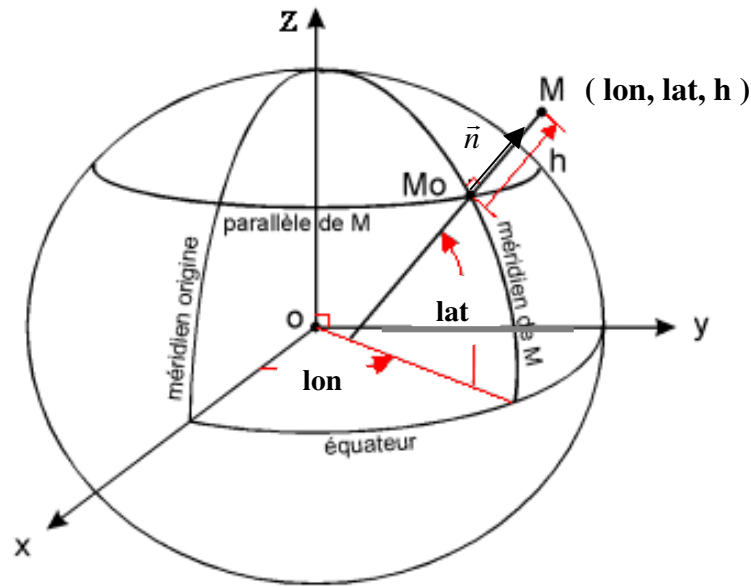
Nous notons que cette méthode est très intéressante, elle permet de superposer n'importe quel couple d'image radar.

L'évaluation de la qualité des résultats de cette étape n'est perceptible qu'à travers le produit interférométrique que nous donnons par la suite.

Géo-référencement des images sar :

En reprenant les résultats des travaux développés au sein de notre laboratoire sur la correction des images radar, nous avons géoréférencé ces images radar, afin que nous puissions calculer les deux angles de vue et d'incidence. Cette étape consiste à trouver les coordonnées géocentriques X, Y, Z pour chaque pixel dans le repère WGS 84, (World Geodetic System 84). En utilisant le logiciel BEST, nous avons pris de l'image quelques points de références avec leur latitude et longitude.

Ensuite, nous avons effectué une interpolation à deux dimensions par les moindres carrés afin de généraliser le calcul, chaque pixel aura ses coordonnées géographiques (latitude et longitude) par rapport à l'ellipsoïde WGS 84.



FigureII.6 : Représentation des coordonnées géographiques d'un point

Une transformation des coordonnées géographiques est utilisée, elle permet de transformer les coordonnées géographiques (longitude (lon), latitude (lat) vers les coordonnées géocentriques X, Y et Z par rapport au centre de la terre et cela par les relations ci dessous :

$$\begin{cases} X = (N + h)\cos(lon)\cos(lat) \\ Y = (N + h)\cos(lon)\sin(lat) \\ Z = [N(1 - e^2) + h]\sin(lat) \end{cases} \quad (II.23)$$

Où X, Y et Z, sont les coordonnées géocentrique d'une cible ou d'un pixel donné, et h représente la hauteur de cette cible.

$$e = \sqrt{\frac{(a^2 + b^2)}{a^2}}, \text{ c'est l'excentricité de la terre.}$$

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2(\text{lat})}}, \text{ c'est une constante qui représente la courbure de l'ellipsoïde.}$$

Où a et b sont respectivement le petit et le grand axe de l'ellipsoïde de la terre.

En conséquence, chaque pixel a ses coordonnées géocentriques par rapport au centre de la terre.

Produit interférométrique :

- **Cohérence interférométrique :**

La cohérence entre deux images SAR interférométrique est un facteur important qui indique la qualité de l'interférogramme, un bon interférogramme est obtenu avec une bonne cohérence.

Il est calculé par la relation suivante :

$$|\gamma| = \frac{\langle S_m S_s^* \rangle}{\sqrt{|S_m|^2 \cdot |S_s|^2}} \quad (\text{II.24})$$

La cohérence $|\gamma|$ varie entre 0 (décorrélation totale) et 1 lorsque les deux images sont identiques et cela dans le cas où il n'y a pas de changement de surface entre les deux acquisitions.

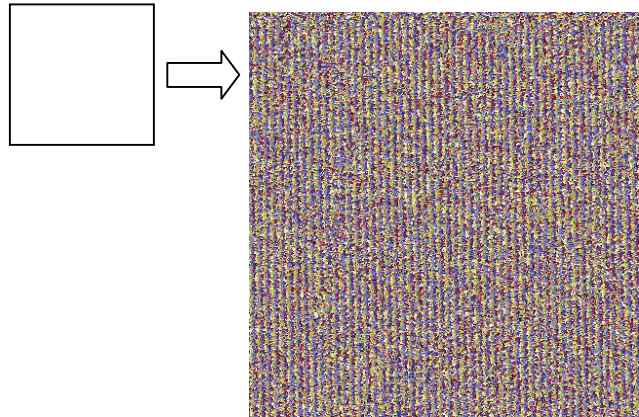
Les principales sources de dégradation de la cohérence interférométrique, [Gare-06], [Dupo-94], [Tom-04], sont :

- 1- Décorrélation causée par le bruit lors de l'acquisition des deux images.
- 2- Décorrélation temporelle causée par les changements de la géométrie des diffuseurs ainsi que par le comportement de rétrodiffusion des diffuseurs dans la cellule de résolution pendant l'intervalle de temps entre les deux acquisitions.
- 3- Décorrélation causée par la différence entre les deux angles de visée.

Pour notre cas, l'image de cohérence est donnée dans la figure (II.7.a).

Génération d'un interférogramme :

Nous avons ensuite calculé l'interférogramme qui est présenté dans la figure II.7. (b), qui représente la différence de phase globale des deux images.



(a)

(b)

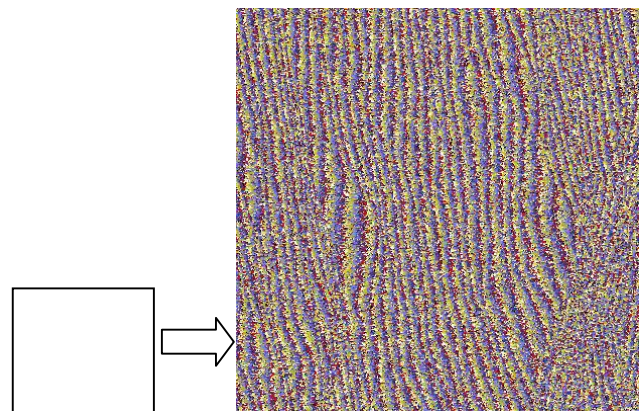


Figure II.7: (a)- Image de cohérence.
(b)- Interférogramme brut.

Il est formé de franges topographiques proportionnelles à l'altitude de chaque cible et les franges orbitales. La première opération que nous avons effectuée est l'élimination des franges orbitales.

Elimination des franges orbitales :

Comme le montre la figure (II.7), nous pouvons dénoter de nombreuses franges parallèles à la direction de vol du radar. Ces franges sont dues au fait que deux points situés à une même hauteur mais à des positions radiales différentes n'ont pas la même valeur de phase interférométrique à cause de l'angle de visée du radar. Ainsi, même si le terrain étudié est totalement plat, l'interférogramme présente des franges.

Soit deux cibles P et P', situées à la même hauteur mais à des positions différentes. Cette configuration introduit un changement de l'angle de visée $\Delta\theta$, la différence de phase interférométrique entre P et P' est proportionnelle à la différence de la distance radiale ΔR_{MS} , et cette dernière augmente en s'éloignant du nadir (la perpendiculaire du radar) vers la partie distale de l'image. Figure II.8.

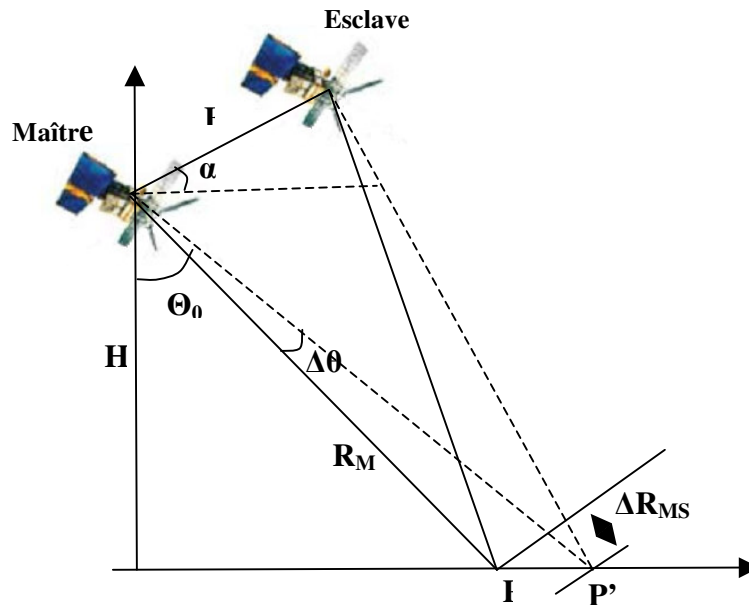


Figure II.8: Géométrie des franges orbitales

La composante de la terre plate peut être estimée à partir de la géométrie utilisée et doit être soustraite de manière à analyser uniquement la phase topographique. Pour cela, il existe principalement deux méthodes pour l'élimination des franges orbitales, une méthode géométrique basée sur les informations des orbites des deux acquisitions [Step-03], et une méthode qui repose sur la transformée de Fourier [Chen-04].

a- Méthode géométrique :

La phase de la terre plate (les franges orbitales) peut être estimée en utilisant les informations des deux orbites lors de l'acquisition des deux images maître et esclave, et cela pour calculer la valeur de la baseline que nous allons utiliser dans l'estimation des franges orbitales.

-Interpolation des orbites et calcul de la baseline :

Pour calculer la baseline, la distance entre orbites, on doit interpoler les deux orbites du radar par l'interpolation de Lagrange [Démi-73], afin qu'on puisse avoir respectivement à chaque ligne des deux images maître et esclave les deux positions du radar maître et esclave qui leur correspondent. Il s'agit de trouver le modèle polynomial sous la forme suivante :

$$\begin{aligned} S_x &= a_x + b_x t + c_x t^2 + \dots \\ S_y &= a_y + b_y t + c_y t^2 + \dots \\ S_z &= a_z + b_z t + c_z t^2 + \dots \end{aligned} \quad (\text{II.25})$$

Pour estimer ces polynômes pour chaque satellite, nous avons utilisé le polynôme de Lagrange.

$$P(t) = \sum_{j=1}^n \frac{P(t_j) \times \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n (t - t_i)}{\prod_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n (t_j - t_i)} \quad (\text{II.26})$$

Avec :

- $P(t_i)$ est la position du satellite au temps t_i mentionnées dans le header des deux images (nous avons 05 points).
- t_i correspond aux données éphémérides dans le header.

Sachant que t_i est l'intervalle entre les positions du satellite lues à partir du header de l'image radar, le baseline B est calculé par la relation suivante :

$$B = \sqrt{(X_S - X_M)^2 + (Y_S - Y_M)^2 + (Z_S - Z_M)^2} \quad (\text{II.27})$$

Notons que les deux positions du radar correspondent au même point dans les deux images maître et esclave.

Dans notre cas, le baseline est estimé à 207m.

En utilisant la valeur du baseline calculée, nous procédons à la simulation des franges orbitales par la formule $\Delta\phi_{\text{terreplate}} = -\frac{4\pi}{\lambda}B\sin(\theta_0 - \alpha)$, figure II.9; et les soustraire de notre interférogramme brut.

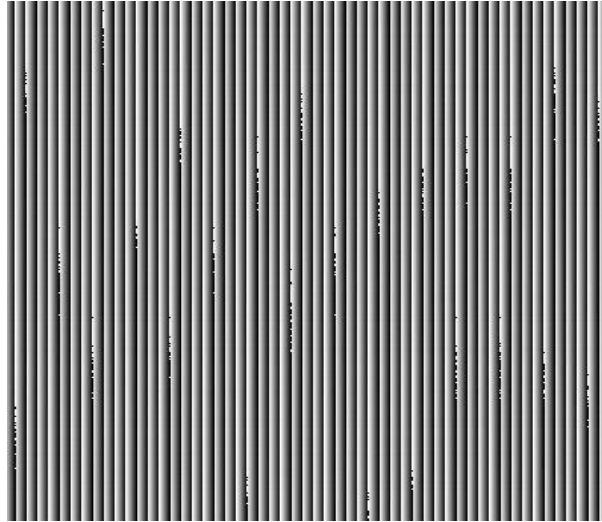


Figure II.9: Franges orbitales générées par la méthode géométrique

L'interférogramme corrigé des franges orbitales est présenté dans la figure (II.11.b).

La deuxième méthode que nous avons mis en œuvre est basée sur la transformée de Fourier.

b- Méthode de la FFT :

Cette méthode repose sur la détection de la fréquence des franges orbitale en calculant dans le plan spectral (calcul de la transformée de Fourier de l'interférogramme), le maximum en amplitude car la fréquence des franges orbitales est la plus grande (elles sont les plus répétées). Tout en détectant bien sur sa position suivant les deux axes horizontal et vertical.

Le rapport de la position horizontale et verticale du maximum par la taille de l'image (nombre de colonnes et de lignes) nous donne respectivement les deux fréquences horizontale F_h et verticale F_v des franges orbitales [Chen-04].

Les franges orbitales peuvent être générées, figure II.10, et extraite de l'interferogramme dans le plan complexe comme suit :

$$\text{intercorr} = \text{inter} \cdot e^{-2\pi F_h t_h} e^{-j2\pi F_v t_v} \quad (\text{II.28})$$

Avec : Intercorr : c'est l'interférogramme après élimination des franges orbitales.

Inter : interférogramme originale issu de la différence de phases.

F_h : la fréquence horizontale.

F_v : la fréquence verticale.

t_h : variable suivant l'axe horizontal.

t_v : variable suivant l'axe vertical.

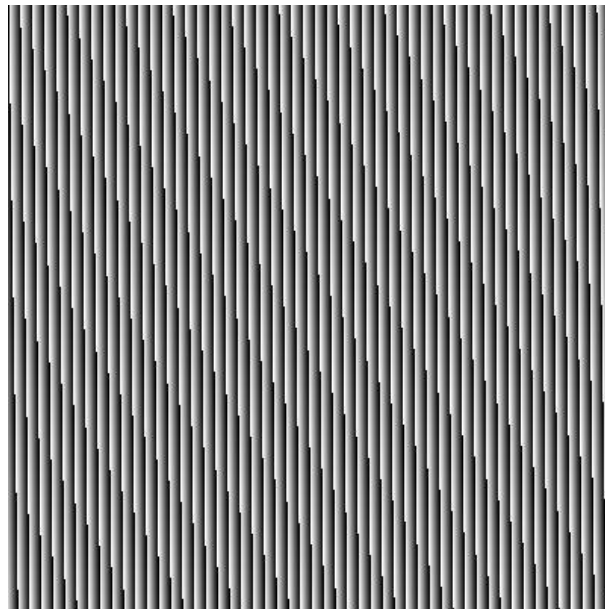


Figure II.10: Franges orbitales générées par la méthode basée sur la FFT

En utilisant les imagerie du couple radar, maître et esclave, présentées dans le chapitre précédent, voir la figure I.9. Nous aurons les résultats dans la figure II.11.

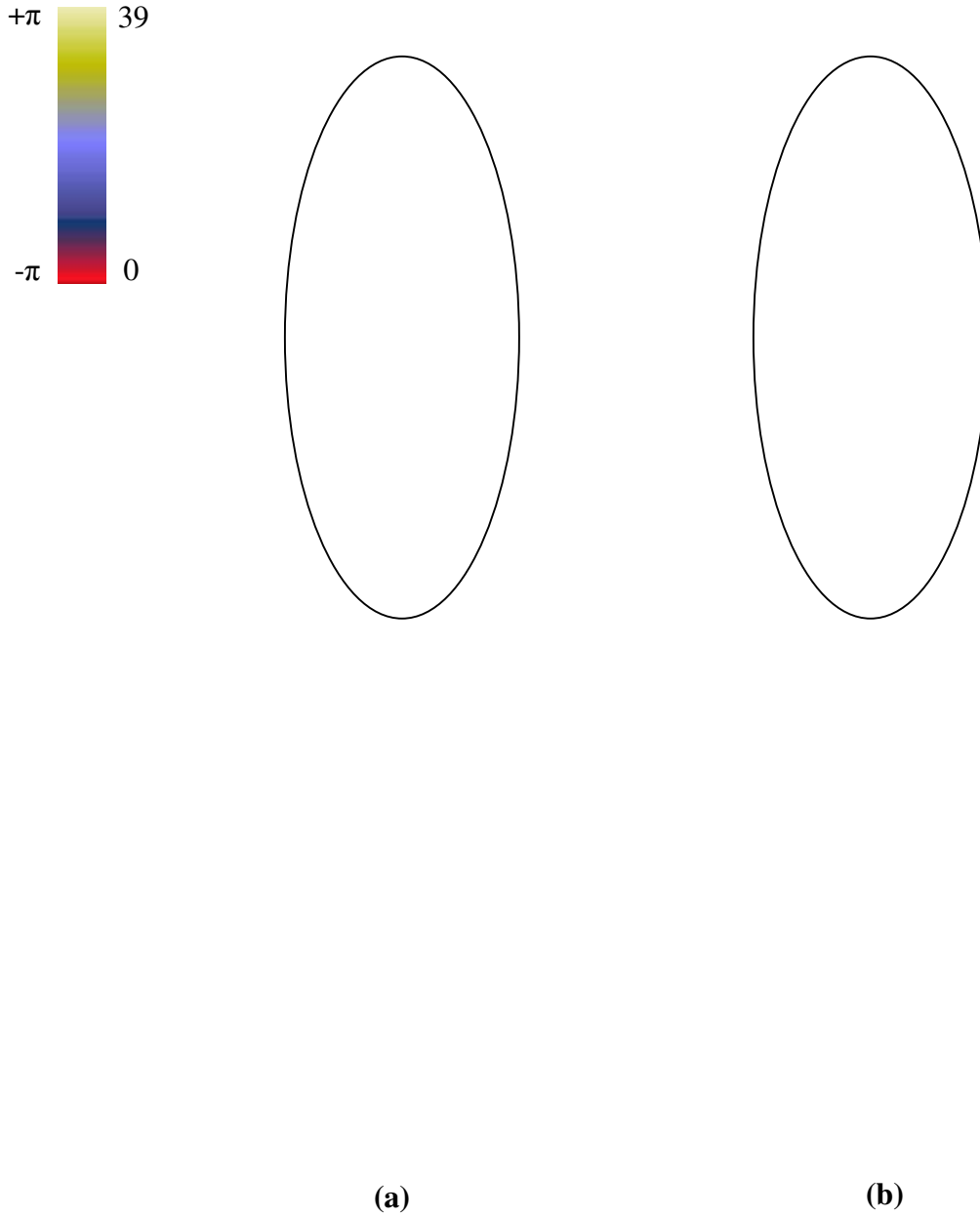


Figure II.11: a- Elimination des franges orbitales par la méthode géométrique.
b- Elimination des franges orbitales par la FFT.

Vue que la zone encadrée est une zone plate qui correspond à la région de Bab Ezzouar, nous remarquons bien, que la seconde méthode est la plus précise. En effet, l'effet d'élimination des franges orbitales de l'interférogramme brut est nettement observé dans l'interférogramme corrigé par la méthode basée sur la FFT.

Cependant, la méthode géométrique présente des franges supplémentaires dans cette région et cela est dû à l'imprécision des données orbitales utilisées.

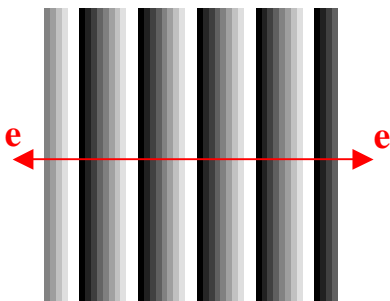
Filtrage de l'interférogramme :

Le filtrage des interférogrammes est une étape indispensable, il permet de réduire le bruit dû à la formation d'image radar (speckel), et les bruits qui sont causés par plusieurs facteurs, nous pouvons citer la décorrélation spatiale (distance entre orbites), la décorrélation temporelle (le temps qui sépare le couple d'images). Cependant, le filtrage des interférogrammes par les filtres non adaptatifs tels que le filtre moyen peut causer des distorsions au niveau des transitions des franges dans les interférogrammes car il ne prend pas en considération la périodicité de la phase interférométrique.

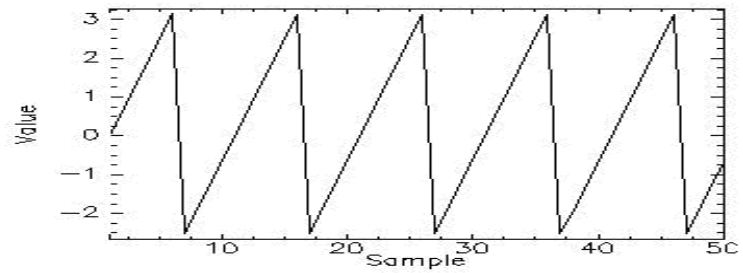
Parmi les filtres adaptés aux images interférométriques, nous trouvons le filtre vecteur [Xu-01], que nous avons mis en œuvre. Il consiste à calculer deux images cosinus et sinus de l'interférogramme, un moyennage est appliqué sur les résultats de ces deux fonctions, la phase résultante correspond à l'interférogramme filtré, l'expression du filtre est donnée par la relation II.29

$$\hat{\varphi}_{n,m} = \arctan\left(\sum \sin \varphi_{i,j}, \sum \cos \varphi_{i,j}\right) \quad (\text{II.29})$$

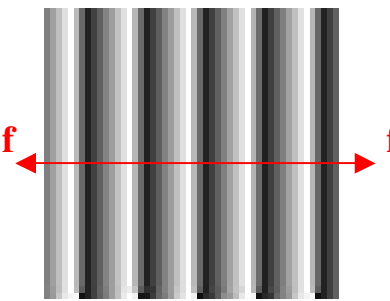
Nous avons testé les deux filtres, le filtre moyen (fenêtre 3×3) et le filtre adaptatif sur un interférogramme simulé. La figure II.12 nous montre que le filtre moyen ne prend pas en considération les discontinuités des franges, il les modifie. Voir le profil horizontal f-f de l'image II.12.b. Cependant, le filtre vecteur garde les mêmes discontinuités, il ne les modifie pas, et cela est illustré par le profil horizontal g-g de l'interférogramme filtré de l'image II.12.c, et qui est assimilable à celui de l'interférogramme original simulé, image II.12.a avec son profil horizontal e-e.



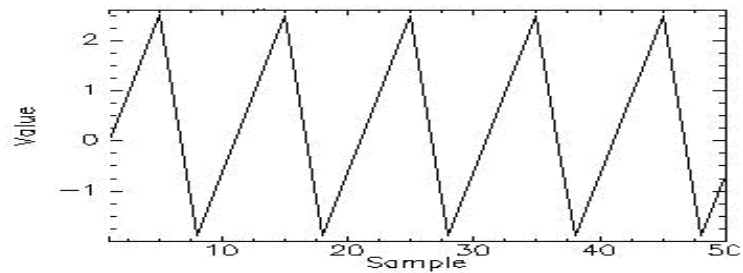
(a)- Interférogramme simulé



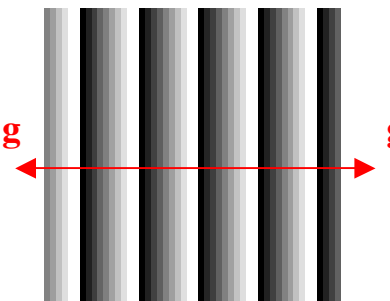
Profile horizontal e- e



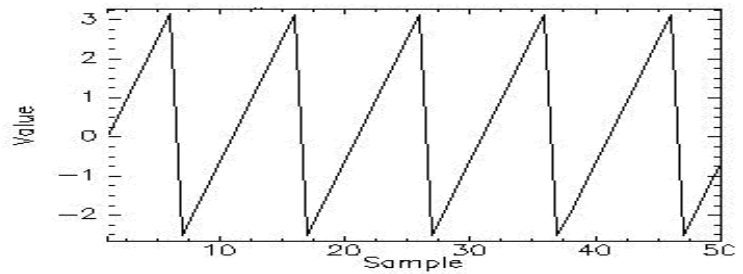
(b)- Interférogramme filtré par filtre moyen



Profile horizontal f- f



(c)- Interférogramme filtré par filtre adaptatif



Profile horizontal g- g

Figure II.12 : Filtrage adaptatif aux interférogrammes

Nous les avons testés sur une image de notre interférogramme généré, en prenant une fenêtre de taille 3×3. Nous voyons bien que le filtre adaptatif a filtré notre interférogramme et cela est illustré par les deux profils horizontaux avant et après filtrage, figure II.13 :

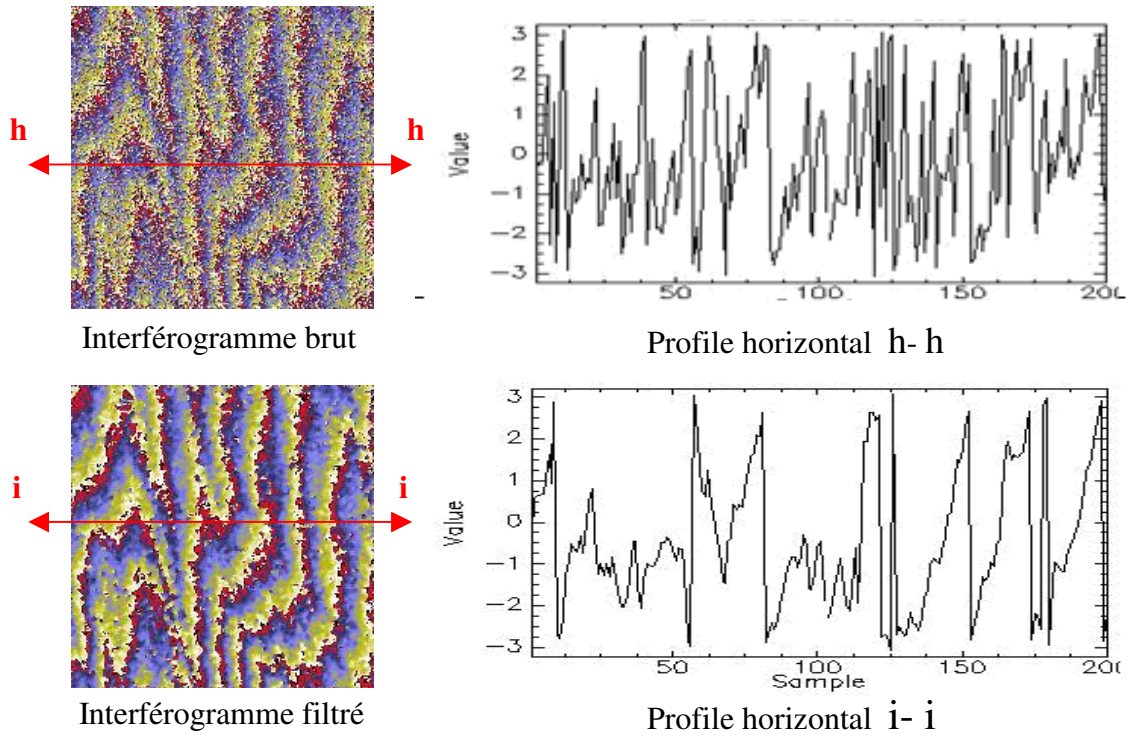


Figure II.13 : Filtrage de l'interférogramme par le filtre adaptateur

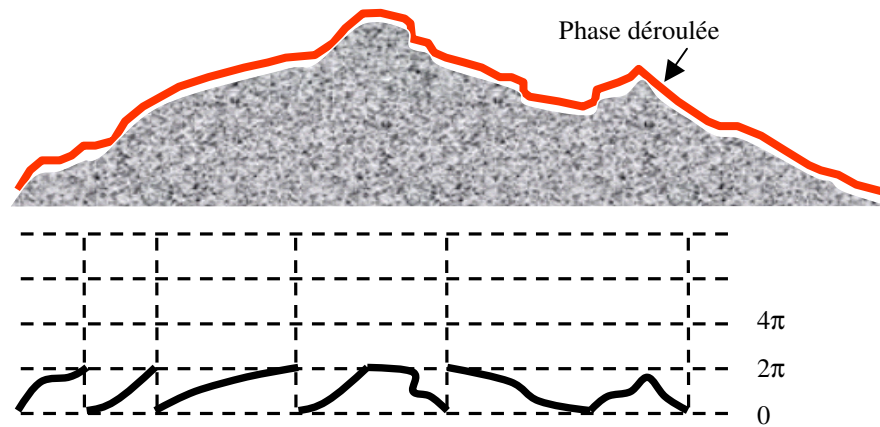
Déroulement de phase interférométrique :

La phase interférométrique montre des discontinuités, se sont des franges correspondantes à des valeurs de la phase Φ qui est modulo 2π . Cette variation est à l'origine de la formule suivante :

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{Q}{I}\right) \quad (\text{II.30})$$

Avec : Q et I sont respectivement la partie imaginaire et la partie réelle du signal radar.

Donc pour avoir un modèle numérique de terrain (MNT), il faut donc annuler cette ambiguïté au niveau de la phase en faisant le déroulement de phase afin d'avoir les phases absolues à partir des phases mesurées, comme le montre la figureII.14:



FigureII.14 : Principe de déroulement de phase

Dans le prochain chapitre, nous présenterons le principe de base du déroulement de phase ainsi que les différentes approches existantes.

Chapitre III : Déroulement de phase interférométrique

La dernière étape d'un processus interférométrique est le déroulement de phase qui consiste à trouver la phase absolue de chaque cible à partir de la phase ambiguë. A cet effet, nous présentons dans ce chapitre les principes et les approches de déroulement de phase et nous présentons les méthodes que nous avons développées ainsi que les résultats obtenus.

III.1. Principe de déroulement de phase :

Une des principales difficultés pour la réalisation d'un modèle numérique de terrain par l'interférométrie SAR, est le déroulement de phase. Cette étape consiste à calculer la phase exacte (phase absolue ϕ) en chaque pixel à partir de la phase mesurée dans l'interférogramme φ . Cela consiste à trouver le facteur k qui vérifie l'équation suivante :

$$\phi(p) = \varphi(p) + 2k\pi \quad \text{Avec } k \in \mathbb{Z} \quad (\text{III.1})$$

Si nous sommes dans un espace à une dimension, nous allons corriger un pixel par rapport à un pixel voisin tout en supposant que la différence de phase déroulée entre ces deux points ne dépasse pas π . Dans le cas contraire, nous disons que la phase a changé de cycle, c'est-à-dire que k doit augmenter ou diminuer de 1.

Par analogie, si maintenant nous sommes dans un espace à deux dimensions, la mesure de l'interférogramme est modulo 2π , il présente des franges dont les bords transitent de $-\pi$ à π . Ces franges sont assimilées à des courbes de niveaux séparées par une altitude dite altitude d'ambiguïté.

Le signal bidimensionnel qui forme l'interférogramme est le résultat d'un échantillonnage spatial, obtenu en azimuth et en distance. Si le critère de Nyquist est respecté lors de l'échantillonnage dans les deux directions, (l'échantillonnage doit se faire au double des fréquences maximales), et comme la période des franges est 2π . La différence de phase entre deux pixels voisins doit donc être inférieure ou égale à π ou $-\pi$.

En reprenant la géométrie interférométrique SAR, la différence de phases entre deux pixels P_1 et P_2 représentant deux cibles au sol est donnée par :

$$|\Delta\phi(p_1, p_2)| = |\phi(p_2) - \phi(p_1)| < \pi \quad (\text{III.2})$$

Les méthodes de déroulement de phase sont regroupées en trois catégories et cela selon la manière d'aborder le problème de déroulement de phase et qui sont :

- L'approche locale.
- L'approche globale.
- L'approche mixte.

III.2 Approche locale :

C'est la plus simple, elle est basée sur le calcul de la différence de phase, « pixel par pixel » selon une direction quelconque. Elle consiste à déterminer la valeur de l'étiquette k en minimisant la différence de phases entre deux pixels voisins comme suit:

Soit deux pixels p_1 et p_2 , en prenant le premier comme une référence, le second est déroulé par rapport à cette référence. Nous calculons la différence de phase enroulée $\Delta\phi$ et la différence de la phase déroulée $\Delta\Phi$ selon les trois conditions suivantes :

$$\begin{aligned} \text{Si } |\Delta\phi(p_1, p_2)| \leq \pi & \quad \Delta\phi(p_1, p_2) = \Delta\phi(p_1, p_2) \quad \text{Et } k(p_2) = k(p_1) \\ \text{Si } |\Delta\phi(p_1, p_2)| > \pi & \quad \Delta\phi(p_1, p_2) = \Delta\phi(p_1, p_2) - 2\pi \quad \text{Et } k(p_2) = k(p_1) - 1 \\ \text{Si } |\Delta\phi(p_1, p_2)| < -\pi & \quad \Delta\phi(p_1, p_2) = \Delta\phi(p_1, p_2) + 2\pi \quad \text{Et } k(p_2) = k(p_1) + 1 \end{aligned} \quad (\text{III.3})$$

La phase déroulée résultante est la suivante :

$$\phi(p_2) = \phi(p_1) + 2k(p_2)\pi \quad (\text{III.4})$$

Pour illustrer cette procédure et valider ainsi la méthode, nous avons généré un interférogramme simulé représentant une pyramide :

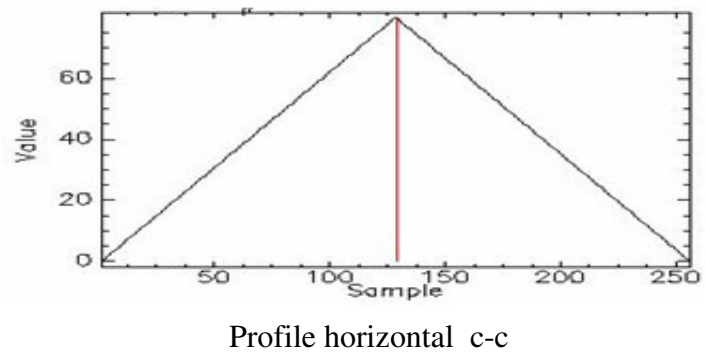
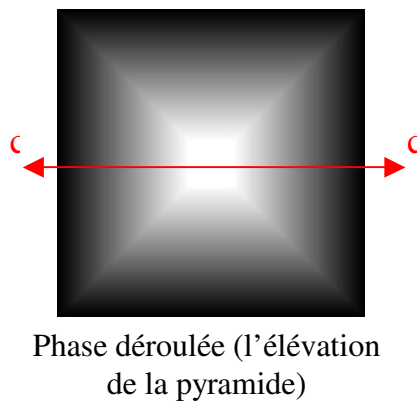
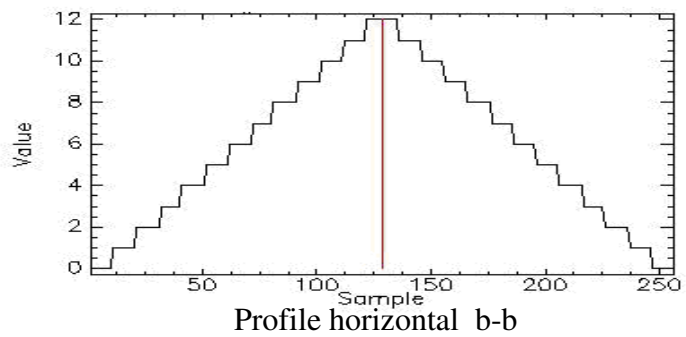
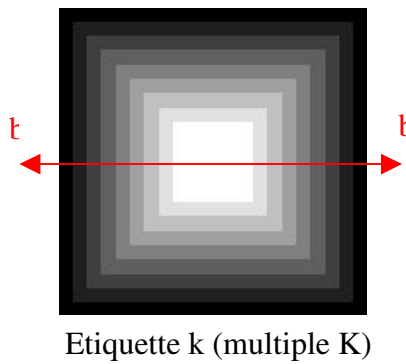
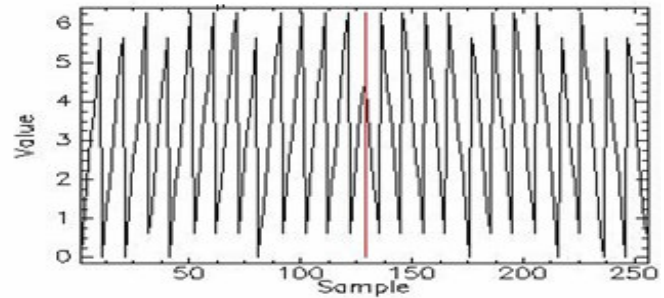
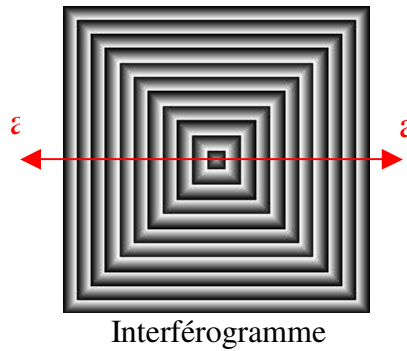


Figure III.1 : Déroulement de phase par la méthode de proche en proche.

Dans le cas des interférogrammes réels, ces derniers présentent des discontinuités dans les transitions d'une frange à une autre, ces discontinuités sont dues principalement aux bruits engendrés par plusieurs phénomènes cités précédemment.

Ces bruits qui engendrent ces discontinuités sont quantifiés dans les interférogrammes par des pixels dits pixels résidus, ils sont détectés avec un déroulement dans un parcours fermé [labr-96], [Trou-96].

Pour décrire la méthode de proche en proche dans un interférogramme bruité, nous avons un exemple d'une fenêtre 3×3 d'un interférogramme bruité et non bruité. L'intervalle des données interférométriques est $[0, 2\pi[$, normalisé à $[0, 1[$, et donc la valeur π est remplacée par 0.5.

Si nous prenons la valeur du coin supérieur gauche comme référence (nous lui attribuons l'étiquette $k=0$), nous allons effectuer le déroulement par rapport à cette valeur, et cela en suivant les deux sens de parcours :

-Cas non bruité :

Le déroulement est effectué en colonnes :

0.4	0.8	→	0.1	0	0	1	0.4	0.8	1.1
↓	↑		↓						
0.3	0.5		0.7	0	0	0	0.3	0.5	0.7
↓	↑		↓						
0.2	→	0.6	0.2	0	0	0	0.2	0.6	0.2
Interférogramme normalisé				Etiquette			Phase déroulée		

Le déroulement est effectué en lignes :

0.4 → 0.8 → 0.1	0	0	1	0.4	0.8	1.1
↓						
0.3 ← 0.5 ← 0.7	0	0	0	0.3	0.5	0.7
↓						
0.2 → 0.6 → 0.2	0	0	0	0.2	0.6	0.2
Interférogramme normalisé	Etiquette			Phase déroulée		

Quelque soit le sens de parcours, nous obtenons le même résultat. En présence du bruit, la différence entre deux pixels voisins peut dépasser π . Le résultat de déroulement par cette méthode est différent selon le chemin emprunté, d'où la non validité des résultats.

-Cas bruité :

Nous reprenons le même exemple, en modifiant le pixel supérieur gauche par 0.9 au lieu de 0.4.

Le déroulement est effectué en colonnes :

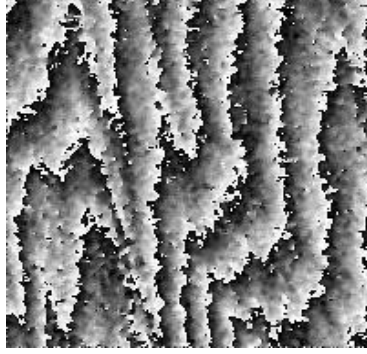
0.9	0.8	→	0.1	0	1	2	0.9	1.8	2.1
↓	↑		↓						
0.3	0.5		0.7	1	1	1	1.3	1.5	1.7
↓	↑		↓						
0.2	→	0.6	0.2	1	1	1	1.2	1.6	1.2
Interférogramme normalisé				Etiquette			Phase déroulée		

Le déroulement est effectué en lignes :

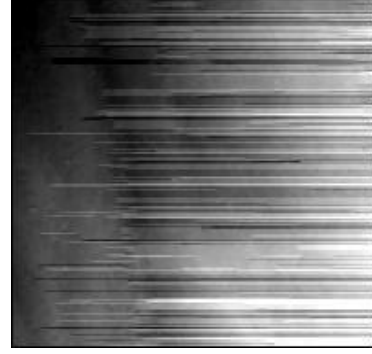
0.9 → 0.8 → 0.1	0	0	1	0.9	0.8	1.1
↓						
0.3 ← 0.5 ← 0.7	0	0	0	0.3	0.5	0.7
↓						
0.2 → 0.6 → 0.2	0	0	0	0.2	0.6	0.2
Interférogramme normalisé	Etiquette			Phase déroulée		

Nous remarquons qu'il y a deux solutions différentes et aucune ne peut être prise comme une solution correcte. Alors nous pouvons conclure qu'il y a des incohérences dans les données qu'il faut détecter avant d'entamer le déroulement de phase.

Nous donnons un exemple réel pour montrer l'effet des résidus sur les résultats de cette méthode, figure III.2.



Interférogramme



Interférogramme déroulé

Figure III.2 : Déroulement de proche en proche d'un interférogramme réel.

Donc il y a lieu de détecter ces résidus et les éviter lors du déroulement de phase.

Méthode de détection des résidus :

Dans cette méthode [Labr-96], [Trou-96], la première étape consiste à détecter les résidus qui gênent la procédure de déroulement de phase et les éviter (ne pas dérouler les pixels bruités).

Avant d'exposer le principe de l'algorithme et les résultats de cette méthode, nous donnons quelques notions sur les parcours de déroulement pour mettre en évidence la présence de ces résidus.

- **Définition1 : (pseudo dérivée)**

Soit une fonction numérique $G(x)$ définie sur D_φ (image interferogramme), telle que :

$$\forall x \in D_\varphi, G(x) = \varphi(x) - \varphi(x_{\text{prec}}) + 2\hat{k}\pi \quad (\text{III.5})$$

$$\text{Avec } \forall x \in D_\varphi, \hat{K}_x = \operatorname{argmin} \left| \varphi(x) - \varphi(x_{\text{prec}}) + 2\hat{k}\pi \right|, \quad \hat{k} \in \mathbb{Z}$$

Où x_{prec} désigne le point qui précède x dans D_φ .

On dit que la fonction G est la pseudo dérivée de φ si elle vérifie :

$$\forall x \in D_\varphi, \quad -\pi < G(x) < +\pi \quad (\text{III.6})$$

- **Définition2 : (pseudo gradient)**

Soit D_φ un espace à deux dimensions, on définit $\overrightarrow{G(x,y)}$: le pseudo gradient de $\varphi(x, y)$ par :

$\overrightarrow{G(x,y)} = (G_x(x,y), G_y(x,y))$ où $G_x(x,y)$ et $G_y(x,y)$ représentent la pseudo dérivée de $\varphi(x,y)$ par rapport à x et y respectivement.

A partir de ces définitions, on introduit la notion de phase corrigée $\varphi_c(p_1, p_2)$ qui est calculée à partir des différences entre les phases principales $\Delta\varphi(p_1, p_2) = \varphi(p_2) - \varphi(p_1)$

Selon la règle :

$$\varphi_c(p_1, p_2) = \begin{cases} \Delta\varphi(p_1, p_2) & \text{si } -\pi < \Delta\varphi(p_1, p_2) < \pi \\ \Delta\varphi(p_1, p_2) + 2\pi & \text{si } \Delta\varphi(p_1, p_2) \leq -\pi \\ \Delta\varphi(p_1, p_2) - 2\pi & \text{si } \Delta\varphi(p_1, p_2) \geq \pi \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

Les différences de phase corrigées selon les deux axes forment un champ vectoriel noté

(φ_x, φ_y) :

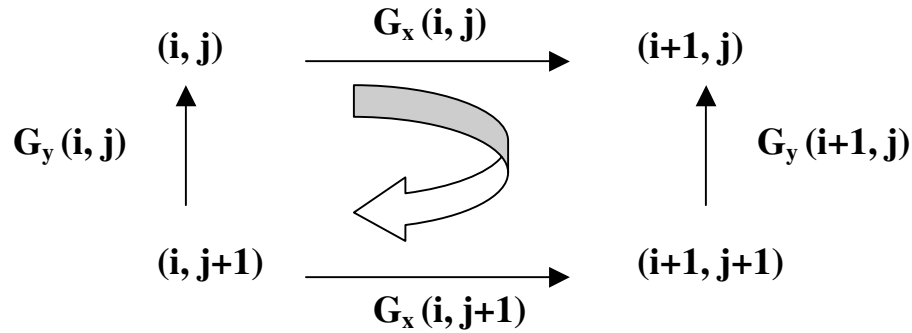
$$\varphi_x(i, j) = \varphi_c((i, j), (i+1, j)) \quad \text{et} \quad \varphi_y(i, j) = \varphi_c((i, j), (i, j+1))$$

Dans le cas bidimensionnel, pour détecter la présence des résidus, on peut considérer un contour fermé par quatre pixels adjacents, la somme des différences de phase le long de tels contours vaut soit 1, -1 ou 0 (quand la phase est normalisées entre 0 et 1); les points pour lesquels la somme est différente de zéro sont appelés résidus positifs ou négatifs.

Le résidu est calculé comme suite :

$$\text{résidu}(i, j) = G_x(i, j) - G_y(i+1, j) - G_x(i, j+1) + G_y(i, j) \quad (\text{III.8})$$

Le calcul d'un résidu fait donc intervenir quatre pseudo dérivées, elles mêmes définies à partir des valeurs en quatre points (voir le schéma ci-dessous):



Ainsi, on peut détecter ces résidus sur l'ensemble de l'image et générer l'image des résidus.
Nous reprenons les deux exemples précédents :

0.4	0.4	0.8	-0.7	0.1	0.4	0.4	0.8	0.3	0.1	0.4	0.8	0.1
0.1		0.3		-0.6	0.1		0.3		0.4	0		0
0.3	0.2	0.5	0.2	0.7	0.3	0.2	0.5	0.2	0.7	0.3	0.5	0.7
0.1		-0.1		0.5	0.1		-0.1		0.5	0		0
0.2	0.4	0.6	-0.4	0.2	0.2	0.4	0.6	-0.4	0.2	0.2	0.6	0.2
Différences de phase					Phases corrigées					Détection des résidus		
0.9	-0.1	0.8	-0.7	0.1	0.9	-0.1	0.8	0.3	0.1	0.9	0.8	0.1
0.6		0.3		-0.6	-0.4		0.3		0.4	-1		0
0.3	0.2	0.5	0.2	0.7	0.3	0.2	0.5	0.2	0.7	0.3	0.5	0.7
0.1		-0.1		0.5	0.1		-0.1		0.5	0		0
0.2	0.4	0.6	-0.4	0.2	0.2	0.4	0.6	-0.4	0.2	0.2	0.6	0.2
Différences de phase					Phases corrigées					Détection des résidus		

Nous remarquons bien que le premier exemple est un interférogramme non bruité car tous les résidus sont nuls, tandis que le deuxième est bruité. En effet, nous avons obtenu un résidu non nul qui rend le déroulement de phase par proche en proche erroné.

Nous avons appliqué le même raisonnement sur un interférogramme réel, la figure suivante représente deux images des résidus correspondants à une partie de l'interférogramme généré avant et après le filtrage. En effet, le nombre des résidus après le filtrage a diminué d'où la nécessité de filtrer avant l'étape de déroulement de phase, figure III.3.

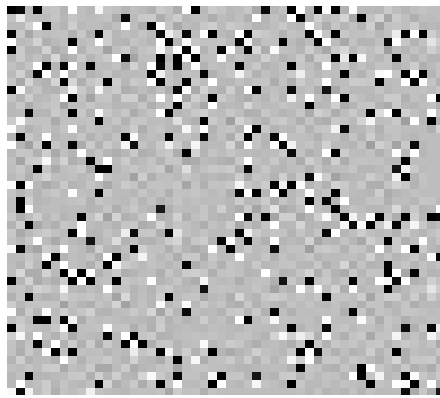


Image des résidus avant le filtrage

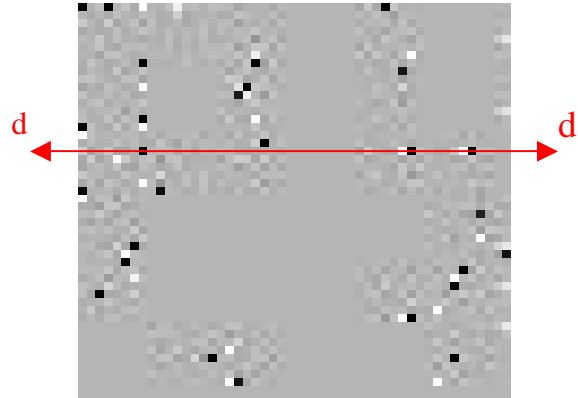
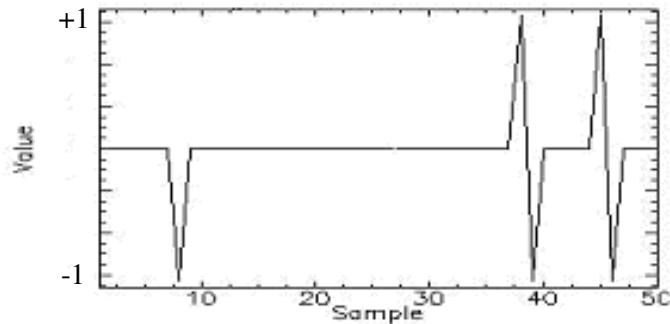


Image des résidus après le filtrage



Profil horizontal d-d

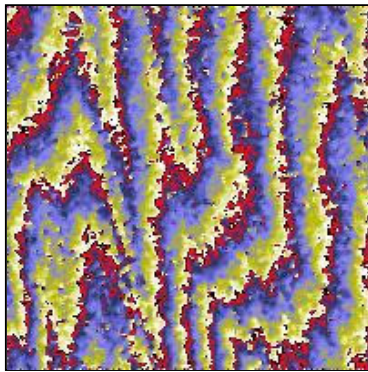
Figure III.3: Image des résidus d'une partie de notre interférogramme

Méthode des lignes fantômes (ghost lines) :

La méthode des lignes fantômes proposée par Goldstein [Zebk-97], consiste à relier les résidus de signes opposés par des lignes appelées coupures, avec une minimisation de leurs distances. Ces coupures se terminent si le nombre de résidus positifs égale au nombre de résidus négatifs, ou elles rencontrent les bordures de l'image.

Une fois que ces lignes sont tracées, nous passons au déroulement de phase par la méthode proche en proche en évitant d'affranchir ces coupures et cela dans toute l'image y compris les zones délimitées et isolées par ces coupures.

Ensuite, nous allons passer au déroulement de phase au niveau de ces coupures. Les images de la figure III.4, représentent le déroulement de phase d'une imagerie de taille 200*200 par la méthode des lignes fantômes, tout en montrant les images des résidus, les coupures et la phase déroulée [Zebk-97].



Interférogramme brute

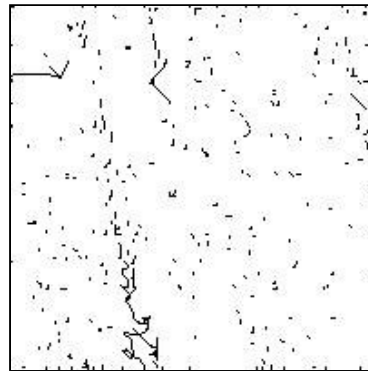


Image des coupures

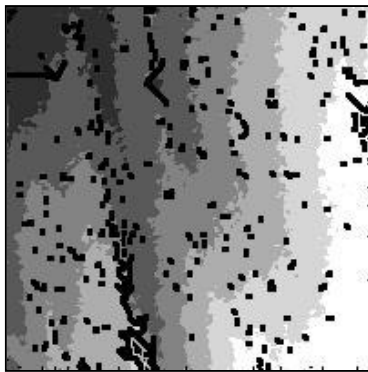
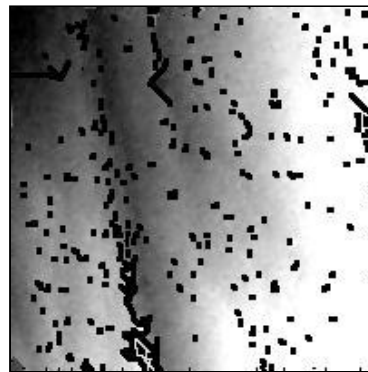


Image des étiquettes



Interférogramme déroulé

Figure III.4 : Déroulement de phase par la méthode des lignes fantômes.

III.3. Approche globale :

Contrairement à la première méthode qui évalue individuellement chaque pixel, cette approche est basée sur l'information globale de l'image. Diverses méthodes ont fait l'objet de plusieurs travaux, nous citons : [Pritt-94], [Dupo-94], [Labr-96].

La première méthode qui a été développée et appliquée dans le déroulement de phase est la méthode des moindres carrés.

Méthode des moindres carrés :

Le champ des différences de phase ($\phi_x(i, j)$, $\phi_y(i, j)$) constitue la seule information non ambiguë mesurée sur l'image. A partir de là, nous cherchons à dérouler la phase.

La méthode des moindres carrés est basée sur la recherche d'une solution, compte tenu des différences de phase corrigées.

Nous cherchons une solution au sens des moindres carrés, cela en minimisant sur toute l'image l'écart quadratique représenté par l'équation suivante :

$$E = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=1}^M (\phi(i+1, j) - \phi(i, j) - \varphi_x(i, j))^2 + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{M-1} (\phi(i, j+1) - \phi(i, j) - \varphi_y(i, j))^2 \quad (\text{III.9})$$

En détaillant le système d'équation liant les données aux inconnues, tout en considérant que l'image soit carrée, on peut utiliser la formulation de Hunt [Trou-96], [Huot-00].

Hunt a proposé une formulation matricielle qui permet d'appliquer des méthodes itératives classiques de résolution d'un système linéaire.

Minimiser E est équivalent à trouver les $\Phi(i, j)$ tels que :

$$\forall i, j \quad \frac{\partial E}{\partial \phi(i, j)} = 0 \quad (\text{III.10})$$

Sur une image carrée de $N \times N$, cette équation aboutit à un système de $2N(N-1)$ équations de la forme :

$$\begin{cases} \varphi_x(i, j) = \phi(i+1, j) - \phi(i, j) & \text{pour } i \in (1, N-1), j \in (1, N) \\ \varphi_y(i, j) = \phi(i, j+1) - \phi(i, j) & \text{pour } i \in (1, N), j \in (1, N-1) \end{cases} \quad (\text{III.11})$$

La résolution des équations mathématiques, de manière itérative, est comme suit:

$$\rho(i, j) = \phi(i+1, j) + \phi(i-1, j) + \phi(i, j+1) + \phi(i, j-1) - 4\phi(i, j) \quad (\text{III.12})$$

Où $\rho(i, j)$ est calculé par la relation suivante :

$$\rho(i, j) = \varphi_x(i+1, j) - \varphi_x(i-1, j) + \varphi_y(i, j+1) - \varphi_y(i, j-1) \quad (\text{III.13})$$

Cette équation est valable pour les pixels situés à l'intérieur de l'image, c'est à dire $[i \in (2, N-1), j \in (2, N-1)]$, sur les cotés et aux angles, on peut conserver la même expression pour ρ , en prenant les données inexistantes $\phi_x(0, j)$, $\phi_x(N, j)$, $\phi_y(i, 0)$ et $\phi_y(i, N)$ égales à zéro [Trou-96]. Cette équation est à la base du calcul de la solution des moindres carrés.

- **Calcul de la solution :**

L'efficacité des méthodes des moindres carrés est due à l'existence des techniques d'analyse numérique, on distingue principalement deux approches employées pour résoudre le système linéaire donné par l'équation de Poisson, [Trou-96], [Prit-94].

- Les méthodes itératives du type Jacobi, Gauss Seidel.
- Les méthodes dites directes qui résolvent l'équation de Poisson dans le plan de Fourier.

La première catégorie est basée sur le calcul de la K^{eme} solution ϕ^K à l'itération K en fonction des résultats des itérations précédentes par une relation issue de l'équation liant les inconnues aux données. Cette équation est une simplification de l'équation III.11.

$$\phi^{K+1}(i, j) = \frac{1}{4} [\phi^K(i, j) + \phi^K(i-1, j) + \phi^K(i, j+1) + \phi^K(i, j-1)] - \rho(i, j) \quad (III.14)$$

Cette technique converge lentement en utilisant les relaxations Gauss Seidel [Trou-96], mais en passant dans le domaine spectral, la transformé de Fourier de l'équation de Poisson (III.11) permet de calculer sa solution.

Cette méthode nécessite que l'image ait une dimension $(2N, 2N)$ nous pouvons réaliser cela en faisant une simple translation de l'image dans les deux directions. Mais cela nous donne un résultat erroné issu des discontinuités induites aux bords, [Labr-96]. Pour contourner ce problème, Takajo a proposé une méthode pour construire cette image de taille $2N \times 2N$ par réflexion dans un miroir le long des deux cotés [Trou-96], [Prit-94].

Le principe de la réflexion miroir est d'étendre $\Phi(i, j)$ et $\varphi(i, j)$ à des fonctions périodiques $\tilde{\varphi}(i, j)$ et $\tilde{\varphi}(i, j)$ dont l'équation III.15 définit cette formulation.

Si l'image initiale $\varphi(i, j)$ est de taille (N, N) avec $i(0, N-1)$ et $j(0, N-1)$ alors :

$$\tilde{\varphi} = \begin{cases} \varphi(i, j) & 0 \leq i \leq N, \quad 0 \leq j \leq N \\ \varphi(2N-i, j) & N \leq i \leq 2N, \quad 0 \leq j \leq N \\ \varphi(i, 2N-j) & 0 \leq i \leq N, \quad N \leq j \leq 2N \\ \varphi(2N-i, 2N-j) & N \leq i \leq 2N, \quad N \leq j \leq 2N \end{cases} \quad (\text{III.15})$$

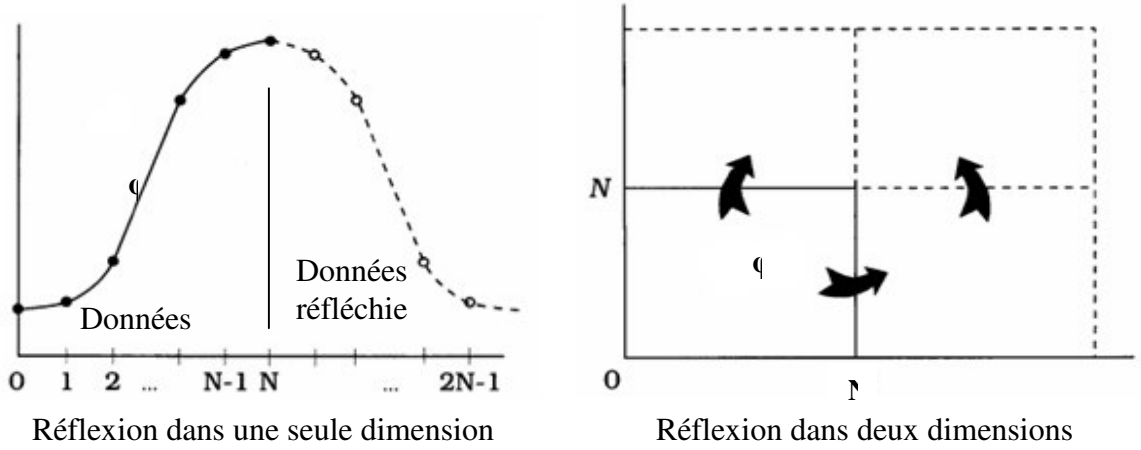


Figure III.5 : Principe des réflexions miroir dans les moindres carrés

La fonction est alors périodique de période $2N$ et se raccorde sans discontinuités. Nous notons

$\tilde{\varphi}(k_x, k_y)$, le coefficient (k_x, k_y) de la FFT-2D de dimension $2N \times 2N$.

A partir du résultat classique sur la FFT d'un signal décalé :

$$\tilde{u}_{(n+1)}(k_x) = \tilde{u}_{(n)}(k_x) e^{j \frac{2\pi}{2N} k_x} \quad (\text{III.16})$$

L'équation III.14 transformée dans le plan de Fourier peut être donnée par :

$$\tilde{\varphi}(k_x, k_y) \left[e^{j \frac{2\pi}{2N} k_x} + e^{-j \frac{2\pi}{2N} k_x} + e^{j \frac{2\pi}{2N} k_y} + e^{-j \frac{2\pi}{2N} k_y} - 4 \right] = \tilde{\rho}(k_x, k_y) \quad (\text{III.17})$$

La solution $\tilde{\varphi}(k_x, k_y)$ est donc entièrement déterminée par :

$$\tilde{\varphi}(k_x, k_y) = \frac{\tilde{\rho}(k_x, k_y)}{2 \left[\cos\left(\frac{2\pi K_x}{2N}\right) + \cos\left(\frac{2\pi K_y}{2N}\right) - 2 \right]} \quad (\text{III.18})$$

Enfin, pour retrouver la solution exacte de la phase déroulée, il faut appliquer la FFT inverse

Les images de la figure III.6, représentent la même imagerie que celle utilisée précédemment pour l'approche locale déroulée.

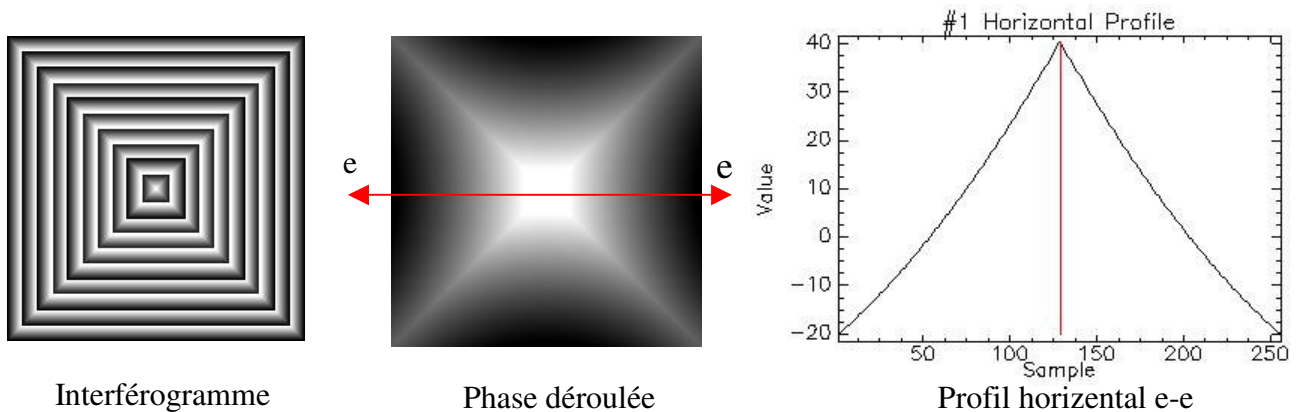
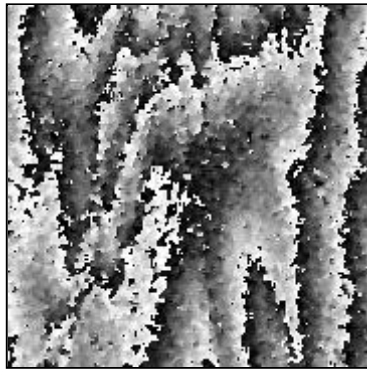


Figure III.6 : Déroulement de phase par la méthode des moindres carré.
(Image simulée)

En comparant les deux profils horizontaux, (c- c) de la figure III.1 et (e- e) de la figure III.6, nous remarquons une erreur globale au niveau de la phase déroulée. Le profil horizontal de la figure III.6 n'est pas exactement linéaire et il présente un décalage au niveau de la première valeur, il ne commence pas par 0 comme celui de la figure III.1 ; mais il commence par la valeur -20. La phase déroulée est donnée par la figure III.7



Interférogramme réel



Interférogramme déroulé

Figure III.7 : Déroulement de phase par la méthode des moindres carrés.
(Imagette)

Nous déduisons que cette méthode engendre une erreur qui se propage sur toute l'image lors du déroulement de phase.

III.4. Approche mixte :

Les méthodes de déroulement globales, telles que les méthodes des moindres carrés, reviennent à estimer une erreur en chaque pixel. Or les estimateurs utilisés ne peuvent faire la différence entre les erreurs dues au bruit et celles correspondantes à la pente réelle [labr-96]. C'est pourquoi, on trouve les méthodes mixtes qui tentent de lier les qualités des approches locales et celle des approches globales [labr-96].

Les méthodes mixtes s'appuient sur une modélisation locale des relations entre pixels voisins d'un côté et une évolution globale du système par une mise à jour itérative des sites en fonction du voisinage d'un autre côté.

La méthode Markovienne :

La méthode Markovienne formalise le problème de déroulement de phase comme un problème d'étiquetage de graphe. Chaque pixel est un nœud du graphe que l'on doit classer, les classes possibles sont des étiquettes qui sont dans notre cas le nombre k de cycles de phase à ajouter, ces contraintes définissent une fonction d'énergie que l'on doit minimiser, pour obtenir la configuration optimale de la phase déroulée.

La figure III.8, résume les étapes à suivre pour le déroulement de phase par cette méthode:

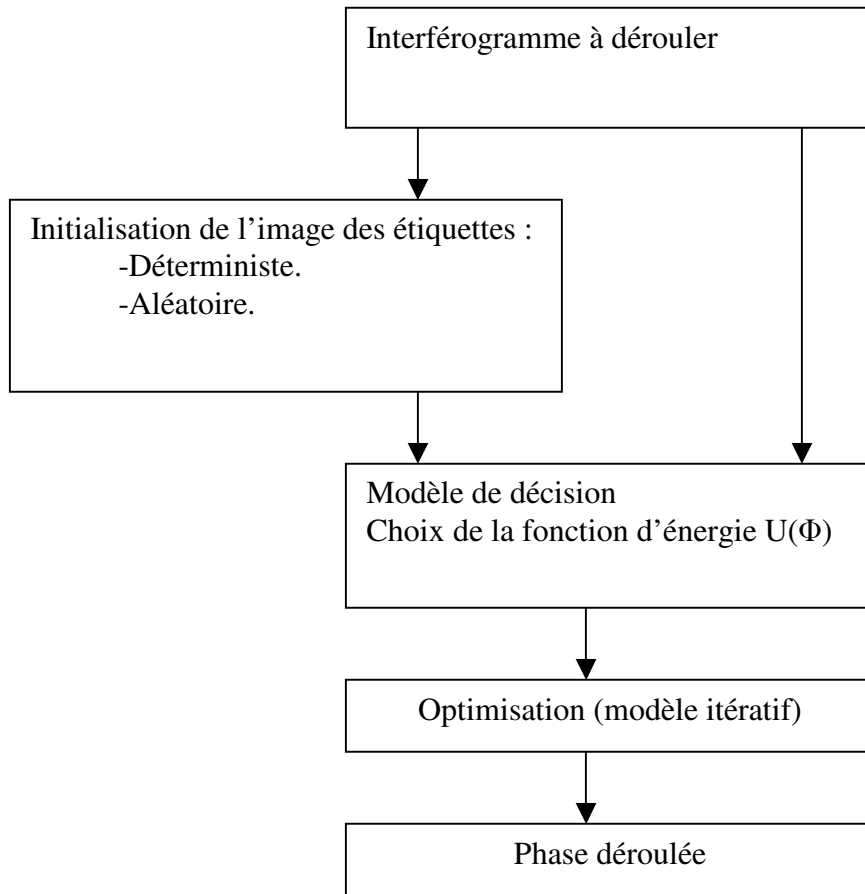


Figure (III.8) : Organigramme de déroulement de phase interférométrique par la méthode de Markov

Définition

Soit $L = \{l_1, l_2, \dots, l_m\}$ un ensemble de sites et F un ensemble d'image définies sur ces sites, l'ensemble de toutes les configurations de F possible est donnée par : $F = \{f_{l_1}, f_{l_2}, \dots, f_{l_m}\}$ et est noté Φ . Soit un autre ensemble de sites $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$ chacun de ces sites peut prendre ses valeurs d'étiquette sur l'ensemble des ordres possibles $\Omega = \{1, 2, 3, \dots, k_{\max}\}$. Les deux ensembles L et S peuvent avoir des parties communes où même identiques, cette partie est appelée la configuration optimale F_{opt} . Notre but est de modéliser les étiquettes et les observations pour trouver cet ensemble.

Modélisation markovienne

Le déroulement de phase consiste alors à calculer une configuration estimée $\hat{\Phi} \in F_{opt}$ telle que :

$$\hat{\Phi} \in F_{opt} \Leftrightarrow \hat{\Phi} = \arg \min_{\Phi \in F} \int_{\Phi \in F} R(\Phi, \Phi') P(\Phi / \varphi) d\Phi \quad (\text{III.19})$$

Où R est le risque de Bayes, il est déterminé par l'estimateur bayésien adopté. Par l'application de la règle de Bayes, nous aurons :

$$P(\phi / \varphi) = \frac{P(\varphi / \phi) P(\phi)}{P(\phi)} \quad (\text{III.20})$$

Où :

$P(\varphi / \phi)$: La probabilité conditionnelle, (fonction de distribution).

$P(\phi)$: La probabilité a priori.

$P(\varphi)$: La probabilité du champ des données observées. Elle est uniformément distribuée, donc elle est constante pour toute l'image.

$P(\phi / \varphi)$: La probabilité à posteriori.

La configuration optimale est déterminée par la maximisation de l'équation III.20, pour cela nous devons modéliser les probabilité $P(\varphi / \phi)$ et $P(\phi)$.

▪ Modèle à priori $P(\phi)$:

D'après le théorème d'équivalence Hammersly-Clifford entre le champ de Markov $P(\Phi)$ et la distribution de Gibbs, nous aurons :

$$P(\Phi) = \frac{\exp(-U(\Phi))}{Z} \quad (\text{III.21})$$

Où Z est une constante de normalisation et U une fonction d'énergie.

Cette équation permet de spécifier une distribution de probabilité sur Φ par le choix d'une fonction d'énergie $U(\Phi)$ de telle sorte que la contrainte de régularité de la phase déroulée à reconstruire soit respectée.

- **Modèle conditionnel $P(\phi / \phi)$:**

La probabilité conditionnelle présente le lien statique entre le champ des données observées et les différentes configurations étiquetées de l'ensemble Ω .

- **Modèle a posteriori**

Après avoir déterminé le modèle à priori et conditionnel, nous calculons la probabilité à posteriori, en utilisant l'équation III.20.

Le maximum a posteriori peut être obtenu en minimisant la fonction $U'(\phi)$ suivante :

$$U'(\phi) = -\ln \left[\frac{P(\phi / \phi)}{P(\phi)} \right] + \frac{U(\phi)}{z} \quad (\text{III.22})$$

Algorithmes d'optimisation

Pour trouver la solution (ou dérouler la phase), il est nécessaire de calculer le minimum de la fonction d'énergie. Ceci constitue une étape d'optimisation.

- **L'optimisation par des algorithmes stochastiques**

Geman [Trou-96] a fait une analogie entre les images et les systèmes physiques dont la configuration d'énergie minimale correspond exactement au modèle. Ainsi, il propose la méthode dite de recuit simulé pour trouver la solution.

Pour simuler l'évolution d'un solide vers l'état d'équilibre thermique pour une température T fixe, la méthode de MonteCarlo propose de générer, au début, un état solide initial qui est caractérisé par la position initiale de ses particules choisie aléatoirement. Une perturbation petite et aléatoire est effectuée en déplaçant une particule choisie aléatoirement. Si la différence d'énergie entre l'état initial et l'état légèrement perturbé est négatif, le processus est poursuivi avec le nouvel état, si la différence est positive ou égale à zéro la probabilité que le nouvel état soit accepté est donnée par $\exp\left(\frac{-\Delta U}{K_B T}\right)$ où K_B est la constante de Boltzman.

Cette règle d'acceptation est connue sous le nom de critère de Metropolis.

En respectant ce critère, la température va diminuer progressivement. A chaque température, on crée un nouvel état ou position de la particule. Plus précisément, on visite toutes les particules par un balayage déterministe et, à chaque fois, on fait un changement local qui est basé sur les états de ses voisins. On obtient ainsi, une suite d'états qui converge vers l'état d'équilibre.

- **L'optimisation par des algorithmes déterministes**

Les algorithmes stochastiques permettent d'atteindre un minimum global mais nécessitent des temps de calcul très élevés. En outre, le minimum global n'est atteint qu'en théorie. C'est pourquoi, des algorithmes déterministes ont été proposés [Trou-96], ceux-ci garantissent une convergence vers une solution optimale mais considérablement plus rapides [Trou-96].

Ces algorithmes se distinguent des algorithmes stochastiques par le fait que chaque itération génère une configuration dont l'énergie est plus faible que la précédente. Le problème commun à tous ces algorithmes est qu'ils sont très dépendants des conditions d'initialisation. Parmi ces algorithmes, Besag a proposé l'algorithme ICM (Iterated conditional mode). L'ICM est une sorte de recuit simulé où la température est fixée à zéro, et les résultats obtenus sont très directement liés à l'initialisation, c'est-à-dire à la configuration initiale, car il consiste à choisir comme nouvelle configuration celle qui est voisine de la configuration courante et dont l'énergie est la plus faible [Trou-96].

Chapitre IV : Interférométrie différentielle.

L'interférométrie différentielle SAR est un moyen efficace pour l'étude des mouvements et le suivi des phénomènes liés au sol à savoir : les tremblements de terre, les glissements de terrain et les éruptions des volcans [prin-05], [Amar-03]. Cette méthode nous renseigne sur le déplacement du sol suivant la visée du satellite (LOS : line of side) avec une certaine précision de l'ordre des millimètres. Cependant, l'effet atmosphérique influe sur les résultats de DINSAR, pour y remédier, on utilise la méthode des réflecteurs permanents (permanent scatters). Ce moyen de traitement peut être considéré comme un outil puissant pour estimer l'affaissement de la topographie avec une meilleure précision.

Dans cette partie, nous donnons des notions sur l'interférométrie différentielle, son implémentation et ses limitations. Quant à sa mise en œuvre selon les deux approches, nous présentons les résultats que nous avons obtenus par la méthode de (couple, MNT). Nous décrivons la méthode des points diffuseurs (PS), sur le plan théorique. Nous montrons les critères de sélection de ces points diffuseurs et les étapes à suivre pour estimer les déformations et la vitesse durant la période d'observation et d'étude d'une région instable.

IV.1.Principe de l'interférométrie différentielle (DINSAR) :

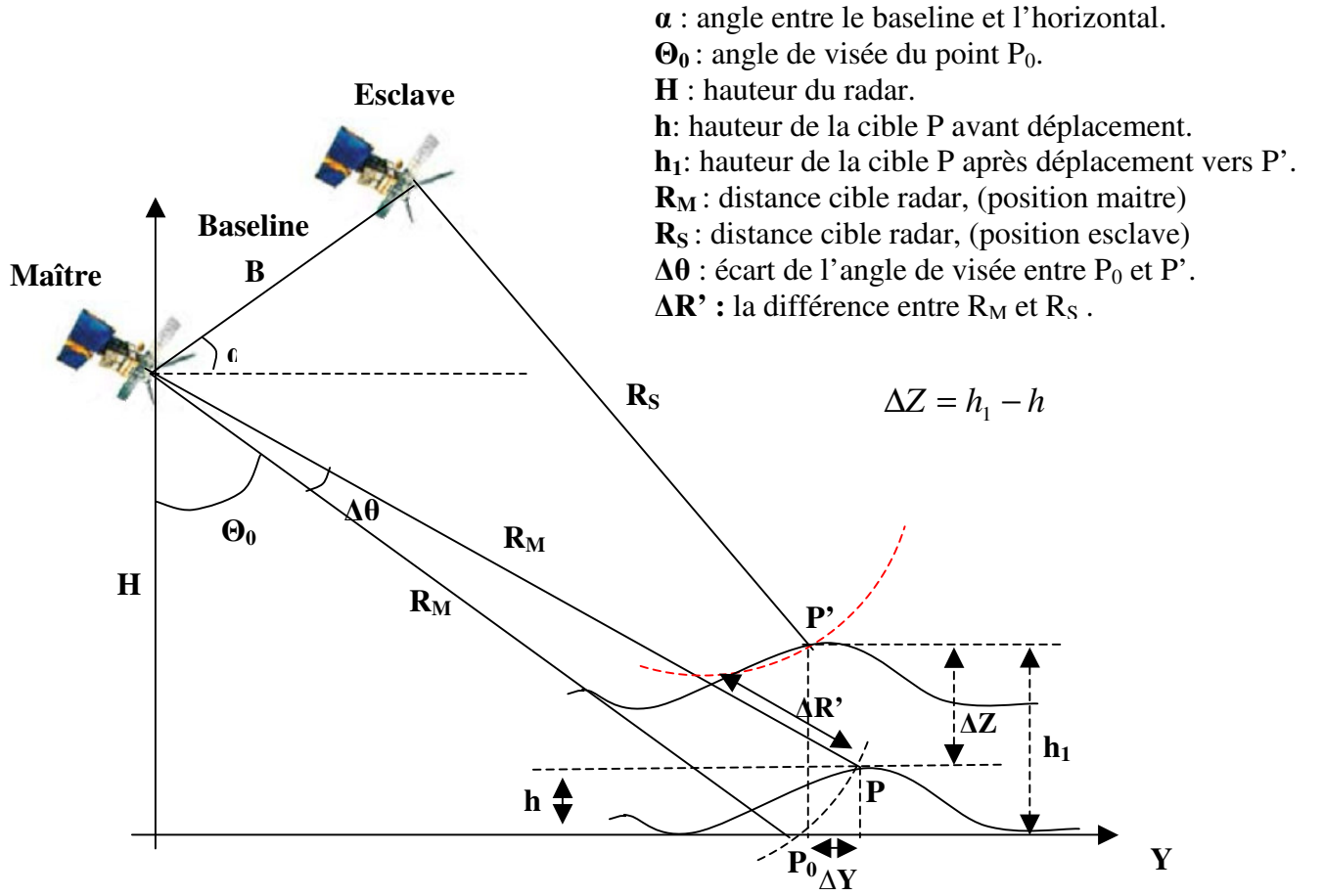


Figure IV.1 : Géométrie d'acquisition du DINSAR

La technique d'interférométrie différentielle radar est un moyen très utile pour analyser les déformations au niveau des surfaces de la terre. Elle utilise la différence de phase (différence de trajet) avant et après des variations de surfaces entre les deux acquisitions de données, figure IV.1.

Quand les deux images radar sont prises avant et après un mouvement. Comme nous avons vu dans le deuxième chapitre, la différence de phase interférométrique entre deux images radar SAR est exprimée par la formule suivante :

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda}(\Delta R') = \Delta\varphi_{flat} + \Delta\varphi_{topo} + \Delta\varphi_{mouv} = -\frac{4\pi}{\lambda}B_{||} - \frac{4\pi}{\lambda} \frac{h}{R_M \sin(\theta_0)} B_{\perp} + \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R_2 \quad (IV.1)$$

Où $\Delta R'$ est la différence de trajets R_M et R_S , et ΔR_2 est une partie de la différence de trajet $\Delta R'$ due uniquement au déplacement de la cible P vers la cible P', la figure IV.1.

La phase interférométrique est une somme de trois termes : le premier représente la phase de la terre plate déduite de la distance entre les deux orbites des deux radars maître et esclave, le second est la phase topographique, le troisième représente la phase de déplacement de la cible excitée par le radar de la position p vers la position p'. Nous avons omis la composante due au bruit (décorrélations temporelle et spatiale) et cela par hypothèse quelle est constante lors des deux acquisitions.

L'interférométrie différentielle permet d'estimer la phase de déplacement (déformation), $\Delta\phi_{mouv}$ en supprimant les deux phases, celle de la terre plate $\Delta\phi_{flat}$ et la phase topographique $\Delta\phi_{topo}$. Et cela soit, en utilisant un modèle numérique de terrain externe dans le cas de la méthode « deux passes », soit en utilisant un second interférogramme sans les effets différentiels pour générer un MNT qui servira à supprimer l'effet topographique, c'est la méthode « multi passes ». Ainsi, les déplacements de surface qui sont des fractions d'onde du radar peuvent être détectés [prin-05], [Amar-03].

Notons qu'après l'estimation du déplacement $\Delta R'$ le long de la visée du radar (déplacement en distance), les deux déplacement suivant les deux axes horizontal (ΔY) et vertical (ΔZ) peuvent être calculés de la manière suivante:

$$\begin{cases} \Delta Y = \Delta R_2 \cdot \sin(\theta_0 + \Delta\theta) \\ \Delta Z = -\Delta R_2 \cdot \cos(\theta_0 + \Delta\theta) \end{cases} \quad (IV.2)$$

Avec θ_0 : angle de visée de la cible P_0 sur l'ellipsoïde, et $\Delta\theta$ est l'écart de l'angle de visée entre P et P_0 .

Méthode « deux passes » :

Cette méthode est basée sur l'utilisation d'un couple interférométrique et d'un modèle numérique de terrain qui permet de simuler la phase topographique [Miki-98]. Mais avant de soustraire cette dernière d'un autre interférogramme qui contient à la fois la phase topographique et la phase de déplacement, le modèle numérique de terrain doit être projeté dans la même géométrie des images radar pour transformer l'élévation de chaque pixel en une phase topographique, et cela en utilisant la formule IV.3.

$$\varphi_{\text{topo}} = -\frac{4\pi}{\lambda} B_{\perp} \frac{h}{\sin(\theta_i) \cdot R_M} \quad (\text{IV.3})$$

Rappelons que $B_{\perp}$ est la composante verticale du baseline, h c'est l'altitude d'un point quelconque extrait de notre MNT, R_M est la distance entre ce point et la position du radar lors de l'acquisition de l'image maître (module du vecteur cible, radar), et enfin, θ_i est l'angle d'incidence de ce point.

Il faut noter que tout mouvement de terrain doit être inclus dans l'intervalle temporelle [MNT, couple d'images].

- **Calcul de l'angle d'incidence θ_i :**

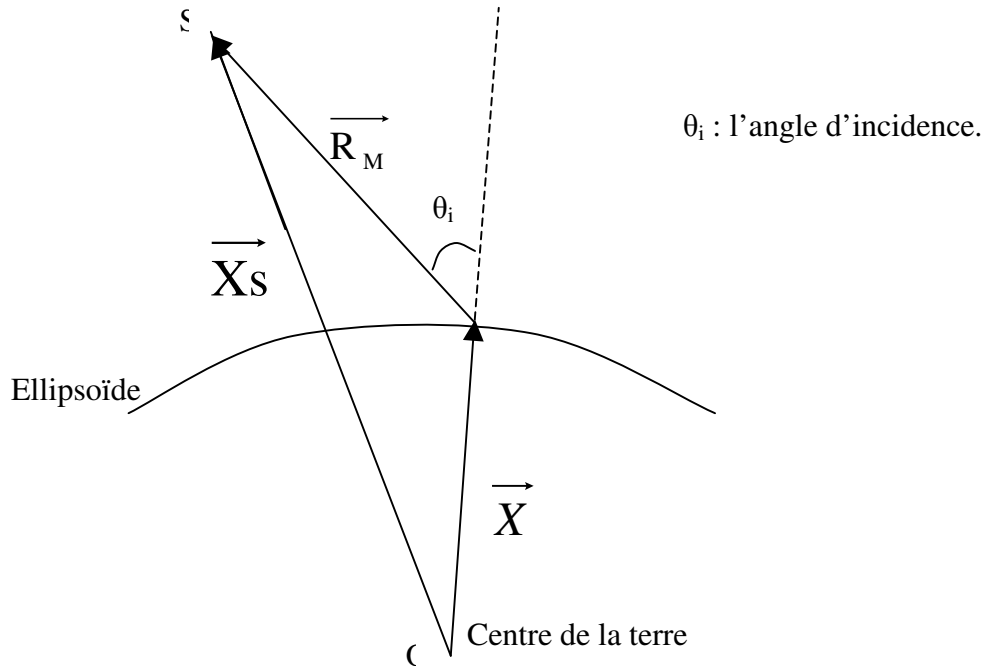


Figure IV.2 : Représentation vectorielle.

La figure IV.2 montre la géométrie du satellite par rapport à l'ellipsoïde, notons que $\vec{X}$, $\vec{XS}$ et $\vec{R_M}$ sont respectivement le vecteur cible par rapport au centre de la terre, le vecteur satellite par rapport au centre de la terre et le vecteur satellite cible.

A partir de cette géométrie, l'angle d'incidence est calculé par la relation IV.4.

$$\theta_i = \arccos \left[\frac{(\vec{X_s} - \vec{X}) \cdot \vec{X}}{|\vec{X_s} - \vec{X}| \cdot |\vec{X}|} \right] \quad (\text{IV.4})$$

Après avoir calculé l'angle d'incidence correspondant à chaque pixel du couple d'images, et en utilisant les paramètres calculés dans l'étape de géoréférencement à savoir, les coordonnées géocentriques par rapport au centre de la terre correspondant à chaque pixel, nous avons simulé l'interférogramme topographique à partir du MNT.

- **Simulation d'interférogramme à partir d'un MNT:**

Les principales étapes de la simulation d'un interférogramme sont les suivantes :

1-Projection dans le même référentiel du couple et du MNT.

2- Extraction de la partie commune (MNT, couple d'images)

3-Calcul de la phase topographique en ayant l'angle d'incidence pour chaque pixel de la partie commune, la composante perpendiculaire du baseline du couple et enfin l'altitude h extraite du modèle numérique de terrain (voire équation IV.3).

Les résultats sont donnés par la figure IV.3. L'image IV.3 (a) représente l'interférogramme généré par le processus interférométrique développé et corrigé par la méthode basée sur la FFT, l'image IV.3 (b) représente l'interférogramme généré par le processus interférométrique développé et corrigé par la méthode géométrique et IV.3 (c) représente l'interférogramme simulé à partir du MNT. Nous constatons que la partie à relief délimitée par la courbe en noir contient pratiquement les mêmes franges. Quant à la partie supérieure de l'image qui est une zone plate, nous remarquons qu'il y a deux franges dans l'interférogramme simulé.

Cette différence est due essentiellement à l'imprécision du MNT, l'imprécision des éphémérides (position et vitesse du satellite) et l'erreur de l'interpolation à deux dimensions lors du géoreférencement des images radar.

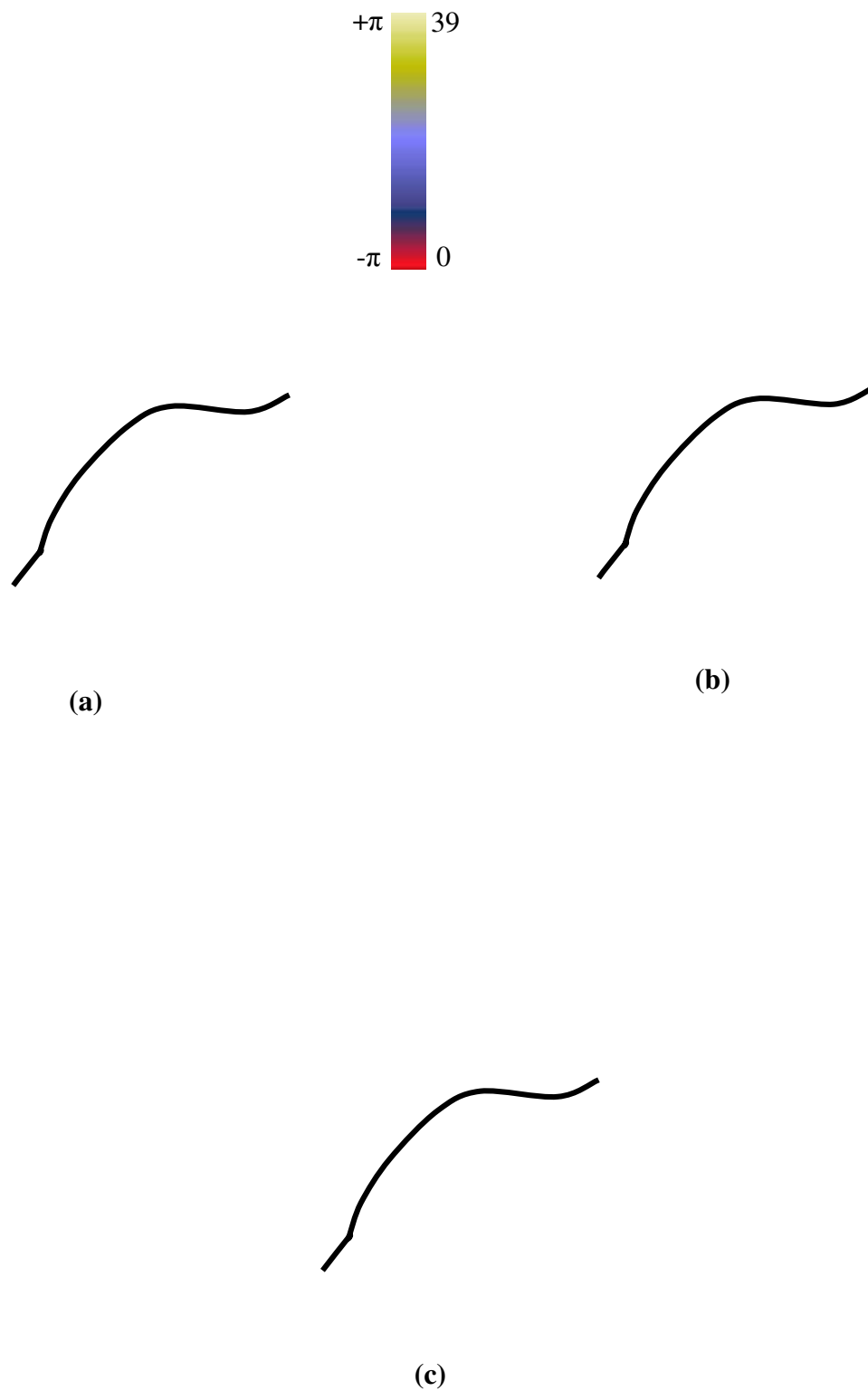


Figure IV.3 : a - Interférogramme généré à partir du couple d'images SLC corrigé par la méthode basée sur la FFT.
 b - Interférogramme généré à partir du couple d'images SLC corrigé par la méthode géométrique.
 c - Interférogramme simulé de notre MNT.

Cette méthode est considérée facile et rapide, car on utilise seulement deux images radar et un modèle numérique du terrain. Cependant, elle est affectée par les erreurs issues du modèle numérique de terrain lors de l'élimination de la phase topographique, et ne prend pas en considération les phases de bruits introduites par l'atmosphère et les systèmes d'acquisitions qui sont négligées lors de notre étude. Or, en interférométrie différentielle, ces effets ne sont pas négligeables du fait que les déplacements détectés sont de l'ordre d'une demi longueur d'onde ($\frac{\lambda}{2}$), (centimétrique).

Méthode « multi passes » :

Dans cette méthode, trois images radar différentes de la même région sont utilisées (A_1, A_2, A_3), une de ces trois images est prise comme référence (A_1). Ensuite nous calculons deux interférogrammes ; le premier interférogramme généré par le couple d'images acquises par les deux positions du radar (A_1, A_2) est supposé obtenu avant le déplacement, et permet d'estimer la composante topographique. Le deuxième interférogramme généré par le couple d'images acquises par les deux positions du radar (A_1, A_3) contient aussi bien la phase topographique que la phase proportionnelle aux déplacements. La soustraction des deux interférogrammes génère la phase du déplacement [Yong-00].

La géométrie du DINSAR par la méthode multi passe est donnée par la figure IV.4.

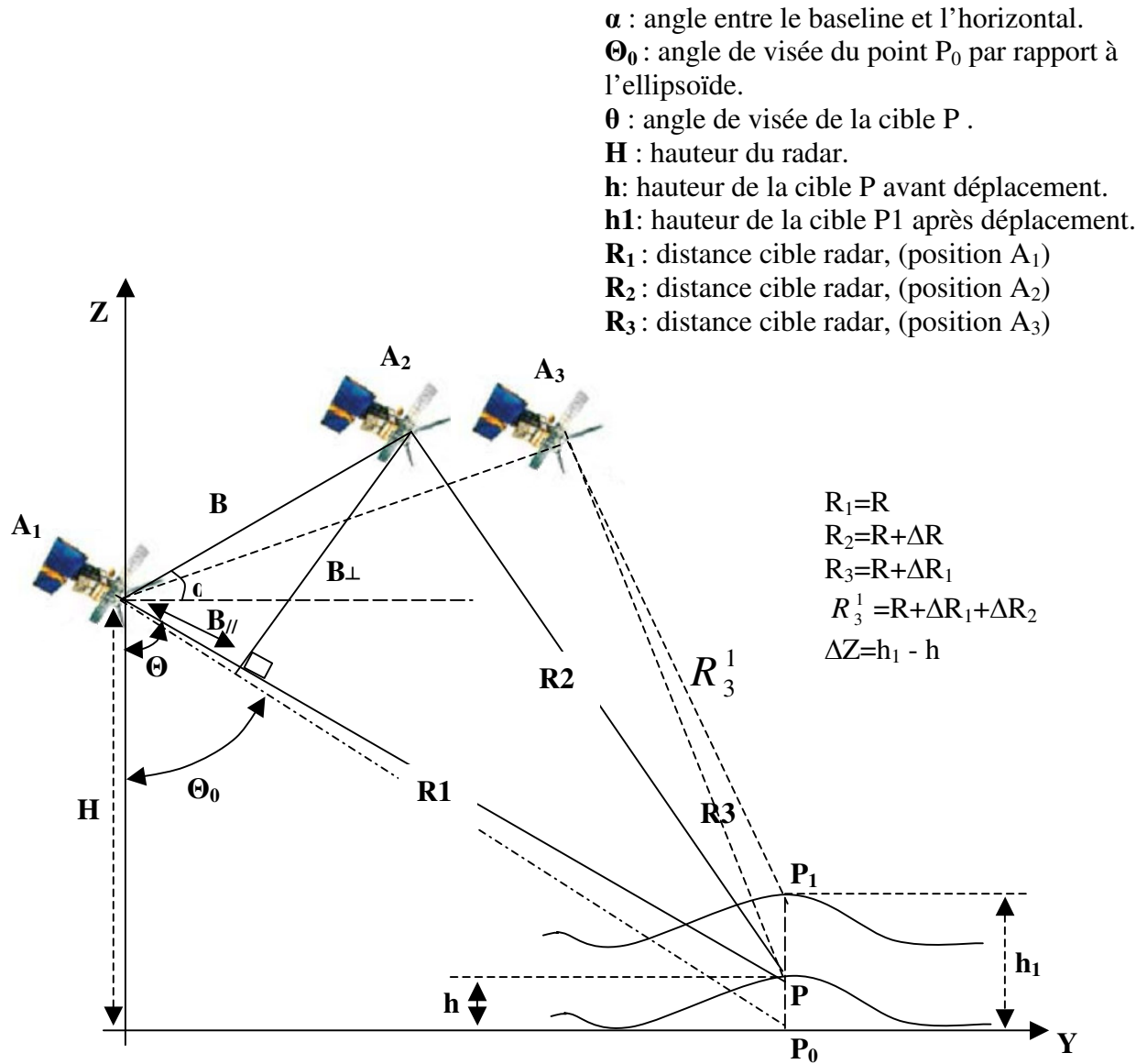


Figure IV.4: Géométrie d'acquisition du DINSAR

En supposant qu'il n'y a pas de déformation entre les deux acquisitions A_1 et A_2 , la hauteur h de la cible P peut être calculée à partir de l'équation suivante :

$$\sin(\theta - \alpha) = \frac{R^2 + B^2 - (R + \Delta R)^2}{2RB} \quad (\text{IV.5})$$

$$h = H - R \cos(\theta) \quad (\text{IV.6})$$

Où, θ est l'angle de visée ; B est le baseline des deux acquisitions A_1 et A_2 ; α est l'angle du baseline par rapport au plan horizontal.

Supposons que la cible P s'est déplacé vers la position P' avant que le satellite ne prenne la position A_3 , la distance entre P' et le radar devient $R_3^1 = R_3 + \Delta R_2$, la différence de phase ϕ_{13}^1 entre la phase ϕ_1 mesurée de la position A_1 et la phase ϕ_3 mesurée de la position A_3 est :

$$\phi_{13}^1 = \phi_1 - \phi_3 = \frac{4\pi}{\lambda}(R_3^1 - R_1) = \frac{4\pi}{\lambda}[(R_3 - R_1) + \Delta R_2] = \frac{4\pi}{\lambda}\Delta R_1 + \frac{4\pi}{\lambda}\Delta R_2 = \phi_{13} + \frac{4\pi}{\lambda}\Delta R_2 \quad (\text{IV.7})$$

Le premier terme $\phi_{13} = \frac{4\pi}{\lambda}\Delta R_1$ est la phase topographique ; le second terme $\frac{4\pi}{\lambda}\Delta R_2$ est la phase causée par le déplacement de la cible P vers P'.

En connaissant la phase topographique de la cible P, le déplacement suivant la visée du radar est calculé comme suit :

$$\Delta R_2 = \frac{\lambda}{4\pi}(\phi_{13}^1 - \phi_{13}) = \frac{\lambda}{4\pi}\Delta\phi_{13} \quad (\text{IV.8})$$

L'équation IV.8 montre que $\Delta\phi_{13}$ est une différence de phase interférométrique entre la phase de la topographie et la phase du déplacement, d'où le nom de cette technique, « interférométrie différentielle ».

Les relations précédentes peuvent être exprimées en fonction des composantes verticales $B_{\perp}$ et horizontale $B_{//}$ du baseline. En effet, la cible P est constante entre les deux acquisitions du satellite A_1 et A_2 . Et comme la distance radiale entre la cible et le satellite est très supérieure à la valeur du baseline ($R \gg B$), et $\Delta R \approx B \sin(\theta - \alpha)$. La différence de phase du premier interférogramme (couple topographique) est comme suit :

$$\phi = \frac{4\pi B \sin(\theta - \alpha)}{\lambda} = \frac{4\pi}{\lambda} B_{//} \quad (\text{IV.9})$$

Où $B_{//} = B \sin(\theta - \alpha)$ est la composante parallèle du baseline, ϕ exprime uniquement la phase topographique, (il n'y a pas de déplacement durant l'intervalle de temps des deux acquisitions A_1 et A_2).

La différence de phase dans le deuxième interférogramme (A₁-A₃) est la suivante :

$$\phi_{13}^1 \approx \frac{4\pi}{\lambda} B_1 \sin(\theta - \alpha_1) + \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R_2 = \frac{4\pi}{\lambda} B_{1.//} + \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R_2 \quad (\text{IV.10})$$

Où α_1 est l'angle du baseline entre les positions du satellite (A₁-A₃) et le plan horizontal,
 $B_{1.//} = B_1 \sin(\theta - \alpha_1)$ est la composante horizontale du baseline. En combinant les deux équations (IV.10) et (IV.9), nous obtenons l'équation suivante :

$$\Delta R_2 = \frac{\lambda}{4\pi} \left(\phi_{13}^1 - \frac{B_{1.//}}{B_{//}} \phi \right) \quad (\text{IV.11})$$

Le rapport $\frac{B_{1.//}}{B_{//}}$ dans l'expression IV.11 est en fonction de l'angle de visée de la cible.

$$\frac{B_{1.//}}{B_{//}} = \frac{B_1 \sin(\theta - \alpha_1)}{B \sin(\theta - \alpha)} \quad (\text{IV.12})$$

L'angle de visée θ est pratiquement difficile à calculer sans avoir les informations sur la topographie du terrain imagé. Cependant, si la cible se situe sur l'ellipsoïde de référence (position P₀ de la cible dans la figure IV.4) ; avec une altitude nulle (h=0). L'angle de visée correspondant peut être aisément calculé. Dans ce cas là, les différences de phases des deux interférogrammes sont les suivantes :

$$\phi_0 = \frac{4\pi}{\lambda} B \sin(\theta_0 - \alpha) \quad (\text{IV.13})$$

$$\phi_{0.13} = \frac{4\pi}{\lambda} B_1 \sin(\theta_0 - \alpha_1) \quad (\text{IV.14})$$

Comme $\theta = \theta_0 + \Delta\theta$, et que la différence des angles $\Delta\theta$ est très petite, alors :

$$\phi_{0.12} = \phi - \phi_0 \approx \frac{4\pi}{\lambda} \sin(\theta - \alpha) - \frac{4\pi}{\lambda} \sin(\theta_0 - \alpha) \approx \frac{4\pi\Delta\theta}{\lambda} B \cos(\theta_0 - \alpha) = \frac{4\pi\Delta\theta}{\lambda} B_{\perp} \quad (\text{IV.15})$$

Et

$$\begin{aligned} \phi_{0.13}^1 &= \phi_{13}^1 - \phi_{0.13} \approx \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R_2 + \frac{4\pi B_1}{\lambda} \sin(\theta - \alpha_1) - \frac{4\pi B_1}{\lambda} \sin(\theta_0 - \alpha) \\ &\approx \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R_2 + \frac{4\pi\Delta\theta B_1}{\lambda} \cos(\theta_0 - \alpha_1) = \frac{4\pi}{\lambda} B_{1,\perp} \Delta\theta + \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R_2 \end{aligned} \quad (\text{IV.16})$$

Où $B_{\perp}$ et $B_{1,\perp}$ sont respectivement les composantes verticales des deux baselines des couples d'images dont les positions d'acquisition sont (A_1-A_2) et (A_1-A_3) . Ils sont respectivement calculés par les équations (IV.17) et (IV.18) ; $\phi_{0.12}$ et $\phi_{0.13}^1$ sont respectivement l'expression de la phase interférométrique des deux interférogrammes correspondants aux : couple « topographique » et couple « déformation » et cela après correction (élimination des franges orbitales).

$$B_{\perp} = B \cos(\theta_0 - \alpha) \approx B \cos(\theta - \alpha) \quad (\text{IV.17})$$

$$B_{1,\perp} = B_1 \cos(\theta_0 - \alpha_1) \approx B_1 \cos(\theta - \alpha_1) \quad (\text{IV.18})$$

En combinant les deux équations (IV.15) et (IV.16), nous obtenons le déplacement ΔR_2 donné par :

$$\Delta R_2 = \frac{\lambda}{4\pi} \left(\phi_{0.13}^1 - \frac{B_{1,\perp}}{B_{\perp}} \phi_{0.12} \right) \quad (\text{IV.19})$$

L'équation (IV.19) est importante, elle présente une méthode de calcul des déplacements à partir des trois images SLC, cette deuxième méthode aussi ne prend pas en considération les phases de bruits.

Par ailleurs, l'approche DINSAR avec ses deux méthodes demande peu d'images, deux ou trois images radar pour estimer les déplacements. Ce nombre réduit d'images diminue la précision des résultats, sachant que les limitations sont dues aussi aux décorrélations spatiale et temporelle.

C'est pour cela qu'une nouvelle méthode a été proposée [Ferr-01], [Prin-05] dite méthode des Réflecteurs Permanents (Permanents Scatters). Elle permet d'éviter ces contraintes, elle nécessite un grand nombre d'images SLC. Son principe est basé sur l'estimation des déplacements dans un plan à deux dimensions. Par ailleurs, le nombre d'images élevé permet d'estimer les erreurs atmosphériques, et celles induites lors de l'élimination de la composante topographique.

IV.2. Approche des réflecteurs permanents (PS):

La méthode des réflecteurs permanents est développée comme une solution aux limitations de l'interférométrie différentielle DINSAR, elle a été présentée la première fois par une équipe du Politecnico di Milano (Polimi) en 1999

[Van-03], [Gao-07], puis développée en 2001 par Alessandro Ferretti et al [Ferr-01]. Depuis, de nombreuses études utilisant cette méthode ont été menées, démontrant son efficacité dans l'estimation de mouvements de terrain.

Cette technique exploite quelques étapes du INSAR et du DINSAR, et nécessite un nombre important d'images radar (> 30 images) avec un choix judicieux de l'image maître.

Définition :

On appelle un réflecteur permanent un pixel affichant une bonne cohérence dans l'intervalle temporel d'utilisation de l'ensemble des images (suivi d'une zone sismique). Il peut s'agir d'un objet nettement plus petit que la taille du pixel (par exemple le coin d'un immeuble). Les réflecteurs permanents renvoient un signal fort (amplitude élevée) et sont peu bruités (phase pixellaire stable). En outre, s'ils sont suffisamment proches l'un de l'autre, ils enregistrent la même composante atmosphérique. Dans ce cas, il devient possible de séparer les différentes contributions de la phase pixellaire.

Nous présenterons dans la figure IV.5, l'organigramme schématisant les différentes étapes de cette approche.

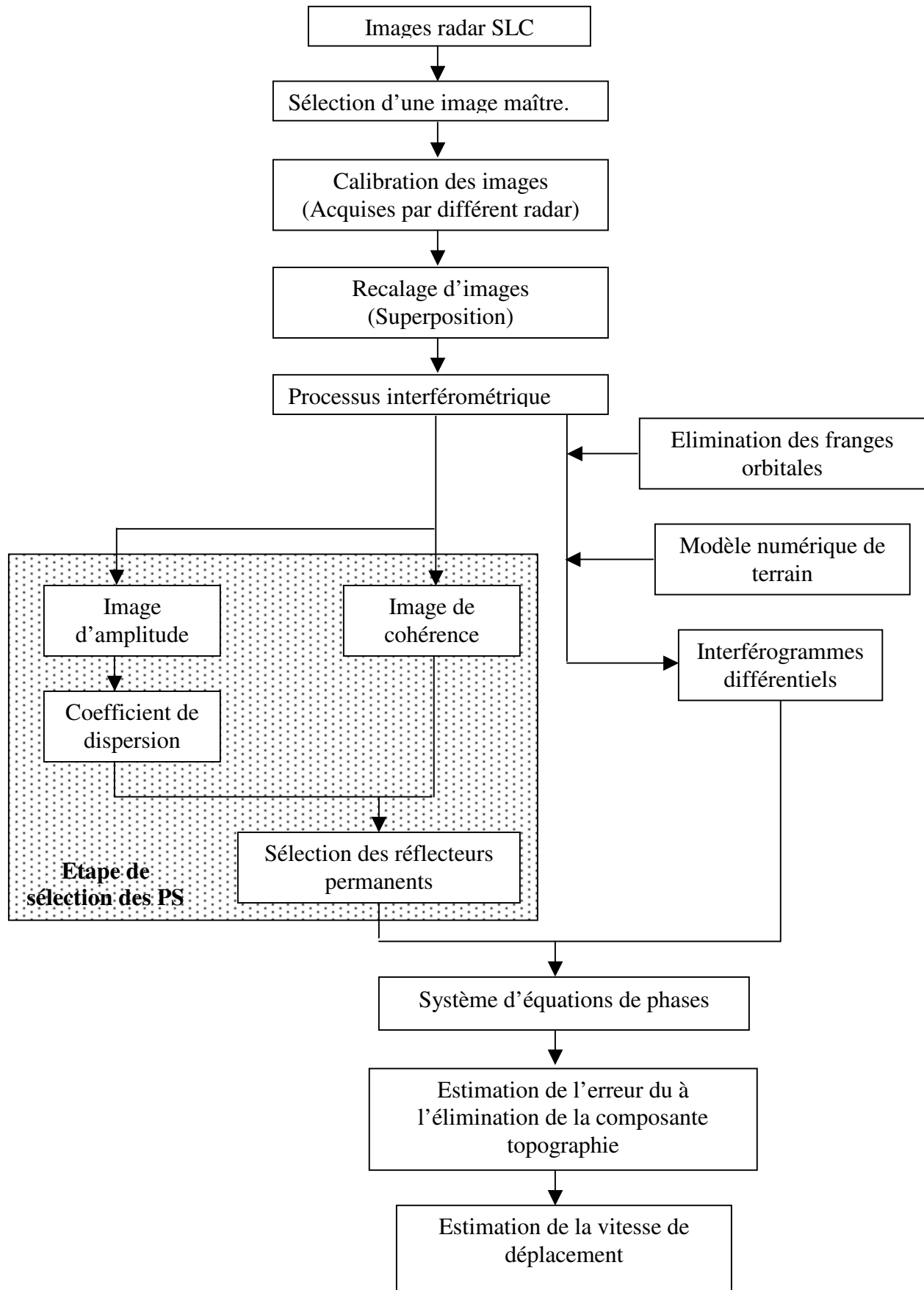


Figure IV.5: Organigramme de la méthode des réflecteurs permanents (PS: permanent scatters).

L'organigramme de la figure IV.5 montre bien que la méthode des réflecteurs permanents exploite le processus interférométrique pour générer les interférogrammes différentiels. En effet, si nous avons $K+1$ images radar SLC, nous allons d'abord choisir une image maître comme « référence », et nous générerons K interférogrammes différentiels, après l'étape de superposition des différentes images, l'élimination des franges orbitales et l'élimination de la phase topographique.

La première phase de cette approche est la sélection des PS, notons que le système d'équations permettant de déduire les erreurs et d'estimer la vitesse de déplacement est établi au niveau des PS.

Sélection des points diffuseurs :

Le problème est de détecter les pixels les plus stables d'un ensemble d'images. Parmi les méthodes [Van-03] [Ferr-01], celle qui étudie les valeurs d'amplitude de chaque pixel dans les images, en mesurant la stabilité de la phase de chaque pixel, [Ferr-01], [Wora-04-a], [Wora-04-b]. Ce paramètre est obtenu par la relation IV.20.

$$D_A = \frac{\sigma_A}{m_A} \quad (\text{IV.20})$$

Avec : D_A : Coefficient de dispersion d'amplitude.

σ_A : L'écart type.

m_A : La moyenne.

Dans l'équation précédente, m et σ sont respectivement la moyenne et l'écart types de chaque pixel dans les $K+1$ images radar considérées, et cela en faisant le rapport entre la moyenne et l'écart type, on aura la valeur de dispersion de chaque pixel, et après un seuillage adéquat, on aura les pixels les plus stables.

Dans des cas pratiques cités en bibliographie [Prin-05], [Ferr-01],[Wora-04-a],[Wora-04-b], les pixels dont la valeur d'amplitude est basse, (lac, près de la mer...) présente une certaine stabilité d'amplitude. En effet, une valeur d'amplitude basse implique que les écarts types sont inférieurs donc à une valeur de dispersion d'amplitude, et cela conduit à leurs sélections comme points de réflecteur malgré la non stabilité de ces pixels. Pour cette raison, le calcul de la dispersion d'amplitude peut être précédé par une opération de filtrage, ajoutant un seuil adaptatif à la sélection des pixels, et cela en utilisant aussi le critère de cohérence (seuls les pixels les plus cohérents seront sélectionnés).

Ferreri et Al, [Prin-05], [Ferr-01], ont proposé un modèle de décomposition de la phase interférométrique, qui est un modèle matriciel dont les colonnes représentent la phase interférométrique de chaque point diffuseur (nombre de diffuseurs) et les lignes représentent les phases interférométriques (nombre d'interférogrammes différentiels) :

$$\Delta\phi = \alpha 1^T + P_\epsilon \epsilon^T + P_\eta \eta^T + B' \Delta q^T + T v^T + E \quad (IV.21)$$

C'est un système d'équation matricielle de taille $K \times H$, avec K le nombre de ligne qui correspond au nombre d'interférogrammes différentiels et H est le nombre des points réflecteurs (PS).

Avec :

Les données sont :

$\Delta\phi [K \times H]$: est une matrice $[K \times H]$, obtenue après élimination des franges orbitales et la composante topographique.

$\epsilon, \eta [K \times H]$: c'est les coordonnées, l'azimut et le rang d'un pixels donné comme (PS).

$B', T [K \times H]$: facteurs proportionnels respectivement aux baselines géométrique et temporelle.

$$\text{Où :} \quad B' = \frac{4\pi}{\lambda R \sin(\theta_i)} B_{\perp} \quad \text{et} \quad T = \frac{4\pi}{\lambda} B_T \quad (\text{IV.22})$$

Avec $B_{\perp}$ est la composante verticale du baseline, B_T est l'intervalle du temps entre les deux images du couple interférométrique, R et θ_i sont respectivement la distance radiale et l'angle d'incidence correspondants aux réflecteurs permanents.

Les inconnus sont :

α , P_e , P_{η} [$K \times H$]: ils sont respectivement la constante et les deux coefficients linéaires atmosphériques le long de l'azimut et la distance.

Δq [$K \times H$] : l'erreur due à l'élimination de la composante topographique.

V [$K \times H$] : la vitesse (LOS), par rapport à la visée du radar.

E : phase du bruit.

Calcul de l'erreur d'élimination de la composante topographique Δq :

Afin de déterminer l'erreur sur le MNT, nous pouvons considérer que les effets atmosphériques restent constants dans un rayon de 1 Km. La même considération peut également être faite mais sur une superficie plus restreinte pour les déformations. En revanche, l'erreur sur le MNT varie d'un pixel à un autre. La démarche suivie fut alors de calculer la différence de phase entre chaque réflecteur d'une fenêtre dont les dimensions respectent les conditions précédemment posées. Considérant deux pixels d'un interférogramme dans cette fenêtre, de phases différentielles respectivement Φ_1 et Φ_2 , la différence de phase s'exprime ainsi :

$$\begin{aligned}
\phi_{2-1} &= \phi_2 - \phi_1 \\
&= \frac{4\pi B_{\perp} \Delta q_2}{\lambda R \sin(\theta_i)} - \frac{4\pi B_{\perp} \Delta q_1}{\lambda R \sin(\theta_i)} \\
&= \frac{4\pi (\Delta q_2 - \Delta q_1)}{\lambda R \sin(\theta_i)} B_{\perp}
\end{aligned} \tag{IV.23}$$

L'équation IV.23 montre que le déphasage entre les deux réflecteurs permanents est relié à la composante verticale du baseline par une relation linéaire de pente $\frac{4\pi \Delta(\Delta q)}{\lambda R \sin(\theta_i)}$

où $\Delta(\Delta q) = \Delta q_2 - \Delta q_1$.

En effectuant le calcul sur l'ensemble des interférogrammes, nous obtenons pour chaque couple de réflecteurs permanents, un diagramme ligne de base/déphasage. Pour chaque diagramme, nous calculons la pente d'une droite de régression par la méthode des moindres carrés.

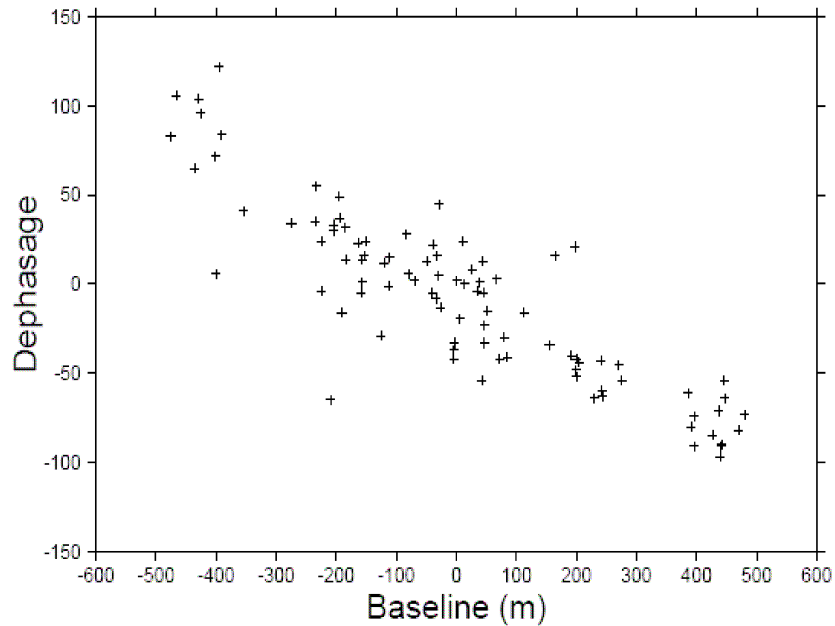


Figure IV.6 : Différences de phase entre deux réflecteurs permanents en fonction de la valeur du baseline. La pente de la droite de régression est proportionnelle à l'erreur du MNT, [Van-03].

Calcul de la vitesse de déplacement V :

Nous adoptons la même méthode de calcul de déphasage entre deux réflecteurs permanents, mais cette fois ci, nous obtenons pour chaque couple de réflecteurs permanents, un diagramme intervalle de temps B_T /déphasage.

$$\begin{aligned}\phi_{2-1} &= \phi_2 - \phi_1 \\ &= \frac{4\pi}{\lambda} B_T V_2 - \frac{4\pi}{\lambda} B_T V_1 \\ &= \frac{4\pi}{\lambda} \Delta V B_T\end{aligned}\tag{IV.24}$$

La pente est $\frac{4\pi}{\lambda} \Delta V$ où $\Delta V = V_2 - V_1$.

Où V_2 et V_1 sont respectivement la vitesse de déplacement des deux réflecteurs permanents.

Cependant, avec cette démarche, ils calculent un déplacement différentiel pour lequel nous ne connaissons pas l'origine. Afin de pallier ce problème, ils définissent un réflecteur permanent de référence supposé resté stable au cours du temps, à partir duquel seront calculés tous les déphasage.

Nous pouvons conclure pour ce chapitre, que le DINSAR est un axe nouveau dans lequel le processus de traitement et l'exploitation sont au stade de recherches et de validations. En effet, plusieurs problèmes restent encore posés, ils se résument en deux niveaux :

- le premier c'est la disponibilité des couples d'images radar qui remplissent les conditions interférométriques (baseline spatiale, baseline temporelle, corrélation temporelle,...).
- le deuxième se situe au niveau de l'estimation des différentes erreurs qui affectent la phase de mouvement et la complexité des algorithmes.
- le troisième est la détermination du seuil de sélection des réflecteurs permanents.

Pour notre part, nous l'avons abordé par la première approche qui est simple mais elle ne garantie pas la bonne solution, et nous avons ensuite effectué une étude théorique sur l'approche par les PS. Au niveau de notre laboratoire, nous sommes entrain de reconstituer des couples interférométriques ERS-1/ERS-2/ASAR (ENVISAT) sur une région du Sud d'Est afin d'implémenter l'approche des PS.

Conclusion générale

Après une synthèse bibliographique où nous avons exposé le principe, les caractéristiques de l'imagerie radar, et certains domaines d'application, à savoir l'interférométrie SAR (INSAR) et l'interférométrie différentielle SAR (DINSAR). Nous concluons par un résumé de notre travail qui est une initiation au domaine de l'Interférométrie et l'interférométrie différentielle en mettant l'accent sur les problèmes rencontrés lors de l'implémentation des algorithmes et l'évaluation des résultats et nous donnons quelques perspectives à ce travail.

Notre travail a porté sur l'implémentation d'un processus interférométrique, le résultat de ce processus après l'étape de déroulement de phase est un modèle Numérique de Terrain.

Notre étude peut être divisée principalement en deux parties, nous avons abordé, dans la première partie, l'interférométrie classique SAR, afin de générer un MNT. Un compromis doit être fait sur le choix d'un couple interférométrique qui est lié aux deux baselines : temporelle (l'intervalle de temps entre les deux images pour éviter les changements de terrain) et géométrique (la distance entre les deux orbites). En effet, la superposition des deux images est l'étape essentielle dans le processus interférométrique. Pour cela, nous avons développé un algorithme de superposition basé sur la corrélation de phase, applicable à tout type d'images radar. Le résultat obtenu est appréciable sur les interférogrammes générés. Néanmoins, l'évaluation de cette superposition reste subjective étant donné que la précision exigée en interférométrie est de l'ordre de 1/10 de pixel.

Afin d'estimer les composantes parallèle et perpendiculaire du baseline ainsi que l'angle d'incidence pour chaque pixel, nous avons été amené à interpoler les orbites des deux satellites en utilisant le polynôme de Lagrange. Ces résultats sont utilisés dans la simulation d'interférogramme à partir d'MNT. Ils ont été comparés aux valeurs obtenues avec le logiciel "BEST", nous avons constaté un petit écart et cela est justifié par les erreurs d'interpolations. Pour l'élimination des franges orbitales, nous avons développé un algorithme qui calcule la fréquence de ces franges et les génère pour les soustraire de l'interférogramme. Le résultat obtenu est satisfaisant par rapport à celui obtenu par la méthode géométrique. Par ailleurs, le filtrage des interférogrammes est nécessaire afin de réduire les bruits qui affectent la phase interférométrique. Nous avons mis en œuvre le filtre vecteur qui est basé sur un filtrage des images cosinus et sinus, générées à partir des interférogrammes.

Cette étape a amélioré sensiblement la qualité des franges, il a permis d'éliminer les résidus dus aux bruits ce qui facilite ainsi l'étape de déroulement de phase.

Quant au déroulement de phase, il a été abordé avec ses deux approches locales et globales. Pour cela nous avons mis en œuvre une méthode locale avec détection et évitement des résidus il s'agit de la méthode de proche en proche et une méthode globale basée sur les moindres carrés. Cependant, cette étape est très délicate et la diversité d'approches abordées par différents chercheurs témoigne de la complexité et l'importance de l'étape de déroulement de phase.

La deuxième partie de notre étude est l'interférométrie différentielle avec ses deux méthodes « simple passe » et « multi passe ». La non disponibilité des données nous a amené à développer la méthode « simple passe » qui est basée essentiellement sur la simulation d'un interférogramme à partir d' MNT projeté dans la géométrie radar. Néanmoins, le problème de la superposition parfaite entre l'interférogramme simulé et l'interférogramme généré par le couple images entraîne des erreurs de détection des franges proportionnelles aux mouvements de terrain. Quant à la technique des réflecteurs permanents que nous l'avons présentée et qui s'énonce comme une nouvelle ère dans l'interférométrie radar, elle permet de détecter avec quelques millimètres de précisions, la déformation du sol.

Pour des travaux ultérieurs, nous proposons les perspectives suivantes :

- Filtrage de fréquence centroïde Doppler entre les deux images du couple.
- Arriver à une superposition à un 1/10 de pixel de couple interférométrique.
- Développement d'autres méthodes de déroulement de phase.
- Développement d'un processus d'interférométrie différentielle en utilisant la méthode « multi passe », et d'appliquer la méthode des réflecteurs permanents (PS).

Bibliographie

- [Amar-03] SHARAY Amarjargal. Differential SAR Interferometry for crustal deformation study. Thèse du magistère. International institut for geo-information science and earth obseravation. Netherlands. March 2003.
- [Ambe-05] VIRGINIE Amberg. Analyse de scènes péri-urbaines à partir d'images radar haute résolution. Thèse de doctorat. Signal, image, acoustique. Laboratoire IRIT site ENSEEIHT, Toulouse. Novembre 2005.
- [Bapt-97] M. Baptiste, B. Maurice, M. Rafael. Calcul de translation et de rotation par la transformée de Fourier. Traitement du signal. INP. Thoulouse. 1997
- [Bara-04] IRENEUSZ Baran. Advenced Satellite radar interferometry for small surface deformation detection. Doctorat thesis. Curtin university of technology. 2004.
- [Burg-00] ROLAND Burgmann, A.Rosen Paul and J. Eric Fielding. Synthetic Aperture Radar Interferometry to Measure Earth's Surface Topography an dits deformation. Annu.Rev.Earth Plant.Sci.2000.28:169-209.
- [Chen-04] KATHERINE Chen. Corrélation estimation in SAR interferograms Sous la direction de Howard A. Zebker .université de standford. 2004
- [Curl-91] JOHN. C Curlander and N. McDonough Robert. Synthetic Aperture Radar - Systems and Signal Processing, John Wiley & Sons, New York, 1991
- [Démi-73] B. Démidovitch et I .Maron. Elément de calcul numérique. Edition Mir. Moscou.1973.
- [Dupo-94] S. Dupont et M. Berthod. Interferometrie radar et déroulement de phase. Rapport INRIA. 1994
- [Fanc-99] GIORGIO Franceschetti, LANARI Ricardo. Synthetic Aperture Radar Processing, CRC PRESS, New York, 1999.
- [Ferr-01] ALESSANDRO Ferretti, PRATI Claudio and FABIO Rocca. Permanent Scatterers in SAR Interferometry, IEEE transaction on geoscience and remote sensing, vol.39,no.1, January 2001.
- [Gao-07] LIAN Gao, OIMING Zeng. Terrain Deformation monitoring in Three Gorges Area using permanent Scatterers SAR Interferometry. Proceedings, ScanGIS'2007.
- [Gare-06] FRANCK Garestier. Evaluation du potentiel de la technique POLINSAR pour L'estimation des paramètres physique de la végétation en conditions satellitaires.Thèse de doctorat. Ecole doctorale : Science physique et de l'ingénieur. Université Bordeaux I. Janvier 2006.

- [Henr-03] CAROLINE Henry. Détection de points brillants par corrélation complexe entre sous vues d'une image spatiale. Thèse de doctorat. Spécialité informatique et Télécommunication. Institut national polytechnique de toulouse. 2003
- [Humb-05] FABRICE Humblot : détection de petits objets dans une image en utilisant les techniques de super-résolution. Thèse de doctorat. Automatique et traitement du signal, université de Paris-sud 11, 06 Décembre 2005.
- [Huot-00] E. Huot. Etude de l'évaluation temporelle de phénomène terrestre au moyen de l'imagerie radar. Thèse de doctorat. Université de CAEN. Ecole doctorale simen. France. 2000.
- [Labe-90] FRANZ.W Leberl. Radargrammetric Image Processing, library of Congress Cataloging-in-Publication Data, 1990.
- [Labr-96] DAVID Labrousse. Modélisation Markovienne pour le déroulement de phase interférométrique SAR. Thèse de doctorat. Vision par ordinateur. Université de Nice. Septembre 1996.
- [Miki-98] T. Mikiot, F. Satoshi, O. Shinzaburo, R. Paula, F. Eric, L. Charl M. Masaki, N. Hiroyuki, N. Koth, M. Makoto. Deformation of 1995 North Sakhalin earthquake detected by Jers-1/sar interferometry. Earth planets space, 50,313- 325, 1998.
- [Noce-96] LUCIANO Nocera. Reconstruction du relief en imagerie radar à ouverture de synthèse, stéréoscopie et ombrages.thèse de doctorat. Spétialité : méthode physique en télédétection. Université de paris07. France
- [Prin-05] BAI JUIN VERRONIQUE Prinnet. PS INSAR technique an dits application in Beijing area. Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences – China.2005
- [Prit-94] MARK.D. Pritt, S. Jerome and S. Shipman . Least-Squares Two-Dimensional Phase Unwrapping Using FFT. IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, VOL. 32, NO. 3, MAY 1994
- [Sand-98] DAVID.T Sandwell, and EVELYN.J Price. Phase gradient approche to stacking interferograms. Institut of Geophysics and planetary physics, Journal of Geophysical research, vol103. No.B12, pages30.183-30.204, December 10,1998.
- [Seym-04] MICHAEL Seymour. Updating DEM's using RADARSAT-1 data:Can.J.Remote Sensing, Vol.30,No.6,pp.927-942,2004 .

- [Stép-03] GHILLASO Stéphane. Complémentarité polarimétrie / interférométrie pour la détection et la caractérisation de cibles. Thèse de doctorat. Traitement du signal et télécommunication. Université de Rennes1, France. Novembre 2003.

- [Tom-04] RUNE LAUKNES Tom. Long term surface deformation mapping small baseline différentielle Sra interferograms. Faculty of science. Department of physique. University of Tromso. November 2004.

- [Trou-96] EMANEL Trouvé. Imagerie interférentielle en radar à synthétique. Thèse doctorat. Ecole nationale supérieure des télécommunications de Paris ENST- Paris. Juillet 19996.

- [Van-03] SEBASTIEN Van Gorp. Identification des réflecteurs permanents en Interférométrie radar. Rapport DEA, laboratoire de sismologie, équipe géodésie, sous la direction de Pierre Briole, 2003.

- [Wora-04-a] J. Worawattanamateekul, J. Hoffmann, N. Adam, B. Kampes, W. Altermann. Radar Interferometry technique for urbain sursidence monitoring a case study in bangkok an dits vicinity, Proceedings of the 2004 Envisat & ERS Symposium (ESA SP-572). 6-10 September 2004.

- [Wora-04-b] J. Worawattanamateekul, J. Hoffmann, N. Adam, B. Kampes. Urban Deformation Monitoring in Bangkok Metropolitan (Tailand) using permanent scatterer and differential interferometry techniques. Proc. of FRINGE 2003 Workshop, Frascati, Italy, 1-5 December 2003.

- [Xu-01] Q. Xu, G. Jin, C. Zhu, Z. Wang, Y. He, P. Yang . The Filtring and phase unwrapping of interferogram. Institute of Surveying and Mapping.China 2001.

- [Yong-00] QI Yong Chen , GUOBAO Zhang, XIAOLI Ding and ZHILIN Li. Monitoring Earth surface deformation with INSAR technology : principale and some critical issues. Journal of geospatial engineering.2000, vol 2 ; part 1, pages 3-22.

- [Zebk-97] HOWARD. A Zebker and YABNPING Lu .Phase Unwrapping Algorithms for Radar Interferometry: Residue-Cut, Least-Squares, and Synthesis Algorithms. Department of Geophysics. Stanford University. May 2, 1997.

- [Zine-05] SONIA Zine .Contribution de la télédétection satellitale radar pour suivi des paramètres de surface d'une zone sahélienne agro pastorale. Thèse de doctorat. Université de Marne-la-Vallée. Science de l'information géographique.15 décembre 2004.