

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université A. Mira de Bejaia
Faculté de Technologie
Département Génie Electrique

Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de master recherche
Spécialité : Télécommunication

Thème :

**Superposition d'un couple d'images
radar SAR (Single Look Complex)**

Réalisé par :

BOUTAKHEDMIT Farid

Encadré par :

**Mr A. Khirddine
Mr S. CHELBI**

Année universitaire

2011/2012

Remerciements

Je tiens à remercier DIEU qui m'a accordé la santé, la possibilité ainsi que la volonté d'entamer et de continuer mes études.

Je remercie profondément mes deux encadreurs, **Mr Chelbi Salim et Mr Khirdinne** pour leurs soutiens et l'aide qu'ils m'ont présentée pour la réalisation de ce document.

Je remercie également l'ensemble de jury d'avoir accepté d'examiner et d'évaluer mon travail.

Mes remerciements s'adressent à tous les enseignants qui ont contribué à ma formation, pour l'aide, et les conseils qui m'ont apportés tout au long de mon stage.

Mes remerciements vont plus particulièrement à ma famille et à mes amis qui ont su me soutenir et m'encourager tout au long de mes études.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

A la mémoire de ma très chère mère

A mon très cher père

A ma sœur Makika et sa petite famille

A mon frère Mourad

A mes grands parents paternels

A la mémoire de « yama Makdjouba », « Khali Idris », « Khalti Samia »

A Khalti Naima et sa famille, Akila et Wahida

A Khali Mohamed, Saïd, Mustapha et leurs familles

A mon cousin Aziz

A toute la famille BOUTAKHEDMIT

*Aux membres de l'association Soummam Solidarité, Abid, Nabil Fayçal, Rabah, Tayeb, Amirouche, Tahar,
Karim, Samir, Saïd*

*A mes copains de chambre E303 Walid dit « Elhadji », Fayçal, Fahim et l'équipe de E301 Chafaa, Chafaa
(Riki), Sadek, Ghani, Massi*

A mes amis de la résidence Tharga Ouzemmour

et à ceux de l'université de Bejaia

A toute la promotion télécom de l'université de Bejaia

A tous qui m'ont aidé durant mes études universitaires

B.Farid

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Introduction générale..... 1

Chapitre I : satellite et imagerie radar

I.1. Les satellites :	3
I.1.1. Historique :	3
I.1.2. Architecture d'un satellite :	3
I.1.3. Type des satellites :	4
I.2. Imagerie radar :	5
I.2.1. Principe d'acquisition d'une image radar à ouverture réelle :	5
a. Résolution en distance	6
b. Résolution en azimuth	7
I.2.2. Principe du radar synthétique :	8
a. compression d'impulsion	9
b. compression d'impulsion	10
I.3. Caractéristiques des images ROS :	11
I.3.1. Distorsions géométriques :	12
I.3.2. Propriétés radiométriques :	13
1.4 Conclusion :	16

Chapitre II : Interférométrie radar SAR

II.1. principe de l'interférométrie radar SAR	17
II.1.1 principe générale	17
II.2. la chaine interférométrique :	21
II.2.1. Condition de faisabilité :	21
II.2.2. Le recalage d'images :	22
II.2.2.1. Méthode statistique :	23
II.2.2.2. Méthode polynomiale :	24

II.2.2.3 Méthode fréquentielle :	26
II.2.3. Produit interférométrique	29
II.2.4. Elimination des franges orbitales :	29
II.2.5. Le déroulement de phase :	31
II.3. Conclusion :	31

Chapitre III : Implémentation et résultats

III.1. Introduction :	32
III.2. Présentation des données :	33
III.3 Implémentation des algorithmes recalage :	35
III.3.1. Recalage par la méthode fréquentielle :	35
III.3.2. Recalage fin :	37
III.4. Génération de l'interférogramme :	39
III.5 Conclusion :	42
Conclusion générale	43
Bibliographie	

Table des figures

Figure I.1 : Architecture d'un satellite	4
Figure I.2 : Visée latérale d'un radar imageur	5
Figure I.3 : Résolution en distance	6
Figure I.4 : Résolution en azimuth	7
Figure I.5 : Géométrie d'acquisition d'une image radar RSO	8
Figure I.6 : Synthèse d'ouverture	10
Figure I.7 : Différentes distorsions géométriques	12
Figure I.8 : Construction de la réponse d'amplitude et de phase dans une cellule de résolution ...	13
Figure I.9 : Principe de découpage en multi vues	14
Figure II.1 : Géométrie d'acquisition d'un couple interférométrique	17
Figure II.2 : Baseline interférométrique	19
Figure II.3 : Image maître et esclave	22
Figure II.4 : grille de points de contrôle	24
Figure II.5 : Géométrie des franges orbitales	30
Figure II.6 : Principe de déroulement de phase	31
Figure III.1 : Les images utilisées	33
Figure III.2 : Organigramme complet de la méthode de corrélation de phase	35
Figure III.3 : Position de Dirac correspondant au point de recalage	36
Figure III.4 : Organigramme complet de recalage fin	37
Figure III.5 : Interférogramme brut	39
Figure III.6 : Les franges orbitales générées	40
Figure III.7 : L'interférogramme corrigé	40
Figure III.8 : Image d'amplitudes	41

Liste des tableaux

Tableau III.1 : Caractéristiques du couple d'images	33
---	----

Liste des abréviations

CP	: Corrélation de Phase
ERS1	: Earth Resources Technology satellite 1
ERS2	: Earth Resources Technology satellite 2
ESA	: Agence spatiale européenne
MNT	: Modèle Numérique de terrain
NR	: Near Range
PRF	: Pulse repetition Frequency
RSO	: Radar à Synthèse d'ouverture
SAR	: Synthetic Aperture Radar
SLC	: Singler Look Complex
SLCI	: Singler Look Complex Image
SPC	: Cross Power Spectrum
TF	: Transformée de Fourier
TFD	: Transformée de Fourier Discrète
TFI	: Transformée de Fourier Inverse
TFR	: Transformée de Fourier Rapide

Introduction générale

Introduction générale

L'observation de la Terre depuis l'espace est un objectif que l'Homme a visé depuis quelques dizaines d'années. Des efforts scientifiques ont été fournis pour atteindre ce but et les résultats se voient maintenant ; plusieurs satellites ont été lancés dans l'espace en améliorant à chaque fois les performances. En 1972, avec le lancement du satellite E.R.T.S.-1 (Earth Resources Technology Satellite), la télédétection spatiale marque ses débuts et au fil des années cette spécialité est devenue très utilisée pour étudier et analyser plusieurs phénomènes naturels.

L'imagerie radar est une technique de télédétection qui utilise le rayonnement électromagnétique avec des longueurs d'onde allant du millimètre à quelques mètres, ce qui la distingue de l'imagerie visible et infrarouge (dite aussi imagerie optique) qui fonctionne à des longueurs d'onde plus petites. Ceci implique de grandes différences sur la façon d'acquérir les images, sur leurs caractéristiques, et sur l'information qu'elles contiennent.

Les images radar résultantes issues d'un traitement complexe des données, contiennent deux types d'informations : l'amplitude du signal rétrodiffusé par le sol vers le radar, et sa phase. Ces deux paramètres sont liés à la nature du sol observé mais aussi à la distance entre le sol et le radar. Ces images sont utilisées dans des nombreuses applications à savoir la polarimétrie, l'interférométrie différentielle, et l'interférométrie. Cette dernière application a pour but de générer des modèles numériques de terrain (MNT).

Notre travail s'inscrit dans le contexte de l'étude et l'implémentation d'une étape très importante de l'interférométrie appelée recalage d'image qui consiste à superposer les deux images radar en utilisant la corrélation de phase suivi d'un recalage très fin avec une précision d'un demi-pixel. Le résultat de cette étape est validé dans l'étape de génération d'interférogramme brute, ce dernier n'est exploitable qu'après sa correction en éliminant les franges orbitales dans le but de l'exploiter dans la génération d'un modèle numérique de terrain.

Introduction générale

Le premier chapitre de ce mémoire introduit le radar à ouverture réelle et le radar à ouverture synthétique, ce dernier est conçu afin d'améliorer la résolution spatiale, aussi on a expliqué le principe de formation des images radar avec une présentation de leurs différentes caractéristiques.

Dans le deuxième chapitre, on définit la technique interférométrique, son principe géométrique et les étapes de son processus, commençant par le recalage d'images, ensuite la génération de l'interférogramme brut suivi de sa correction en éliminant les franges orbitales

L'interférogramme résultant est utilisé dans le déroulement de phase qui est l'étape finale du processus interférométrique.

Dans le dernier chapitre on présente les différents algorithmes implémentés et les résultats obtenus pour les étapes du recalage d'images et la génération de l'interférogramme brut suivi de sa correction.

Enfin, on termine notre travail par une conclusion générale.

CHAPITRE I

Satellite et imagerie radar

Chapitre I : satellite et imagerie radar

L'objectif de ce chapitre est de présenter les types des satellites à savoir les satellites passifs et les satellites actifs (les satellites radar), ce dernier est l'objet de notre travail en présentant les deux types de radar imageurs ainsi le principe de formation de ses images.

I.1. Les satellites :

I.1.1. Historique :

Depuis la fin des années 70, une surveillance totale de la terre est assurée grâce aux différents types des satellites, à savoir météorologiques et communication. Un satellite a comme mission principale de prendre des données pour la surveillance du temps et du climat, la surface de la Terre. Avec chaque nouvelle génération, les senseurs à bord de ces satellites deviennent plus performants afin de répondre à différents besoins.

I.1.2. Architecture d'un satellite :

Tout satellite comporte essentiellement une charge utile constituée par les instruments liés aux objectifs de la mission (antennes et amplificateurs pour un satellite de télécommunications, instrument d'optique pour l'observation de la Terre, etc.). Une plate forme de service comportant tout ce qui est nécessaire pour assure le bon fonctionnement des instruments pendant la durée de vie prévue et qui supporte la charge utile [1]. C'est ce qui est illustré dans la figure (I.1).

- **Charge utile :** En fonction de l'émission à réaliser, un satellite aura des équipements bien adapté. Elle comprend d'une part une case à équiper qui contient les enregistrements de données et d'autre part les instruments spécifique. La case accueille des équipements électroniques de traitement d'image mémorisant et de télémétrie.
- **La plateforme :** Pour ce placer sur une orbite, le satellite est besoin de carburant et de moteur. C'est également sur la plateforme qui sont fixés les panneaux solaires. Elle assure les fonctions suivantes :
 - D'interface avec le lanceur (fusée).
 - Génération et stockage d'énergie
 - De contrôle de l'altitude du satellite (orientation dans l'espace).

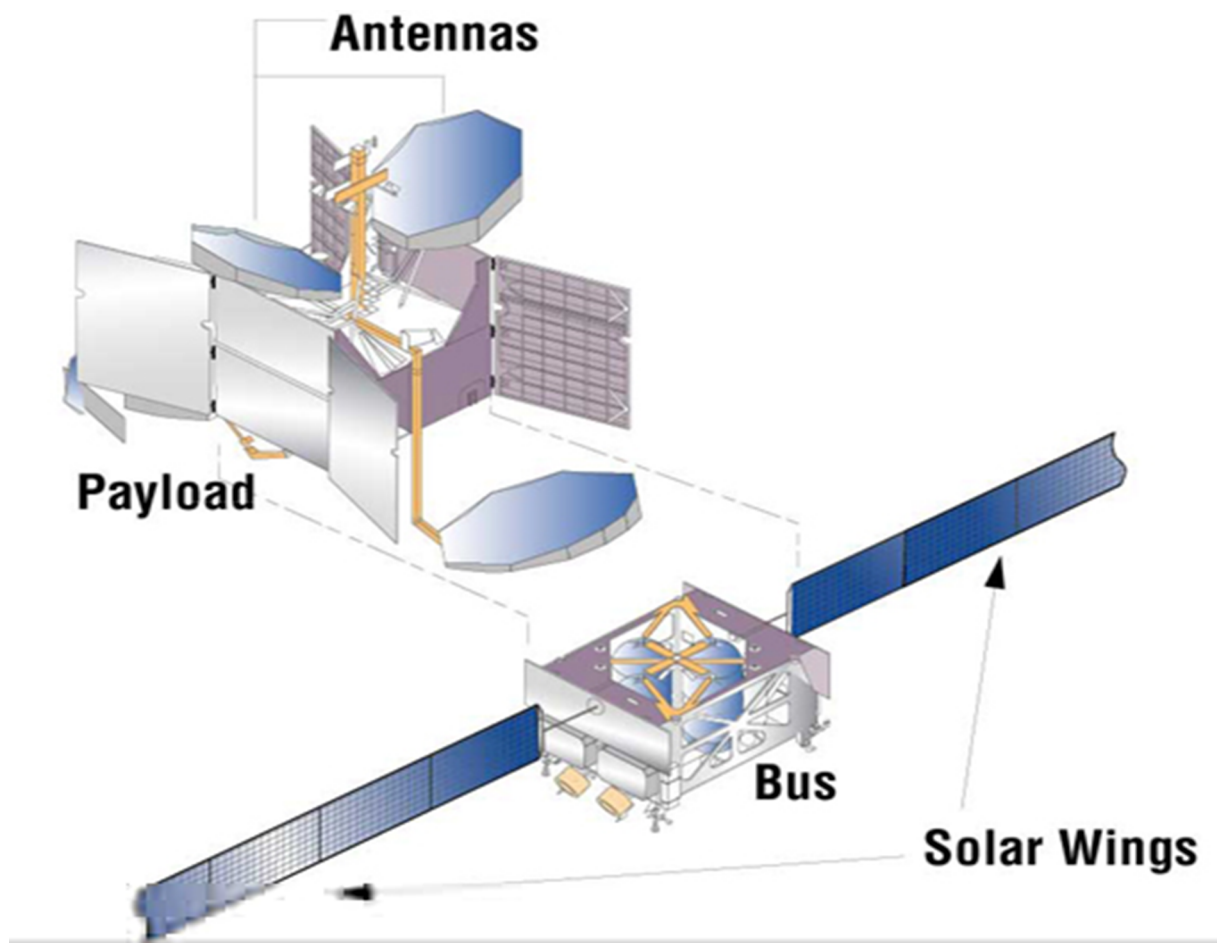


Figure I.1 : Architecture d'un satellite

I.1.3. Type des satellites :

Les satellites sont classés selon leurs positions, alors on trouve :

Les satellites géostationnaires qui se déplacent en même temps que la Terre et qui sont donc fixes par rapport à un point de la surface. Ils sont situés à 35 800 km d'altitude au-dessus de l'Équateur.

Les satellites polaires qui observent la Terre à seulement 850 km d'altitude. Ils permettent une meilleure résolution et surtout l'observation des régions qui ne sont pas couvertes par les satellites géostationnaires.

On peut les classer aussi selon leurs systèmes, alors il existe deux types des satellites : les satellites passifs, leurs capteurs sont des récepteurs, seules les sources naturelles de rayonnement de la Terre sont enregistrées et le capteur est un récepteur passif.

Leurs principaux domaines d'application sont : détection de la végétation, l'océanographie et la détection de l'humidité dans le sol.

Les satellites actifs, ils possédaient leur propre système d'émission et de réception. Ils émettent vers le sol des ondes radar (longueur d'onde d'environ 5 cm) sous forme d'impulsions très brèves dont ils enregistrent immédiatement les échos "déformés" par le sol ou la surface de l'océan. Grâce à ce système de télédétection actif on peut observer la Terre de nuit comme de jour et voir à travers les nuages car la taille des gouttelettes est largement inférieure à la longueur de l'onde radar utilisée.

I.2. Imagerie radar :

I.2.1. 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.2). Cet angle est appelé angle de visée θ , le radar émet des trains d'impulsions avec une fréquence appelée PRF (Pulse Repetition Frequency) 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).

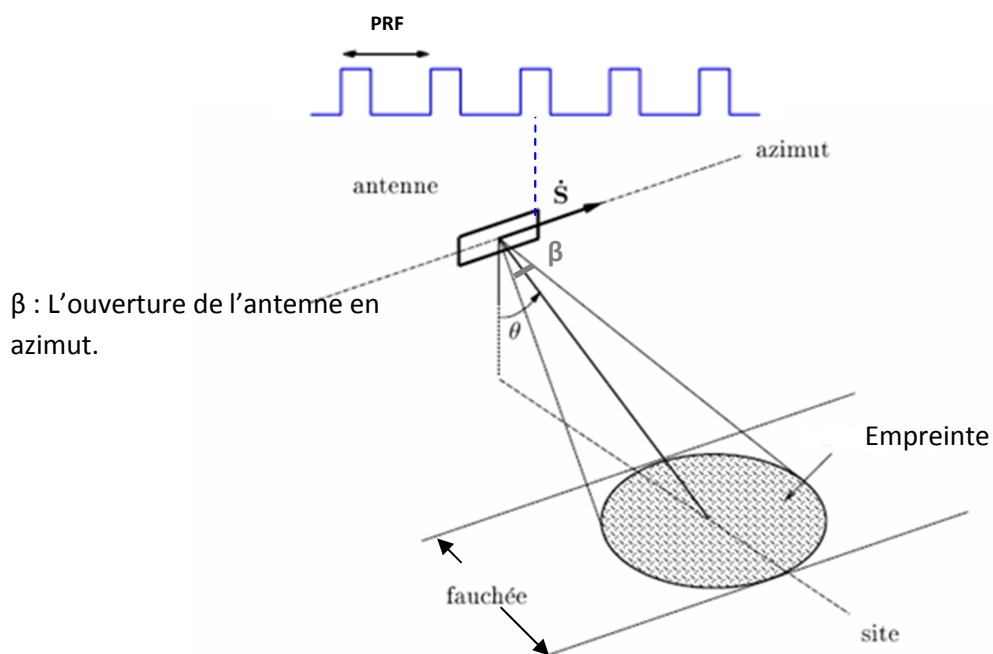


Figure I.2 : Visée latérale d'un radar imageur

a. Résolution en distance

La résolution radiale 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 :

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

Si l'angle d'incidence d'une cible est θ_i , la résolution de cette cible projetée au sol

(δ_{r-sol}) sera donnée par l'équation suivante :

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

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.3). La figure (I.3.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.3.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.

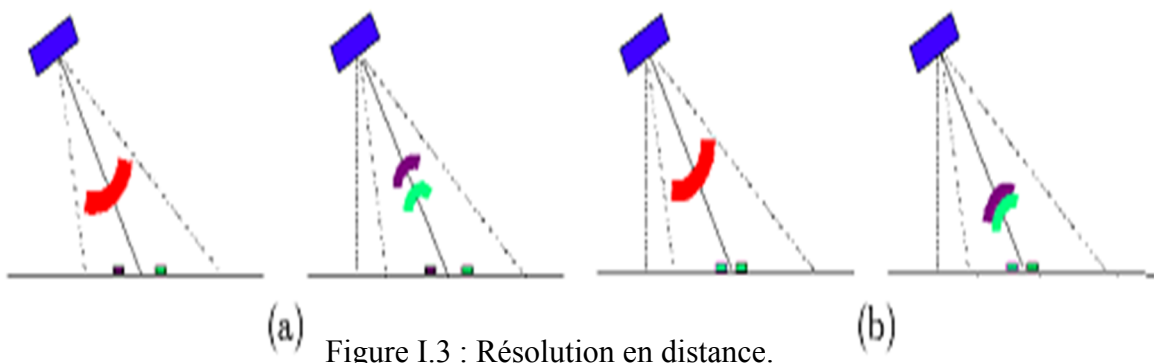


Figure I.3 : Résolution en distance.

b. Résolution en azimut :

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 azimut 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.4). En général, deux cibles soient séparables en azimut, il faut qu'elles ne soient pas dans le lobe d'antenne au même moment.

L'ouverture d'antenne est conventionnellement calculée à 3dB.

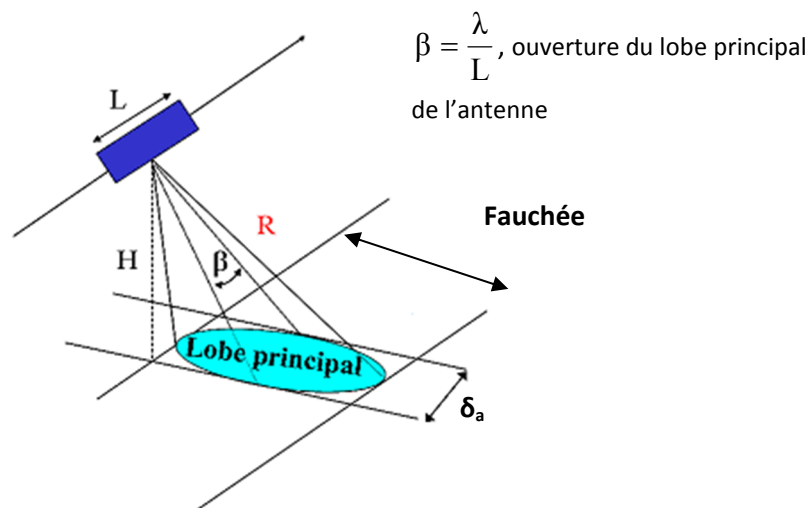


Figure I.4 : Résolution en azimut

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

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

I.2.2. Principe du radar synthétique :

Un radar à ouverture de synthèse est un système d'imagerie radar. Il utilise 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, [2], [3].

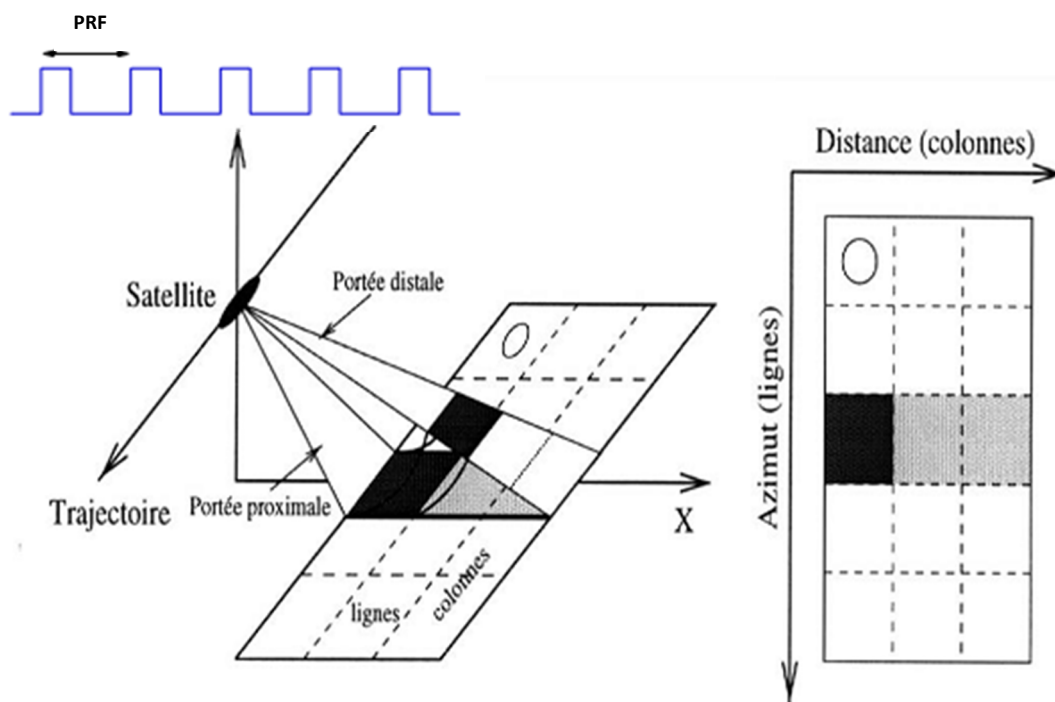


Figure I.5 : Géométrie d'acquisition d'une image radar RSO

La figure (I.5) présente la géométrie d'acquisition d'une image radar RSO. En effet, 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.

a. 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 :

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

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'impulsion exploite la convolution 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 $\tau = 1/B_{\text{chirp}}$, [4], [5]. La résolution radiale δ_r en distance du système devient :

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

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 est de $\delta_{r\text{-sol}} = 14.2$ Km.

Pour le radar à compression d'impulsion, nous avons $B_{\text{chirp}} = 15.5$ MHz, on obtient alors

$\delta_r = 9.7$ m et la résolution projetée au sol est de $\delta_{r\text{-sol}} = 24.8$ 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 $F_e \geq B_{\text{chirp}}$.

b. 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 [6], [7].

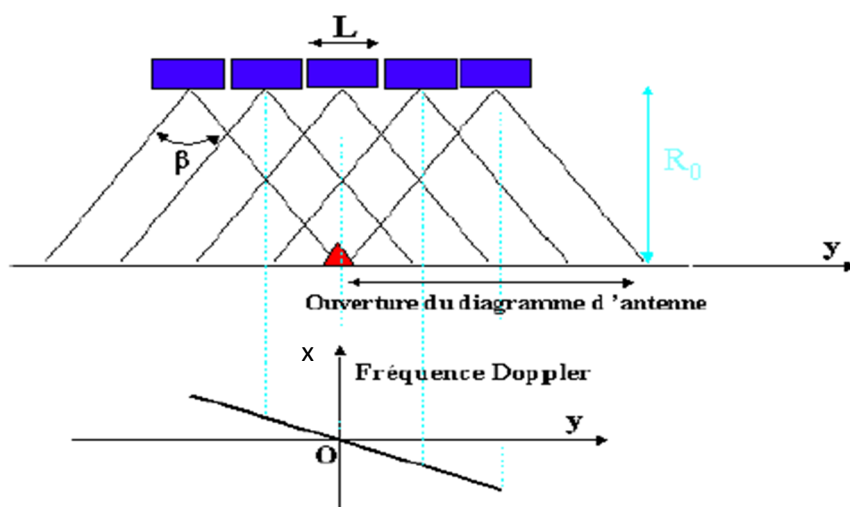


Figure I.6: synthèse d'ouverture

En utilisant l'effet Doppler, on peut synthétiser une grande antenne à partir du déplacement du radar en illuminant la même cible durant une période et cela pour augmenter la résolution azimutale, en effet pour un système radar RSO elle est égale à :

$$\delta_a = \frac{L}{2} \quad (I.9)$$

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

I.3. Caractéristiques des images ROS :

I.3.1. 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.7.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.7.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.7.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.

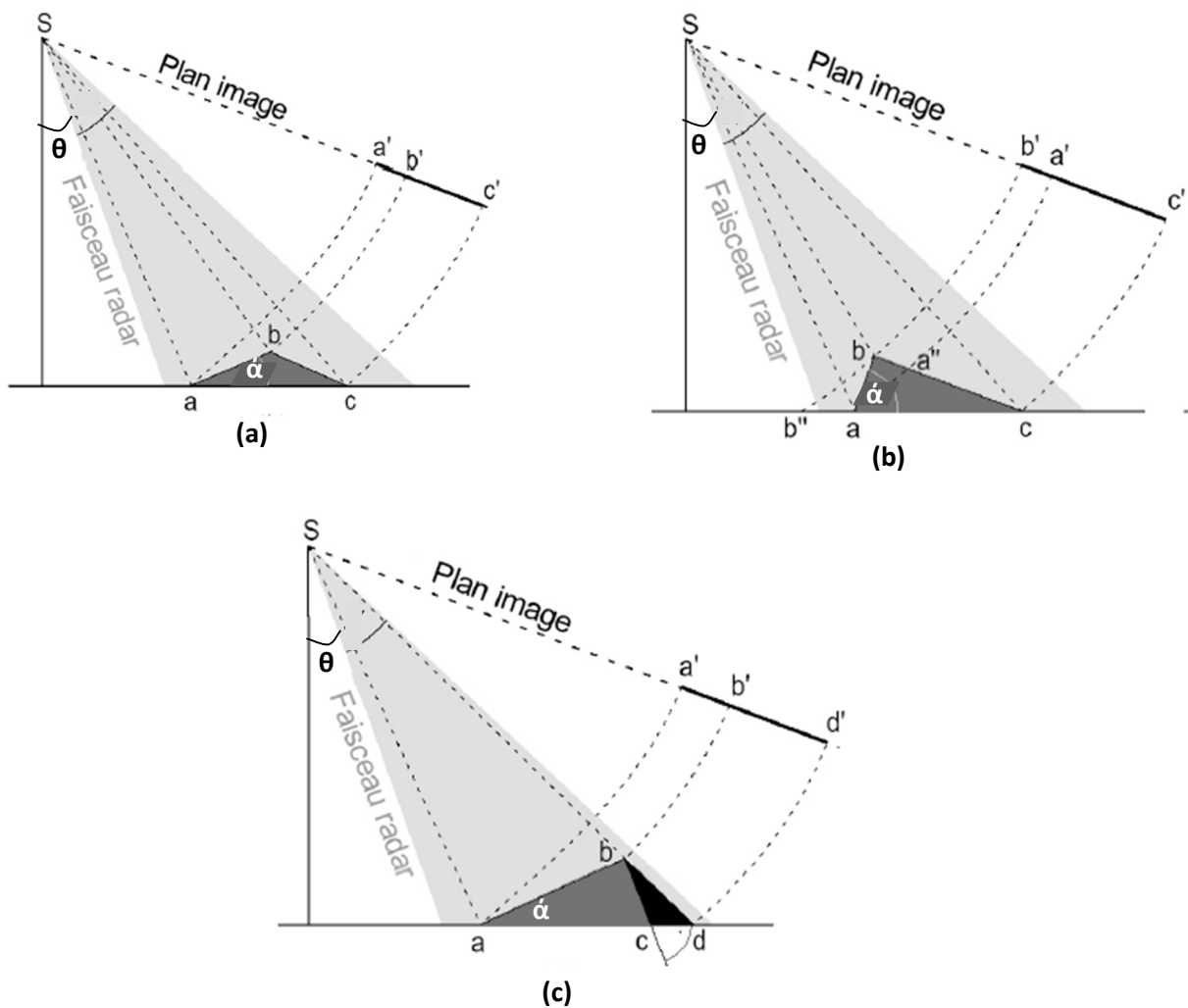


Figure I.7: différentes distorsions géométriques.

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.

I.3.2. 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 [8], ayant chacun réfléchi une onde électromagnétique et dont les signaux s'additionnent de façon cohérente pour former le signal rétrodiffusé exprimé par :

$$S = i + jq = Ae^{j\phi} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=1}^N a_k e^{j\phi_k} \quad (I.10)$$

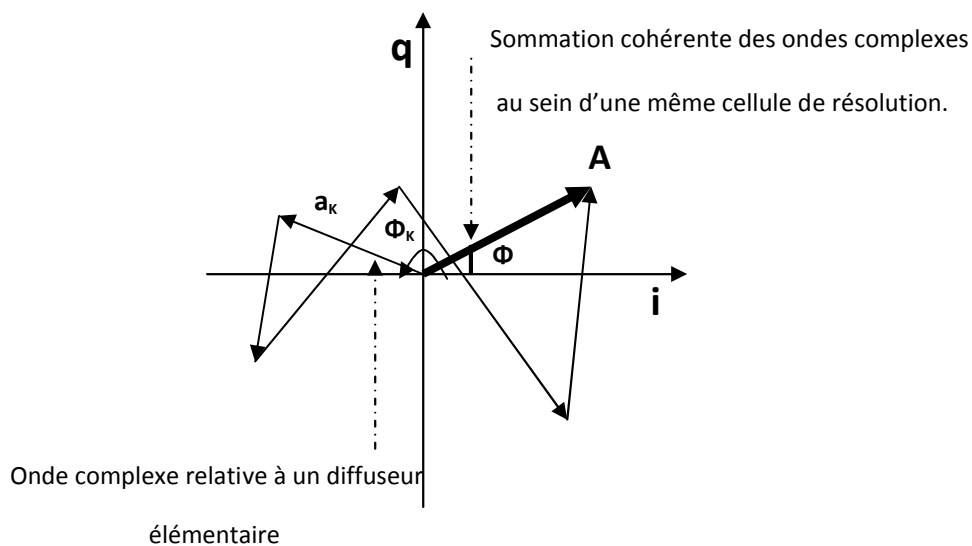


Figure I.8: Construction de la réponse d'amplitude et de phase dans une cellule de résolution

En raison de l'interférence des ondes $Ae^{j\Phi}$, 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, 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 de 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 de diviser l'ouverture synthétique de l'antenne (diviser la bande Doppler) en M sous bandes 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 [9].

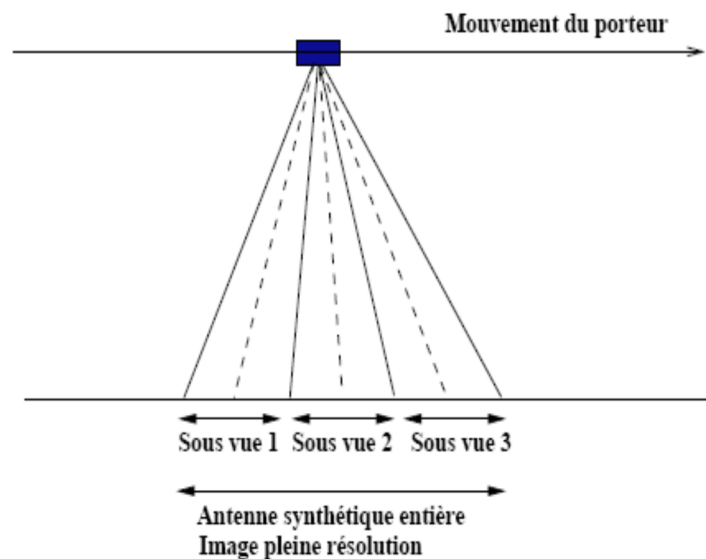


Figure I.9: Principe de découpage en multi vues.

- **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, est en fonction de l'interaction onde surface, elle dépend des 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 :

$$\varphi_{\text{totale}} = \varphi_{\text{trajet}} + \varphi_{\text{météo}} + \varphi_{\text{rétrodiffusion}} + \varphi_{\text{bruit}}$$

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_{bruit} , introduit par l'instrumentalisation et les procédés d'acquisition.

1.4 Conclusion :

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.

CHAPITRE II
Interférométrie
radar SAR

Chapitre II : Interférométrie radar 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.

II.1. principe de l'interférométrie radar SAR

II.1.1 principe générale

L'interférométrie utilise les informations fournies par la mesure entre deux chemins, radar et cible.

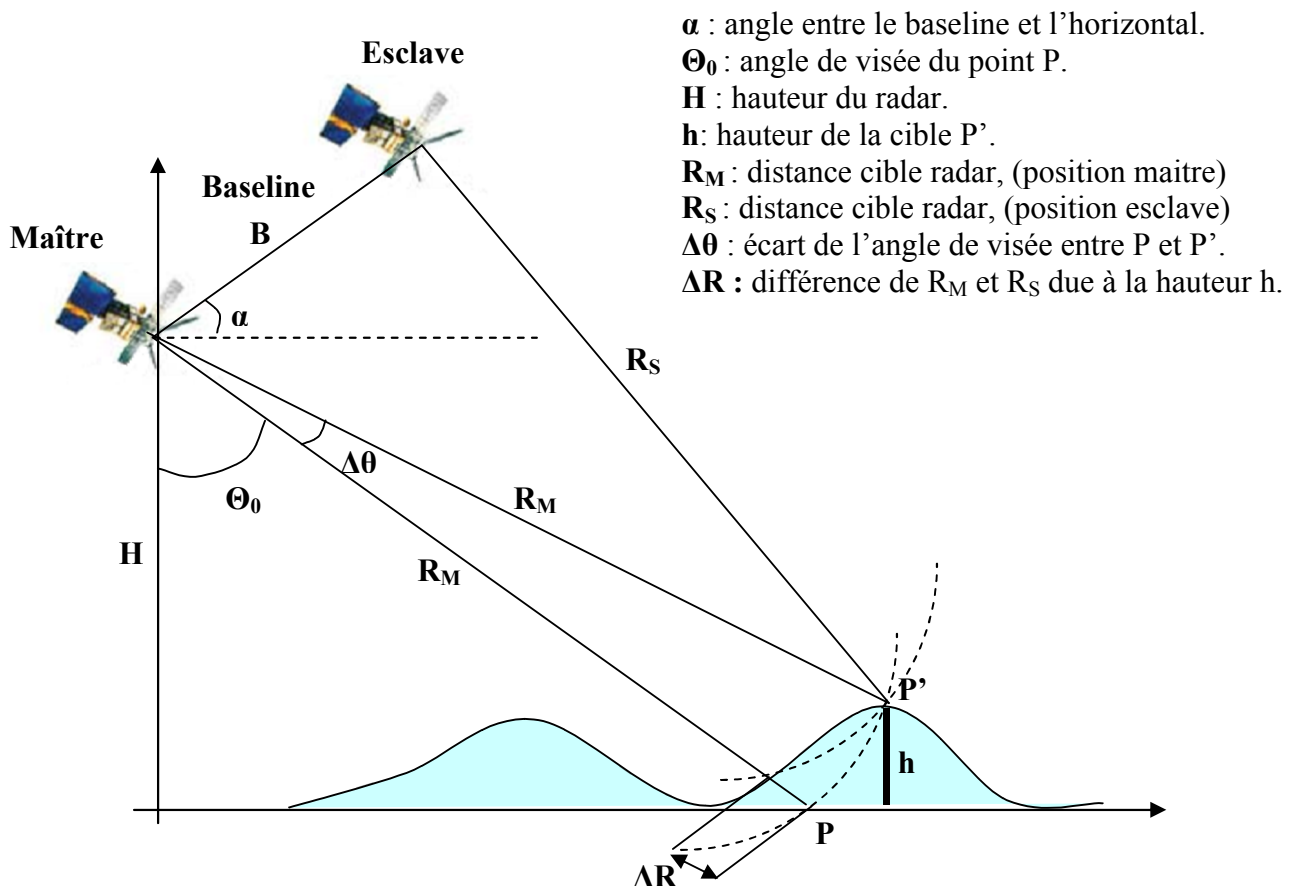


Figure II.1 : Géométrie d'acquisition d'un couple interférométrique

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 $S_M \cdot S_S^*$ 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):

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

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 :

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

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

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

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

Communément, il est utile de décomposer le baseline en deux termes, le baseline parallèle $B_{//}$ et le baseline orthogonale, B_{\perp} , [10], [11], (figure II.2).

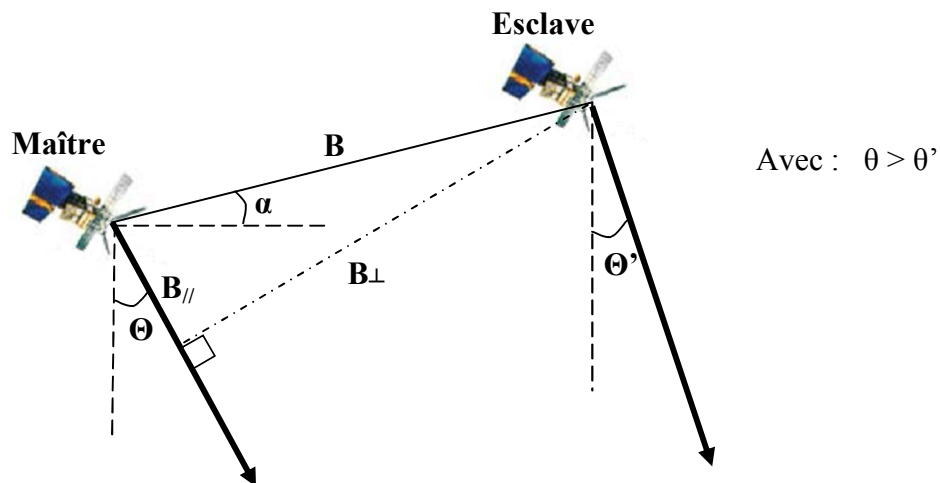


Figure II.2 : Baseline interférométrique

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 :

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

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 :

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

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

La phase interférométrique est une somme de deux termes, le premier 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.

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 :

$$\varphi_{topo} = 2\pi$$

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

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.

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. la chaine interférométrique :

Les étapes du processus interférométrique sont ordonnées comme suit :

- Le recalage des images acquises afin d'avoir une bonne superposition et de trouver pour chaque pixel dans l'image maitresse son homologue dans l'image esclave.
- Produit interférométrique, ce dernier présente les deux images, l'interférogramme qui est la différence des phases, et l'image de cohérence qui montre les différents changements entre les deux acquisitions.
- Le déroulement de l'interférogramme, afin de trouver ce qu'on appelle la phase absolue pour chaque pixel.

Pour qu'on puisse avoir un bon résultat par ce processus, les deux images doivent répondre aux certaines conditions de faisabilité de l'interférométrie qu'on va présenter dans la prochaine partie.

II.2.1. Condition de faisabilité :

Pour que l'interférométrie soit applicable, certaines conditions doivent être respecté, à savoir :
Les caractéristiques physiques de la cible n'aient pas chaudée pendant les deux acquisitions
La dimension de la Baseline, la distance entre les deux positions du radar correspondantes à l'acquisition des deux images du couple interférométrique au couple d'images acquises ne doit pas être trop grande résultant un fort bruit issu d'une décorrélation spatiale et temporelle.

a. La décorrélation spatiale

Cette décorrélation est une conséquence de la géométrie de l'interférométrie radar sar, en effet, chaque cible dans les deux images sont imagée sous deux angles d'incidences différentes.

b. La décorrélation temporelle

Cette décorrélation est un résultat des changements physique de la cible imagée par les deux radars. Cette décorrélation est négligeable lorsque l'acquisition est faite en même temps, c'est-à-dire mono-passe.

II.2.2. Le recalage d'images :

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. Dans ce cas, il s'agit de capteurs aéroportés (deux capteurs séparés par une distance B et embarqués par un avion).

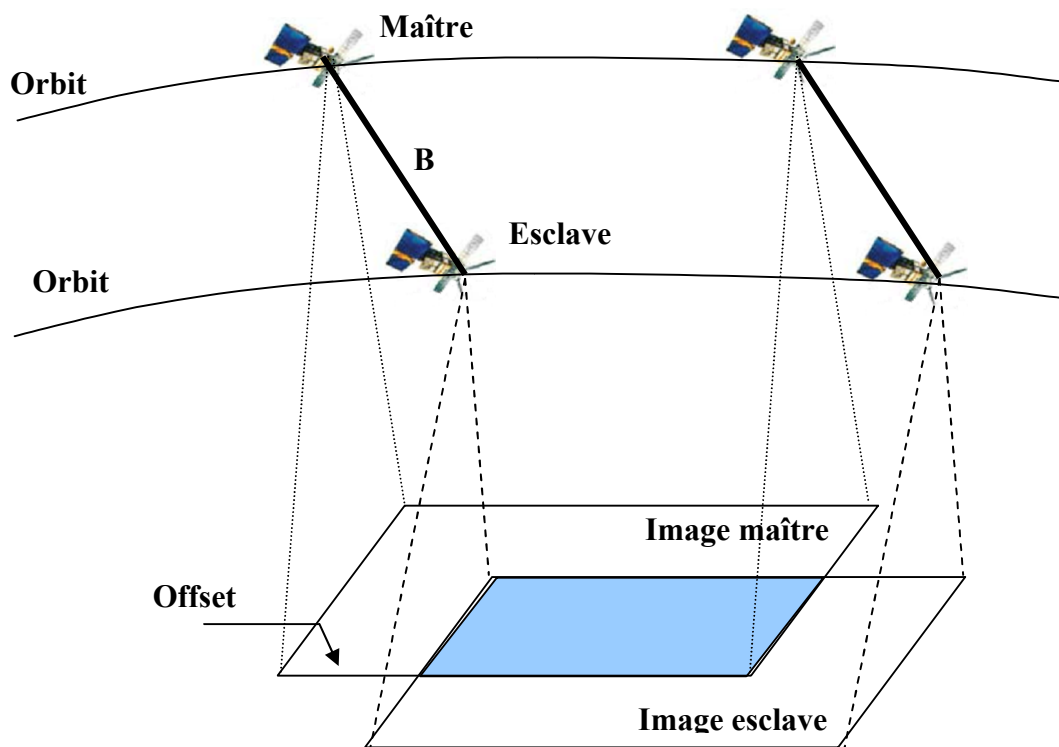


Figure II.3 : Image maître et esclave

Quel que 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. en utilisant le logiciel BEST qui est un logiciel gratuit de l'ESA (agence spatiale européenne) pour manipuler les images radar ERS1/2 et ENVISAT.

La deuxième opération est de bien superposer les deux images radar, chaque pixel de l'image maître trouvera son homologue dans l'image esclave. C'est le sujet de notre travail. En effet il existe plusieurs méthodes de superposition de deux images, on trouvera :

II.2.2 .1. Méthode statistique :

Ce sont les méthodes qui ne mettent pas en jeu les caractéristiques de l'interférogramme mais de chacune des images.

Afin de déterminer les décalages effectués en site et en azimuth, cette méthode prend en considération la mesure de corrélation statistique des deux images de manière discrète sur les pixels [13]. Cette dernière permet en fait de mesurer le degré de ressemblance entre deux fenêtres sélectionnées de deux images pour différentes translations.

La corrélation statistique des deux images est donnée par :

$$C(u, v) = \frac{\sum_f (S_1(i, j) - \bar{S}_1)(S_2(i - u, j - v) - \bar{S}_2)}{\sqrt{\sum_f (S_1(i, j) - \bar{S}_1)^2 \sum_f (S_2(i - u, j - v) - \bar{S}_2)^2}} \quad (\text{II.17})$$

S_1 et S_2 sont les échantillons donnés par la fenêtre f .

\bar{S}_1 et \bar{S}_2 sont les moyennes réalisées sur cette fenêtre.

Les valeurs de $C(u, v)$ sont comprises entre 1 et 0. Elles sont en fait normalisées afin que les valeurs des pixels n'influencent pas sur la mesure de corrélation.

Cette méthode est utilisée en suivant une approche locale vu qu'elle est gourmande en temps de calcul. La mesure de translation entre les deux images est réalisée en maximisant la valeur de la mesure de corrélation.

II.2.2.2. Méthode polynomiale :

Cette méthode se base sur la sélection de points de contrôle appelés aussi points d'amer. Les points d'amer représentent la même cible dans les deux images. Ils peuvent être sélectionnés manuellement par un opérateur ou d'une façon automatique.

La méthode représentée par William W. Bonifant [12], repose sur la sélection des points de contrôle sur une grille de points uniformément distribués sur toute l'image. La figure (II.4) interprète le principe de cette sélection automatique.

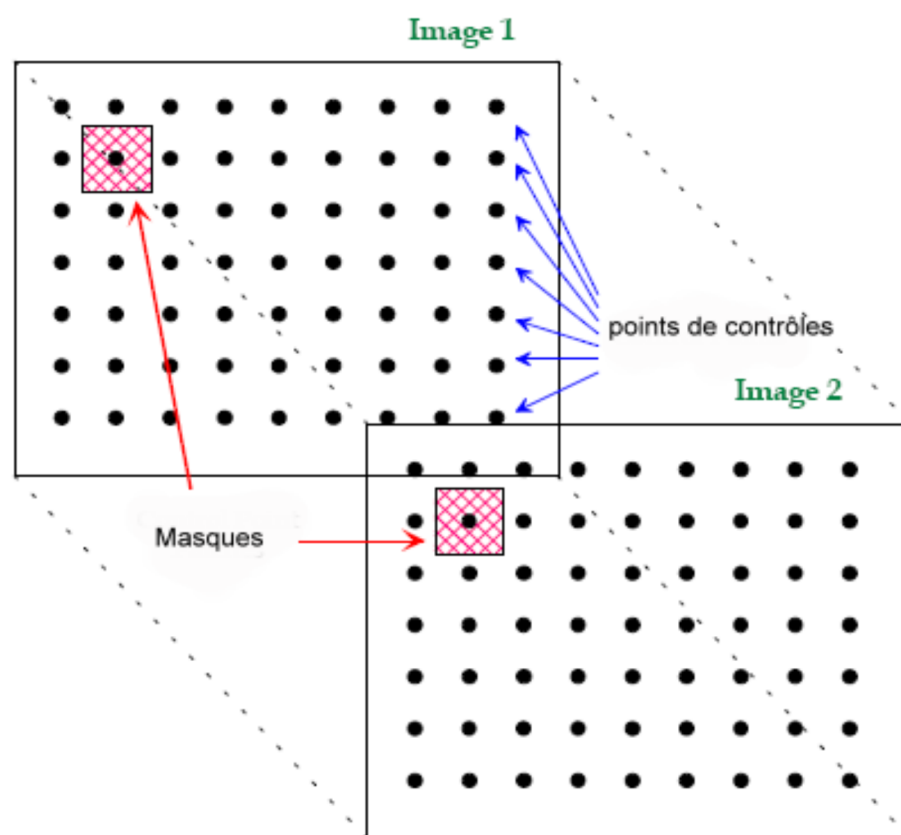


Figure II.4. Grille de points de contrôle.

Ces points seront les centres de masques qui par la méthode de corrélation vont permettre de générer une relation géométrique entre les points de contrôle.

En appliquant ceci pour chaque point de la grille on aura alors un ensemble de vecteurs de translation qui lie chaque point de l'image 1 à son homologue dans l'image 2.

L'ensemble des vecteurs de translation ainsi formés servira à la génération de la fonction polynomiale qui exprime la déformation entre les deux images. L'ordre considéré est souvent de 2 pour plus de simplicité, mais on peut aussi atteindre des ordres supérieurs.

M points d'amer nous fournit deux systèmes de M équations.

La sélection des points d'amer est délicate aussi choisit-on un système surdimensionné. En générale : $M > 3N_i$, ou $N_i = \frac{1}{2(n+1)(n+2)}$ est le nombre d'inconnus du système.

La résolution du système de donnée par les équations II.18 et II.19 nous permet de déterminer les coefficients de la fonction polynomiale qui exprime la déformation entre les deux images :

$$\begin{pmatrix} 1 & X_{1i} & Y_{1i} & X_{1i}^2 & X_{1i}Y_{1i} & X_{1i}^3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{1i} + D_i^x \\ \vdots \\ \vdots \end{pmatrix} \quad (\text{II.18})$$

$$\begin{pmatrix} 1 & X_{1i} & Y_{1i} & X_{1i}^2 & X_{1i}Y_{1i} & X_{1i}^3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{1i} + D_i^y \\ \vdots \\ \vdots \end{pmatrix} \quad (\text{II.19})$$

Où X_{1i} et Y_{1i} sont les coordonnées en x et y du ième point de contrôle sur l'image 1

D_i^x et D_i^y sont les coefficients du vecteur de transformation calculé entre les masques appliqués au ième point du contrôle. Ainsi la fonction polynomiale qui exprime la déformation entre les deux images est donnée par :

$$W(x_1, y_1) = \begin{bmatrix} a_0 + a_1x_1 + a_2y_1 + a_3x_1^2 + a_4x_1y_1 + a_5x_1^2 \\ b_0 + b_1x_1 + b_2y_1 + b_3x_1^2 + b_4x_1y_1 + b_5x_1^2 \end{bmatrix} \quad (\text{II.20})$$

Ayant obtenu le modèle de déformation d'une image par rapport à l'autre, pour projeter l'image 2 dans la géométrie de l'image 1.

On considère successivement chaque pixel (x, y) de l'image 1 et on calcule ses coordonnées (x', y') , à l'aide du polynôme de recalage.

Dans le cas générale, les coordonnées (x', y') ne sont pas des entiers mais des nombres réels, et la valeur du pixel $I(x', y')$ est obtenue par interpolation des valeurs des pixels voisins.

II.2 .2.3. Méthode fréquentielle :

Les techniques du domaine fréquentiel se basent sur un modèle de mouvement, et elles utilisent les relations entre les coefficients des images dans le domaine « transformé » (de Gabor ou de Fourier).

Fleet et Jepson se sont intéressés à l'utilisation de la transformée de Gabor dans la résolution de problème de recalage dans [14].

La méthode de recalage par corrélation de phase (CP) est intéressante pour sa bonne précision dans le cas d'une translation, sa vitesse d'exécution sur un ordinateur grâce à la transformée de Fourier rapide (TFR), et la facilité de sa mise en pratique.

Contrairement aux méthodes précédemment présentées, la méthode par CP ne permet pas d'obtenir un champ de mouvement dense. Toutefois, elle peut être utilisée sur des sections d'images de manière à estimer des paramètres de mouvement locaux.

Le contexte de ce travail permet de se limiter à une translation globale de la scène. C'est pourquoi la méthode de corrélation de phase (CP) s'est avérée être un choix intéressant (précise, rapide en temps de calcul et robuste au bruit).

Une manière élégante d'aligner deux images, dont l'une est la translaturée de l'autre, est d'utiliser la CP [15]. Cette méthode s'appuie sur la propriété de translation de la

TF, parfois qualifiée de théorème de déplacement (Shift Theorem). Une translation est représentée par une exponentielle complexe dans le domaine de Fourier.

On observe dans l'interspectre de puissance des deux images un pic qui est localisé dans le point de recalage, tandis que la puissance liées au bruit est distribué d'une manière aléatoire dans l'autre pic.

Soit i_1 et i_2 deux images qui diffèrent uniquement l'une de l'autre par un déplacement (x_0, y_0) , c'est-à-dire que l'on a en chaque pixel :

$$i_2(x, y) = i_1(x - x_0, y - y_0)$$

Supposons aussi que :

$$T \mathcal{R}\{i_1(x, y)\} = I_1(u, v)$$

$$T \mathcal{R}\{i_2(x, y)\} = I_2(u, v)$$

Où TF représente la transformée de Fourier et I_1 et I_2 sont les représentations de i_1 et i_2 dans le domaine fréquentielle.

En appliquant les propriétés de la transformé de Fourier on pourra écrire alors :

$$I_2(u, v) = I_1(u, v) e^{j 2 \pi (u x_0 + v y_0)}$$

En d'autres termes, ces deux images ont la même amplitude dans le domaine de Fourier, mais surtout une différence de phase directement liée à leur déplacement. Cette différence de phase est équivalente à la phase du spectre de puissance croisée (SPC, cross-power spectrum).

Ainsi, en multipliant I_2 par le conjugué de I_1 et en divisant le tout par le module du produit de ces deux images on obtient :

$$\frac{I_2(u, v) I_1^*(u, v)}{|I_2(u, v) I_1^*(u, v)|} = e^{-j 2 \pi (u x_0 + v y_0)} \quad (\text{II.21})$$

En appliquant la TF inverse (TFI) à cette exponentielle complexe on trouve $\delta(x-x_0, y-y_0)$. Il s'agit d'une fonction de Dirac centrée sur la valeur du déplacement (x_0, y_0) : on l'appelle le point de recalage.

$$T \mathcal{F}^{-1} \left\{ \frac{I_2(u, v) I_1^*(u, v)}{|I_2(u, v) I_1^*(u, v)|} \right\} = T \mathcal{F}^{-1} \left\{ e^{-j(u x_0 + v y_0)} \right\} = \delta(x_0, y_0). \quad (\text{II.22})$$

Ces coordonnées se trouvent aisément par recherche du maximum. En pratique, la TF continue est remplacée par la TF discrète (TFD), et la fonction de Dirac devient la fonction de Kronecker (définie par $\delta(0) = 1$, et $\delta(t) = 0$ pour $t \neq 0$).

Puisque la différence de phase contribue de manière égale pour chaque fréquence, cette technique est particulièrement bien adaptée aux images qui ont du bruit dans une bande-passante étroite (on peut alors appliquer le principe de CP dans la portion basse fréquence du spectre).

II.2.2.4. Comparaison entre les méthodes classiques :

Ce qui caractérise la méthode de corrélation de phase par rapport à la corrélation statistique, c'est la précision avec laquelle on peut détecter le pic centré au point de recalage. La méthode de corrélation de phase permet d'obtenir un pic bien distinct localisé au point de recalage tandis que la corrélation de classique fournit un ensemble de pics qui s'étalent sur tout l'ensemble du résultat, en plus le pic principale n'est pas toujours exactement centré au point de recalage. Une autre importante propriété de la méthode de l'interspectre est encore plus la robustesse surtout contre les bruits qui sont corrélés avec l'image.

II.2.3. Produit interférométrique

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

Il est calculé par la relation suivante :

$$|\gamma| = \frac{\langle S_m S_s^* \rangle}{\sqrt{\langle |S_m|^2 \rangle \langle |S_s|^2 \rangle}} \quad (\text{II.23})$$

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.

L'interférogramme est l'image de différence de phase entre les deux images radar, cette image est calculée par la formule suivante :

$$\Delta\phi(x, y) = a r \{ i_1(x, y) * i_2^*(x, y) \}$$

Avec i_1 est l'image complexe maître, i_2^* est le conjugué de l'image esclave.

II.2.4. Elimination des franges orbitales :

L'interférogramme brut est à l'origine inexploitable, en effet il contient plusieurs 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 de 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.5.

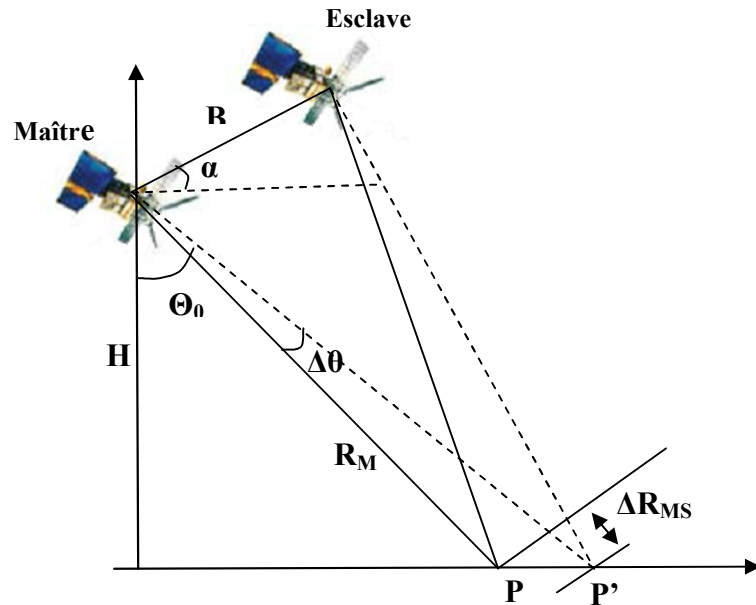


Figure II.5: Géométrie des franges orbitales

La fréquence de ces franges orbitales, peut être estimée dans le plan spectral (calcul de la transformée de Fourier de l'interférogramme brut) le maximum en amplitude car la fréquence des franges orbitales est la plus grande (elles sont les plus répétées). Tout en détectant bien sur leurs positions à savoir 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 horizontales F_h et verticale F_v des franges orbitales.

Les franges orbitales peuvent être générées, et extraites comme suit :

$$\text{intercorr} = \text{inter} \cdot e^{-2\pi F_h t_h} e^{-j2\pi F_v t_v} \quad (\text{II.24})$$

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.

II.2.5. Le déroulement de phase :

La phase interférométrique montre des discontinuités, c'est des franges représentant la valeur de la phase Φ qui est modulo 2π . Cette variation est à l'origine de la formule suivante :

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{Q}{I}\right) \quad (\text{II.25})$$

Cette variation résulte une ambiguïté au niveau de phase, elle est appelée enroulement de phase. Donc pour avoir un modèle numérique de terrain (MNT), il faut donc annuler cet enroulement de phase, c'est faire le déroulement de phase afin d'avoir les valeurs de phases finales, comme le montre la figure II.:

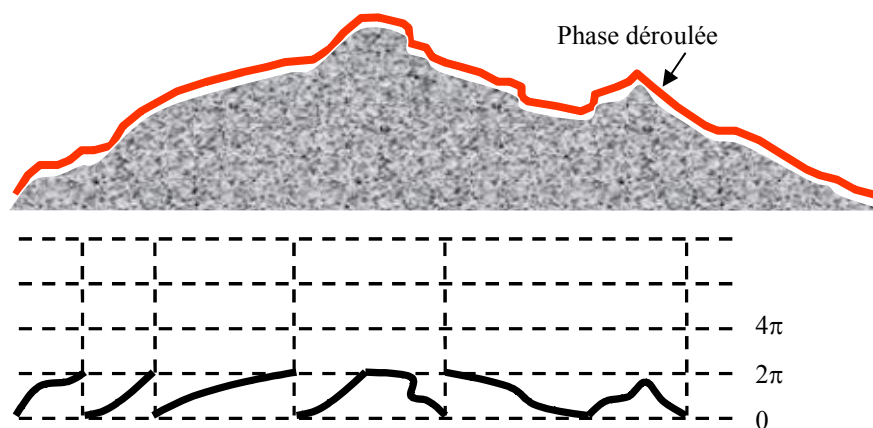


Figure II.6 : Principe de déroulement de phase

II.3. Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre, la géométrie d'acquisition de l'interférométrie Radar SAR, en présentant son processus, commençant par une présentation des différentes méthodes de recalage d'images, la génération du produit interférométrique avec l'élimination des franges orbitales et en fin l'étape du déroulement de phase.

En vue d'une implémentation des algorithmes, Nous nous intéressons au recalage d'image, à la génération et la correction de l'interférogramme brut dans le prochain chapitre.

CHAPITRE III

Implémentation et résultats

Chapitre III : Implémentation et résultats

III.1. Introduction :

Le recalage est une technique qui s'applique pour traiter les déformations géométriques sur les images ; et le but est d'aligner géométriquement les images les unes par rapport aux autres. Cette première étape de l'interférométrie présente un intérêt capital pour la réalisation d'un interférogramme correct.

Alors Le but de notre travail était de développer et de mettre en place un algorithme de recalage des images issues d'un radar SAR embarqué sur un satellite, entre autre l'algorithme devrait être robuste, tout en étant rapide en temps de calcul.

Les résultats ont été obtenus en utilisant le logiciel Matlab 7.9 pour l'implémentation des différents algorithmes. Ce choix est justifié par :

- Sa simplicité : pas de déclaration des variables.
- Programmation infiniment facile pour le calcul et l'affichage.
- Code facile à comprendre et très lisible.
- Un aide très bien fait.
- Possibilité d'exécution de code en dehors du programme.

Dans ce chapitre, nous allons présenter les algorithmes de recalage par la méthode de corrélation de phase ainsi le recalage fin adoptés sous forme d'organigrammes en détaillant les différentes étapes. Nous montrons leurs résultats en fonction et à mesure de la progression des algorithmes sur les images.

III.2. 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 complexe image) de la région d'Alger, leurs caractéristiques sont données dans le tableau 4.1 suivant :

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 III.1 : Caractéristiques du couple d'images

Les images utilisées son illustrées comme suit ;

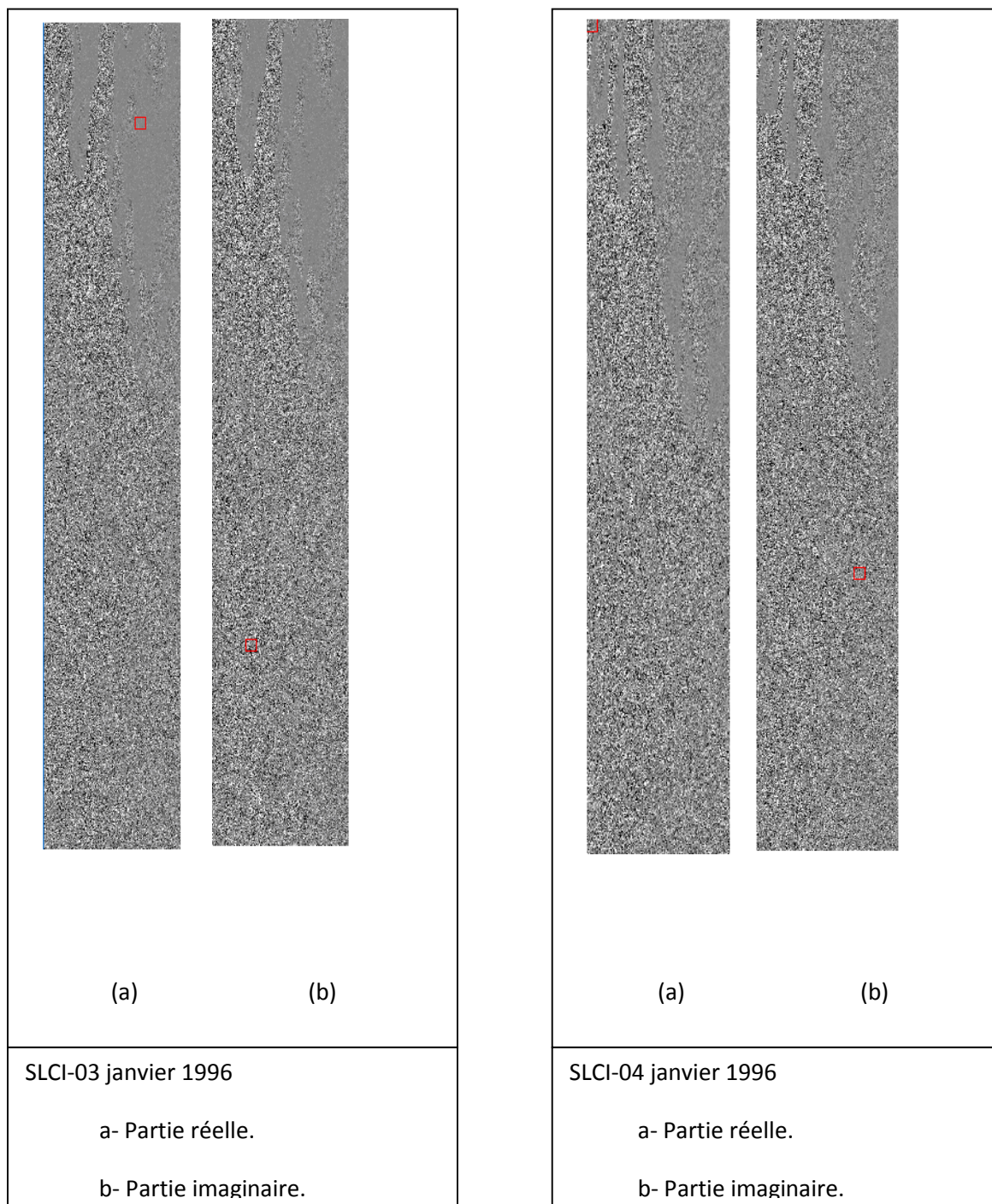


Figure III.1 : Les images utilisées

III.3 Implémentation des algorithmes de recalage :

III.3.1. Recalage par la méthode fréquentielle :

Parmi les méthodes de recalage qu'on avait évoquées lors du deuxième chapitre, nous avons opté pour la corrélation de phase qui détermine le décalage entre les deux images radar du couple interférométrique dans le plan fréquentiel, cette méthode était choisie pour sa rapidité en temps de calcul et sa simplicité dans sa mise en œuvre, l'organigramme de cette méthode est présenté dans la figure III.2.

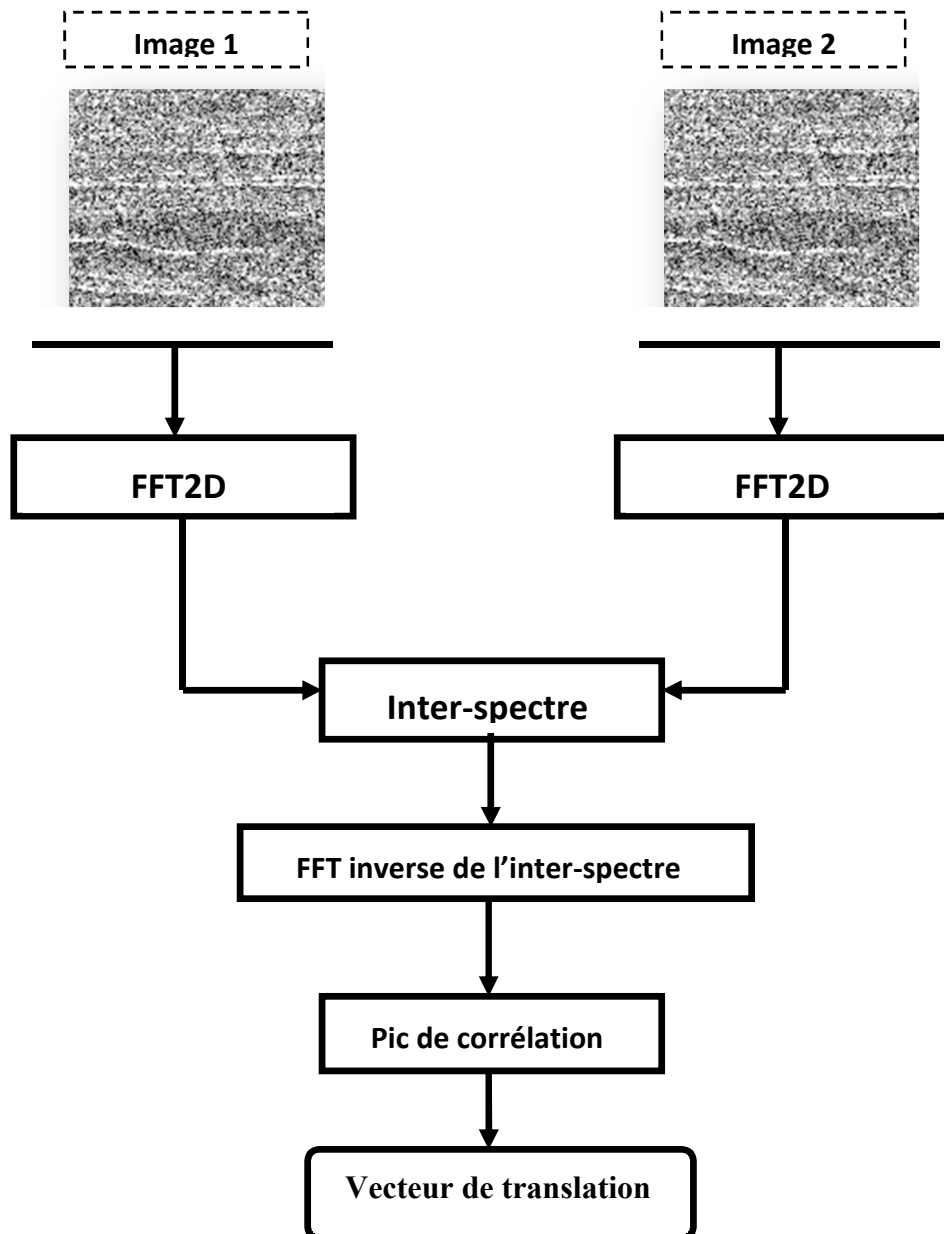


Figure III.2 Organigramme complet de la méthode de corrélation de phase

D'après l'organigramme précédent, les étapes de notre algorithme est comme suit :

- Calculer la transformé de Fourier des deux images i_1 et i_2 .
- Calculer l'inter-spectre normalisé entre $I_1(u,v)$ et $I_2(u,v)$. A ce stade les deux images ne diffèrent que par un paramètre de translation 2D.
- Calculer la transformé de Fourier inverse de l'inter-spectre normalisé qui donnera un Dirac centré.
- Chercher les coordonnées de la valeur maximale (la position du Dirac) dans l'image résultat qui sont le décalage entre les deux images selon les deux axes, horizontale et verticale.

La position du Dirac résultant correspond au point de recalage présenté dans la figure III.3 :

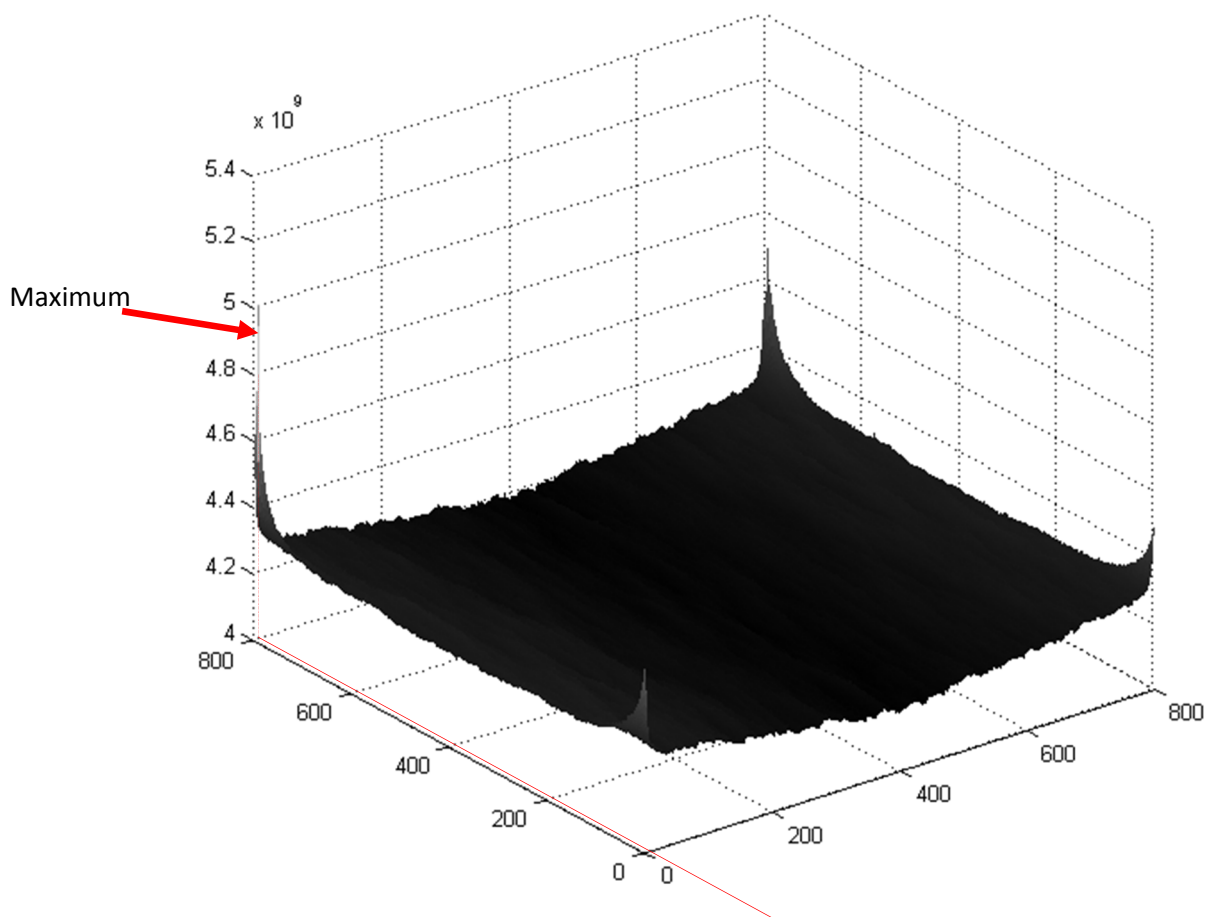


Figure III. 3. Position du Dirac correspondant au point de recalage

Suivant notre algorithme de recalage, Le décalage suivant les deux axes horizontal et vertical sont respectivement : 10 et 0 donc on aura un seul décalage qui est suivant l'axe horizontal.

III.3.2. Recalage fin :

Le recalage à une résolution sub-pixellique permet de trouver encore les déplacements entre les images à une échelle très bas (1/2 pixel). Les algorithmes de recalage fin ont toujours besoin d'une étape de sur-échantillonnage des données qui permet de passer à une résolution supérieur à celle de l'image originale et de définir la précision de recalage. Nous présentons, ici l'organigramme de recalage fin

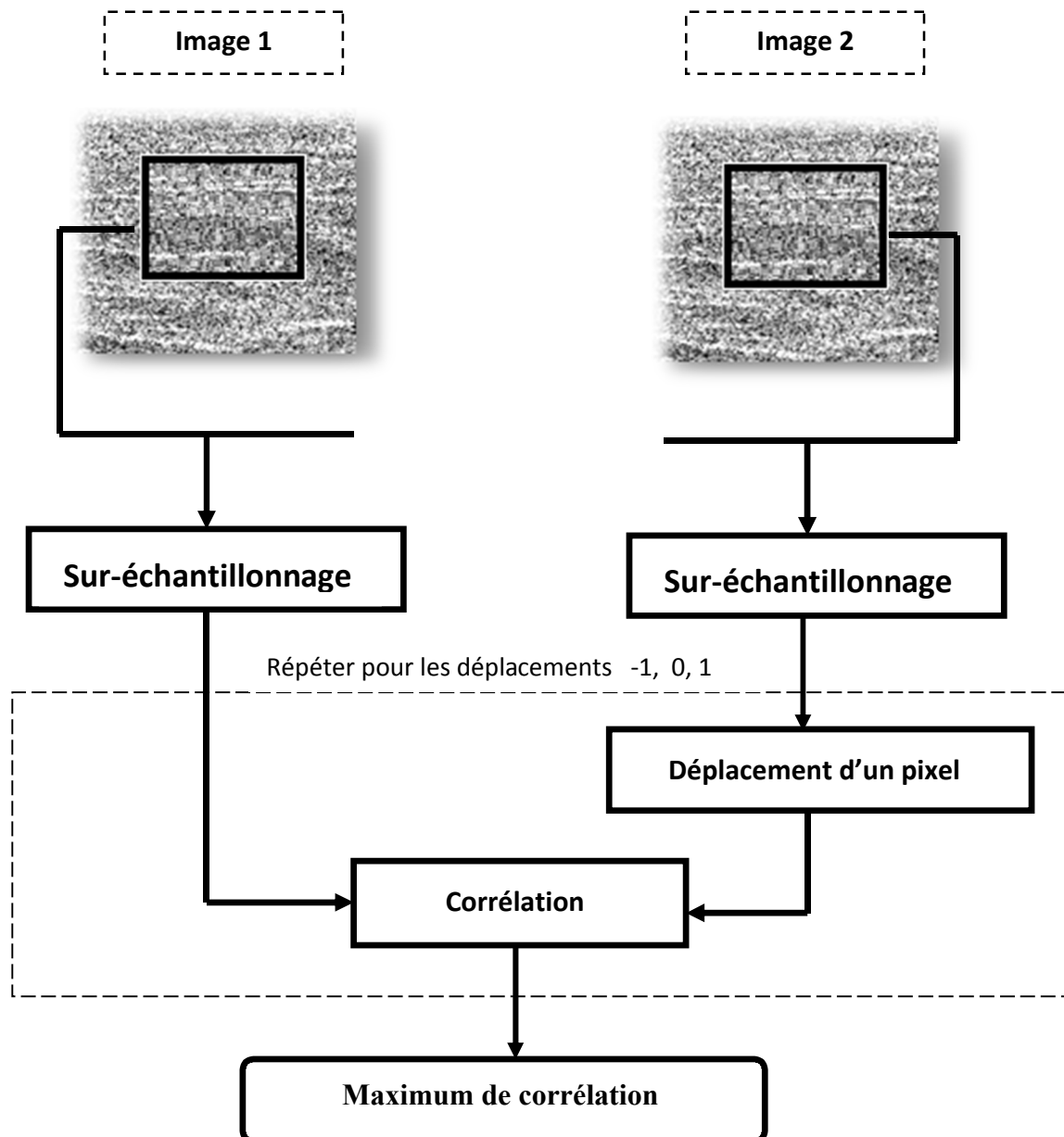


Figure III.4 : Organigramme complet de recalage fin

L'algorithme de la méthode implémenté dans ce projet comme le montre la figure(III.4) est le suivant :

1. Sur-échantillonnage des données a recalées.
2. Applique un déplacement sur les deux axes avec les valeurs de translation entre $[-1, 1]$ sur l'une des fenêtres.
3. Enfin, calculer la corrélation et chercher le maximum,
4. Après avoir trouvé le vecteur de translation, on superpose les deux images et on revient à la résolution d'origine en effectuant une décimation.

Cette méthode est réalisée en abordant une approche locale ce qui nous a amené à sélectionner une fenêtre de chaque image avec une grande cohérence (les montagnes, les roches) sur lesquelles sera basé le calcul pour l'appliquer par la suite sur toute l'image.

Dans notre travail, nous avons fait un recalage fin à d'ordre d'un demi-pixel, alors pour une fenêtre de taille $M \times N$, on s'est amené à faire le recalage sur une fenêtre de taille $(2M-1) \times (2N-1)$.

Nous avons appliqué l'algorithme pour tous les couples de translation entre $[-1,1]$ avec un pas de 1 en cherchant à trouver la combinaison qui donne le maximum de corrélation entre les deux fenêtres. Après l'exécution de l'algorithme, nous avons obtenu les résultats suivants :

Le déplacement effectué selon les deux axes	Le maximum de corrélation obtenu
$[-1, -1]$	0.4496
$[-1, 0]$	0.5261
$[-1, 1]$	0.4985
$[0, -1]$	0.4540
$[0, 0]$	0.5347
$[0, 1]$	0.5137
$[1, -1]$	0.4254
$[1, 0]$	0.5941
$[1, 1]$	0.4813

Nous constatons que le maximum de corrélation pour les deux images est 0,5347 correspondant aux valeurs $(0,0)$ de translation des deux images selon les deux axes.

III.4. Génération de l'interférogramme :

L'interférogramme est une image des différences de phase. Il est calculé à partir des données du couple interférométrique qui sont superposées lors de l'étape précédente.

Les données des images sont des valeurs complexes qui s'écrivent sous la forme $Ae^{i\varphi}$, où A représente le module et φ représente la phase. La différence de phase entre les deux images est donnée par la phase du résultat de la multiplication de la valeur du pixel de la première image par le conjugué de la valeur du pixel de la deuxième image.

$$\Delta\varphi(i, j) = \arg\{i_1(i, j) \times i_2^*(i, j)\}$$

L'interférogramme généré est donné dans la Figure III.6

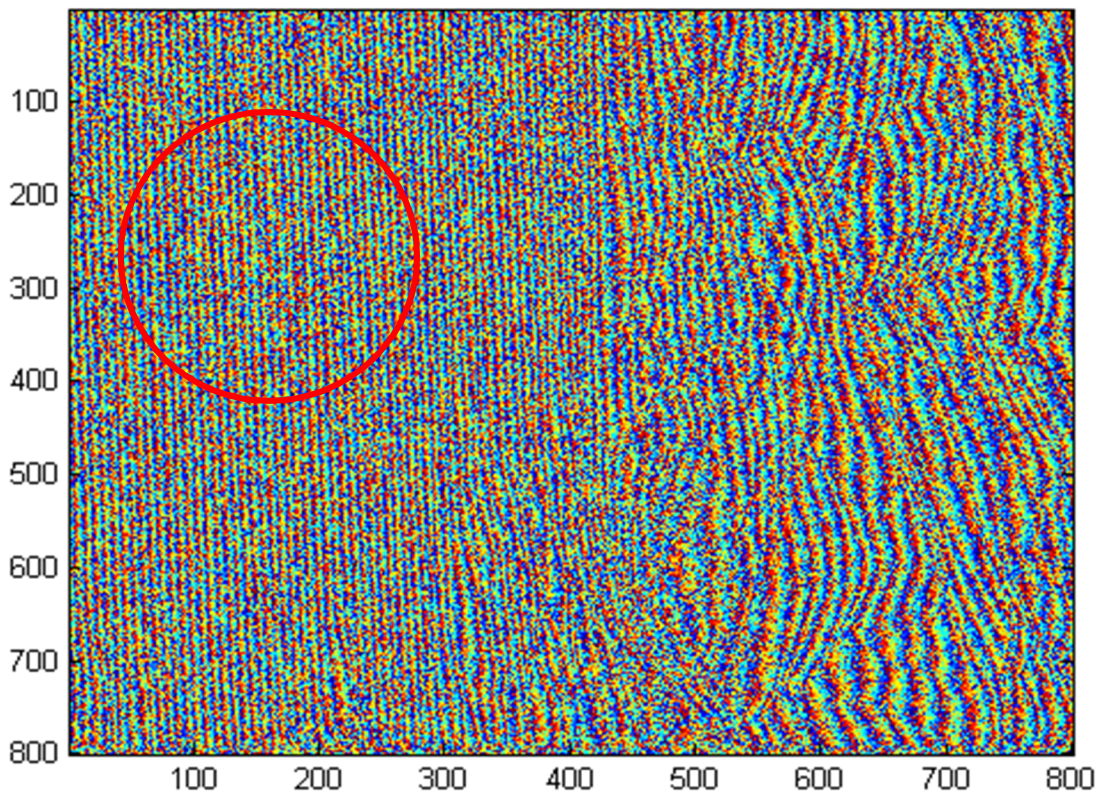


Figure III.5 L'interférogramme brut

Cet interférogramme est formé de franges topographiques et des franges orbitales issues de la géométrie radar (représentées par un cercle rouge dans la figure III.5), pour exploiter cet interférogramme nous devons éliminer les franges orbitales et cela en estimant leurs fréquences de répétition dans le plan spectrale pour les générer par l'équation (II.24) et ensuite les extraire de l'interférogramme brute.

La figure III.6 présente les franges orbitales générées.

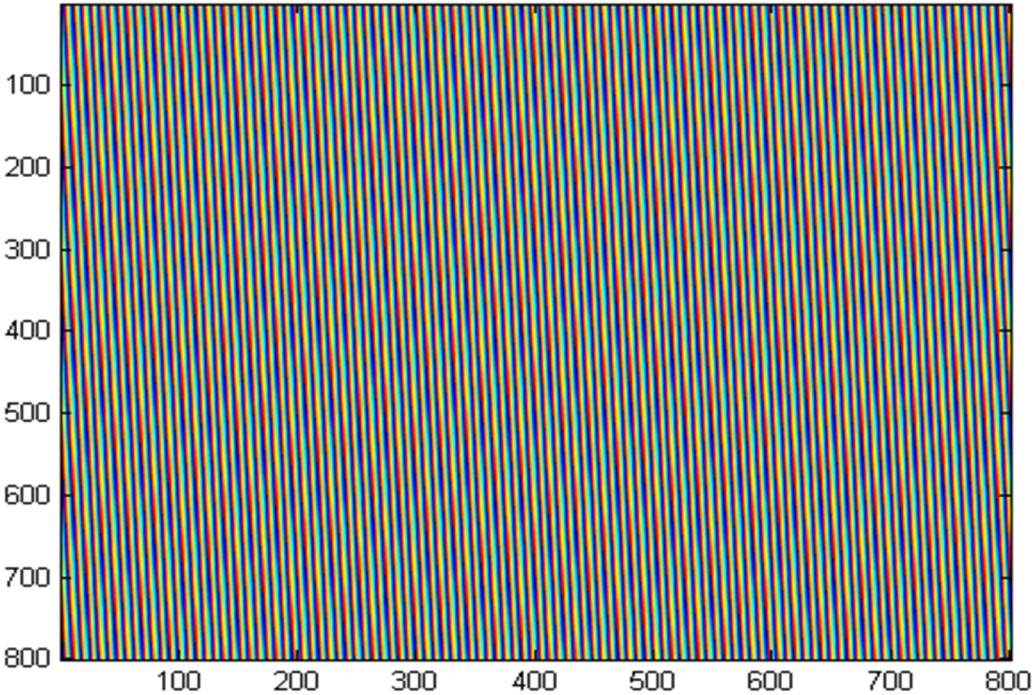


Figure III.6 : Les franges orbitales générées

La figure III.7 montre l'interférogramme finale, corrigé.

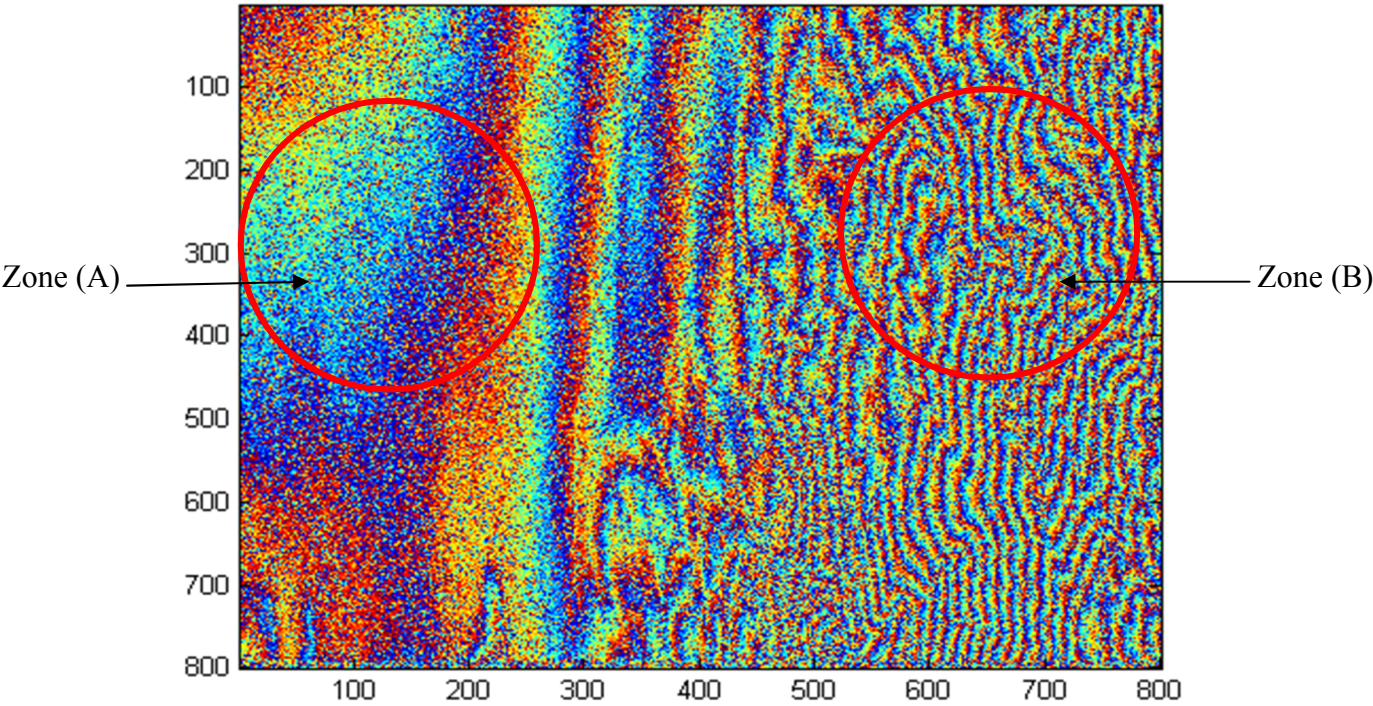


Figure III.7. L'interférogramme corrigé

Nous remarquons bien que l'interférogramme finale est bien corrigé des franges orbitales.

En effet, vu la région étudiée, région de Bab Ezzouar, la zone (A) est plate. Elle est présentée par une seule large frange (zone encerclée dans l'image d'amplitude et dans l'interférogramme corrigé).

La zone (B) dans la Figure III.7 et la Figure III.8 présente une zone montagneuse ce qui explique les nombreuses franges étroites.

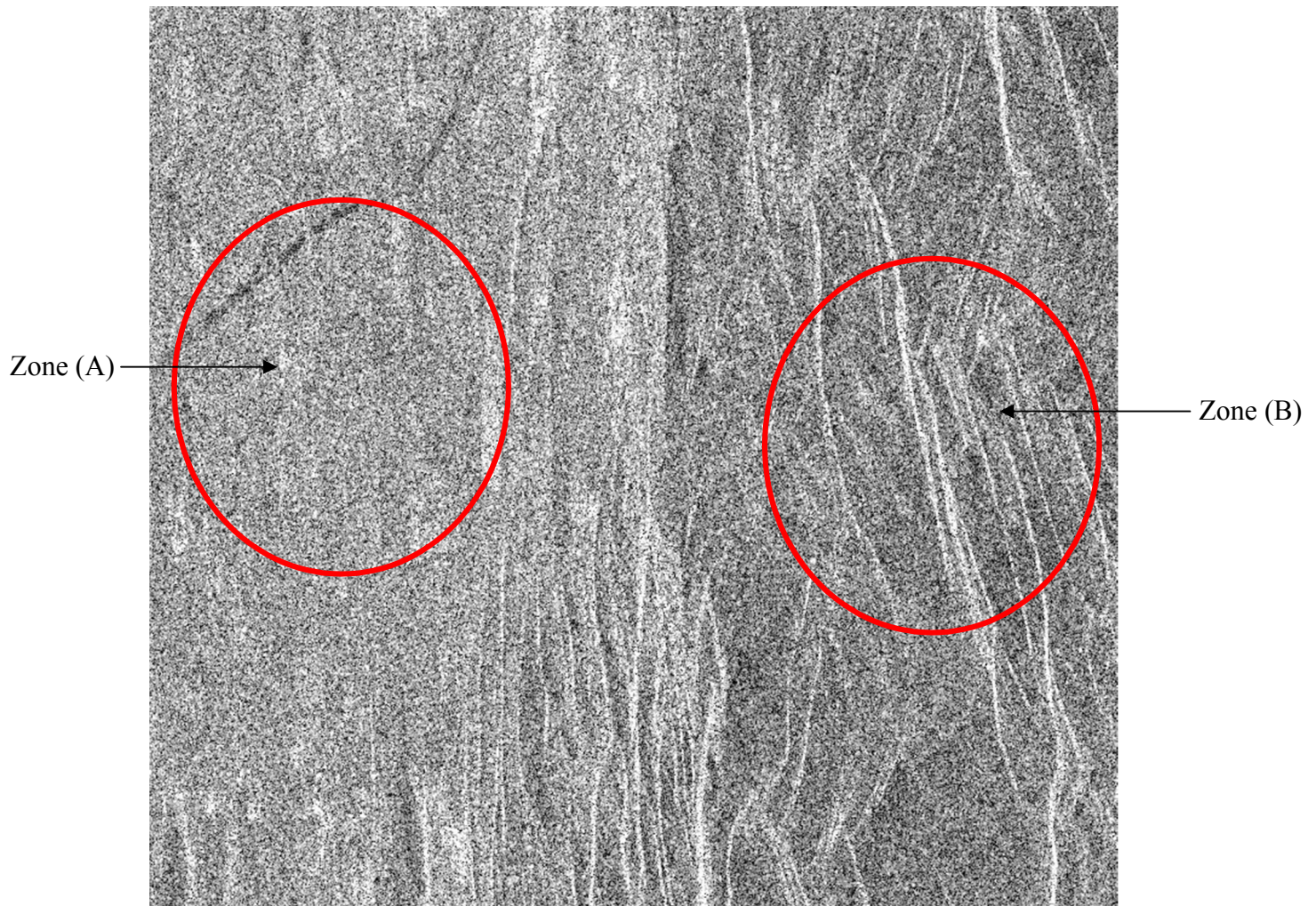


Figure.III.8 : Image des amplitudes

III.5. Conclusion :

Nous avons développé dans ce chapitre deux algorithmes qui nous ont permis de trouver le décalage entre les images considérées en vue de leur superposition avec une précision d'un demi-pixel ; Les résultats d'images, après superposition, sont satisfaisants par rapport à l'interférogramme qu'on a généré.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans notre travail, nous avons présenté les types des satellites à savoir les satellites passifs et les satellites actifs (les satellites radar), ce dernier a fait l'objet de notre travail en présentant les deux types de radar imageurs ainsi le principe de formation des images radar SAR.

Parmi les domaines d'utilisation de ces images radar, nous nous sommes intéressés à l'interférométrie radar. En effet, l'étude que nous avons présentée a été consacrée à l'une de ses étapes, c'est le recalage d'image. Elle présente un intérêt capital pour la réalisation du produit interférométrique (l'interférogramme brut). Nous avons opté pour l'utilisation de la corrélation de phase, c'est la détection des coefficients du vecteur de translation dans l'inter-spectres des deux images radar. Pour avoir une précision d'un demi-pixel de recalage, on a eu recours à une méthode itérative permettant d'obtenir les translations avec cette précision en maximisant la corrélation.

Pour la génération de l'interférogramme brut, c'est une méthode simple qui consiste à calculer la phase du produit de la première image complexe fois le conjugué de la deuxième image complexe. Ce produit n'est pas exploitable directement, en effet il faut passer par l'étape de correction en éliminant les franges orbitales issues de la géométrie de l'interférométrie radar, et cela en estimant leurs fréquences de répétition pour les générer et les soustraire de l'interférogramme brut.

Nous souhaitons que ce modeste travail soit d'un intérêt capital pour les promotions prochaines ; et nous mettons comme perspectives à arriver à faire une précision d'un dixième de pixel. Adapter des techniques qui permettent d'extraire les paramètres de recalage : rotation et homothétie entre deux images à superposer

Bibliographie

Bibliographie

- [1] Daniel Marty, Système spatiaux : conception et technologie, Masson 2005
- [2] J. C. Carlander and R.S. McDonough, Synthetic Aperture Radar: system and signal processing, Wiley-Interscience, New York 1991
- [3] M. Soumekh, Synthetic Aperture Radar signal processing with Matlab algorithms, Wiley-Interscience, New York 1999
- [4] Eric Hervet, Appariement d'images radar à synthétique d'ouverture en condition radargrammétrique, Thèse doctorat, Toulouse 2000
- [5] Christophe Proisy, Apport des données radar à synthèse d'ouverture pour l'étude de la dynamique des écosystèmes forestiers, Thèse doctorat, Toulouse 2000.
- [6] Andreas Reigber, Synthetic Aperture Radar: Basic concepts and image formation, Tutorial, version 1.0, May 2001
<http://epsilon.nought.de>
- [7] Principe du radar et traitement d'une image SAR
<http://irif.fr/ACTIVITES/DESS-IIN/cours/Radar/synopsis2.html>
- [8] Maitre, Traitement des images radar à ouverture synthétique, Herms publication, 2001
- [9] I. Tanous, Modélisation paramétrique de la géométrie de prise en vue SAR embarqué sur satellite, application à la superposition de l'image radar/optique, Thèse doctorat, Grenoble, juillet 1991.
- [10] F. Li and R. Goldstein, Studies of multi-baseline space borne Interferometric Synthetic Aperture Radar using detection, IEEE, 1991
- [11] A. Gabriel, R. Goldstein, Radar Interferometric mode from two passes, Int journal remote sensing, 1998
- [12] Q. Lin, J. Vesecky, estimation with Interferometric Synthetic Aperture Radar using firing detection, IEEE, 1991
- [13] William Bonifant, Radar interférometric Synthetic Aperture SONAR processing, Thesis presented to academic faculty Georgia, July 1999
- [14] D. Fleet and A. Jepson, computation of component image velocity from local information, Inter Journal of computer vision, vol 5, page 77.104, 1990
- [15] C. D. Kuglin et D. C. Hines, The phase correlation image alignment méthode, In Proc, IEEE, 1975