

République Algérienne Démocratique et Populaire
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DE BATNA

FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

Option : Micro-ondes pour télécommunication

Mémoire de Magister présenté par :

BENTAHAR TAREK

Thème

Modélisation d'un Radar Interférométrique à
Déroulement de Phase et Correction des
Distorsions

Jury composé de :

Dr. Abdelmadjid BENGHALIA	Prof.	U. Constantine	Président
Dr. Djamel BENATIA	Prof.	U. Batna	Encadreur
Dr. Nabil Benoudjit	M.C	U. Batna	Examineur
Dr. Tarek Fortaki	M.C	U. Batna	Examineur

Année Universitaire 2006/2007

Remerciement

Arrivant à la fin de ce projet, je remercie Dieu, puis je tiens à remercier les membres de jury d'avoir acceptés d'évaluer mon travail, présidé par le Pr Abdelmadjid Benghalia, Dr Nabil Benoudjit, Dr Tarek Fortaki et mon encadreur Pr Djamel Benatia.

Je remercié également tous les membres de la promotion de magister M-ondes notamment: Boulila Mouhamed, Lamir Mounir...

Sans oublier toute la famille et les amis qui ont contribué à faire aboutir ce projet.

Je dédie ce modeste travail à tous qu'ils me sont chers.

SOMMAIRE

Introduction générale	1
1. Généralité sur l'image Radar brute	3
Introduction	3
Le Radar	4
L'antenne Radar	4
Fréquences Radar	5
Spécificité du Radar.....	6
L'image Radar	7
Principe de construction	7
Caractéristiques de l'image	10
Le Radar à synthèse d'ouverture	12
Le traitement en distance	12
Le traitement en azimuth	13
Les caractéristiques de l'image SAR	15
L'influence de relief	15
L'interaction onde-surface	16
Le coefficient de rétrodiffusion	16
Les pentes	18
Les corrections	21
Correction des migrations	21
La migration parabolique	21
La migration linéaire	22
Les défauts d'attitude du porteur	24
Les variations d'attitude du porteur	24
Le speckle	24
Correction radiométrique	25
Correction géométrique	25
Conclusion	27
2. l'interférométrie	28
Introduction	28
Le principe	30
Les condition de faisabilité	33
L'évaluation de cohérence	34
Décorrélacion	35
Décorrélacion spatiale	35
Décorrélacion temporelle	36
Proportionnalité phase-altitude	37
Les variations en distance radial	37
Limites	39

Le traitement interférométrique	40
Le recalage	40
Génération de l'interférogramme	42
Limites de l'interférométrie	45
Conclusion	46
3. L'approche de déroulement de phase	47
Problématique	47
Définition	47
Le traitement unidimensionnel	49
Description mathématique	49
Le cas d'un seul point de discontinuité	50
Généralisation pour plusieurs points.....	55
Discretisation de résultats	58
Application sur l'image de phase 1D	62
Les résultats obtenus	64
Le traitement bidimensionnel	66
Description mathématique	66
Application sur l'image de phase 2D	68
La procédure de comparaison	71
Les résultats obtenus	75
Conclusion	78
4. Correction de distorsions	
Introduction	79
Définition	79
Localisation de pixels	83
Les résultats obtenus	87
Limites	89
Conclusion	91
Conclusion générale	92

LISTE DES FIGURES

1.1 L'Ouverture plane rectangulaire	4
1.2 Puissance rayonnée par l'ouverture.....	4
1.3 Projection de diagramme d'antenne au sol	5
1.4 domaine fréquentiel radar	6
1.5 Vision en distance et en azimut d'un radar classique	8
1.6 Radar à visée latérale (SLAR)	9
1.7 Distance minimale entre deux cibles	12
1.8 Paramètres dans le plan oblique	14
1.9 Cibles projetés en distance	16
1.10 Surface éclairée dans la cellule de résolution pour l'axe en distance	18
1.11 Surface éclairée dans la cellule de résolution pour l'axe en azimut	19
1.12 Facteur d'inclinaison en fonction des composantes en distance et azimut	20
1.13 La migration parabolique des point au sol	22
1.14 Facteur à l'origine de la migration linéaire	23
1.15 Projection des distances au sol	25
1.16 la chaîne de traitement de l'image SAR	26
2.1 Technique interférométrique monopasse	29
2.2 Technique interférométrique multipasse	30
2.3 la géométrie interférométrique	31
2.4 L'observation sous deux angles d'une même cible	36
2.5 La variation en distance radiale de l'altitude de relief	38
2.6 L'image de module	44
2.7 L'image de phase	44
2.8 L'image de cohérence	45
3.1 Le déroulement de phase en une dimension	48
3.2 Les parties (sous fonctions) de $f_m(x)$	50
3.3 $f_m(x)$ avec un seul point de discontinuité	50
3.4 Fonction d'échelon et de Dirac	51
3.5 la dérivé de $f(x)$ et $f_m(x)$ dans le cas de croissance	52

3.6	La dérivé de de $f(x)$ et $f_m(x)$ dans le cas de décroissance	53
3.7	La différence entre la fonction connectée et celle d'origine	54
3.8	Reconstruction de $f(x)$ à partir de $f_m(x)$	57
3.9	L'échantillonnage d'une fonction par un pas Δx	59
3.10	L'échantillonnage d'une fonction par un pas $\Delta x \leq \frac{ x_{d'+1} - x_{d'} }{2}$	60
3.11	L'échantillonnage de la somme d'échelons	61
3.12	Traitement unidimensionnel pour une section de la surface	64
3.13	Une section de surface avec un échantillonnage de 128 pixels	65
3.14	Une section de surface avec un échantillonnage de 256 pixels	66
3.15	Les deux sens de parcours	70
3.16	Différence entre les deux modes à l'égard des pixels affectés	71
3.17	Traitement de déroulement sans rupture de phase (suface1)	75
3.18	Traitement de déroulement sans rupture de phase (suface2)	76
3.19	les deux images générées pour $x_{50} \leq x_i \leq x_{60}$ $y_{40} \leq y_j \leq y_{45}$	77
3.20	les deux images générées pour $x_{35} \leq x_i \leq x_{40}$ $y_{90} \leq y_j \leq y_{100}$	77
4.1	filtre moyennneur 3x3	80
4.2	filtre moyennneur pour les pixels de bornes	80
4.3	filtrage local au niveau de la région distordue	82
4.4	localisation de pixels à filtrer	84
4.5	Correction de distorsions d'image choisie (1 ^{ier} exemple)	87
4.6	Correction de distorsions d'image choisie (2 ^{eme} exemple)	88
4.7	Les résultats de filtrage selon le nombre de pixels de la région distordue	90

RESUME

L'utilité du radar interférométrique réside dans les prises d'images à travers les nuages le jour comme la nuit. Pour cela on utilise les variations géométriques sub-pixeliques présentes dans les différences de phases des images radar ; Cette méthode reste toujours relative. Pour passer à des variations géométriques absolues, on utilise une méthode appelée «déroulement de phases».

L'objectif de notre travail est l'étude de la proportionnalité entre les phases prises et les altitudes du diffuseur qui constituent les reliefs à observer. Cette phase est mesurée modulo 2π afin de trouver la phase réelle et par conséquent l'élévation réelle du relief, ensuite nous devons attribuer à cette phase mesurée le nombre de cycle entier pour trouver la phase originale.

Pour cela, nous dresserons d'abord un état de l'art sur les déroulements de phase pour reconstruire l'image topographique à observer à partir de l'image de phase interférométrique, avec la possibilité de traiter les problèmes de zones d'ombre qui se traduisent par des point noirs dans l'image de phase prise, dont les effets se propagent lors du traitement de déroulement. Dans ce but une étude comparative sera jointe à notre approche à fin d'obtenir des images plus pertinentes.

Introduction
Générale

INTRODUCTION GENERALE

Le souci d'étudier la terre, de comprendre son environnement et de surveiller ses régions, existe depuis toujours. Une connaissance de la topographie des sols basée sur des données d'altitude est requise pour la cartographie et la surveillance des changements au niveau du globe. Ces données d'altitude constituent des éléments indispensables pour réaliser l'analyse des caractères structurels du terrain.

Le système radar à ouverture synthétique permet d'acquérir des images des zones terrestres peu visibles par les capteurs optiques à cause, par exemple, d'une couverture nuageuse souvent importante. Ces images sont caractérisées par une extrême sensibilité à la géométrie du terrain, ce qui a permis à l'interférométrie radar de mesurer la topographie du terrain pour produire des représentations 3D des surfaces appelées modèles numériques du terrain (MNT) à partir de l'information de phase de ces images.

L'interférométrie radar est une technique puissante ayant ses avantages et ses inconvénients. Elle analyse la différence de phase de deux images d'une même région, acquises que se soit à des dates différentes ou à partir de deux orbites parallèles assez proches. Cette différence de phase est directement liée à l'élévation des points imagés. Ceci offre l'opportunité à l'interférométrie de détecter et d'évaluer les variations altimétriques du terrain et fournit, par conséquent, des informations précieuses dans plusieurs domaines des sciences de la terre.

En se basant sur la littérature [1-10], le but de notre étude est de recenser et comprendre toutes les étapes permettant la réalisation de ces images des différences de phases, appelées des interférogrammes, mais aussi de dresser un véritable état de l'art sur le déroulement de phase, méthode permettant de passer des variations géométriques relatives à des variations absolues nécessaires à la génération du MNT [11-15].

Pour cela, un premier chapitre explique en générale les principes de formation d'une image radar que se soit le RADAR classique, SLAR (Side Looking Airborne Radar) ou SAR (Synthetic Aperture Radar) , avec une tendance aux principes et à la chaînes de traitement de l'image SAR.

Un deuxième chapitre fera l'objet d'interférométrie. Ce chapitre commence par une définition générale de ce qui est l'interférométrie. Les conditions de validation sont ensuite expliquées ainsi que la chaîne de traitement à effectuer pour obtenir le produit interférométrique.

Dans le 3^{ème} chapitre on dressera un état de l'art de l'algorithme de déroulement de phase, en interprétant l'étude de *Spagnolini* [11] fournit pour des données unidimensionnelles à un algorithme simulés par le MATLAB et sa généralisation pour des surfaces 3D, en montrant son efficacité de reconstruire la phase et enlever l'ambiguïté due au mesure modulo (2π) de la phase correspondante à chaque pixel, et finalement on mène une étude comparative entre deux modes proposés pour la génération d'image de phase déroulée concernant leurs qualités et leurs distorsion.

Et enfin dans le dernier chapitre, on étudie le filtrage et la correction de distorsion engendrée par le traitement de déroulement et la propagation de ses erreurs afin d'avoir une meilleure qualité de l'image finale.

Chapitre 1

*Généralité sur l'image **RADAR** brute*

Chapitre 1 :

Généralité sur l'image RADAR brute

1.1 Introduction

Le radar est l'abréviation de "Radio Detection and Ranging" signifiant détection et télémétrie par onde radio. Ce système recueille le rayonnement retourné par les objets dans le domaine des micro-ondes, soit pour des longueurs d'ondes de l'ordre du centimètre.

L'émetteur émet une impulsion à intervalle régulier et le rayonnement renvoyé par le sol est enregistré pour former une ligne dans une image. L'amplitude, la phase et la polarisation du signal reçu par le radar sont analysées pour déterminer la distance entre l'objet et le capteur et pour mesurer l'intensité de la réponse de l'objet (sa nature).

Le radar imageur est un système actif qui utilise sa propre source de rayonnement. sa capacité de travailler le jour que la nuit, quelles que soient les conditions atmosphériques et géographiques, lui permet de saisir l'image de zones terrestres qui sont pas toujours visibles par les capteurs optiques. On distingue les radars à ouverture réelle des radars à ouverture synthétique. Le radar à ouverture réelle appelé **SLAR** c'est un radar à visé latérale, ce qui permet d'exploiter sa résolution en distance dans la direction normale à la trajectoire, cependant, sa résolution dans la direction parallèle à la trajectoire du porteur (azimutale) reste très faible. Par contre le système **SAR** ou **ROS** (radar à ouverture synthétique exploite l'effet Doppler ainsi que la modulation de fréquence. il utilise une sorte d'antenne virtuelle appelée antenne synthétique, qui lui permet une résolution longitudinale meilleure que celle du radar à ouverture réelle.

1.2 Le radar

1.2.1 L'antenne radar

Un conducteur parcouru par un courant électrique alternatif produit un champ électromagnétique qui rayonne dans l'espace environnant ainsi un ensemble de conducteurs élémentaires, traversés par des courants variables puissants, forme une antenne radio émettrice.

Selon l'agencement de ses conducteurs élémentaires, une antenne peut être plus ou moins directive. L'antenne radar exploite les propriétés des ouvertures rayonnantes planes rectangulaires [1].

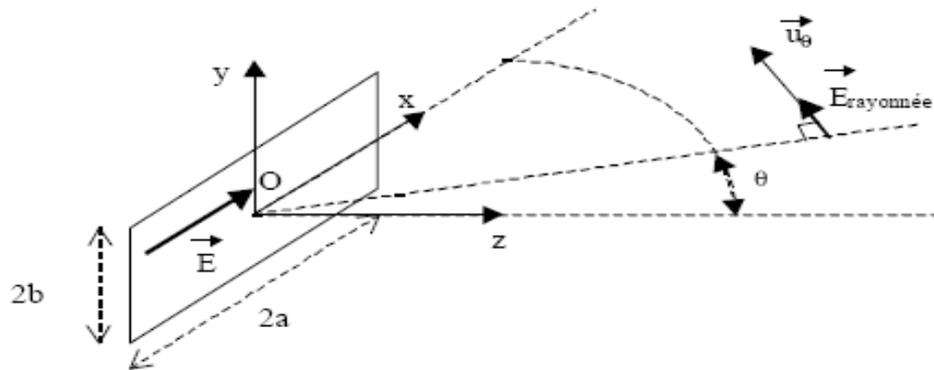


Fig. 1.1 : Ouverture plane rectangulaire

Considérons une ouverture plane rectangulaire de dimension $2a \times 2b$. Elle est traversée par un courant qui permet de maintenir un champ électrique sinusoïdal $E = E_0 e^{-i\omega x} u_x$. L'expression complexe du champ produit à grande distance se simplifie lorsque nous nous plaçons dans le plan (xOz) pour prendre la forme :

$$\vec{E}_{rayonné} = ik \frac{e^{-ikr}}{2\pi r} 4abE_0 \frac{\sin(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} e^{-i\omega t} \vec{u}_\theta \quad \dots\dots\dots (1.1)$$

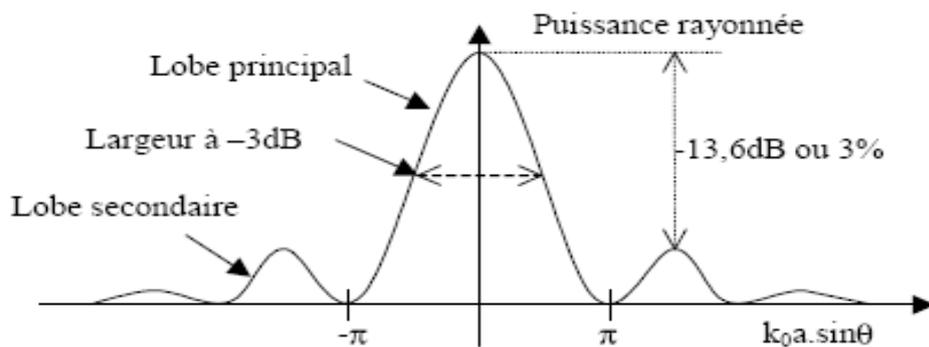


Fig. 1.2 : Puissance rayonnée par l'ouverture

La puissance du champ rayonné (caractérisée par le nombre d'onde $k_0 = 2\pi/\lambda$) à une distance r de l'antenne varie donc le carré d'un sinus cardinal en fonction de θ .

On définit alors l'ouverture $\Delta\theta$ de l'antenne comme étant la largeur du lobe principal à -3dB c'est-à-dire la moitié de la largeur totale :

$$\Delta\theta = \arcsin\left(\frac{\pi}{ka}\right) = \arcsin\left(\frac{\lambda}{2a}\right) \approx \frac{\lambda}{2a} \quad \dots\dots\dots (1.2)$$

La directivité de l'antenne est donc d'autant plus forte que la longueur d'onde est petite ou que la taille de l'antenne est grande dans le plan étudié. Une antenne très longue donc un faisceau très pincé dans cette direction mais en contrepartie, très ouvert dans le plan orthogonal (fig1.3). la dynamique de diagramme de l'antenne est telle que les contributions des lobes secondaires sont en général négligées.

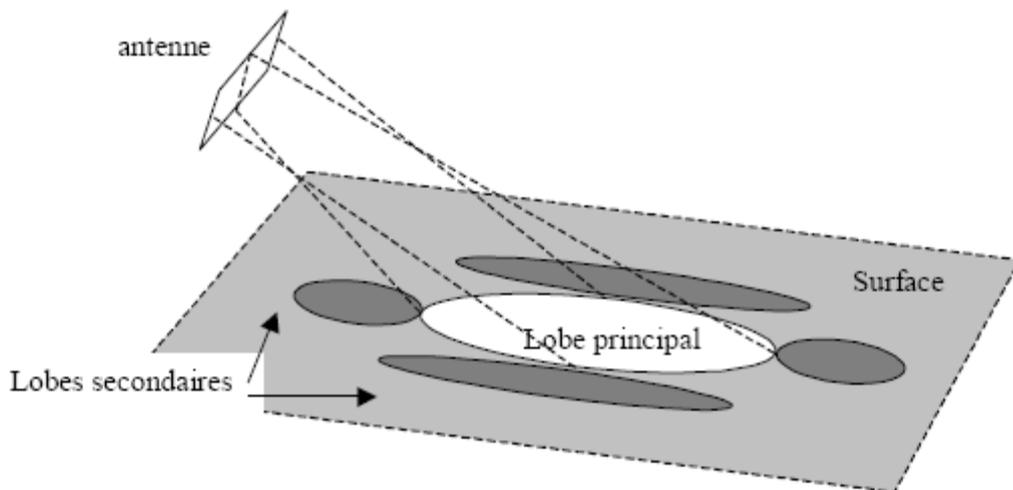


Fig.1.3 : Projection de diagramme d'antenne au sol

1.2.2 Fréquences radar

Quelles que soient les spécificités du radar [2] (modulation de fréquence ou non,...), le train d'onde produit est caractérisé par la fréquence de la porteuse. Compte tenu de l'équation 1.2, les ondes hyperfréquences autorisent la réalisation d'antennes de directivités intéressantes.

Les fréquences radar partagent les bandes UHF et SHF avec d'autres applications industrielles : télévision, télécommunication,...(Fig. 1.4). Ce domaine fréquentiel est subdivisé en 7 bandes, dont les plus utilisées en radar sont les bandes C, L pour les systèmes spatiaux et X, C, L pour les systèmes aéroportés.

	1-10 μ m	10-100 μ m	0.1-1mm	1-10mm	1-10cm	1-10dm	10-100dm
Infrarouge			Micro-ondes			Radio	
				EHF	SHF	UHF	VHF
					Radar		Télévision

Fig. 1.4 domaine fréquentiel radar

	EHF				UHF		
Bande spectrale	Ka	Ku	X	C	S	L	P
Longueur d'onde (cm)	1	2	3,1	5,6	9,6	23	68
Fréquence (GHz)	35	14	9,6	5,3	3,0	1,3	0,44

Tableau 1.1 Bandes radar

1.2.3 Spécificités du radar

Les propriétés du radar se différencient de celles des systèmes optiques, particulièrement au moment de l'interaction de l'onde avec une cible :

- la source d'éclairement est le radar lui-même :
 - conditions d'illumination (intensité angles) indépendants du moment : heur de jour, saison,...
 - la source est unique et totalement cohérente : les phénomènes d'interférence sont donc possibles
- les longueurs d'onde sont considérablement plus grandes que celles du domaine visible :
 - l'onde est très peu sensible à l'état de couches atmosphériques traversées (nuage, humidité,

température...) : possibilité de travailler par tous temps.

-Les plus grandes longueurs d'onde sont susceptibles de traverser ou de pénétrer certaines couches de surface : forêts, sable sec,...

-La part d'énergie renvoyée est inhérente à la pente et à la rugosité : la réflexion est très importante, et des réflexions multiples sont possibles.

-Les propriétés électriques de la cible dimensionnent fortement le pouvoir réflecteur : l'eau et les objets métalliques sont particulièrement réfléchissants.

- Le récepteur est le radar lui-même :

-La direction d'observation est généralement celle de la rétrodiffusion car c'est souvent la même antenne qui émet et reçoit. Le radar est alors qualifié mono-statique, mais il existe des radars multi-statiques (plusieurs récepteurs pour un seul émetteur).

-L'antenne est sensible à une particulière de polarisation.

Toutes ces caractéristiques en font un instrument complémentaire des dispositifs optiques (fonctionnel par tous temps), et particulièrement adapté aux applications militaires, à l'étude de relief et de la géologie, et bien entendu à la cartographie.

1.2.4 L'image radar

1.2.4.1 principes de construction

1.2.4.1.1 Le radar classique

Les premiers radars que l'on pourrait qualifier de radars imageurs étaient fondés sur le principe qu'une antenne rotative, elle peut fournir une vision angulaire et radiale de l'espace environnant [1] :

- L'indication de distance est fournie par la mesure de temps écoulé entre le départ de l'impulsion et la réception de son écho.
- L'antenne en azimut balaye 360° dans le plan associé.

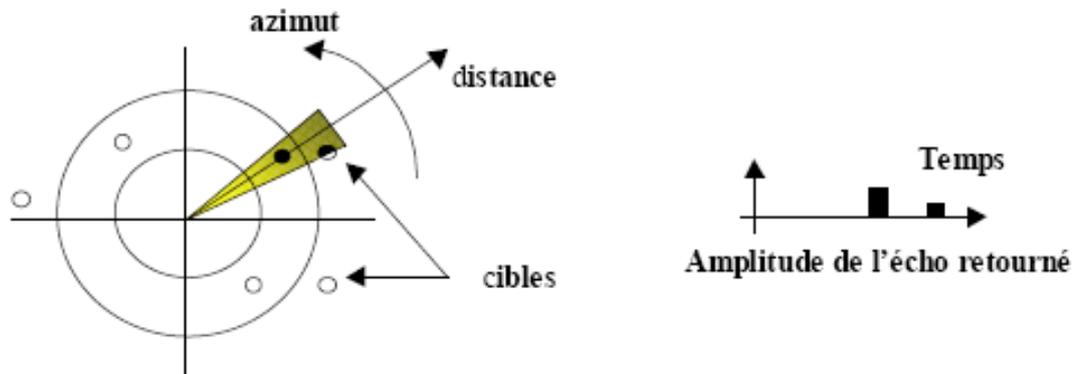


Fig.1.5 : Vision en distance et en azimut d'un radar classique

Malgré l'adaptation parfaite aux applications militaires à l'égard de détection de cibles volantes, cette technique ne fournit pas des résolutions suffisantes et des représentations adéquates pour des applications civiles de type imagerie.

1.2.4.1.2 Le radar à vision latérale (SLAR)

L'objectif du radar imageur SLAR est d'obtenir une image d'une surface au sol, une antenne est donc placée à bord d'un avion et orientée latéralement au porteur, qui se déplace parallèlement à la zone à imager [1]. La visée latérale définit les deux axes de l'image :

- **Axe distance** : le temps de retour de l'impulsion électromagnétique fournit la position en distance des différents éléments réflecteurs de la surface. Les signaux mesurés sont donc repérés par distance, qui définit la première composante de l'image. La distance associée au premier point de l'image est appelée « distance proximale » (near range), tandis que celle associée au dernier point est appelés « porté distale » (far range). La différence entre ces deux derniers détermine la profondeur de champ observé « fauchée ».

- **Axe azimut** : les positions occupées par le porteur tout au long de sa trajectoire indiquent la position de la projection orthogonale de la cible dans la direction de déplacement. Pour des raisons historiques, cette composante a été dénommée azimut (en référence aux premiers radars de détection aérienne qui avaient un axe de rotation azimutal).

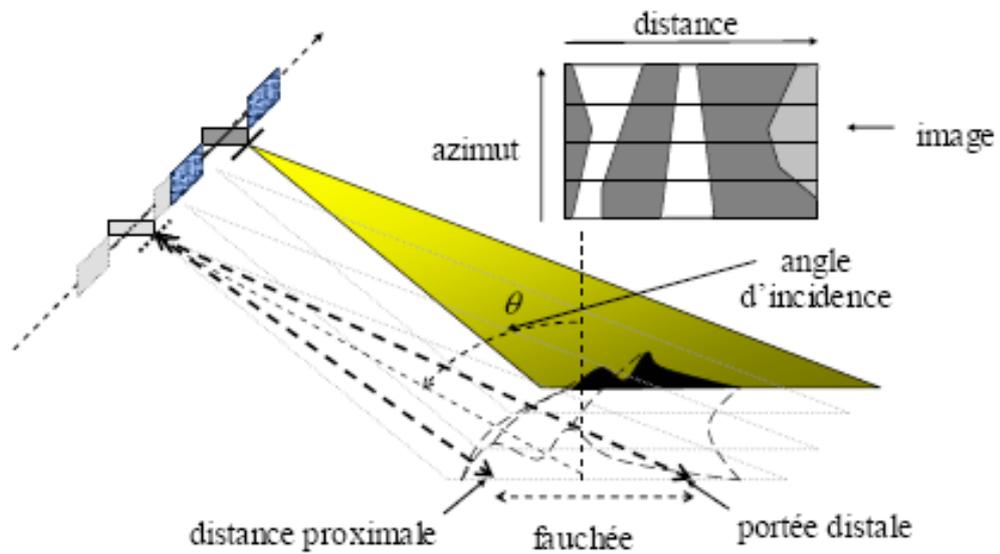


Fig.1.6 : Radar a visée latérale (SLAR)

L'antenne est orientée latéralement plutôt que verticalement puisque le radar ne distingue les cibles que par leur distance, à la verticale du lieu les distance sensiblement les mêmes donc les point ne sont pas discernables. Egalement, deux points situés de part et d'autre de la verticale sont équidistants donc confondus.

Remarques

Dans la figure 1.6, et pour des raisons de lisibilité, l'angle θ désigne l'angle d'incidence de l'onde par rapport à la verticale au niveau de la cible, mais à grande distance, la courbure (la sphéricité) de la terre intervient, et θ doit être pris au niveau de la cible.

Le SLAR n'exploite que l'amplitude du signal reçu et a des capacités limitées en terme de résolution. Il n'est plus utilisé dans l'imagerie.

1.2.4.1.3 Le SAR

Le principe de fonctionnement du SAR est directement dérivé du celui du SLAR, sauf qu'il utilise une antenne virtuelle plus ouverte que celle réelle (antenne synthétique), ce qui permet d'avoir une résolution plus grande. Son fonctionnement est étudié en détail dans les paragraphes suivants.

1.2.4.2 caractéristiques de l'image

L'imageur radar fournit deux sortes d'images, l'image d'amplitude et celle de phase [3]

L'image d'amplitude :

L'amplitude du signal reçu dépend du coefficient de rétrodiffusion (voir page 16) de la cible dans les conditions d'observation. Malheureusement, elle est également fonction de nombreuses caractéristiques (pente locale, humidité du sol, orientation des sillons pour un champ,...), aussi cette amplitude est aléatoire et sujette à l'interférence,

L'image de phase :

La phase du signal reçu est la somme de six phases :

$$\varphi = \varphi_{\text{trajet}} + \varphi_{\text{atmosphérique}} + \varphi_{\text{construction}} + \varphi_{\text{rétrodiffusion}} + \varphi_{\text{instrumentale}} + \varphi_{\text{synthèse}} + \varphi_{\text{bruit}} \quad (1.3)$$

- La phase de trajet est le déphasage lié à la distance parcouru par onde.
- La phase météo est un second déphasage de trajet par des conditions atmosphériques particulières (dû à l'interaction de l'onde avec les particules météorologiques).
- La phase de construction ne correspond à aucun phénomène physique mais sert à modéliser la phase globale de l'ensemble des échos issus d'un pixel de résolution.
- La phase de rétrodiffusion est le déphasage introduit au moment d'interaction onde-surface.
- La phase instrumentale est celle produite par le système électronique d'émission et de réception (temps de réponse des filtres, amplificateurs...).
- La phase de synthèse est celle introduite par le traitement radar synthétique effectué après la réception du signal complexe radar.
- Un bruit de phase dû au procédés d'acquisition (numérisation, dérives fréquentielles de la porteuse,...).

On comprend aisément que l'information de phase n'est pas directement exploitable, toutefois, c'est une richesse d'information potentielle et elle peut être utile si l'on implique certaines techniques (la cohérence par exemple) (voir le chapitre suivant). Il est possible de négliger quelques contributions afin de recueillir une phase de trajet et de rétrodiffusion.

Résolution :

Résolution en azimut :

La résolution en azimut est donc nécessairement dimensionnée par l'ouverture du faisceau radar dans ce plan, ou par conséquent, elle dépend de la longueur d'onde et la dimension de l'antenne selon cette direction :

$$r_y = d \cdot \frac{\lambda}{a} \quad (1.4)$$

Où d est la distance du radar à la zone à imager. Cette technique n'autorise donc pas de résolutions inférieures à la dizaine de kilomètres pour les plates-formes satellitaires, ou à la centaine de mètres pour les systèmes aéroportés.

Résolution en distance :

Ce qui contraint la résolution en distance du dispositif est la durée de l'impulsion radar. En effet, considérons un train d'onde hyperfréquence de durée τ . Pour pouvoir discerner les échos de deux cibles considérées ponctuelles il faut que le délai les séparant soit supérieur ou égal à τ .

Comme le montre la figure ci-dessous le deuxième écho parcourt deux fois la distance A B, alors la résolution en distance est le chemin parcouru par l'impulsion au d'un temps $\tau/2$.

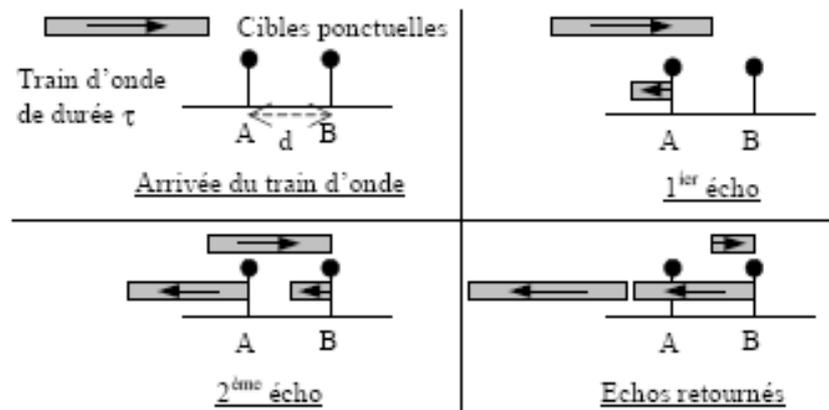


Fig.1.7 : Distance minimale entre deux cibles

$$rd = c \cdot \frac{\tau}{2} \quad (1.5)$$

Nous observons que la résolution en distance ne dépend pas de l'altitude du porteur, ce qui permet d'avoir une résolution équivalente que se soit pour les systèmes spatiaux ou celui aéroporté. Il faut de nouveau prendre en compte l'angle d'incidence pour obtenir la résolution en distance au sol :

$$rd_{sol} = c \cdot \frac{\tau}{2 \cdot \sin \theta} \quad (1.6)$$

1.3 Le principe de la synthèse radar

1.3.1 Le traitement en distance (la compression d'impulsion)

La résolution en distance est proportionnelle à la brièveté (rythme) de l'impulsion. Cependant, l'émission d'impulsions permettant la résolution souhaitée n'est guère réalisable techniquement, au niveau de sa durée mais aussi au niveau de l'énergie (qui doit être suffisante pour la détection des échos réfléchis compte tenu des affaiblissements importants dus au trajet et au coefficient de rétrodiffusion).

La finesse de résolution est donc obtenue de manière indirecte. La durée d'impulsion est plus longue (ce qui permet une énergie plus élevée) mais le signal est modulé de manière à occuper une grande largeur de bande et à permettre l'obtention d'une résolution plus petite après traitement adapté du signal reçu. La modulation employée est généralement une modulation linéaire de la fréquence. Elle est communément appelée un *Chirp*.

Comme nous l'avons vu précédemment, la résolution en distance dépend de la longueur d'impulsion (temporellement),

$rd = c \cdot \frac{\tau}{2}$, alors, d'un point de vue pratique, une résolution décimétrique conduirait à des impulsions de largeur temporelle de 10^{-8} secondes, ce qui n'est pas envisageable techniquement. La technique dite de compression d'impulsion pallie à ce problème [5].

Ainsi, si l'on note Δf la bande de fréquence de l'impulsion émise, on assimile la largeur à 3dB du lobe principal du signal après traitement à la largeur de l'impulsion comprimée. Elle vaut

$$\tau = \frac{0.885}{\Delta f} \quad (1.7)$$

La compression en distance permet donc d'obtenir une résolution correspondant à $rd = c \cdot \frac{0.885}{2 \cdot \Delta f}$, ce qui donne une résolution au sol $rd_{sol} = c \cdot \frac{0.885}{2 \cdot \Delta f \cdot \sin(\theta)}$

Pour SEASAT-A $\Delta f = 19$ MHz et la résolution obtenue est $rd = 7,9$ m soit, si l'on projette cette valeur au sol (angle de visée $\theta = 20,5^\circ$), $rd_{sol} = 25$ m. De même, pour ERS-1, la résolution passe de 6 km $rd = 9$ m. [4]

1.3.2 Le traitement en azimuth : la synthèse d'ouverture

Le but de la synthèse d'ouverture est d'obtenir une résolution spatiale en azimuth comparable à celle obtenue précédemment en distance. Elle utilise le fait que, lors du déplacement du porteur, chaque cible présente une vitesse radiale variable au cours de la traversée du lobe antenne. Il faut donc tout d'abord revenir à la définition de la résolution en azimuth. On se place, pour cela, dans le plan oblique afin de mieux comprendre la géométrie azimuthale du système.

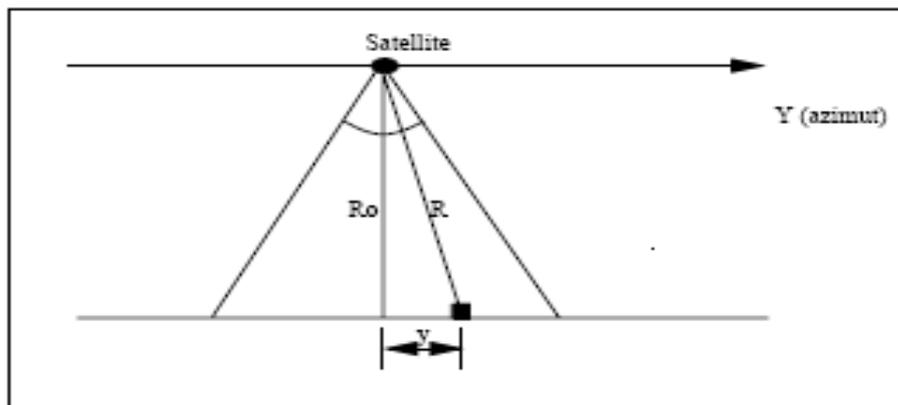


Fig. 1.8 : Paramètres dans le plan oblique.

La différence de phase entre le signal émis et le signal reçu pour un réflecteur situé à une distance R du porteur est proportionnel à cette distance [4] :

$$\Delta \varphi = \frac{4\pi R}{\lambda} \quad \text{or} \quad R = \sqrt{R_0^2 + y^2} \quad (1.8)$$

y étant petit devant R , alors on peut effectuer un développement limité au premier ordre de R :

$$R = R_0 + \frac{y^2}{2R_0} \quad (1.9)$$

Par la substitution on obtient :

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi R_0}{\lambda} + \frac{2\pi y^2}{\lambda R_0} \quad (1.10)$$

Le décalage Doppler se calcule alors directement avec v la vitesse du porteur et $y = vt$:

$$f_d = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi}{dt} \quad (1.11)$$

On a alors :

$$f_d = \frac{2v^2 t}{\lambda R_0} \quad (1.12)$$

f_d est appelée fréquence Doppler centrale, elle correspond physiquement à la fréquence instantanée du signal au centre du faisceau. Cette fréquence est due à la vitesse radiale du capteur relativement à la cible.

On définit la bande du spectre Doppler B , est donnée en considérant la période Te d'éclairement d'un réflecteur :

$$B = \frac{2v^2 Te}{\lambda R_0}$$

On peut utiliser, comme précédemment, la compression d'impulsion pour le traiter et séparer les échos issus de différents réflecteurs. Ce procédé permet de comprimer l'impulsion de durée Te en une durée $0.885 B$, largeur du lobe principale à 3dB. la résolution en azimuth devient :

$$r_y = \frac{0.885 v}{B} \quad (1.13)$$

1.4 Les caractéristiques de l'image SAR

Cette partie souligne les particularités de telles images et analyse les propriétés utiles à leur interprétation.

1.4.1 L'influence du relief

Le radar mesure la distance de la cible au porteur. Il se crée ainsi des distorsions géométriques lorsque la cible se trouve à une hauteur différente du niveau moyen du relief [6].

Zones de compression ou zones d'accumulation

Etant donné le principe de détection en site, il est impossible de distinguer des points situés à une même distance de l'antenne. En fait, comme chaque pixel de l'image SAR correspond (pour une impulsion) à la somme des échos provenant des réflecteurs élémentaires situés à une même distance du radar (échos reçus dans la même porte radar), il se crée des zones d'accumulation. Ces dernières seront en surbrillance dans l'image. Elles sont aussi des zones de compression comme le montre clairement la figure 1.9 [1].

Zones d'inversion

Une inversion du relief survient pour les fortes pentes faisant face à l'antenne. Elle est en fait un cas extrême des zones de compression. Les points situés au sommet de la pente d'un versant éclairé sont, relativement au radar, à une distance inférieure à celle des points du bas de la pente. Sur l'axe de site, le haut de ces pentes est donc vu avant le bas (voir figure 1.9).

Zones d'ombre

Les zones d'ombre sont importantes dans le cas de reliefs accidentés et sont dues à la nature même du système imageur qui génère sa propre source d'illumination. Il est possible de relier la portée de l'ombre à la hauteur de l'objet imagé. Ceci est une différence importante par rapport aux systèmes imageurs optiques pour lesquels les zones d'ombre sont fonction uniquement de la position du soleil.

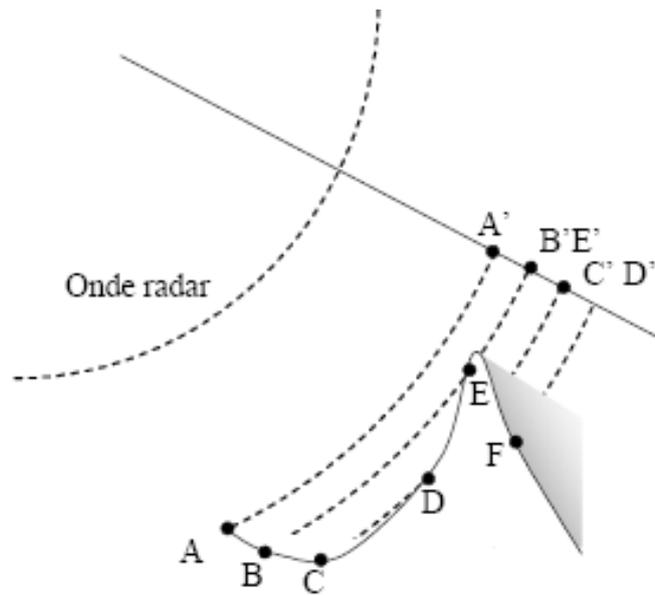


Fig. 1.9 : Cibles projetés en distance

1.4.2 L'interaction onde- surface

1.4.2.1 Le coefficient de rétrodiffusion

L'onde électromagnétique arrivant sur une cible (zone du terrain imagé) est sujette à un ensemble de phénomènes :

- Absorption par la cible.
- Diffusion dans la cible.
- Réflexion dans des directions autres que celle de l'antenne.
- Réflexion éventuelle dans la direction de l'antenne.

La modélisation de tels phénomènes étant extrêmement complexe, seules les propriétés essentielles pour interpréter des images SAR seront abordées. Une image radar (image d'amplitude est une image du coefficient de rétrodiffusion de la surface. Une définition équivalente est de dire que l'image radar est une image de certaines propriétés du sols et/ou du sous-sol interprétées par le coefficient de rétrodiffusion, le signe de ce coefficient en dB indique si la surface est spéculaire ou rétrodiffusante.

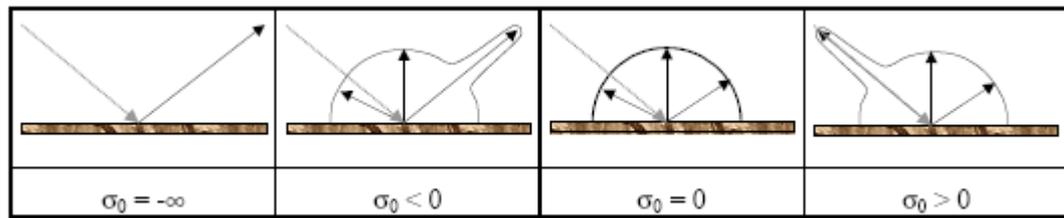


Tableau 1.2

Le tableau ci-dessous cite quelques valeurs de σ qui permettent de faire une classification de surface selon sa nature (histogramme type de radiométrie).

σ_0 en déciBel (dB)	Type de surface
+50	Cibles ponctuelles, navires, véhicules
+20	Zones urbaines
0	Surface plane
-10	Forêt, végétation
-10	Végétation
-15	Herbe rase
-22	Goudron, béton

Tableau1.3 exemple de radiométrie radar en échelle logarithmique.

1.4.2.2 Les pentes

Pour comprendre l'effet des pentes sur la radiométrie de l'image, il est intéressant de se reporter à la littérature concernant le *shape from shading* en imagerie SAR [4, 7].

Chellappa définit un modèle de réflectance $R(\cdot)$ qui relie l'orientation locale de la surface à l'intensité de l'image. Il permet surtout de distinguer l'effet de la surface efficace $S(i_d, i_a)$ de l'influence de l'angle d'incidence $\psi(i_d, i_a)$. La réflectance peut ainsi être exprimée comme le produit d'un facteur d'inclinaison par un facteur d'orientation :

$$R(i_d, i_a) = A(i_d, i_a) \psi(i_d, i_a) \quad (1.14)$$

Le facteur d'inclinaison

Lors de la synthèse de l'image radar, la surface est supposée horizontale afin d'avoir, après calibration, l'intensité proportionnelle au coefficient de rétrodiffusion. On introduit, pour cela, la définition de la surface de la cellule de résolution :

$$S(i_d; i_a) = r_{d\text{sol}}(i_d; i_a) r_y = A(i_d; i_a) r_d r_y \quad (1.15)$$

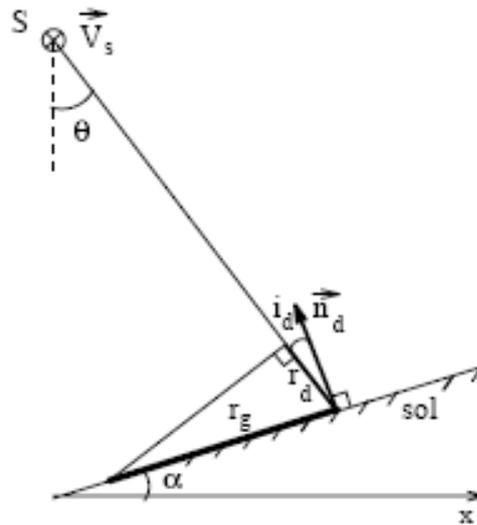


Fig. 1.10 : Surface éclairée dans la cellule de résolution pour l'axe en distance

Si la pente fait localement un angle α avec l'horizontale en distance (Fig. 1.10), la surface efficace devient :

$$S = \frac{r_d r_y}{\sin(|\theta - \alpha|)} = \frac{r_d r_y}{\sin(|i_d|)} \quad (1.16)$$

On suit le même raisonnement s'il existe une composante de la pente en azimut. Dans ce dernier cas, la géométrie de la figure 1.11 montre que le facteur suit une loi en cosinus

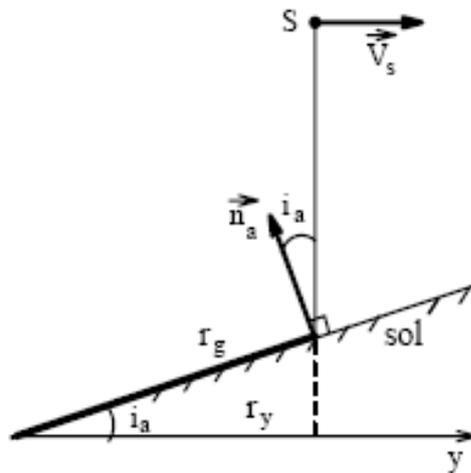


Fig. 1.11 : Surface éclairée dans la cellule de résolution pour l'axe en azimuth

On généralise par la relation suivante :

$$A(i_d, i_a) = \frac{1}{\sin(|i_d|)\sin(|i_a|)} \quad (1.17)$$

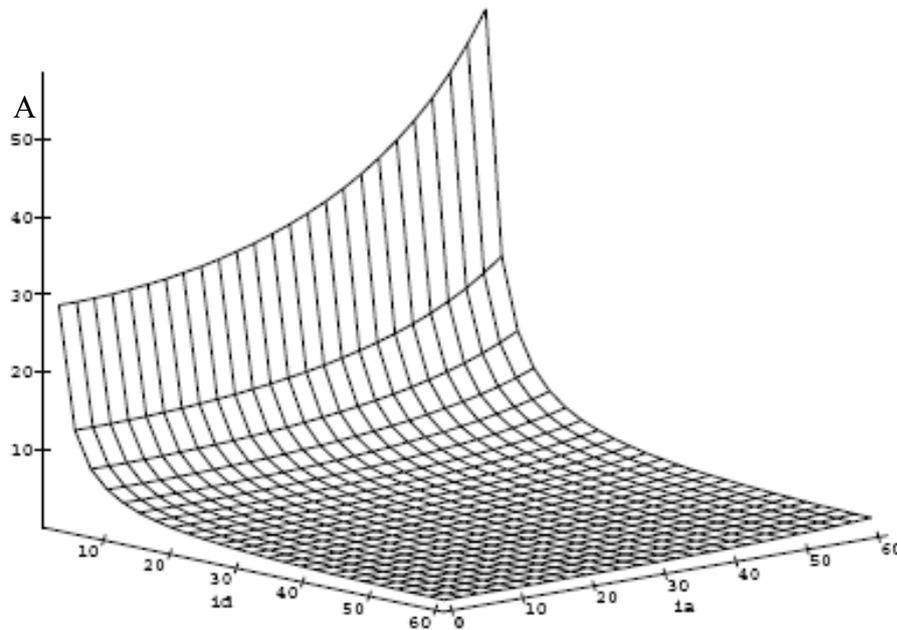


Fig. 1.12 : Facteur d'inclinaison en fonction des composantes en distance et azimuth de l'angle d'incidence

Le facteur d'orientation

On trouve dans la littérature un grand nombre de modélisations, aussi bien théoriques, basées sur l'optique physique, qu'empiriques.

Pour des objets géométriques simples, tels des sphères ou des cylindres, ces modélisations sont connues explicitement. Elles supposent des objets parfaitement conducteurs et sont généralisables à l'estimation de surfaces courbes quelconques.

Dans le cas de terrains naturels, cela demande la prise en compte à la fois des interactions de surface et de volume.

Les modèles connus s'appliquent aux surfaces présentant des grandes rugosités devant la longueur d'onde du radar ou des pentes faibles avec des rugosités petites devant la longueur d'onde du radar. Dans le cas où le produit du nombre d'onde par l'écart type des rugosités est grand devant l'unité, le facteur d'orientation peut s'écrire:

$$\psi(i) = \frac{|R(0)|^2}{2M^2 \cos^4 i} \exp\left(-\frac{\tan^2 i}{2M^2}\right) \quad (1.18)$$

Où $R(0)$ est le coefficient de réflexion de Fresnel et M l'écart type des pentes [4].

Si l'approximation précédente ne s'applique pas, on montre que l'on peut exprimer Ψ sous la forme d'une série. Dans tous les cas le coefficient de réflexion de Fresnel peut être factorisé, laissant apparaître un terme ne dépendant que des caractéristiques de la surface (la pente moyenne) et de l'angle d'incidence.

1.5. Les corrections

Nous avons plusieurs erreurs dues au traitement de synthèse dont les principales sont :

Les migrations, les défauts et les variations d'attitude de porteur, le speckle, les défauts de la radiométrie et les déformations géométriques.

1.5.1 corrections des migrations

Le procédé de compression en azimuth et en distance consiste à rassembler pour chaque cible l'information étalée, cette technique exige une localisation précise des différentes contributions dans l'image. Ces déformations ou bien les décalages de points d'image sont appelés les migrations. On a deux types de migration, une c'est parabolique et l'autre linéaire.

1.5.1.1 la migration parabolique

Ce phénomène est dû à la sphéricité des portes radar. En effet, le déplacement relatif de la cible dans la trace du lobe antenne crée une variation quadratique de sa distance au porteur. Ainsi, un point au sol n'est pas toujours à la même distance du radar quand il traverse le lobe de l'antenne.

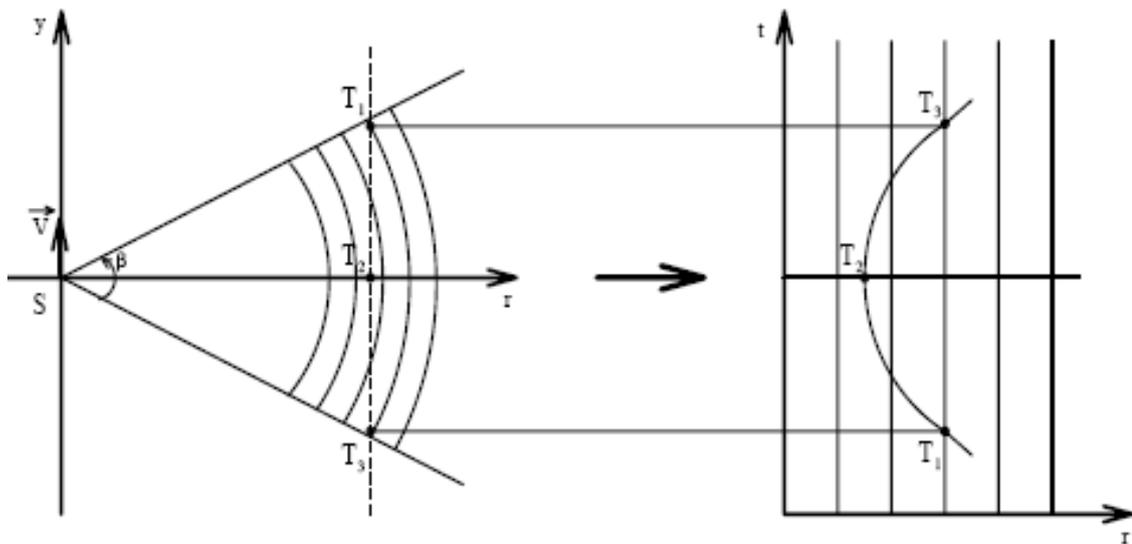


Fig. 1.13 : La migration parabolique de points au sol

1.5.1.2. La migration linéaire

Cette erreur a plusieurs origines (Fig. 1.14.)[4]. Tout d'abord, la migration linéaire est due au vecteur vitesse de la cible qui n'est pas, du fait de la rotation de la Terre, parallèle au vecteur vitesse du porteur. Ainsi, l'écho d'un point au sol change de porte radar au cours de sa traversée du lobe de l'antenne. De même, le fait que l'observation soit latérale engendre une variation

linéaire de la distance en fonction du temps. Enfin, il faut aussi citer l'effet de l'excentricité de l'orbite. Afin de corriger la migration linéaire, le tableau des données en site sera rééchantillonnée et décalé.

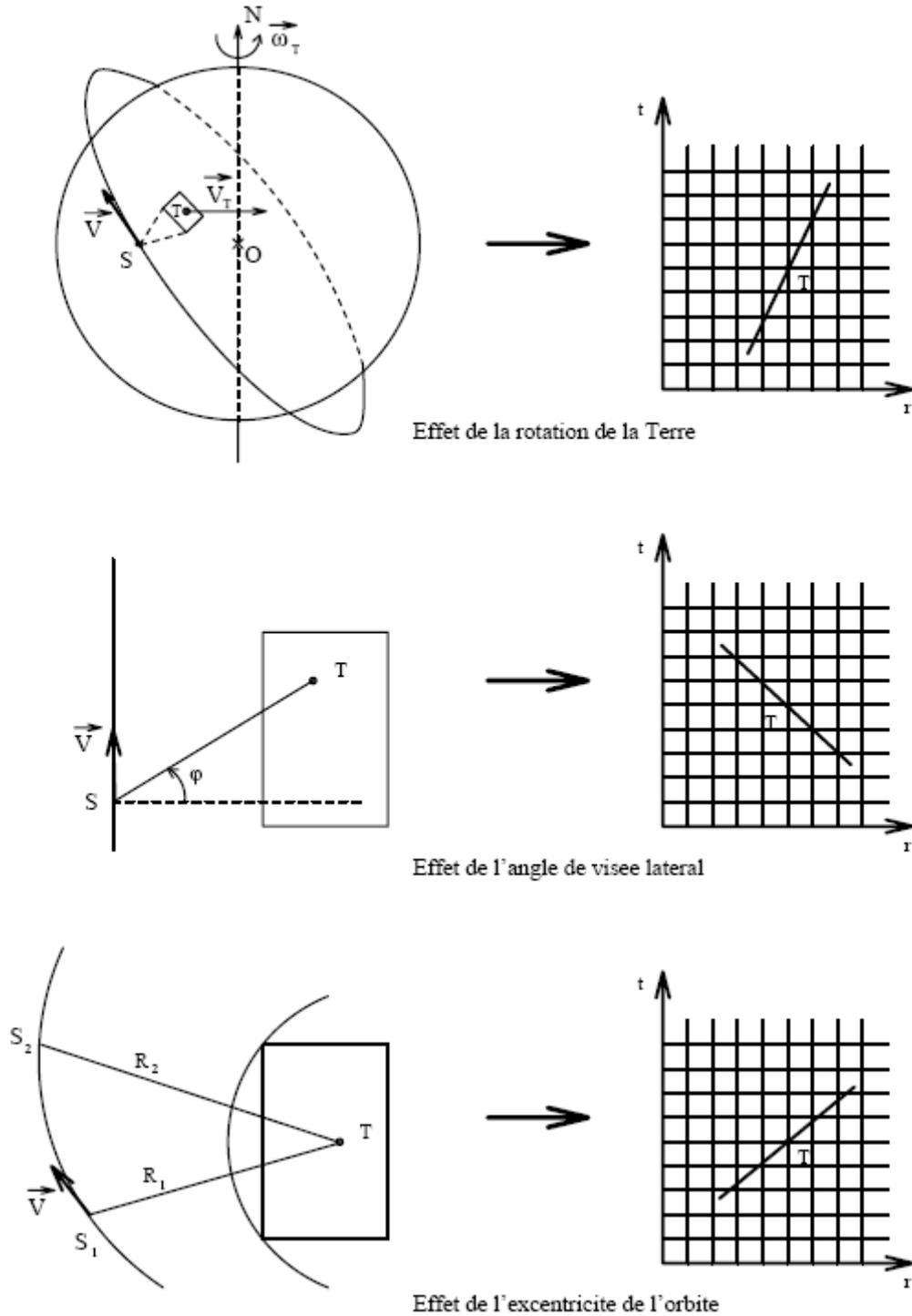


Fig. 1.14 : Facteur à l'origine de la migration linéaire

1.5.2 Les défauts d'attitude du porteur

Le porteur est exposé aux roulis, tangage et lacet. Les effets de ces différents phénomènes sont plus importants pour les avions que pour les satellites car ces derniers sont beaucoup moins soumis aux problèmes atmosphériques.

Le roulis (rotation du porteur dans le plan perpendiculaire à l'axe d'azimut) a pour effet de décaler une porte radar dans le lobe d'antenne.

Le tangage (rotation du porteur dans le plan perpendiculaire à l'axe en distance).

et le lacet (rotation du porteur dans le plan contenant les axes d'azimut et de distance) induisent eux des erreurs plus graves car ils se traduisent par un dépointage de l'antenne dans la direction azimutale et donc un décalage Doppler du signal reçu. Plusieurs solutions sont possibles pour ramener réellement ou virtuellement l'antenne à pointer latéralement au porteur. Ces problèmes sont réglés à bord.

1.5.3 Les variations d'attitude du porteur

Les variations d'attitude du porteur sont des défauts d'attitude dépendants du temps. Les erreurs qu'elles induisent sont pratiquement négligeables dans le cas d'un satellite.

Elles peuvent être corrigées à bord si l'on connaît la vitesse et l'accélération instantanée du porteur.

1.5.4 Le speckle

Le signal radar est formé par addition cohérente des signaux rétrodiffusés par un réflecteur pendant sa traversée dans le lobe d'antenne. Cette addition cohérente est à la source d'un phénomène de bruit dit de speckle.

Le speckle se traduit sur l'image par un bruit dégradant les contrastes et se mêlant aux détails fins. Il est d'autant plus présent que la surface du sol est rugueuse. C'est pourquoi ce bruit peut être interprété comme la résultante, à l'échelle de la longueur d'onde, d'interférences entre les multitudes d'ondelettes rétrodiffusées par les micro-réflecteurs contenus dans la cellule de résolution. Plusieurs méthodes de filtrage ont été proposées pour traitements réduire les effets du

speckle, elles sont à effectuer lors de deux étapes bien distinctes ; au cours de la synthèse d'ouverture et Après l'obtention des images définitives.

1.5.5 Les corrections radiométriques

Les corrections radiométriques servent à compenser les distorsions de l'intensité de l'image, dues aux différents traitements, afin de rendre l'intensité des pixels proportionnelle à celle du coefficient de rétrodiffusion du sol.

Ces corrections concernent principalement l'intensité moyenne de chaque image partielle dans le cas d'un traitement multi-vues. Dans le spectre Doppler, les sous-bandes ne possèdent pas la même énergie spectrale. Il faut donc effectuer une mise à niveau préalablement à leur superposition. Ceci est fait de manière empirique en évaluant sur les images calculées les coefficients de correction à appliquer.

1.5.6 Les corrections géométriques

L'image résultant d'un traitement SAR possède des pixels échantillonnés selon des lois temporelles uniformes en site et en azimut. Pour être utilisée pratiquement, l'image radar doit être transformée en une image échantillonnée selon des coordonnées de position au sol.

La déformation de l'image radar réside principalement dans la direction en site où l'on doit passer de la coordonnée de distance oblique à celle de distance au sol (fig1.15 [1]). La rectification géométrique en site est identique pour toutes les lignes transversales de l'image et ne dépend en fait que des rayons de la Terre et du porteur.

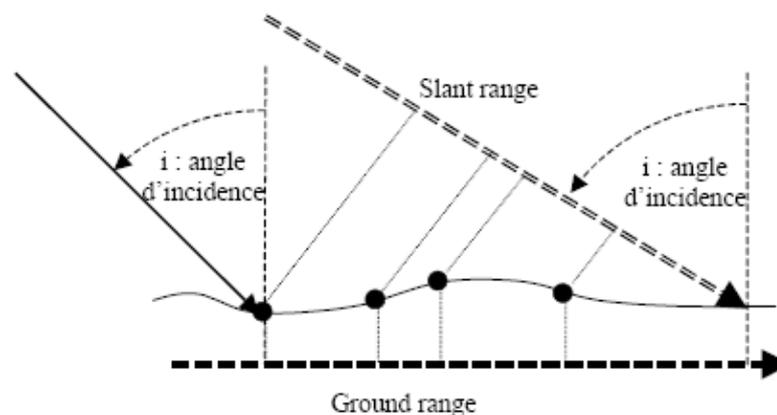


Fig. 1.15 : Projection des distances au sol

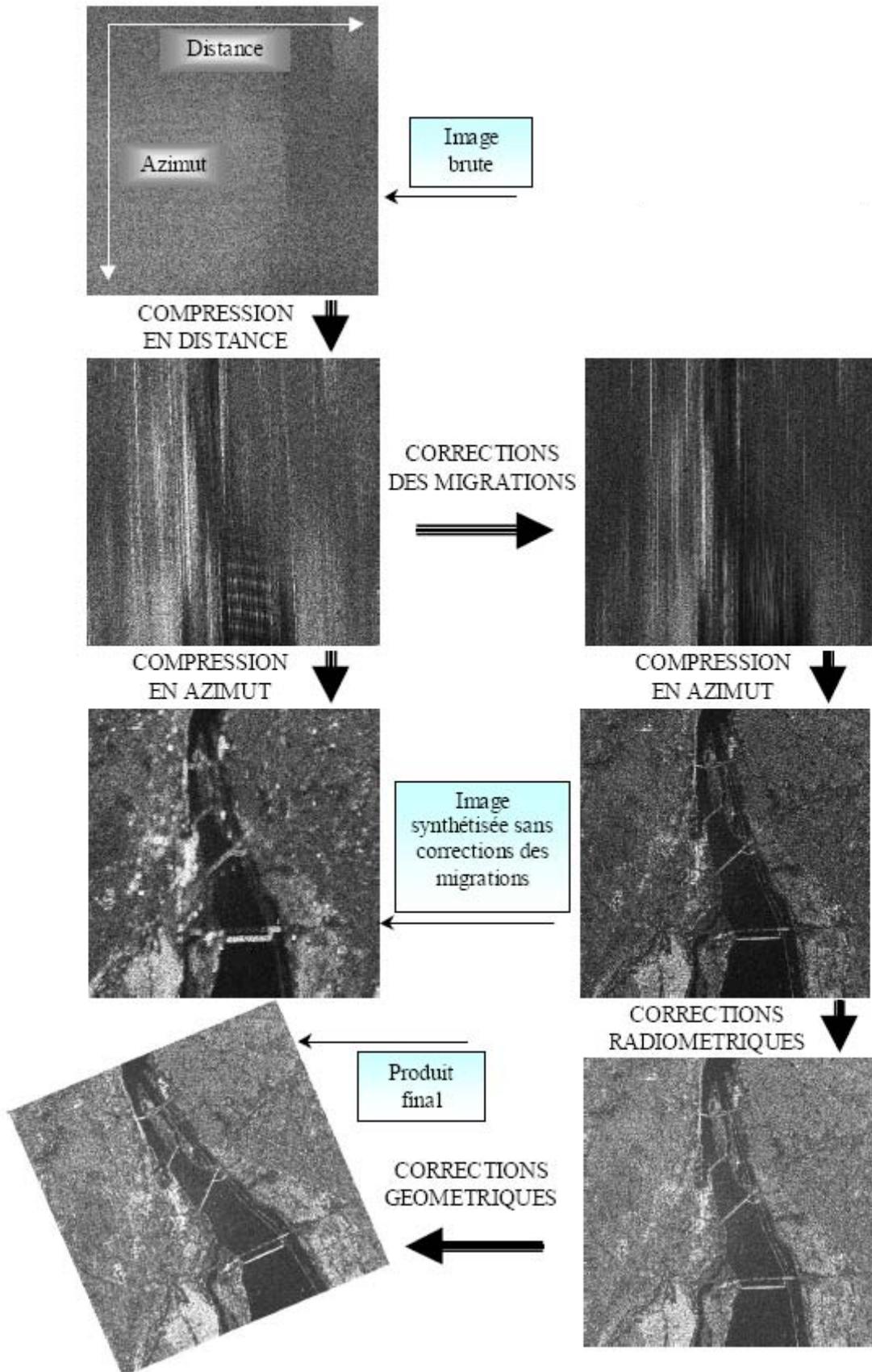


Fig. 1.16 : la chaîne de traitement de l'image SAR

1.6 Conclusion

L'essor considérable de l'imagerie radar satellitaire est soutenu par de nombreuses applications. Citons comme exemples, la surveillance de l'environnement, l'occupation des sols, la défense du territoire et la cartographie. Ceci est réalisé grâce aux progrès considérables constatés dans le traitement du signal et de l'image.

La caractéristique principale des images acquises par un radar à ouverture synthétique est leur extrême sensibilité à la géométrie du terrain. Ceci a permis de développer une technique de restitution du relief appelé "interférométrie radar". Cette technique exploite l'information de phase de l'image comme moyen de mesure des distances, elle fera l'objet du prochain chapitre.

Chapitre 2

L'interférométrie

Chapitre 2 :

Interférométrie

2.1 Introduction

Le principe de l'interférométrie a été initialement utilisé lors des applications classiques de télédétection des planètes distantes. Ceci a permis la génération des cartes d'élévation des surfaces de la Lune et de Vénus. L'interférométrie dans le domaine radar a été proposée pour la première fois aux États-unis en 1974, par Graham de la société Goodyear Aerospace. Il a démontré la possibilité de mesurer la topographie du terrain, tout en exploitant l'information de phase contenue dans les images radar. Le dispositif était constitué de deux antennes montées sur un même porteur. L'une des antennes émet le signal. Après réflexion, le signal rétrodiffusé est enregistré par les deux antennes. Dans les années 1980, des chercheurs du Jet Propulsion Laboratory (PL) ont étudié la faisabilité de la génération des modèles numériques du terrain (MNT), à partir des mesures de phase des images acquises par le satellite SEASAT. Goldstein et Zebker ont été les premiers à présenter les résultats obtenus à partir de ce satellite. Le processus consiste à comparer deux images d'une même zone en démontrant la faisabilité de l'interférométrie à partir des données satellitaires.

Le but de l'interférométrie est d'analyser les différences de phase, pixel à pixel, de deux images d'une même région acquises selon deux approches possibles. La première approche, dite "interférométrie en une passe" (Figure 2.1), utilise deux antennes physiques situées sur le porteur. Les deux antennes éclairent le terrain simultanément. L'une des deux antennes est émettrice réceptrice. Cette technique présente l'avantage d'enregistrer la réflexion du sol d'un même signal, avec une base parfaitement fixe. La deuxième approche dite «interférométrie multipasse (Figure 2.2)» utilise une seule antenne pour acquérir deux images d'une même région, à des dates différentes et à partir de deux orbites parallèles assez proches- Cette technique souffre de problèmes de décorrélation temporelle des signaux à cause de la non stabilité de la scène pour la rétrodiffusion radar, ainsi que de problèmes orbitaux résultant des deux passages du satellite, qui doivent être sur des trajectoires quasiment parallèles et avec une base B_x

acceptable. La base B_x est la distance séparant les deux satellites dans le cas de l'interférométrie multipasse ou les deux antennes d'un même avion dans le cas de l'interférométrie monopasse, lors de l'acquisition d'un même point au sol.

Avec l'analyse des différences de phase, l'interférométrie radar offre l'opportunité de détecter et d'évaluer les variations altimétriques du terrain et fournit, par conséquent, des informations précieuses dans plusieurs domaines des sciences de la terre.

L'objectif de ce chapitre est d'expliquer les fondements de la technique interférométrique SAR. Nous commençons par présenter le principe de cette technique. Après, nous expliquons les conditions nécessaires pour réaliser une mesure interférométrique. Ces conditions sont reliées à la cohérence entre les images radar. Ensuite, nous examinons les différentes étapes du traitement interférométrique qui permettent d'obtenir une information de phase à partir de laquelle on peut déduire la topographie d'un terrain. Nous terminons en citant quelques unes des limitations de l'interférométrie SAR.

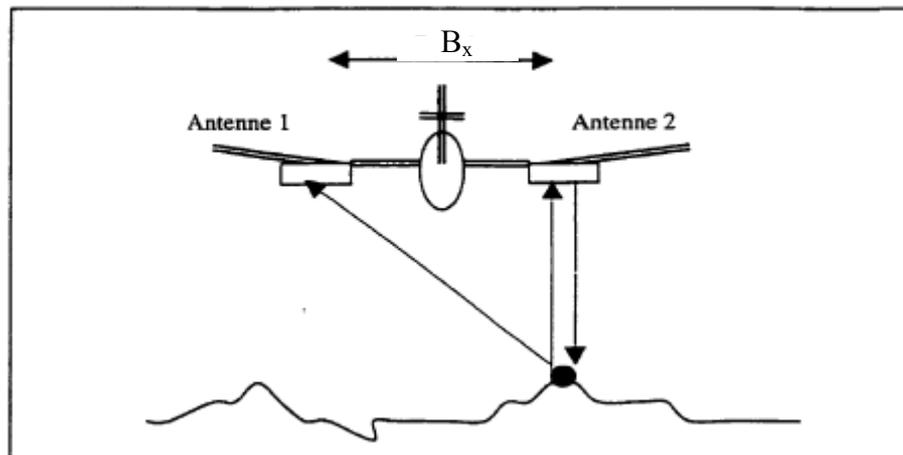


Fig. 2.1 : Technique interférométrique monopasse

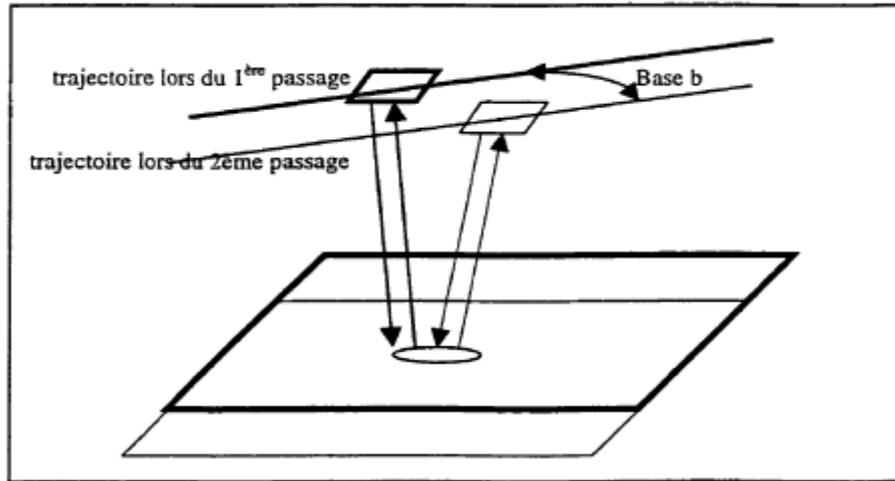


Fig. 2.2 : Technique interférométrique multipasse

2.2 Principe

La technique interférométrique SAR utilise deux images radar acquises sur une même région. L'une des deux images sera appelée "image maîtresse". Sa géométrie de prise de vue sera prise comme référence. Par opposition, l'autre image sera considérée comme "image esclave"[8].

Dans la figure (2.3), S_1 et S_2 sont les positions du capteur dans des conditions géométriques différentes et T la position d'un point diffuseur de la scène.

La distance B_x séparant les deux positions de l'antenne du satellite quand il saisie le même point T est appelée "base interférométrique" ou "baseline". r et $r-\Delta r$ sont les distances séparantes un point T et le radar lors de l'acquisition des deux images.

L'image radar est une image complexe au sens mathématique du terme. Elle est composée de deux quantités totalement indépendantes. En effet, pour chaque pixel de l'image, on possède une information d'amplitude dite aussi radiométrie et une information de phase. L'amplitude représente la réflectivité du sol aux ondes hyperfréquences et dépend directement des propriétés physiques et de la géométrie de la zone observée. La phase, quand à elle, est une information riche mais qui est restée inexploitée pendant longtemps parce qu'elle était assimilée, pour une image unique, à un bruit blanc pour des raisons physiques et géométriques. Cependant, l'utilisation de différence de phase de deux images radar prises dans des conditions géométriques voisines est pertinente parce qu'elle permet d'obtenir la troisième dimension des scènes observées

pour générer des modèles numériques du terrain. En plus, deux images acquises dans des conditions géométriques identiques donnent une même image de phase.

La valeur de phase enregistrée est la mesure du déphasage entre l'onde émise et l'onde réfléchie. Elle est la somme de deux termes en négligeant les autres phases (voir chapitre précédent) :

- Un déphasage qui se produit lors de la réflexion de l'onde sur l'objet et qui est fonction de la nature de l'objet, c'est à dire qu'en fonction de la nature diélectrique du réflecteur, le signal subira un déphasage. Ce terme dit phase de retrodiffusion ϕ_m est aléatoire d'un pixel au pixel voisin, mais ne change pas d'une prise de vue à l'autre si l'objet ne change pas autrement dit une phase propre caractérise seulement l'objet diffuseur .

- Un déphasage dû au trajet aller-retour de l'onde. Ce terme de phase dit phase trajet (géométrique)

Φ_{trajet} ne dépend que de la distance relative entre le point observé et le satellite :

$$\phi_{trajet} = \frac{4\pi r}{\lambda}$$

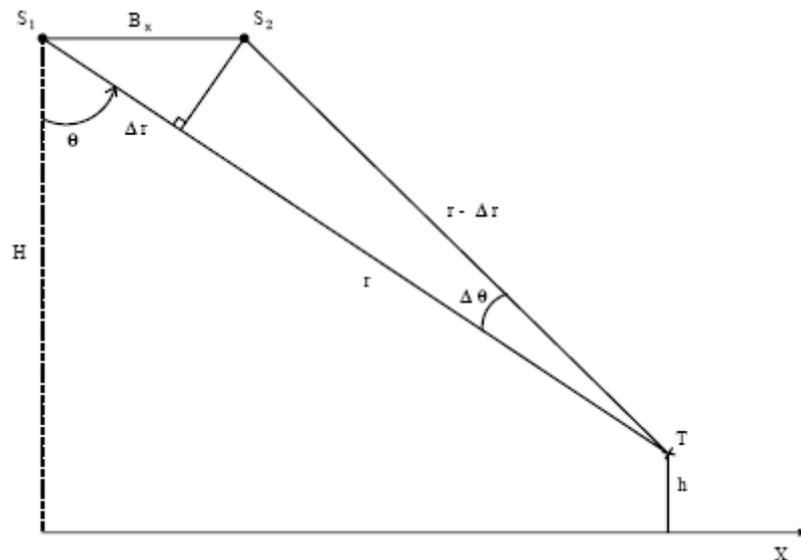


Fig. 2.3 : La géométrie interférométrique

Si Φ_1 est la phase de l'image issue du satellite 1 et Φ_2 est celle de l'image issue du satellite 2, la différence de phase interférométrique des deux images est donnée par $\Delta\Phi = \Phi_1 + \Phi_2$.

Où :

$$\phi_1 = \frac{4\pi}{\lambda}r + \phi_{m1}$$
$$\phi_2 = \frac{4\pi}{\lambda}(r - \Delta r) + \phi_{m2}$$

Avant de procéder à la différence de phase des deux images, ces dernières doivent être superposables, de manière à ce que deux pixels identiques dans les deux images représentent un même élément sur le terrain. Ce type de traitement géométrique est appelé coregistration (recalage). Il permet de passer de la géométrie de prise de vue de l'image esclave à celle de l'image maîtresse, puis d'échantillonner l'image esclave en conséquence.

Après la coregistration, la différence de phase $\Delta\Phi$ se calcule point à point entre les deux images, cette différence de phase modulo 2π donne lieu à une image d'interférence appelée interférogramme qui contient des franges équivalentes à des courbes de niveaux et sensibles aux variations d'altitude du terrain.

$$\Delta\phi (\% 2\pi) = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r + \Delta\phi_m \quad (2.1)$$

Une fois que l'interférogramme est calculé, l'altitude d'un point P au dessus de la sphère terrestre peut être trouvée à partir de la différence radiale Δr de ce point dans l'interférogramme et de la connaissance à priori de la position de l'antenne lors de passages du satellite.

Dans la Figure 2.3, H est l'altitude du satellite, B_x , est la baseline, et h est l'altitude au point T

h et la différence de chemin entre les deux rayons radar-cible sont reliés par :

$$h = H - R \cos \left[\arcsin \left(\frac{\Delta r}{B_x} \right) \right] \quad (2.2)$$

Si l'on néglige la courbure de la Terre.

Le calcul de cette dernière équation nécessite une bonne maîtrise des paramètres orbitaux (H et B_x) et nécessite la détermination exacte de l'angle de visée donné par $\arcsin(\Delta r/B_x)$.

En plus l'estimation correcte de h n'est possible que si $\Delta\phi_m$, qui joue en fait le rôle d'un bruit de mesure, qui est suffisamment petit. Ceci se traduit par des contraintes qui fixent les conditions de faisabilité de l'interférométrie.

2.3 Les conditions de faisabilité

Le déphasage de deux images radar, acquises depuis deux trajectoires proches et ensuite recalées par un traitement géométrique, permet la génération d'un interférogramme qui se présente sous forme de franges d'interférences. Pour que cette image de phase interférométrique ou "interférogramme" soit de qualité, la phase propre doit rester constante dans les deux images et le déphasage ne doit dépendre que du chemin optique parcouru. Pour cela, la stabilité des caractéristiques physiques du sol est nécessaire entre les deux acquisitions dans le cas de technique multipasse. Aussi, l'intervalle de temps entre les deux prises de vue ne doit pas être trop long, surtout pour les régions à fort couvert végétal ou l'évolution de la végétation est rapide. De plus, les conditions de prise de vue ne doivent pas être trop différentes. Pour cela, l'angle de prise de vue ne doit pas beaucoup changer. C'est pour ceci que le mode monopasse est conseillé afin d'avoir $\Delta\Phi_m$ aussi petite que possible

La faisabilité d'une mesure interférométrique dépend essentiellement de ce qu'on appelle la cohérence. La cohérence est un indicateur très sensible, indiquant le degré de corrélation entre les phases des deux échos.

On considère pour cela que ces signaux ont une partie commune c et des parties bruitées (bruit du système) distinctes n_1 et n_2 [4], soit :

$$s_1 = c + n_1 \quad \text{et} \quad s_2 = c + n_2$$

Où S_1 est le signal complexe dans l'image maîtresse, S_2 est le signal complexe dans l'image esclave.

Si l'on note $\langle \cdot \rangle$ la covariance, ce degré de corrélation $\rho_{\text{système}}$ est défini par :

$$\rho_{\text{système}} = \frac{\langle s_1 s_2^* \rangle}{\sqrt{\langle s_1 s_1^* \rangle \langle s_2 s_2^* \rangle}} \quad (2.3)$$

Comme le bruit et les signaux sont décorrélés, on obtient :

$$\rho_{\text{système}} = \frac{|c|^2}{|c|^2 + |n|^2} \quad \text{soit} \quad \rho_{\text{système}} = \frac{1}{1 + SNR^{-1}}$$

Le degré complexe de cohérence est simplement le terme d'interférence normé issu des deux images. Il constitue un nombre compris entre 0 et 1. Il est directement lié à la visibilité des franges et au rapport signal sur bruit. Si ce degré $\rho_{\text{système}} = 1$, les phases de deux images sont parfaitement corrélées et la visibilité des franges est maximale. Par contre, une cohérence faible signifie que les deux images sont faiblement corrélées et dans ce cas $\rho_{\text{système}} = 0$.

2.4 Évaluation de cohérence

L'image de cohérence est considérée en quelque sorte comme une image de degré de confiance à accorder à l'interférogramme. Elle contient des informations sur la stabilité interne de la surface. Les forêts ont une cohérence plus faible à cause d'une part d'une évolution plus rapide du couvert végétal et d'autre part d'un possible rétrodiffusion volumique. Par contre les zones de plaine, les villes et les structures artificielles manifestent une faible variation de phase et par conséquent donnent lieu à une bonne cohérence.

La cohérence dans un interférogramme SAR n'est pas mesurée, mais estimée. L'estimateur de plus fréquemment utilisé est :

$$\rho_{\text{système}} = \frac{\left| \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M S_1(i, j) S_2^*(i, j) \right|}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M |S_1(i, j)|^2 \right) \left(\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M |S_2(i, j)|^2 \right)}}$$

2.5 Décorrélation

La différence de phase utilisée en interférométrie nécessite une corrélation suffisante entre les données acquises par le satellite au cours des cycles d'observation. La décorrélation est la conséquence de plusieurs phénomènes qui perturbent la différence de phase entre les deux images. Cette décorrélation se manifeste sous forme d'un bruit visible dans l'interférogramme et d'une chute de la cohérence mesurée. Elle signifie un changement dans la géométrie d'observation ou dans la position relative apparente des diffuseurs. Il existe principalement deux causes de décorrélation :

- Décorrélation spatiale.
- Décorrélation temporelle.

Si l'on introduit ces deux termes on obtient un degré de corrélation total jugeant la cohérence de l'image, il est défini comme :

$$\rho_{\text{total}} = \rho_{\text{système}} \rho_{\text{spatial}} \rho_{\text{temporel}}$$

Il reste donc à définir et évaluer les coefficients ρ_{spatial} et ρ_{temporel} .

2.5.1 La décorrélation spatiale

La décorrélation spatiale est due à l'observation sous deux angles d'incidence différents de la même cellule de résolution [9]. Elle est déduite de la fraction des échos radar commune aux deux antennes (voir figure 2.4). Cette dernière vaut

$$\Delta d = \sin \theta_1 - \sin \theta_2 = \sin \theta_2 \left(\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} - 1 \right)$$

Si l'on pose $\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2$ on trouve au premier ordre :

$$\Delta d = \sin \theta_2 \frac{\Delta\theta}{\tan \theta_2} = \Delta\theta \cos \theta_2$$

La corrélation spatiale devient alors :

$$\rho_{\text{spatial}} = 1 - \frac{2rd\Delta\theta \cos\theta_2}{\lambda}$$

Si on l'exprime en fonction de la composante horizontale de la baseline, on obtient :

$$\rho_{\text{spatial}} = 1 - \frac{2|B_x|rd(\cos\theta_2)^2}{\lambda R_2} \quad (2.4)$$

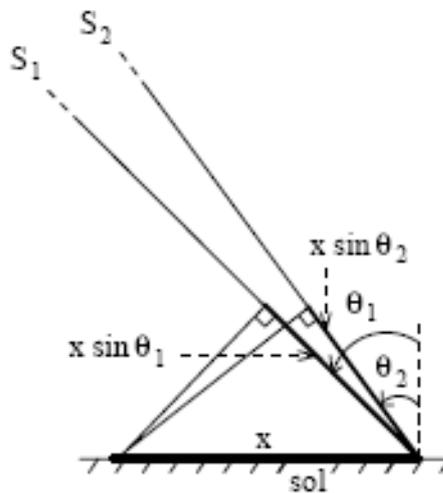


Fig. 2.4 : L'observation sous deux angles d'une même cible

2.5.2 La décorrélation temporelle

La décorrélation temporelle est, elle, l'effet des changements physiques de la surface entre les deux observations. Elle est en fait modélisée comme un degré de liberté de déplacement des rétrodiffuseurs à l'intérieur de la cellule [10]. Elle est définie par un écart type horizontal σ_x et vertical σ_z . Le coefficient de corrélation temporelle devient alors

$$\rho_{\text{temporel}} = \exp\left[-1/2\left(\frac{4\pi}{\lambda}\right)^2 (\sigma_x^2 \sin^2 \theta + \sigma_z^2 \cos^2 \theta)\right] \quad (2.5)$$

Dans le cas d'ERS-1, l'angle d'incidence de 23° implique que les déplacements verticaux contribuent plus à la décorrélation.

Ces contraintes sur la décorrélation des deux échos radar se traduisent principalement par une condition sur la baseline. Cette condition prise en compte, il faut encore que les autres algorithmes, mis en jeu ensuite au cours du traitement interférométrique, puissent fonctionner. Ils imposent donc à leur tour de nouvelles contraintes qui déterminent aussi les conditions de faisabilité de l'interférométrie.

Pour la superposition des deux images, tout d'abord, les défauts ont deux raisons principales :

- la différence de géométrie de prise de vue entre les deux images (cf. erreurs d'attitudes du porteur),
- les distorsions dues au relief.

La première source d'erreurs peut être corrigée en utilisant une modélisation précise de la géométrie des images par la réalisation d'une première estimation du profil du terrain par stéréorestitution. Même peu précise, cette estimation s'avère suffisante pour réaliser une superposition sub-pixelique des images.

2.6 Proportionnalité phase -altitude

Il reste donc essentiellement les erreurs dues au relief dites habituellement de parallaxe. Pour les étudier, il s'est proposé deux approches. L'une est macroscopique et est à l'échelle du pixel. L'autre, microscopique, s'intéresse au nombre de cycles de 2π dans un même pixel.

Pour cela, on commence par calculer la relation entre la variation d'altitude et la variation en distance radiale (voir figure ci-dessous).

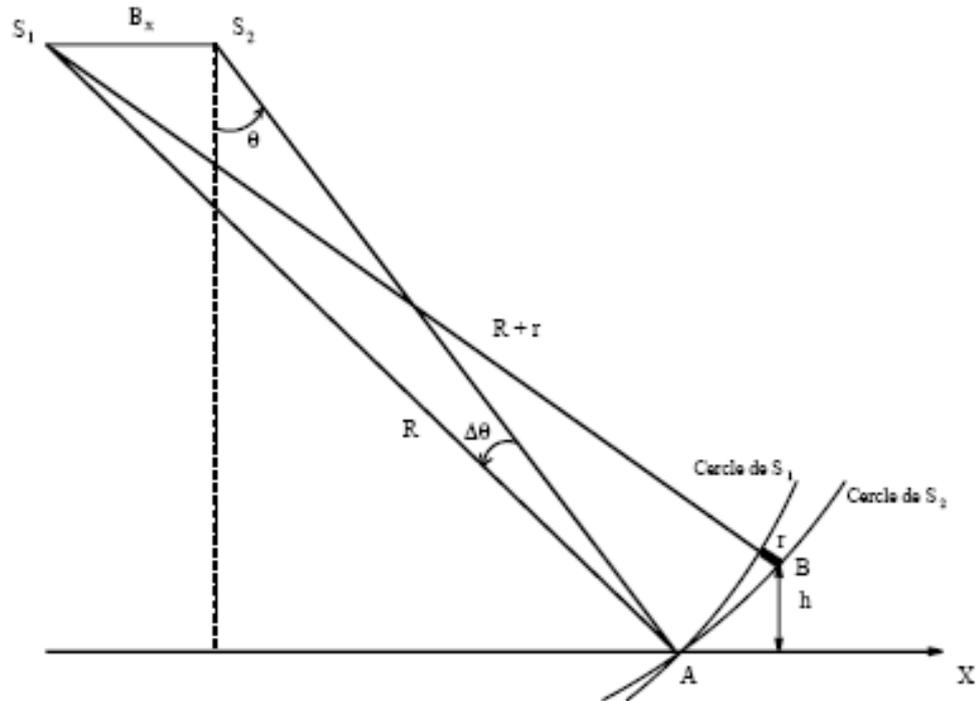


Fig. 2.5 : La variation en distance radiale de l'altitude de relief.

De façon plus claire, si A et B sont des cibles équidistantes du satellite S2, le fait que B soit à une altitude h par rapport à A entraîne que la différence radiale entre A et B est de r pour le satellite S1.

$$h = \frac{rR \tan \theta}{B_x} \quad (2.6)$$

D'autre part la différence de phase due au passage aller-retour de l'onde parcouru la distance différentielle $2r$ est :

$$\Delta \phi = \frac{4\pi}{\lambda} r$$

Ce qui donne une relation interprétante l'altitude h de point B par rapport à A à une phase $\Delta \Phi$:

$$h = \frac{\lambda R \tan \theta}{4\pi B_x} \Delta \phi \quad (2.7)$$

2.6.2 Limites

D'après l'équation 2.6 on définit l'altitude d'ambiguïté qui est la séparation altimétrique entre deux lignes de frange de l'interférogramme due uniquement à l'effet d'altitude (on peut ainsi voir l'interférogramme comme une image de courbes de niveau). Cette altitude, notée h_a , est la variation d'altitude correspondant à $r = \lambda/2$. Elle vaut :

$$h_a = \frac{\lambda R \tan \theta}{2B_x} \quad (2.8)$$

En fait, les effets du relief deviennent limite lorsqu'ils dépassent la taille du pixel.

On peut les quantifier en définissant de même une altitude dite de superposition h_s qui représente la variation d'altitude entraînant une déformation égale à la taille de la cellule de résolution en distance radiale :

$$h_s = \frac{rdR \tan \theta}{B_x} \quad (2.9)$$

Ces deux notions sont liées par un coefficient noté Q :

$$Q = \frac{h_s}{h_a} = \frac{2rd}{\lambda}$$

On peut voir ce coefficient comme la taille du pixel en unité de longueur d'onde. Ce coefficient est fixe, il vaut, par exemple 279.496 pour ERS-1. A l'échelle macroscopique, cela se traduit par un décalage d'un pixel tous les Q pixels ;

On remède à ce problème par le recalage entre les deux prises de vues (voir paragraphe 2.7.1); si on note S la déformation relative qui correspond à un décalage d'un pixel chaque S pixels :

$$S = \frac{R \tan \theta}{B_x \cos \theta}$$

Une contrainte de faisabilité est alors pour $S > Q$. Elle revient à une limite supérieure sur la taille de *baseline* :

$$B_x < R \frac{\tan \theta}{Q \cos \theta} \quad (2.10)$$

Pour ERS-1, on a $R = 800$ km, $\lambda = 5,6$ cm et $\theta = 23^\circ$ qui se traduit par une *baseline* horizontale optimale $B_x = 1300$ m. et une altitude d'ambiguïté $h_a = 7.2$ m. [4]

Une fois définis les contraintes de faisabilité et les paramètres dimensionnant de l'interférométrie, on peut passer à la procédure mise en place pour engendrer l'interférogramme.

2.7 Traitement interférométrique

La déduction de la topographie par l'interférométrie radar nécessite un ensemble de traitements afin d'extraire l'information de l'altitude à partir de la différence de phase des images. Ce traitement interférométrique consiste en un ensemble d'étapes [8] :

- Recalage.
- Génération de l'interférogramme.
- Déroulement de phase.
- Génération du modèle numérique du terrain.

2.7.1 Recalage

On a déjà cité que le principe de l'interférométrie est basé sur l'exploitation de deux images radar. Ces images correspondent à des prises de vue du terrain depuis des positions satellitaires assez proches. Elles sont légèrement déformées l'une par rapport à l'autre. Ceci nécessite un traitement afin de les replacer dans une géométrie commune pour qu'elles soient superposables, de manière à ce que deux pixels identiques dans les deux images représentent un même élément sur le terrain.

L'une des deux images sera appelée "image maîtresse". Par opposition, l'autre image sera prise comme "image esclave". La géométrie de prise de vue de l'image maîtresse sera considérée

comme référence. Le type de traitement géométrique permettant de recalibrer les deux images d'une même scène afin de pouvoir les manipuler dans une même géométrie (géométrie de prise de vue de l'image maîtresse) est appelé coregistration.

La coregistration consiste en la détermination de la position des pixels de l'image esclave considérée comme mobile, en fonction des coordonnées naturelles de l'image maîtresse considérée comme fixe. Cette technique conditionne la qualité des données ainsi que leur interprétation exacte. Elle peut être employée différemment selon la nature des données initiales. Nous citons les deux principales étapes constituant la coregistration :

- La modélisation de la déformation.
- Le rééchantillonnage.

La modélisation de la déformation

Le but de cette étape est de rechercher la transformation géométrique à appliquer à l'image esclave pour la rendre superposable à l'image maîtresse de manière que pour les mêmes coordonnées oblique-azimut, le pixel dans l'une et l'autre image soit associé au même élément de terrain dans la scène observée. Les méthodes les plus classiques sont basées sur des techniques de corrélation. Elles permettent de déterminer les décalages à effectuer en oblique et azimut au niveau des pixels. Ces décalages pouvant varier de plusieurs pixels entre les cibles les plus proches et les plus éloignées, une interpolation de cette fonction de corrélation est nécessaire.

Le principe de base de la corrélation est le suivant :

- On réalise d'abord un calage grossier des deux images par des techniques visuelles ou des techniques de corrélation massive.
- On découpe ensuite l'image en imquettes dont la dimension est de l'ordre de la dizaine de pixels de côté.
- On déplace ces imquettes dans l'image de référence, en distance et en azimut suivant un pas entier.

- On détermine la position donnant de taux de corrélation maximum. On mesure ce taux sur ses 8 points voisins dans la grille de déplacement.
- Enfin, on interpole ces valeurs afin de trouver les coordonnées en fraction de pixel du maximum.

Cette opération étant renouvelée un grand nombre de fois dans l'image, on obtient une grille de déplacement en translation suivant les deux axes entre l'image maîtresse et l'image esclave.

Une fois obtenues ces grilles de déformation, on procède à la modélisation de la déformation.

Le rééchantillonnage

Après avoir connue la déformation qui existe entre l'image maîtresse et l'image esclave, on doit rééchantillonner l'image esclave afin de la rendre superposable à l'image maîtresse.

Le rééchantillonnage peut se faire soit dans le domaine spatial, soit dans le domaine fréquentiel. Dans le domaine spatial, on procède à une interpolation du pixel manquant à partir de ses voisins. Ceci provoque une perte d'une partie de l'information parce qu'on n'utilise pas les propriétés de l'image radar.

Cependant, dans le domaine fréquentiel, on calcule la transformée de Fourier bidimensionnelle de l'image de référence et on la multiplie par une rampe de phase correspondant à la déformation modélisée. On retourne dans le domaine spatial par une transformée de Fourier inverse. Avec cette méthode, il y a moins de perte d'information.

2.7.2 Génération de l'interférogramme

Après avoir rendu les deux images superposables par le traitement de recalage, on procède à la génération de l'interférogramme. Ce dernier est le résultat de la différence de phase de l'image maîtresse et de l'image esclave et se présente sous forme d'image d'interférence, contenant des franges équivalentes à des courbes de niveaux aux différentes valeurs de la différence de phase. La génération de l'interférogramme consiste simplement à multiplier point à point la valeur complexe de chaque pixel de l'image maîtresse par le complexe conjugué de la valeur du pixel correspondant dans l'image esclave.

Si $S_1(R_1)$ est la valeur complexe du point P dans la première image et $S_2(R_2)$ est la valeur complexe du point P dans la deuxième, alors :

$$S_1(R_1) = |S_1(R_1)| e^{-jkR_1} e^{j\psi_1}$$
$$S_2(R_2) = |S_2(R_2)| e^{-jkR_2} e^{j\psi_2}$$

Où $|S(R)|$ est l'amplitude du signal rétrodiffusé dans l'image et KR^* est la phase liée au parcours du signal, c'est à dire, la phase relative au chemin optique parcouru. Ce terme de phase dépend de la distance entre l'antenne et le point observé.

$K = 4\pi/\lambda$ est le nombre d'onde du signal dont les distance sont parcourues deux fois, et ψ^* est la phase propre générée par la réponse de chaque diffuseur au sein du pixel considéré.

L'interférogramme est l'image d'intensité issue de la superposition des deux fronts d'ondes :

$$|S_1 + S_2|^2 = |S_1|^2 + |S_2|^2 + S_1 S_2^* + S_1^* S_2$$

Dans l'expression précédente, seule les termes croisés nous intéressent. En effet, ce sont eux qui portent l'information de phase relative à la différence de chemin optique, donc on obtient un coefficient complexe noté γ :

$$\gamma = p_1(R_1) p_2(R_2)^* = |p_1(R_1) p_2(R_2)| e^{jk(\Delta r)} e^{j(\psi_2 - \psi_1)} \quad (2.11)$$

L'interférogramme (ou image de phase) est la phase du nombre complexe γ , tandis que L'image d'amplitudes constitue son module. L'image des amplitudes qui en général peu diffère de celle des images maîtresse ou esclave, n'a pas une grande utilité. On s'intéresse seulement à l'interférogramme. Ce dernier est un produit brut où on voit bien qu'il constitue une image de courbe de niveaux (figure 2.7)[4]. Alors pour le reconstruire on doit passer à l'étape la plus importante c'est le déroulement de phase.

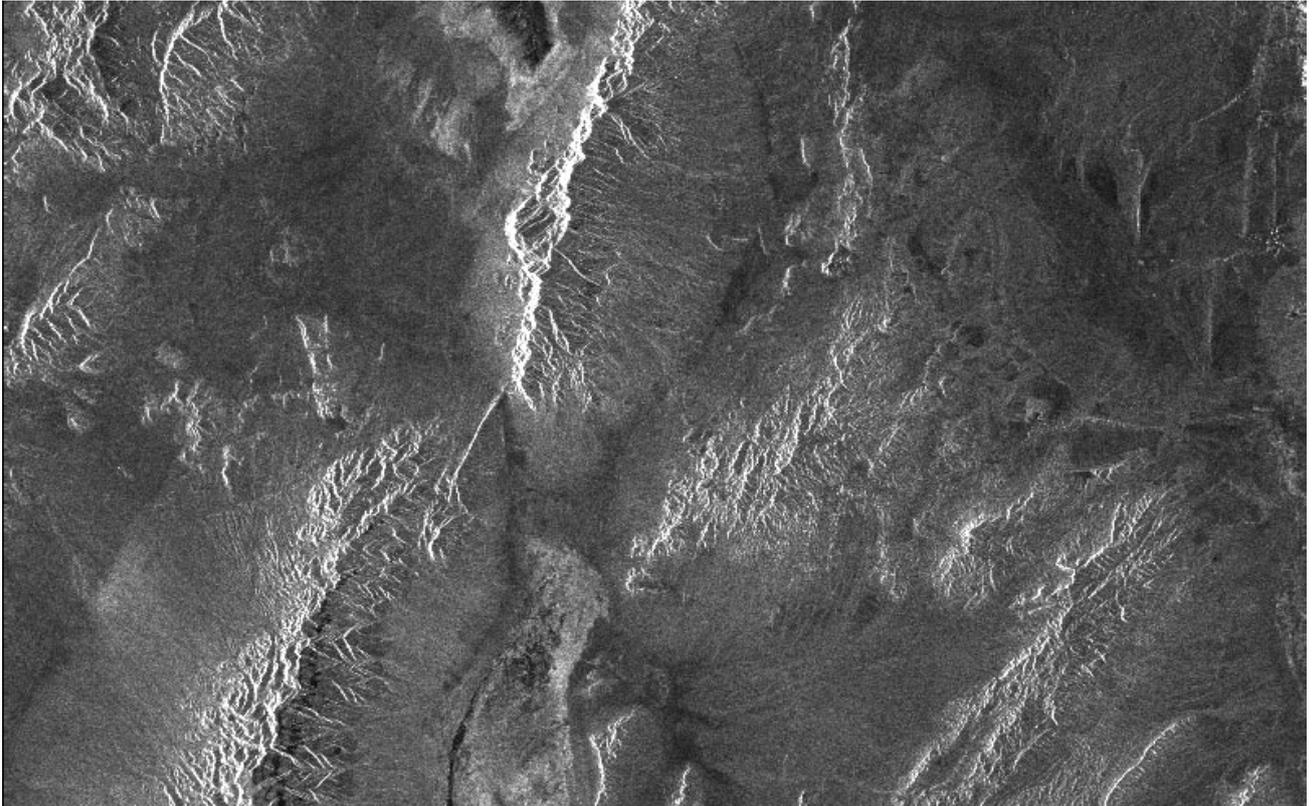


Fig. 2.6 : L'image de module

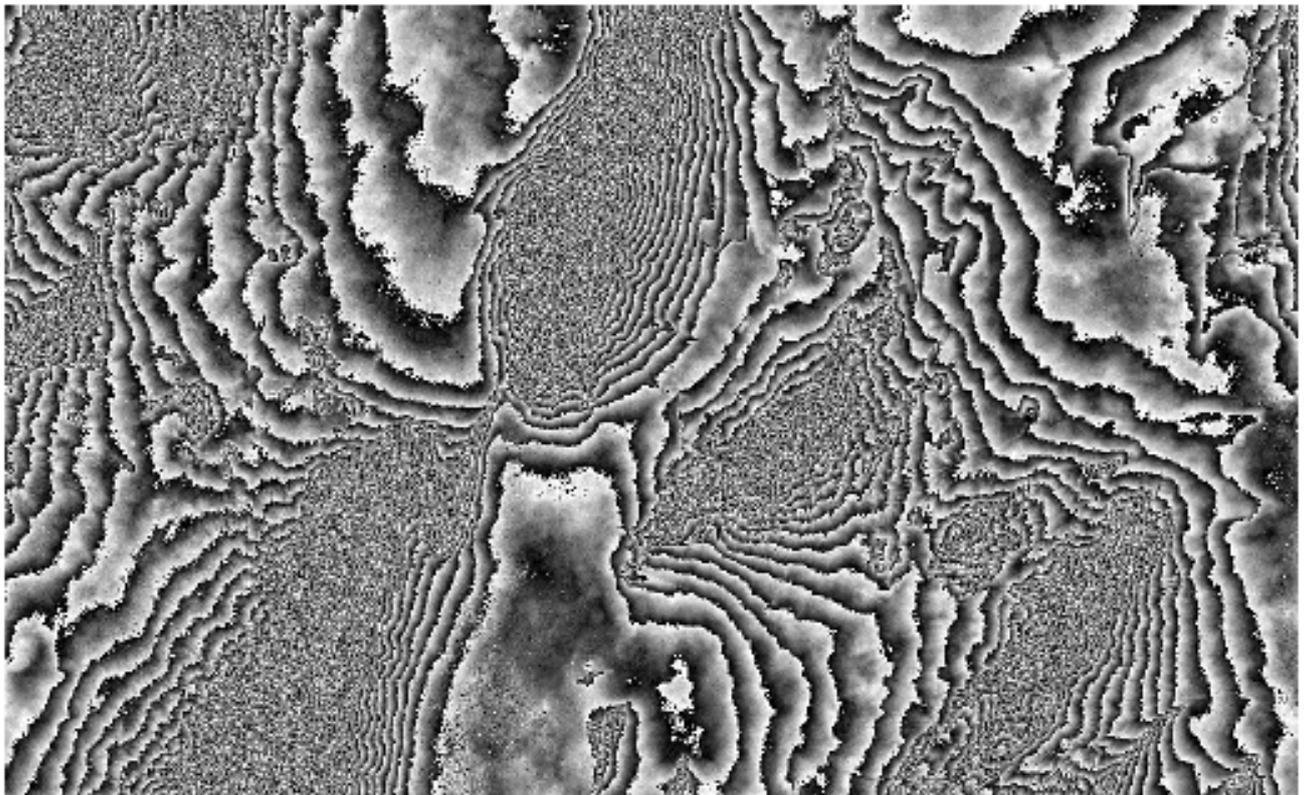


Fig. 2.7 : L'image de phase

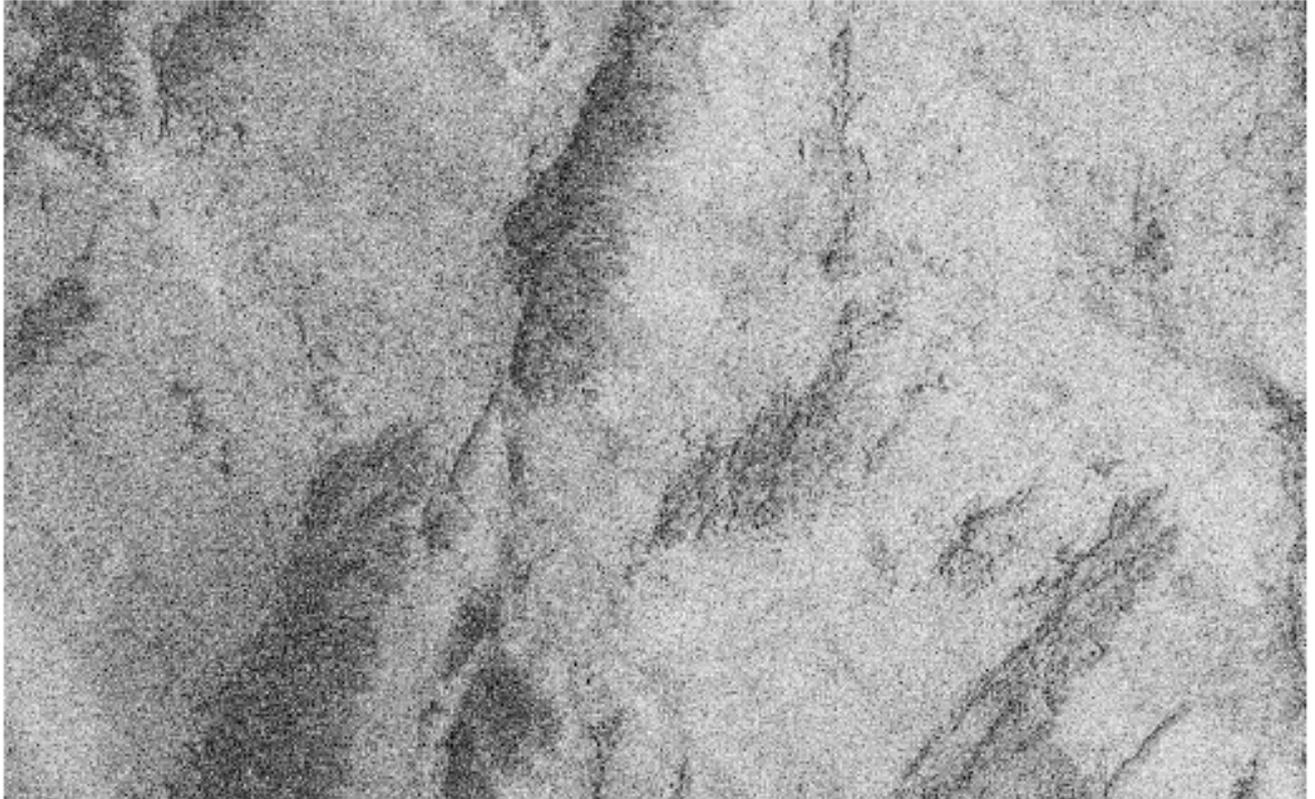


Fig. 2.8 : L'image de cohérence

2.8 Limites de l'interférométrie

La technique interférométrique présente des limitations importantes dans sa mise en oeuvre. Parmi ces limitations on peut citer :

- Le besoin d'une connaissance la plus précise possible du positionnement de la plateforme sur laquelle est embarquée le satellite. Citons en exemple qu'une mauvaise connaissance de la base de prise de vue entraîne une mauvaise estimation de la position du satellite.
- Au niveau de la géométrie, en plus des limitations dues aux distorsions géométriques (recouvrement, ombre, etc...), la distance entre les orbites caractérisée par l'altitude d'ambiguïté, conditionne la précision potentielle pour un couple interférométrique donné.
- La stabilité de l'état du sol joue un rôle important. En effet, le changement de l'état du sol entre les deux prises de vue entraînera une chute de la cohérence. Ceci limite les

possibilités de restitution du relief. Mais ce genre de problème ne s'impose pas dans le mode monopasse

- L'atmosphère peut introduire de grosses erreurs dans la mesure d'altitude faites par l'interférométrie.

2.9 Conclusion

L'interférométrie radar utilise l'information de phase contenue dans les images radar comme moyen de mesure de distance. En analysant des déphasages entre deux images complexes acquises dans des conditions géométriques voisines.

Malheureusement cette information de phase est prise modulo 2π , ça veut dire qu'on ne distingue pas les élévations (altitudes) réelles des reliefs correspondant à des phases ayant le même reste de la division par 2π , pour déterminer cette élévation réelle on fait appel à la technique de déroulement de phase à fin de reconstruire l'image topographique à partir de celle de la phase interférométrique.

Les résultats obtenus ainsi que la méthodologie de travail feront l'objet de notre prochain chapitre.

Chapitre 3

L'approche de déroulement de phase

Chapitre 3 :

L'approche de déroulement de phase

3.1 Problématique

Il existe des nombreuses approches mises en application, tel que l'approche locale, globale et markovienne, toutes ces approches ne résolvent pas les problèmes des ruptures de phase (sauts de phase) qui ne sont pas issues de mesure modulo 2π de la phase, autrement dit ce sont des pixels dont la variation entre ces adjacents supérieure à π dues aux erreurs du système après l'acquisition l'image de phase, ou une erreur de prise de vue (zones d'ombres), ces pixels se traduisent par des points noirs dans l'image dont ces effets se propagent aux autres pixels bien sûr après le déroulement de phase en utilisent l'approche locale ou globale. Notre approche permet de minimiser cette distorsion par conséquent d'avoir le moindre nombre de ces résidus à l'échelle de la taille d'image (le nombre total de pixels), ce qui facilite les opérations de filtrage appliquées dans le domaine de traitement d'image et de la topographie.

3.2 Définition

Pour connaître l'élévation réelle de chaque point, il faut ajouter à la phase mesurée le nombre entier de cycles de phases correct.

En résumé, si la phase mesurée est φ_m , il faut trouver le bon nombre k de cycles, appelé aussi ordre, qui vérifie

$$\varphi_d = \varphi_m + 2\pi k \quad (3.1)$$

Où φ_d est la phase absolue déroulée qui représente, comme on l'a vu précédemment, une proportionnalité avec l'élévation réelle h du point (voir chapitre3 partieI). Dérouler la phase, c'est

donc redistribuer à chaque pixel sa phase absolue. Afin de reconstruire la forme réelle de la surface.

Remarque :

Le déroulement de phase est régi par deux principes implicites:

- la surface doit être relativement régulière,
- la variation absolue de phase entre deux pixels voisins doit être inférieure à π .

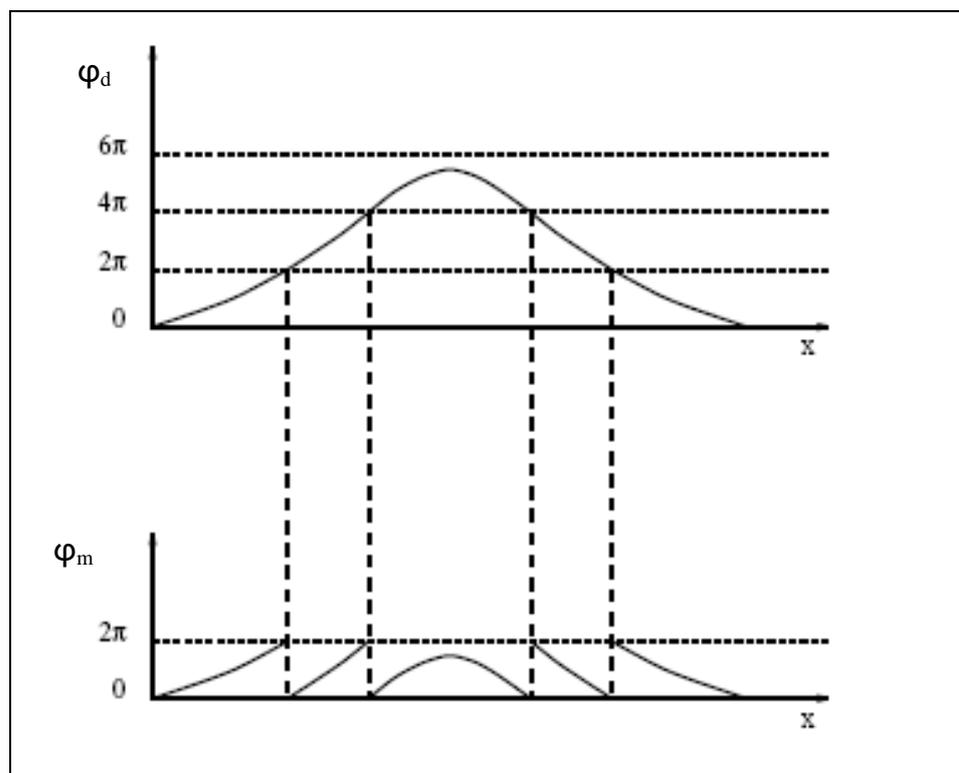


Fig. 3.1 : Le déroulement de phase en une dimension

3.3 L'approche proposée (le traitement unidimensionnel)

On commence dans cette partie par l'explication mathématique et détailler tout d'abord le résultat de **spagnolini** cité dans la littérature [11].

3.3.1 Description mathématique

Soit $f(x)$ une fonction continue pour $x \in D$, où $D = [x_{min}, x_{max}]$ c'est le domaine de définition de $f(x)$.

La continuité de cette fonction désigne qu'il y a une seule valeur y_0 au voisinage de x_0 .

$f(x_0+\varepsilon) \approx f(x_0-\varepsilon) \approx y_0$, pour chaque $x_0 \in D$, d'autre façon l'existence d'une limite de $f(x)$ quand x approche supérieurement et inférieurement à x_0

$$\forall x_0 \in D, \exists y_0 : \lim_{x \rightarrow x_0^-} f(x) = \lim_{x \rightarrow x_0^+} f(x) = y_0 \quad (3.2)$$

On définit maintenant une fonction $f_m(x) = (f(x), \% h)$ qui représente la fonction précédente mais modulo h .

$$\forall x \in D : 0 \leq f_m(x) < h \quad (3.3)$$

Donc :

$$\exists x_d \in D : f(x_d) = k_d h : \lim_{x \rightarrow x_d^-} f_m(x) \approx f(x_d) \quad \text{et} \quad \lim_{x \rightarrow x_d^+} f_m(x) \approx (f(x_d), \% h) \quad (3.4)$$

Où ces deux limites sont liées par la relation suivante :

$$f(x_d) = (f(x_d), \% h) + k_d h = f_m(x_d) + k_d h \quad (3.5)$$

On parle ici d'un ensemble des points $x_d \in S$ où l'opération de modulo h s'applique sur la fonction continue $f(x)$, ce qui la rends discontinue au niveau de ces points.

$$\lim_{x \rightarrow x_d^-} f_m(x) \neq \lim_{x \rightarrow x_d^+} f_m(x); \text{ pour } x_d \in S \quad (3.6)$$

Donc $f_m(x)$ est sous forme d'un ensemble de sous fonctions $f_{md}(x)$ [13] qui est défini

comme :

$$f_m(x) = \sum_{d=1}^{C+1} f_{md}(x); \quad x \in D - S \quad (3.7)$$

$$f_{md}(x) = (f(x), \%h); \quad x \in]x_{d-1}, x_d[; \quad (x_{d-1}, x_d) \in S$$

Où C représente le nombre de points de discontinuité (nombres d'éléments de S)

Remarque :

Si $d=1$, $f_{m1}(x)$ est défini sur l'intervalle $[x_{\min}, x_1[$, de même $f_{mC+1}(x)$ est défini sur $]x_c, x_{\max}]$

Où $(x_{\min}, x_{\max}) \notin S$, ça veut dire qu'ils ne sont pas des points de discontinuité mais ils sont les bornes de l'intervalle D

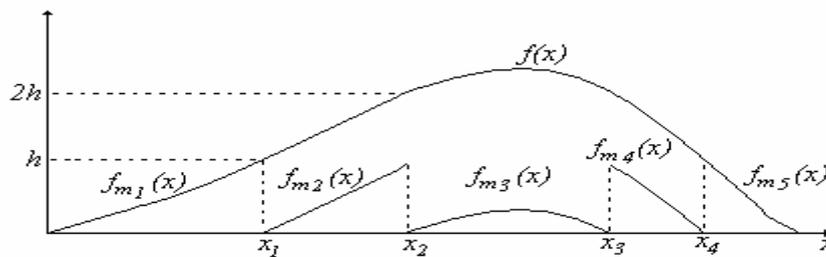


Fig. 3.2 : Les parties (sous fonctions) de $f_m(x)$

3.3.1.1 Que vaut $f(x)$ et $f_m(x)$ au voisinage de x_i ?

Pour mieux comprendre les valeurs pris par $f(x)$ et $f_m(x)$ à $x=x_d$ et également la reconstruction de $f(x)$ à partir de $f_m(x)$, on se met dans le cas de présence d'un seul point de discontinuité x_1 , afin de faciliter la discussion, puis on le généralisera.

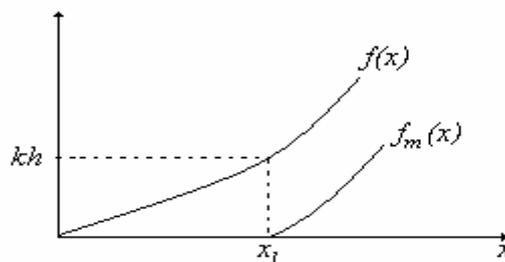


Fig.3.3 : $f_m(x)$ avec un seul point de discontinuité

D'après la continuité de $f(x)$ on a :

$$\lim_{x \rightarrow x_1^-} f(x) = kh - \varepsilon \quad \text{et} \quad \lim_{x \rightarrow x_1^+} f(x) = kh + \varepsilon \quad \Rightarrow \quad kh - \varepsilon \approx kh + \varepsilon$$

Lorsque on applique l'opération de modulo h on obtient :

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow x_1^-} f_m(x) &= (\lim_{x \rightarrow x_1^-} f(x), \% h) = (kh - \varepsilon, \% h) = h - \varepsilon \\ \lim_{x \rightarrow x_1^+} f_m(x) &= (\lim_{x \rightarrow x_1^+} f(x), \% h) = (kh + \varepsilon, \% h) = \varepsilon \end{aligned} \quad h - \varepsilon \gg \varepsilon$$

Alors la fonction $f_m(x)$ est discontinue à x_1 .

Pour déterminer $f(x)$ à partir de $f_m(x)$ on utilise la fonction d'échelon :

$$f(x) = f_m(x) + k h \text{ ech}(x - x_1) \quad (3.8)$$

On voit bien que si on connaît le point de discontinuité x_1 , il nous reste que calculer k pour déterminer $f(x)$, sachant que k vaut +1 ou -1.

La fonction dérivée de l'équation 3.8 est sous forme :

$$\frac{df(x)}{dx} = \frac{df_m(x)}{dx} + kh \delta(x - x_1) \quad (3.9)$$

Où $\delta(x - x_1)$ est l'impulsion de Dirac qui constitue la dérivé de la fonction d'échelon

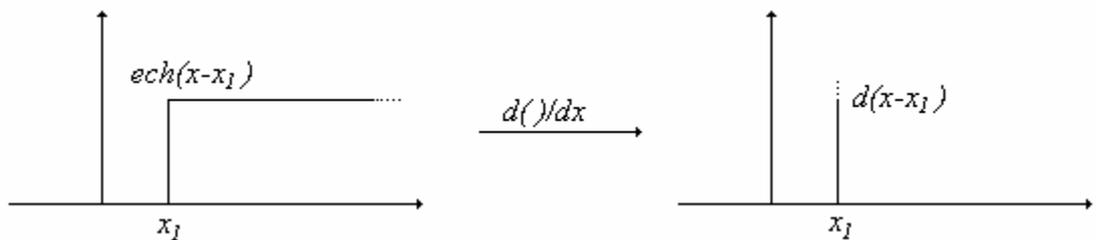


Fig. 3.4 : Fonction d'échelon et de Dirac

Il est évident que la fonction d'origine $f(x)$ au voisinage de x_1 , soit croissante ou décroissante, d'après ceci k prends l'une des ces valeurs selon ces deux cas.

1^{er} cas : $f(x)$ croissante au voisinage de x_1

Si $f(x)$ croissant ($f(x_1-\varepsilon) < f(x_1) < f(x_1+\varepsilon)$), ça veut dire que sa dérivé $\frac{df(x)}{dx}$ est positive sur l'intervalle $[x_1 - \varepsilon, x_1 + \varepsilon]$, par conséquent et selon l'équation 3.9 $\frac{df_m(x)}{dx}$ est aussi positive sur l'intervalle $[x_1 - \varepsilon, x_1[\cup]x_1, x_1 + \varepsilon]$, car elles sont identiques ; excepté le point de discontinuité x_1 correspondent à l'impulsion de Dirac au niveau de ce point.

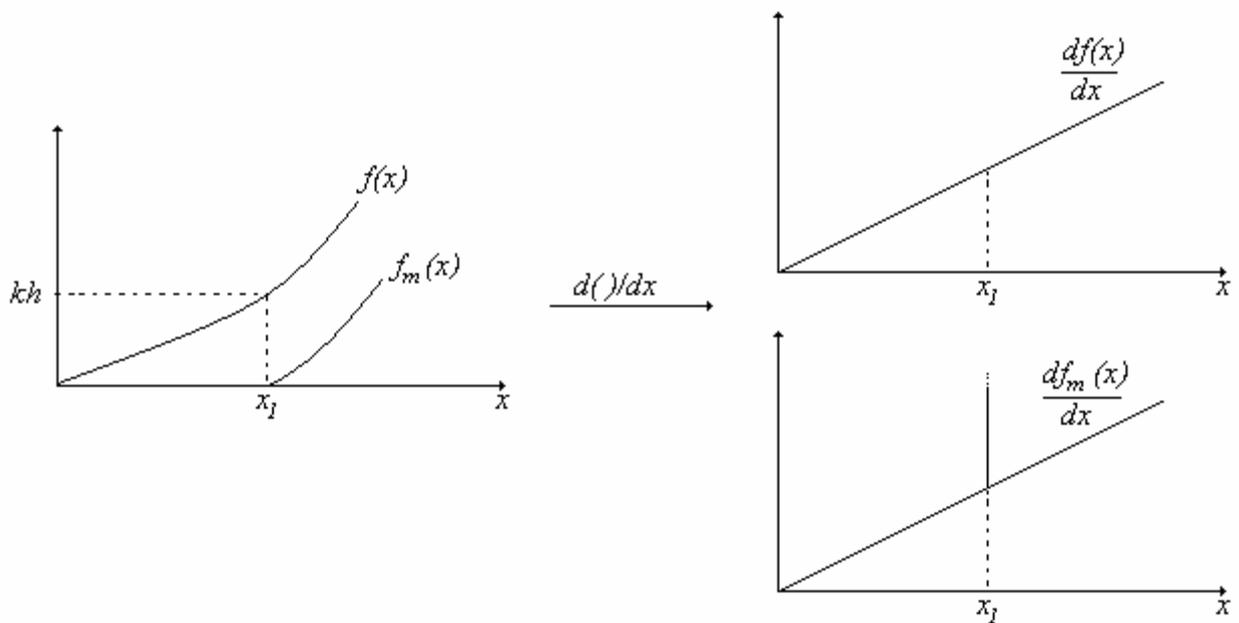


Fig. 3.5 : La dérivé de $f(x)$ et $f_m(x)$ dans le cas de croissance

Alors si :

$$\lim_{x \rightarrow x_1^-} \frac{df_m(x)}{dx} > 0 \quad \text{et} \quad \lim_{x \rightarrow x_1^+} \frac{df_m(x)}{dx} > 0$$

Ça signifier que $f(x)$ est croissante au voisinage de x_1 , donc il faut que :

$$\lim_{x \rightarrow x_1^-} f_m(x) = \lim_{x \rightarrow x_1^+} f_m(x) + h \quad \text{pour que} \quad \lim_{x \rightarrow x_1^-} f(x) = \lim_{x \rightarrow x_1^+} f(x)$$

Autrement dit $k = +1$, ce qui implique :

$$f(x) = f_m(x) + h \text{ ech}(x-x_1)$$

On parle ici de faire continuer la fonction $f(x)$ au point x_1 par l'élévation d'un facteur h de toute la fonction $f_m(x)$ pour $x > x_1$

2^{ème} cas : $f(x)$ décroissante au voisinage de x_1

Si $f(x)$ décroissant ($f(x_1-\varepsilon) > f(x_1) > f(x_1+\varepsilon)$), ça veut dire que sa dérivé $\frac{df(x)}{dx}$ est négative sur

l'intervalle $[x_1 - \varepsilon, x_1 + \varepsilon]$, par conséquent $\frac{df_m(x)}{dx}$ est aussi négative sur l'intervalle

$[x_1 - \varepsilon, x_1[\cup]x_1, x_1 + \varepsilon]$.

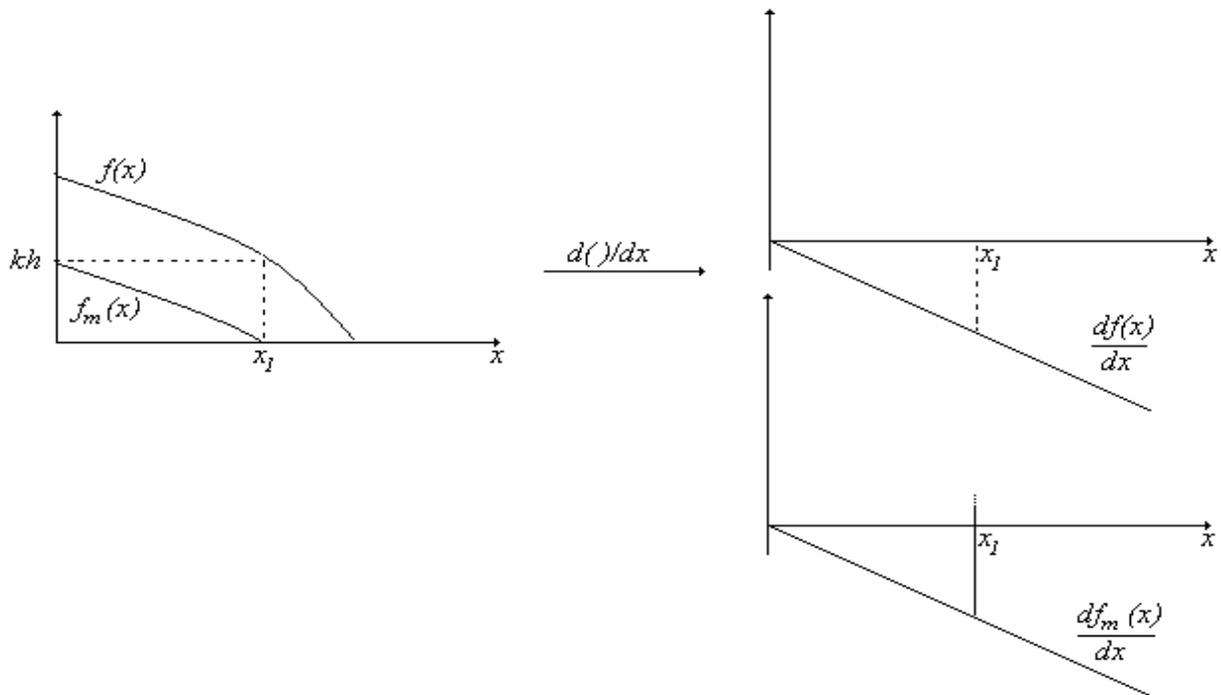


Fig. 3.6 : la dérivé de $f(x)$ et $f_m(x)$ dans le cas de décroissance

Si :

$$\lim_{x \rightarrow x_1^-} \frac{df_m(x)}{dx} < 0 \quad \text{et} \quad \lim_{x \rightarrow x_1^+} \frac{df_m(x)}{dx} < 0$$

Ça signifie que $f(x)$ est décroissante au voisinage de x_1 , donc il faut que :

$$\lim_{x \rightarrow x_1^-} f_m(x) = \lim_{x \rightarrow x_1^+} f_m(x) - h \quad \text{pour que} \quad \lim_{x \rightarrow x_1^-} f(x) = \lim_{x \rightarrow x_1^+} f(x)$$

Autrement dit $k = -1$, $f(x) = f_m(x) - h \text{ ech}(x-x_1)$

Dans ce cas la continuité de $f_m(x)$ se fait par la baisse (soustraction) d'un facteur h de toute la fonction pour $x > x_1$.

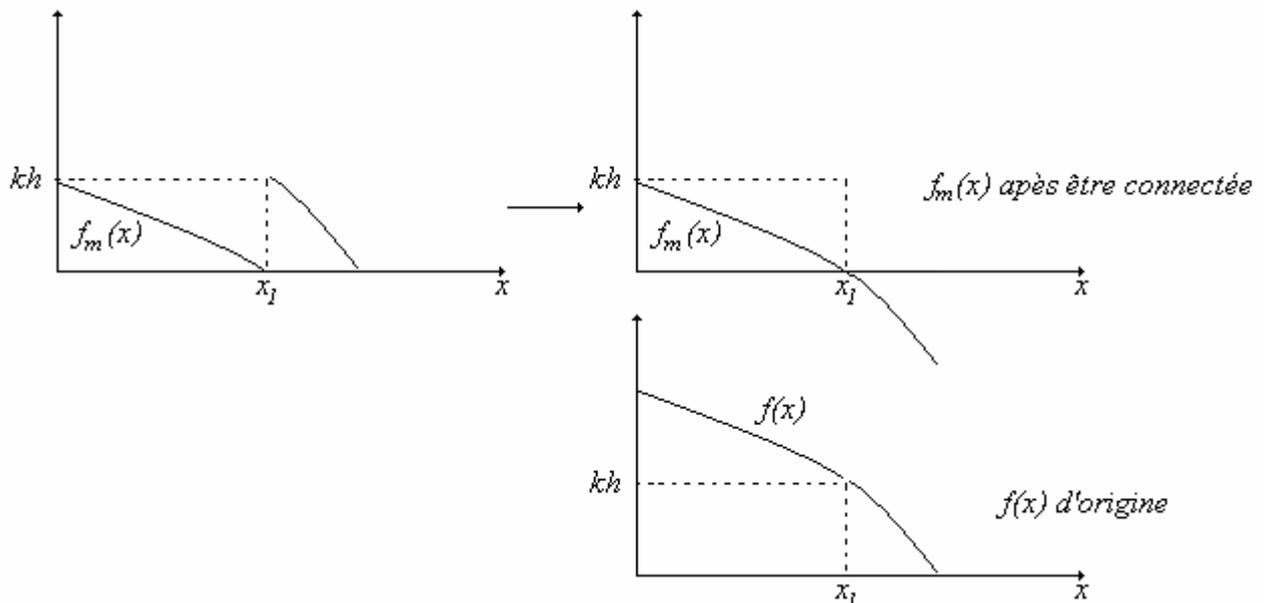


Fig. 3.7 : La différence entre la fonction connectée et celle d'origine

Donc on se trouve dans un problème de décalage globale de h de la fonction calculée par rapport à celle d'origine $f(x)$, ces deux fonctions sont tout à fait distinctes et elles ne sont plus identiques mathématiquement, mais lors de l'application de cette théorie sur l'image RADAR (la fonction ici représente une section de surface), ce problème devient banale, par ce que tous ce qu'il nous intéresse c'est l'allure générale de la fonction et sa forme correspondante à la

topographie de la région à imager, on s'occupe pas à la relativité entre la fonction et les axes de repère.

Malgré ça, on s'empêche pas de résoudre ce problème en mettant une condition pour la première valeur $f(x_{min})$, qui ne doit pas dépasser la valeur d'ambiguïté h en valeur absolue ;
 $|f(x_{min})| < h$

Car c'est à nous de choisir le point de départ de prise de vue et quelque soit la hauteur correspondante à ce point (x_{min}) on le module d'une telle façon qu'il soit inférieur à h relativement au décalage des axes, ça veut dire que ces modification n'atteint pas les variations de la fonction entre-elles au long de $x \in D$, ce qui permet de maintenir la forme de la fonction, sauf son repère qui se change.

Cette condition de la première valeur conduit à que la première sous fonction $f_{m1}(x)$ est aussi inférieure à h en valeur absolue pour tout l'intervalle de x_{min} jusqu'au premier point de discontinuité.

$$\forall x \in [x_{min}, x_1[; |f(x)| < h \Rightarrow |f_{m1}(x)| < h \quad (3.10)$$

D'une manière plus simple, on a toujours une superposition entre $f(x)$ et $f_{m1}(x)$ pour $[x_{min}, x_1[$.

3.3.1.2 Généralisations pour plusieurs points de discontinuité

On suit dans ce paragraphe la même théorie précédente, en prenant un ensemble de point de discontinuité S de c éléments, afin de prendre une vision générale de la reconstruction de $f(x)$ suivant tous les point $x_d \in S$ l'un après l'autre.

La fonction reconstruite $f(x)$ représente elle aussi un ensemble de parties rattachées entre elles comme le cas de $f_m(x)$:

$$f(x) = \sum_{d=1}^{c+1} f_d(x) \quad (3.11)$$

Dont chaque partie (sous fonction) est définit comme ce qui suit :

$$f_d(x) = f_{md}(x) + k_d ech(x - x_d) \quad (3.12)$$

Donc l'équation (3.11) devient :

$$f(x) = \sum_{d=1}^{c+1} f_{md}(x) + h \sum_{d=1}^{c+1} k_d ech(x - x_d) \quad (3.13)$$

En substituant (3.7) dans (3.13), on obtient :

$$f(x) = f_m(x) + h \sum_{d=1}^{c+1} k_d ech(x - x_d); \quad x \in D \quad (3.14)$$

C'est la forme générale de $f(x)$ reconstruite à partir de la fonction discontinue $f_m(x)$ en effectuant pour chaque point x_d la même procédure étudiée dans le paragraphe 3.3.1.1, afin de rendre $f_m(x)$ continue à ce point, en attribuant soit une élévation soit une baisse d'un facteur h non seulement pour $f_{md+1}(x)$ mais pour toutes les parties $\sum_{p=d+1}^{c+1} f_{mp}(x)$, ces parties sont affectées par l'addition ou soustraction $k_d h$ qu'elle subisse $f_{md}(x)$, malgré que la connexité s'est faite seulement entre $f_{md}(x)$ et $f_{md+1}(x)$.

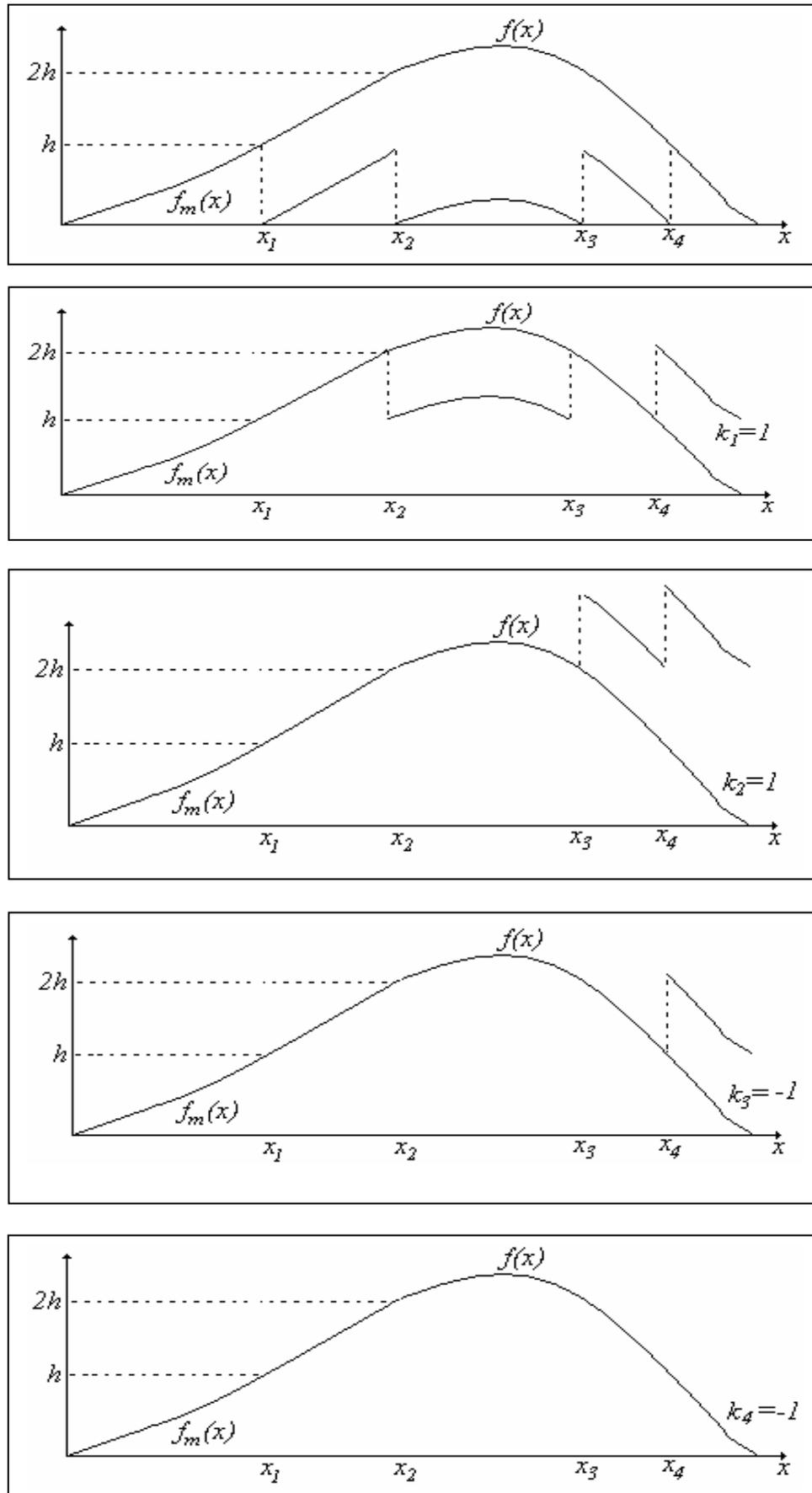


Fig. 3.8 : Reconstruction de $f(x)$ à partir de $f_m(x)$

Généralement les erreurs se produisent lorsque on considère $f_m(x)$ comme étant discontinue à un point continu, ce problème se manifeste dans le domaine discret, car notre fonction est échantillonnée, donc on distingue pas entre les points de discontinuité et ceux d'échantillonnage si on a pas introduit autre processus qu'on discutera dans les prochains paragraphes.

3.3.2 Discrétisation de résultats

Soit $\hat{f}(x)$ la représentation de $f(x)$ dans le domaine discret, on définit tout d'abord une série des impulsions de Dirac régulièrement séparées, elle connue sous le nom peigne de Dirac

$$p(x) = \sum_i^N \delta(x - x_i).$$

Il est bien évident que $f(x)\delta(x - x_i) = f(x_i)$, alors la discrétisation de $f(x)$ se fait par la multiplication par le peigne de Dirac.

$$\hat{f}(x) = f(x) \sum_{i=1}^N \delta(x - x_i) = \sum_{i=1}^N f(x_i) \delta(x - x_i) \quad (3.15)$$

Donc on dit que notre fonction est échantillonnée par un pas $\Delta x = x_{i+1} - x_i$.

La même chose pour la fonction discontinue $f_m(x)$:

$$\hat{f}_m(x) = \sum f_m(x_i) \delta(x - x_i) \quad (3.16)$$

Supposons que $\Delta x =$ la distance minimale entre deux points de discontinuité notés x_d , $x_{d'+1}$, dans ce cas $f_m(x_{i+1}) - f_m(x_i) = 0$ dont $x_d \leq x_i \leq x_{d'+1}$ et $x_{d'+1} \leq x_{i+1} \leq x_{d'+2}$, alors on ne peut plus distinguer la variation entre les deux échantillons $f_m(x_{i+1}), f_m(x_i)$, et par conséquent on ne peut pas déterminer si notre fonction est croissante ou décroissante pour calculer $k_{d'+1}$, donc la discontinuité $x_{d'+1}$ ne se prends pas en compte et la fonction sera considérée comme étant constante sur l'intervalle $[x_i, x_{i+1}]$.

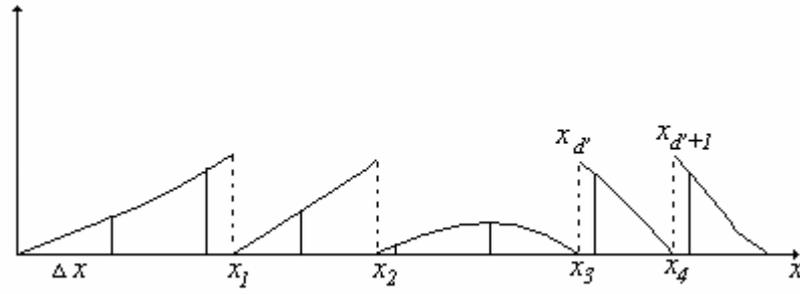


Fig. 3.9 : L'échantillonnage d'une fonction par un pas $\Delta x = x_{d'+1} - x_{d'}$

On pourra dire qu'il faut que :

$$\Delta x \leq \frac{|x_{d'+1} - x_{d'}|}{2} \Rightarrow |x_{d'+1} - x_{d'}| \geq 2\Delta x \quad (3.17)$$

Ce qui met une condition très importante [11] pour $\widehat{f}(x)$, qu'il faut être inférieur ou égale à $h/2$:

$$\forall x_i \in \widehat{D} \quad \Delta \widehat{f}(x) \leq h/2 \quad (3.18)$$

Alors après l'opération modulo h de $\widehat{f}(x)$, s'il y a une variation supérieur à $h/2$ entre deux échantillons quelconques de $\widehat{f}_m(x)$ ça signifie que cette différence est due uniquement à l'opération modulo h de la fonction d'origine, autrement dit il y a un point de discontinuité x_d correspondant à $f(x_d) = kh$.

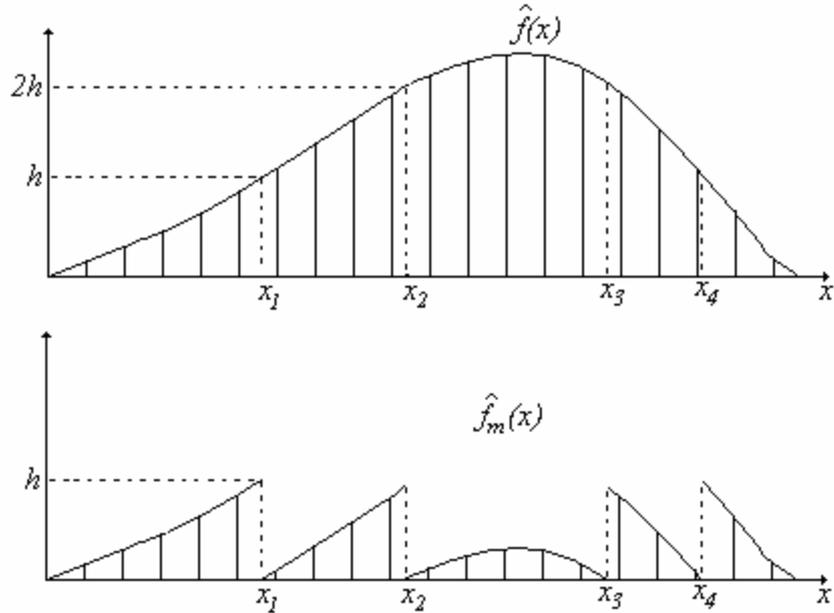


Fig. 3.10 : L'échantillonnage d'une fonction par un pas $\Delta x \leq \frac{|x_{d'+1} - x_{d'}|}{2}$

En substituant l'équation 3.14 dans 3.15 on obtient :

$$\begin{aligned}\widehat{f}(x) &= (f_m(x) + h \sum_{d=1}^{c+1} k_d ech(x - x_d)) \sum_{i=1}^N \delta(x - x_i) \\ \widehat{f}(x) &= f_m(x) \times \sum_{i=1}^N \delta(x - x_i) + h \sum_{d=1}^{c+1} k_d ech(x - x_d) \times \sum_{i=1}^N \delta(x - x_i)\end{aligned}$$

Selon l'équation 3.16 on aura :

$$\widehat{f}(x) = \widehat{f}_m(x) + h \sum_{d=1}^{c+1} k_d ech(x - x_d) \times \sum_{i=1}^N \delta(x - x_i) \quad (3.19)$$

Il nous reste qu'identifier le terme $\sum_{d=1}^{c+1} k_d ech(x - x_d) \times \sum_{i=1}^N \delta(x - x_i)$, qui constitue un échantillonnage d'une somme de fonctions d'échelon comme il est montré dans la figure ci-dessous.

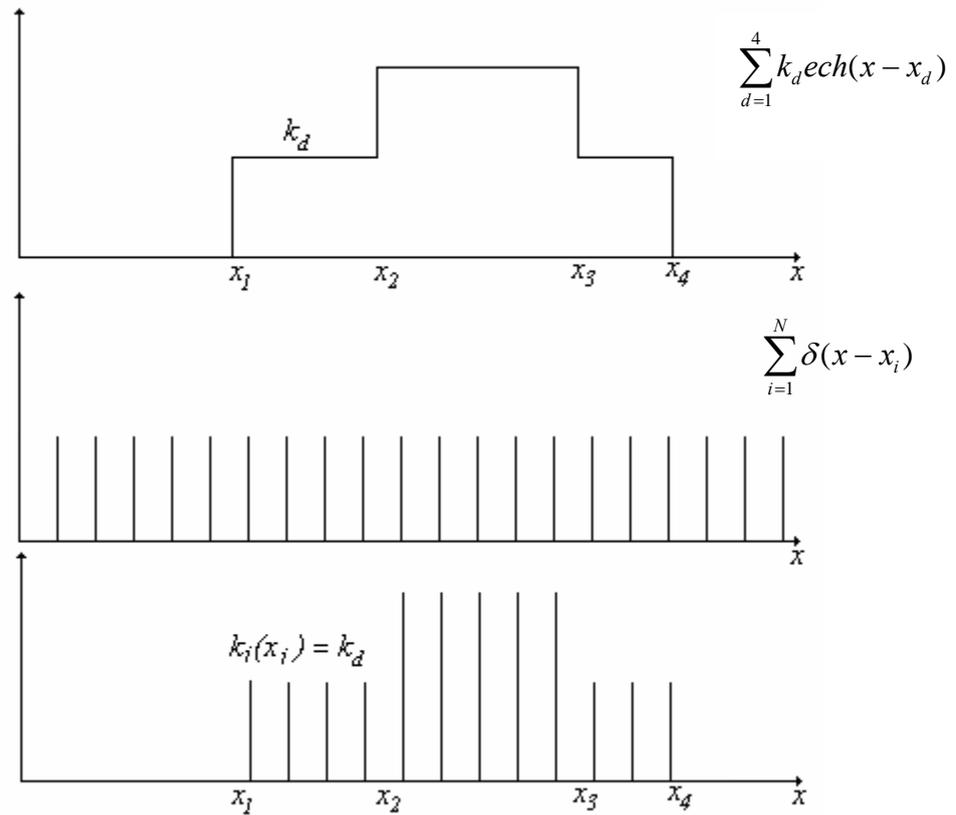


Fig. 3.11 : L'échantillonnage de la somme d'échelons

Ce terme égal à $\sum_{i=1}^N k_d \delta(x - x_i)$ pour $x_d \leq x_i < x_{d+1}$.

Ça veut dire que cette formule prend k_d pour les échantillons situés entre les deux points de discontinuité x_d et x_{d+1} , et elle prend k_{d+1} pour les échantillons entre x_{d+1} et x_{d+2} .

L'équation 3.19 devient :

$$\hat{f}(x) = \hat{f}_m(x) + h \sum_{i=1}^N k_d \delta(x - x_i) \quad \text{pour } x_d \leq x_i < x_{d+1} \quad (3.20)$$

Pour des raison d'unifier les indices (d , i), on peut définir un autre paramètre $k(x_i)$ qui se présente sous forme d'une somme de $k_i(x_i)$ tel que :

$$k(x_i) = \sum_{\alpha=1}^i k_\alpha(x_\alpha) \quad (3.21)$$

Comme on a dit précédemment on distingue pas les point de discontinuité que par les variations qui sont supérieur à $h/2$, donc on peut dire que :

$$\begin{cases} k_i(x_i) = k_d & \text{si } |\widehat{f}_m(x_i) - \widehat{f}_m(x_{i-1})| > h/2 \\ k_i(x_i) = 0 & \text{si } |\widehat{f}_m(x_i) - \widehat{f}_m(x_{i-1})| \leq h/2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} k_d = +1 & \text{si la fonction croissante} \Rightarrow \widehat{f}(x_{i-1}) < \widehat{f}(x_i) \Rightarrow \widehat{f}_m(x_{i-1}) > \widehat{f}_m(x_i) \\ k_d = -1 & \text{si la fonction décroissante} \Rightarrow \widehat{f}(x_{i-1}) > \widehat{f}(x_i) \Rightarrow \widehat{f}_m(x_{i-1}) < \widehat{f}_m(x_i) \end{cases}$$

En utilisant (3.21) alors l'équation (3.20) devient :

$$\widehat{f}(x) = \widehat{f}_m(x) + h \sum_{i=1}^N \left(\sum_{\alpha=1}^i k_\alpha(x_\alpha) \right) \delta(x - x_i) \quad (3.22)$$

C'est notre résultat final pour reconstruire une fonction à partir de celle de sa mesure modulo h dans le domaine discret, dont chaque échantillon de la fonction reconstruite est lié avec celui de la fonction modulo h par la relation suivante, en remplaçant x par x_i correspondant à l'échantillon dans (3.22).

$$f(x_i) = f_m(x_i) + hk(x_i) \quad (3.23)$$

3.3.3 Application sur l'image de phase 1D

On note par $\varphi_m(x_i)$ la phase mesurée par le traitement interférogramme pour chaque pixel x_i (la phase modulo 2π) dans le domaine discret où $1 \leq i \leq N$; N étant le nombre d'échantillonnage ; et $\varphi_d(x_i)$ la phase estimée par le traitement de déroulement de phase (la phase déroulée). Conformément à l'équation (3.23) on a :

$$\varphi_d(x_i) = \varphi_m(x_i) + 2\pi k(x_i)$$

C'est l'attribution à chaque vecteur φ_m un vecteur de nombre de cycle propre $k(x_i)$

$$k(x_i) = \begin{cases} \sum_{\alpha=1}^i k_\alpha(x_\alpha); & 1 < i \leq N \\ 0; & i = 1 \end{cases} \quad (3.24)$$

On définit la fonction $k_i(x_i)$ pour chaque $x_i \neq x_l$, par :

$$k_i(x_i) = \begin{cases} 0 & , |\varphi_m(x_i) - \varphi_m(x_{i-1})| \leq \pi \\ 1 & , |\varphi_m(x_i) - \varphi_m(x_{i-1})| > \pi \text{ et } \varphi_m(x_{i-1}) > \varphi_m(x_i) \\ -1 & , |\varphi_m(x_i) - \varphi_m(x_{i-1})| > \pi \text{ et } \varphi_m(x_{i-1}) < \varphi_m(x_i) \end{cases} \quad (3.25)$$

Alors chaque pixel x_i est attribué un nombre de cycle propre (appelé aussi ordre) qui représente un ajustement avec le pixel adjacent x_{i+1} et les nombres de cycles de tous les pixels qui lui précèdent.

On interprète cet algorithme par l'organigramme ci-dessous :

3.3.4 Les résultats obtenus

Après avoir calculé le déroulement de phase pour un vecteur de 128 éléments qui représente une section d'une surface on obtient :

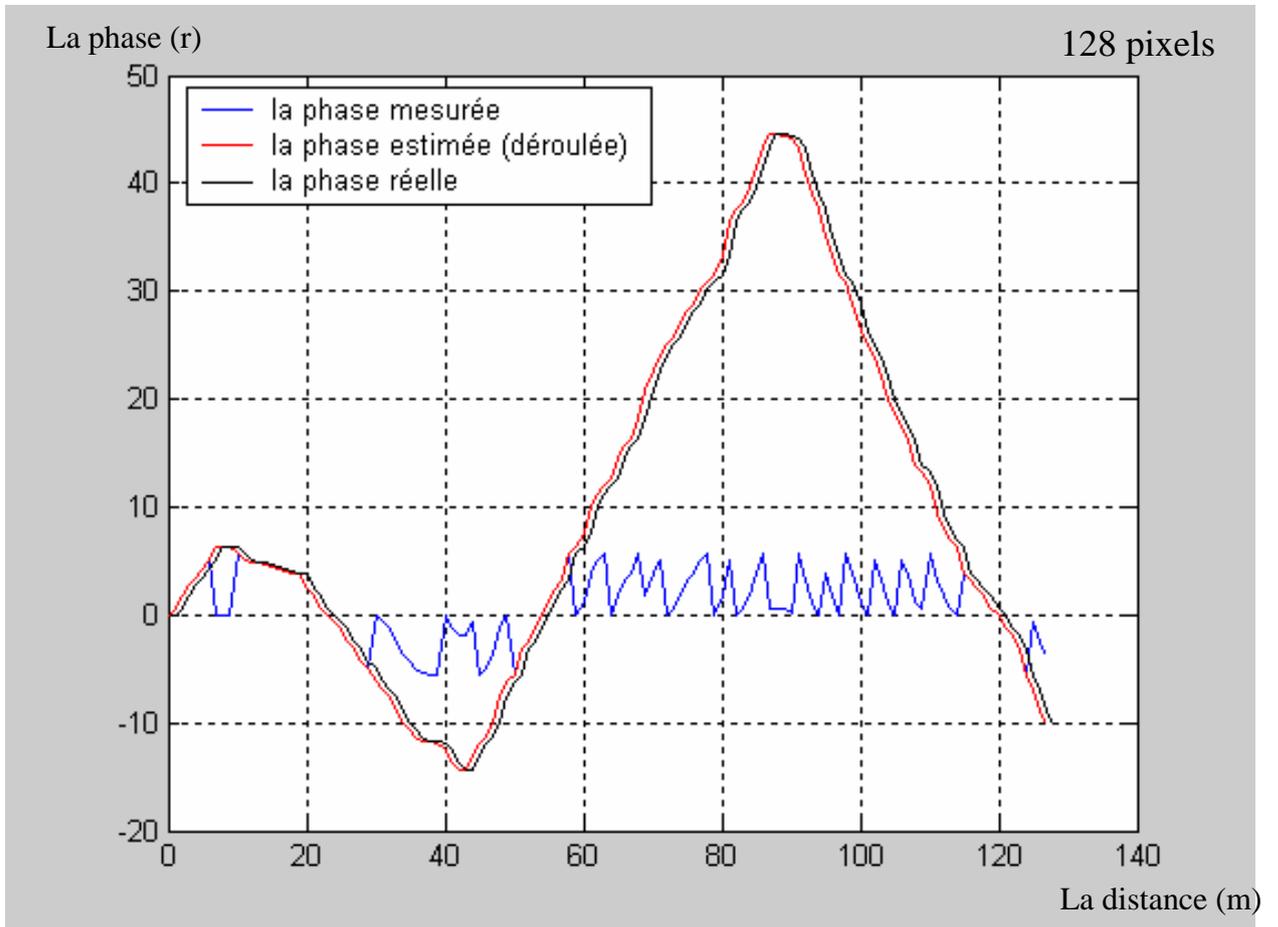


Fig. 3.13 : Traitement unidimensionnel pour une section de la surface

D'après la figure 3.13 qui représente une ligne ou colonne d'image, on remarque que la courbe de φ_d proche de celle de $\varphi_{réelle}$ parce que toutes les variations entre les pixels sont inférieures ou égales à π , la principale condition de faisabilité de déroulement de phase est satisfaite (voir paragraphe 3.3.2).

Mais dans le cas des variations supérieures à π , nous aurons une erreur qui se propage au long de la courbe.

Comme il est montré dans la figure (3.14), cette erreur est causée par la région sélectionnée en vert correspondante à une variation qui dépasse π , et pendant le traitement de

déroulement, cette région est considérée comme une frange d'image due au mesure modulo 2π de la phase réelle, ce qui se traduit par une élévation ou une baisse de toutes les phases correspondantes aux pixels situés après cette région.

Pour remédier à ce problème, l'une des méthodes proposée d'augmenter le rythme d'échantillonnage, ou d'autre façon il faut avoir une résolution plus fine notamment pour les surfaces les plus rugueuses, comme il est montré dans la figure (3.15), on voit bien que le problème de distorsion disparaît pour un échantillonnage plus grand (256 pixels au lieu 128 de la figure 3.14), et dans ce cas la courbe de la phase réelle et celle estimée sont mieux superposables.

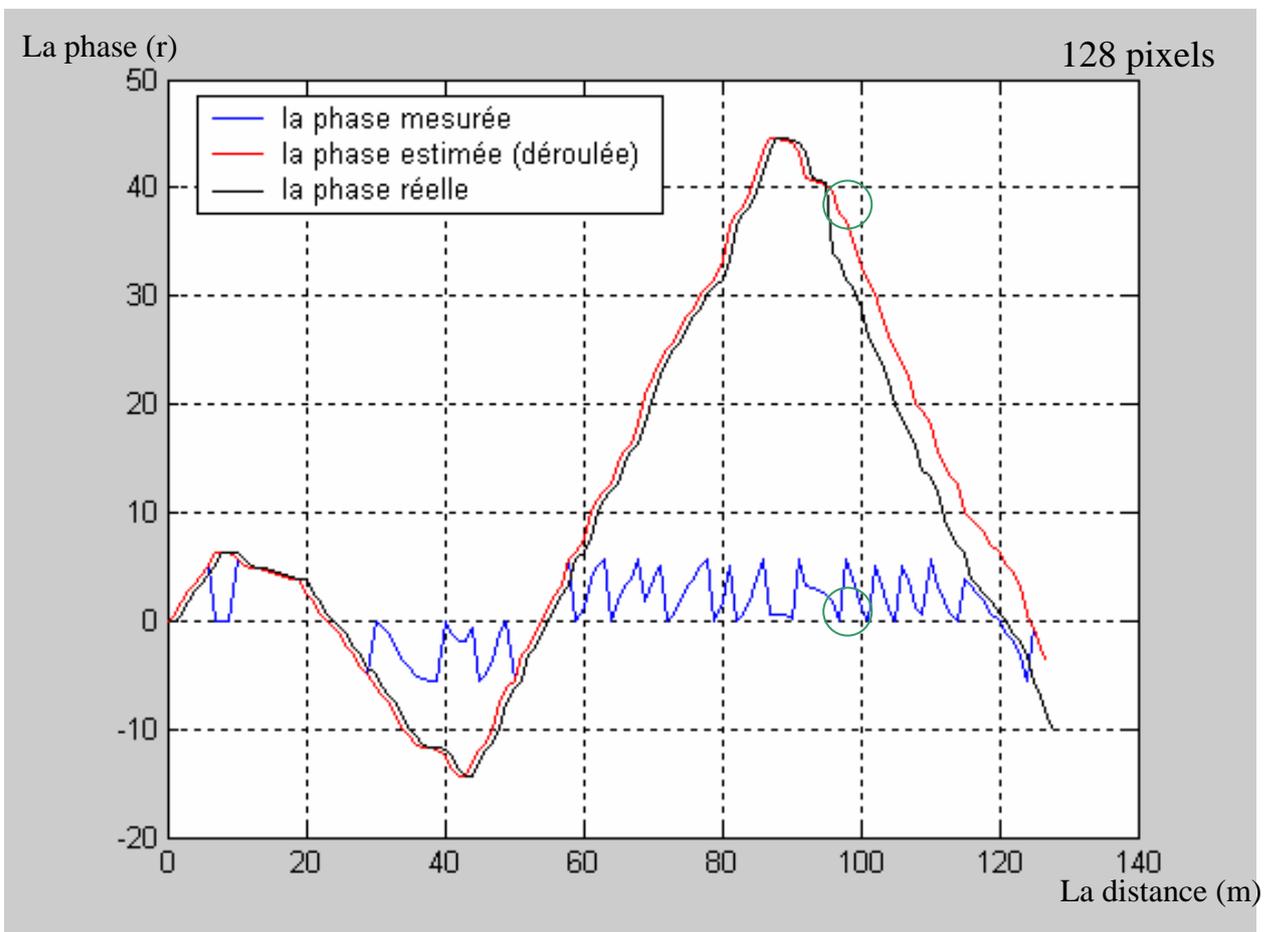


Fig. 3.14 : Une section de surface avec un échantillonnage de 128 pixels

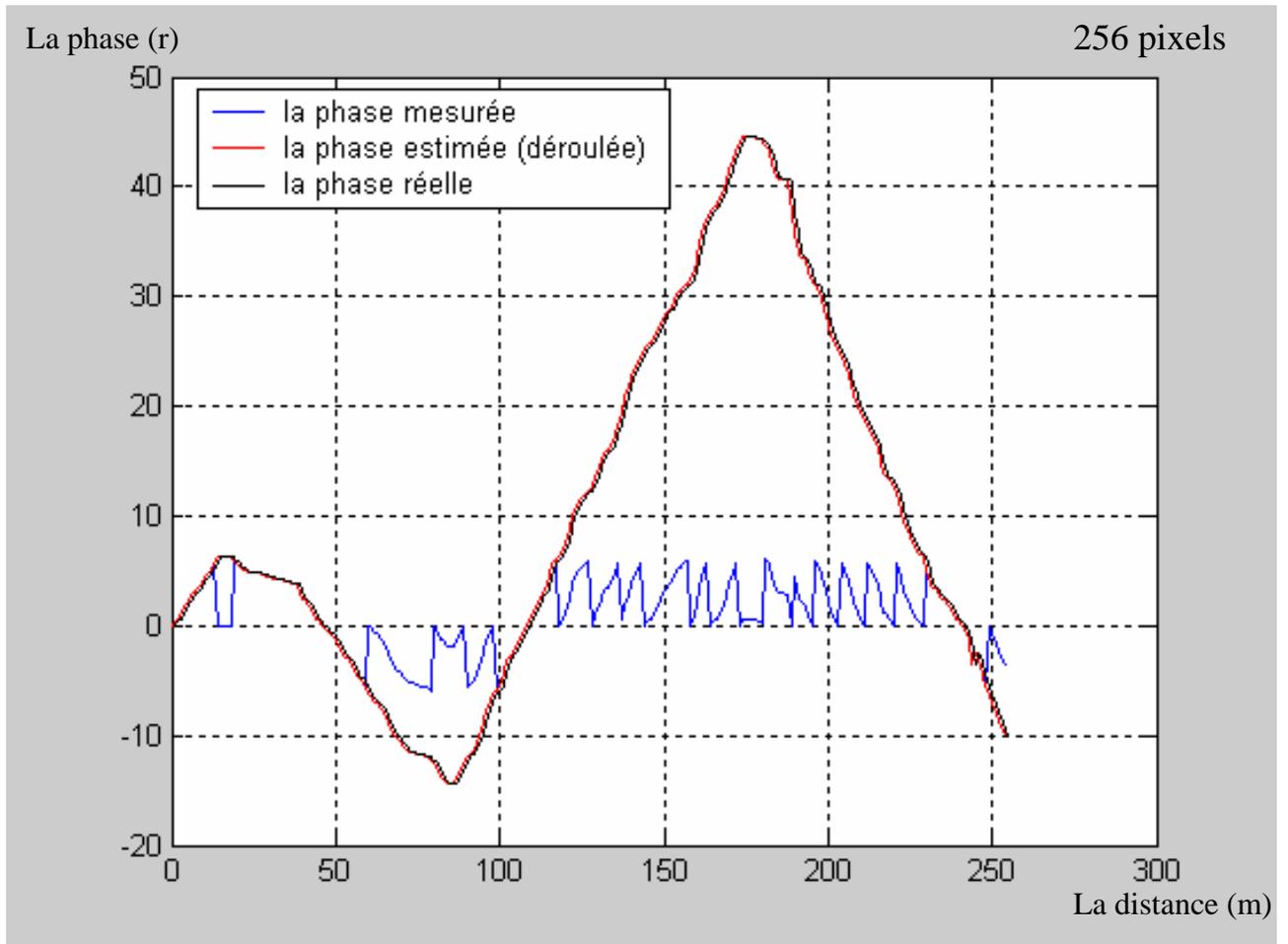


Fig. 3.15 : Une section de surface avec un échantillonnage de 256 pixels

3.4 Le traitement bidimensionnel

3.4.1 Description mathématique

Soit $f(x,y)$ une fonction continue définie pour $x \in D_x$ et $y \in D_y$, D_x , D_y respectivement est le domaine de définition de la variable x , y .

Et $f_m(x,y)$ sa correspondante modulo h définie pour $x \in D_x - S_x$ et $y \in D_y - S_y$, où S_x , S_y respectivement l'ensemble de points de discontinuité dus à l'opération modulo h selon x , selon y .

$$f_m(x,y) = (f(x,y) \% h)$$

$$(x_{d'}, y_{d''}) = \{x_{d'} \in D_x \quad y_{d''} \in D_y : f(x_{d'}, y_{d''}) = kh\} \quad k \in \mathbb{N}$$

Ces point de discontinuité forment des contour de la surface du quel il est issu le nom frange d'image.

Pour mettre une relation entre $f(x,y)$ et $f_m(x,y)$ on définit une fonction d'échelon bidimensionnelle comme ce qui suit :

$$.ech(x - x_{d'}, y - y_{d''}) = \begin{cases} 1, & x \geq x_{d'} \text{ et } y \geq y_{d''} \\ 0, & x < x_{d'} \text{ ou } y < y_{d''} \end{cases}$$

Et également la fonction de Dirac bidimensionnelle est :

$$\delta(x - x_{d'}, y - y_{d''}) = \begin{cases} 1, & (x, y) = (x_{d'}, y_{d''}) \\ 0, & \text{ailleurs} \end{cases}$$

Comme on a expliqué dans l'étude unidimensionnelle la formule permettant de reconstruire $f(x,y)$ à partir de $f_m(x,y)$ est obtenue à l'aide d'une somme de fonctions d'échelons qui détermine l'élévation ou la baisse d'un facteur $k_d h = (k_{d'} + k_{d''})h$ de $f_m(x,y)$ pour $x \geq x_{d'}$ et $y \geq y_{d''}$

$$f(x, y) = f_m(x, y) + h \sum_{d'} \sum_{d''} (k_{d'} + k_{d''}) ech(x - x_{d'}, y - y_{d''}) \quad (3.26)$$

Où $k_{d'}$ et $k_{d''}$ sont calculés de la même façon dans le paragraphe 3.3.1.1, dont $k_{d'}$ désigne la discontinuité au voisinage de $x_{d'}$ ($x_{d'} - \varepsilon < x < x_{d'} + \varepsilon$) et $k_{d''}$ désigne l'étude de discontinuité pour ($y_{d''} - \varepsilon < y < y_{d''} + \varepsilon$)

La discrétisation :

La discrétisation de l'équation 3.26 se fait par la multiplication par un peigne de Dirac bidimensionnel de $N \times M$ échantillons, sans oublier bien sûr la condition d'échantillonnage.

$$\begin{cases} \Delta x \leq \frac{|x_{d'+1} - x_{d'}|_{\min}}{2} \\ \Delta y \leq \frac{|y_{d''+1} - y_{d''}|_{\min}}{2} \end{cases}$$

Donc l'équation 3.26 devient :

$$f(x, y) \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \delta(x - x_i, y - y_j) = (f_m(x, y) + h \sum_{d'} \sum_{d''} (k_{d'} + k_{d''}) ech(x - x_{d'}, y - y_{d''})) \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \delta(x - x_i, y - y_j)$$

$$\widehat{f}(x, y) = \widehat{f}_m(x, y) + h \sum_{d'} \sum_{d''} (k_{d'} + k_{d''}) ech(x - x_{d'}, y - y_{d''}) \times \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \delta(x - x_i, y - y_j)$$

$$\widehat{f}(x, y) = \widehat{f}_m(x, y) + h \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (k^l(x_i) + k^c(y_j)) \delta(x - x_i, y - y_j)$$

Où :

$$k^l(x_i) = \sum_{\alpha=1}^i k_{\alpha}^l(x_{\alpha})$$

$$k^c(y_j) = \sum_{\beta=1}^j k_{\beta}^c(y_{\beta})$$

Si on met $k(x_i, y_j) = k^l(x_i) + k^c(y_j)$ on obtient :

$$\widehat{f}(x, y) = \widehat{f}_m(x, y) + h \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M k(x_i, y_j) \delta(x - x_i, y - y_j) \quad (3.27)$$

Ceci constitue la formule générale de la reconstruction dont pour chaque échantillon (x_i, y_j) on a :

$$\widehat{f}(x_i, y_j) = \widehat{f}_m(x_i, y_j) + hk(x_i, y_j) \quad (3.28)$$

3.4.2 Application sur l'image de phase

Comme nous avons expliqué dans le paragraphe précédent, c'est presque la même étude suivie en généralisant notre algorithme pour des données bidimensionnelles, ce qui génère une topographie de 3D de la surface observée, mais cette fois on s'occupe de problème de résidus (les sauts de phase).

Pour ceci, l'idée de base est de faire deux sens de parcours de traitement de déroulement de phase (Fig. 3.16), puis on effectue une opération de comparaison entre ces deux images

produites selon le nombre de ruptures de graphe engendrées par la propagation de l'effet du pixels résidus et leurs positions dans l'image, afin d'éviter l'image la plus distortue.

Il est évident que pour les surfaces régulières (moins rugueuses à l'échelle de la longueur d'onde), les deux images de mode1 et mode2 sont identiques, alors le problème de choix ne s'impose pas dans ce cas.

Tout d'abord on note $x_i; 1 \leq i \leq N, y_j; 1 \leq j \leq M$, respectivement les lignes et les colonnes correspondantes à la surface observée, on note aussi $\varphi_m(x,y)$ la phase mesurée, $\varphi_d(x,y)$ la phase déroulée et $k(x,y)$ la matrice d'attribution correspondante.

$$\varphi_d(x_i, y_j) = \varphi_m(x_i, y_j) + 2\pi k(x_i, y_j)$$

L'approche bidimensionnelle consiste à effectuer la procédure de déroulement de phase sélectionnée dans l'organigramme de traitement unidimensionnel (Fig. 3.12) entre les pixels (i, j) , $(i+1, j)$ et $(i, j+1)$.

Donc la matrice d'attribution est de la forme :

$$k(x_i, y_j) = \begin{cases} \sum_{\alpha=1}^i k_{\alpha}^c(x_{\alpha}, y_j) + \sum_{\beta=1}^j k_{\beta}^l(x_i, y_{\beta}); & 1 < i \leq N \text{ et } 1 < j \leq M \\ 0; & i = 1 \text{ et } j = 1 \end{cases}$$

Où :

$$k_i^c(x_i, y_j) = \begin{cases} 0 & , \left| \varphi_m(x_i, y_j) - \varphi_m(x_{i-1}, y_j) \right| \leq \pi \\ 1 & , \left| \varphi_m(x_i, y_j) - \varphi_m(x_{i-1}, y_j) \right| > \pi \text{ et } \varphi_m(x_{i-1}, y_j) > \varphi_m(x_i, y_j) \\ -1 & , \left| \varphi_m(x_i, y_j) - \varphi_m(x_{i-1}, y_j) \right| > \pi \text{ et } \varphi_m(x_{i-1}, y_j) < \varphi_m(x_i, y_j) \end{cases}$$

$$k_j^l(x_i, y_j) = \begin{cases} 0 & , |\varphi_m(x_i, y_j) - \varphi_m(x_i, y_{j-1})| \leq \pi \\ 1 & , |\varphi_m(x_i, y_j) - \varphi_m(x_i, y_{j-1})| > \pi \text{ et } \varphi_m(x_i, y_{j-1}) > \varphi_m(x_i, y_j) \\ -1 & , |\varphi_m(x_i, y_j) - \varphi_m(x_i, y_{j-1})| > \pi \text{ et } \varphi_m(x_i, y_{j-1}) < \varphi_m(x_i, y_j) \end{cases}$$

Après avoir effectué la procédure interpixel (i, j) , $(i+1, j)$ et $(i, j+1)$, on a deux sens de parcours, soit on passe au pixel $(i+1, j)$ et on ré effectue la procédure avec $(i+2, j)$ et $(i+1, j+1)$, en notant ceci par le mode1 (suivant les colonnes), soit on passe au pixel $(i, j+1)$ avec $(i, j+2)$ et $(i+1, j+1)$, ce dernier est noté par le mode2 (suivant les lignes).

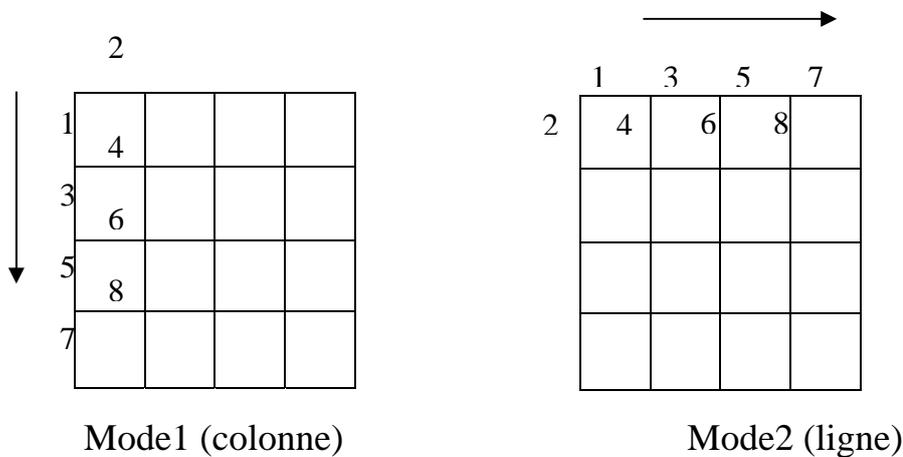


Fig. 3.16 : Les deux sens de parcours

La différence entre ces deux modes apparaît dans le cas de présence des pixels bruités (saut de phase), comme on a vue précédemment l'effet de ces points se propage au long de la direction de traitement de déroulement.

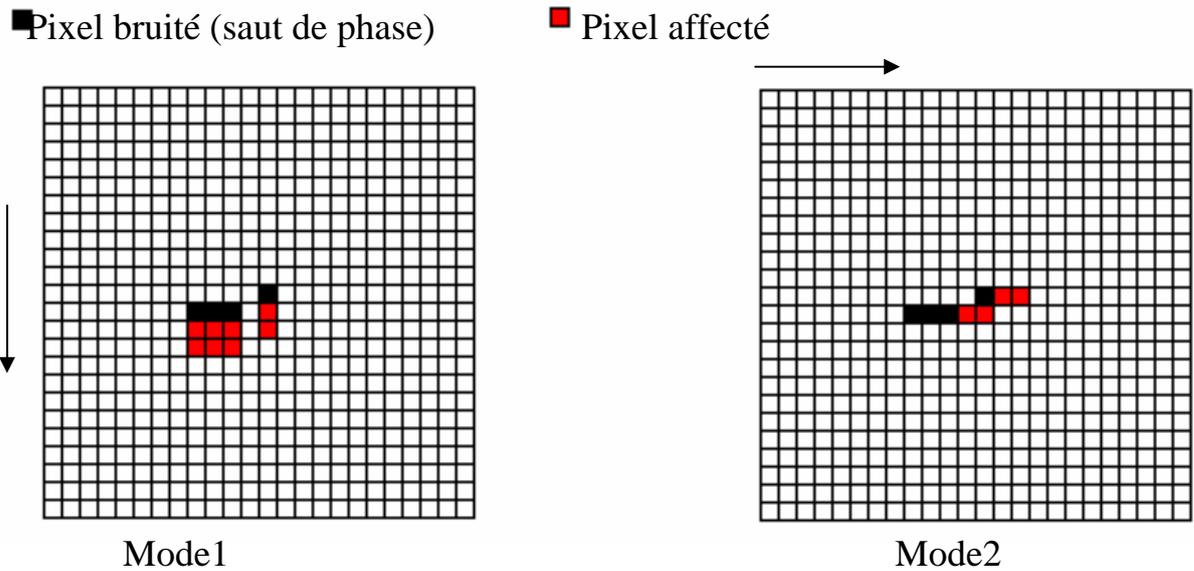


Fig. 3.17 : Différence entre les deux modes à l'égard des pixels affectés

On voit bien que la densité des pixels affectés pour les deux modes n'est pas la même.

Cette dernière varie en fonction de localisation de pixels de saut de phase dans l'image et le parcours suivi, donc le bon choix de mode de traitement constitue une étape très importante pour notre approche.

3.4.3 Procédure de comparaison

La comparaison se fait selon les ruptures de graphe (saut de phase) de l'image de mode1 représentée par la matrice F_1 et l'image mode2 représentée par F_2 , alors on définit pour chaque image une matrice dérivative partiel discrète $\Delta_c F_1$ (selon les colonnes) et une autre $\Delta_l F_1$ (selon les lignes), de même $\Delta_c F_2$ et $\Delta_l F_2$.

Ces fonctions discrètes sont sous la forme suivante [12] :

$$\begin{aligned}
 \Delta_c F_1(x_i, y_j) &= F_1(x_{i+1}, y_j) - F_1(x_i, y_j); & 1 \leq i \leq N-1 \text{ et } 1 \leq j \leq M \\
 \Delta_l F_1(x_i, y_j) &= F_1(x_i, y_{j+1}) - F_1(x_i, y_j); & 1 \leq i \leq N \text{ et } 1 \leq j \leq M-1
 \end{aligned}
 \tag{3.29}$$

De même pour la matrice F_2 .

Soit S_1^c S_1^l l'ensemble des ruptures de phase respectivement au sens colonne et ligne pour l'image 1, d'autre part S_2^c S_2^l pour l'image 2

$$\begin{aligned}
 S_1^c &= \{(x_i, y_j) \in \Delta_c F_1 / |\Delta_c F_1(x_i, y_j)| > \pi\}, \quad 1 \leq i \leq N-1, \quad 1 \leq j \leq M \\
 S_1^l &= \{(x_i, y_j) \in \Delta_l F_1 / |\Delta_l F_1(x_i, y_j)| > \pi\}, \quad 1 \leq i \leq N, \quad 1 \leq j \leq M-1 \\
 S_2^c &= \{(x_i, y_j) \in \Delta_c F_2 / |\Delta_c F_2(x_i, y_j)| > \pi\}, \quad 1 \leq i \leq N-1, \quad 1 \leq j \leq M \\
 S_2^l &= \{(x_i, y_j) \in \Delta_l F_2 / |\Delta_l F_2(x_i, y_j)| > \pi\}, \quad 1 \leq i \leq N, \quad 1 \leq j \leq M-1
 \end{aligned} \tag{3.30}$$

Le choix du mode consiste à comparer le nombre d'élément N_*^* de chacun de ces ensembles, en tenant le couple dont ces éléments sont minimums, d'une façon plus claire une comparaison entre $(N_1^c + N_1^l)$ $(N_2^c + N_2^l)$.

Dans le cas où ces deux grandeurs sont égales et pour améliorer l'algorithme on choisira le mode correspondant au couple qui contient le nombre le plus petit parmi les quatre.

3.4.5 Les résultats obtenus

On prend comme exemple deux portions de deux surfaces différentes et leurs images de courbe de niveau correspondantes, avant et après le déroulement sans aucun saut de phase :

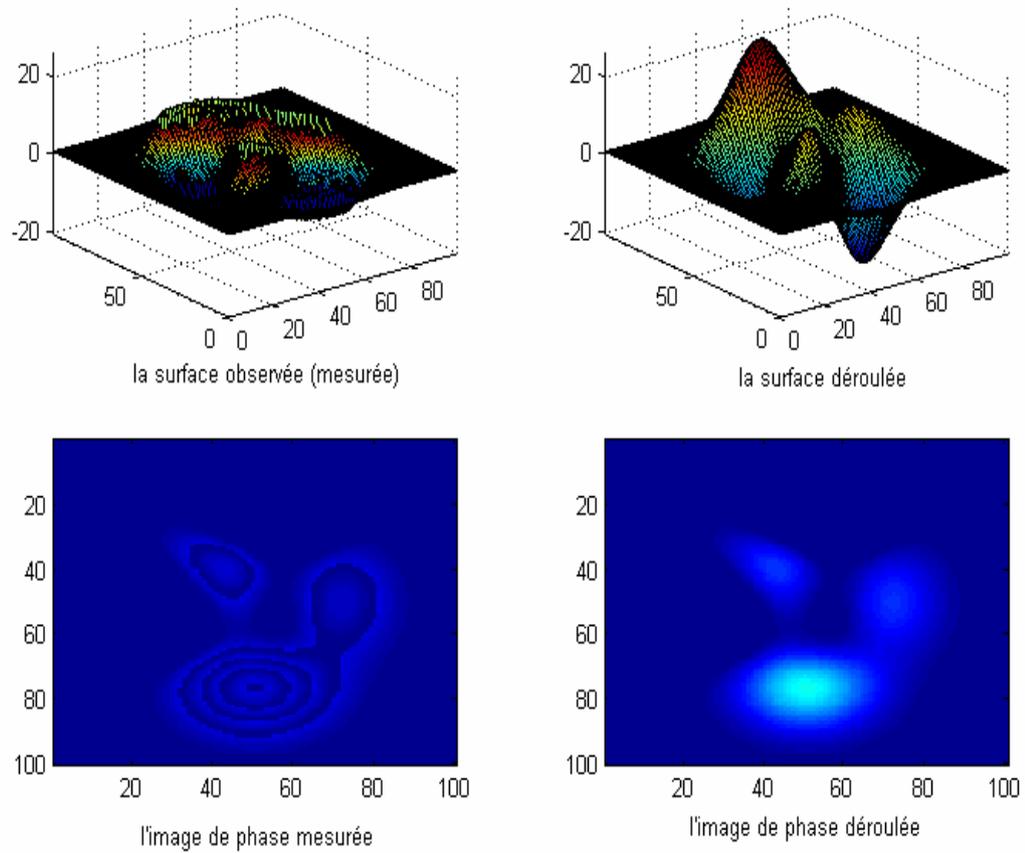


Fig. 3.20 : Traitement de déroulement sans rupture de phase (surface1)

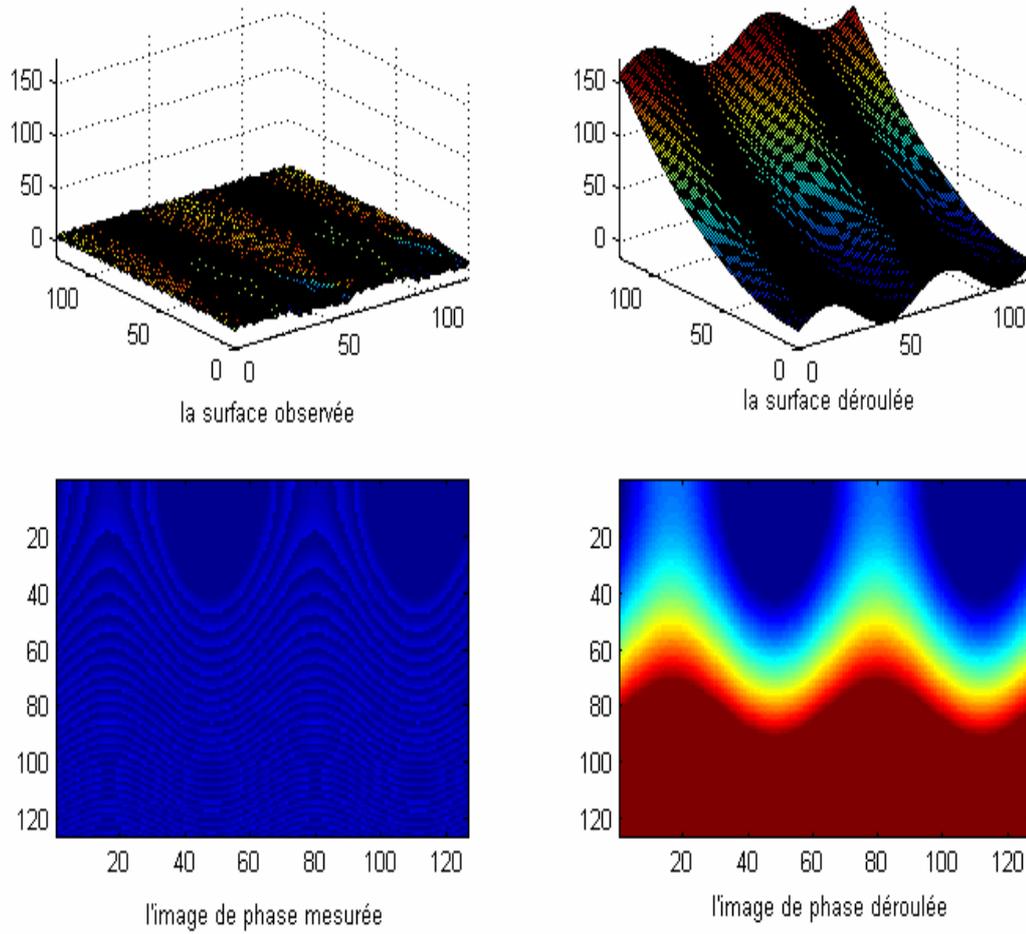


Fig. 3.21 : Traitement de déroulement sans rupture de phase (suface2)

On se met maintenant dans le cas de présence des sauts de phase au niveau de quelques pixels, alors les deux images générées selon les sens de traitement sont:

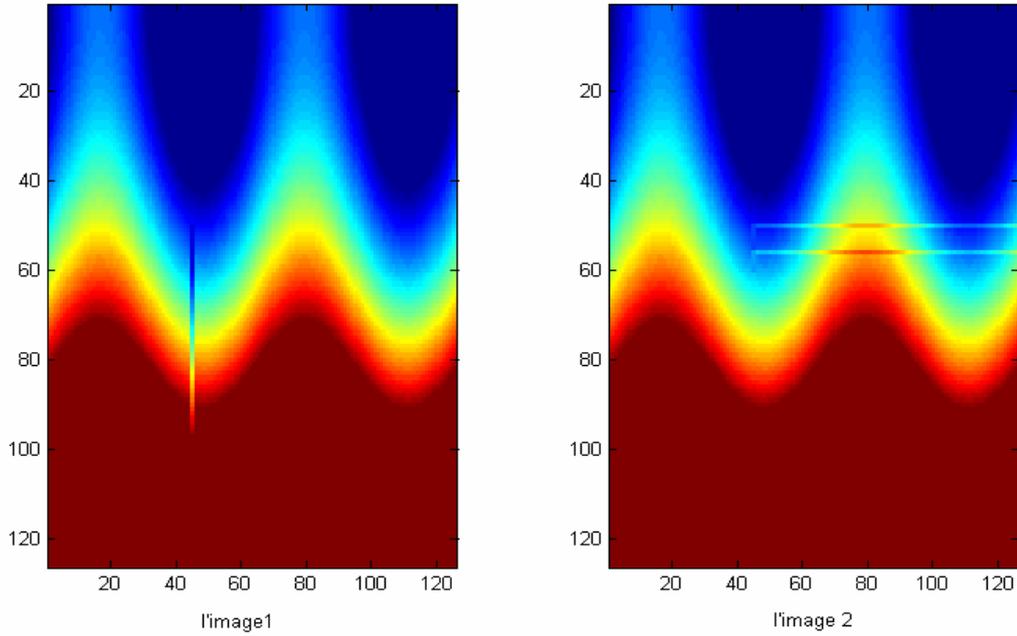


Fig. 3.22 : Les deux images générées pour des sauts de phase situés entre

$$x_{50} \leq x_i \leq x_{60} \quad y_{40} \leq y_j \leq y_{45}$$

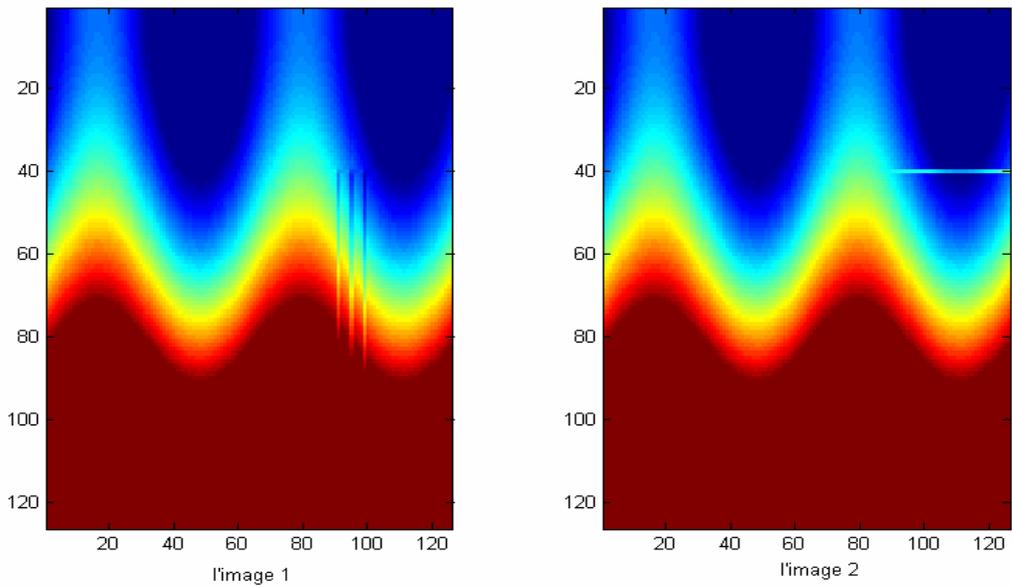


Fig. 3.23 : Les deux images générées pour des sauts de phase situés

$$\text{entre } x_{35} \leq x_i \leq x_{40} \quad y_{90} \leq y_j \leq y_{100}$$

On remarque que les deux images sont distinctement distordues en fonction de localisation des pixels de saut de phase, donc pour la figure (3.21) notre algorithme va choisir l'image 1 par ce que tout simplement elle est moins distordue que l'image2, et pour la figure (3.22) l'image 2 sera choisie.

3.5 Conclusion

La reconstruction de surface topographique à partir de l'information de phase interférométrique par la technique de déroulement de phase étant maintenant compris, on s'est basé pour cela sur la méthode de Spangolini [11] avec une certaines formulation de M.Constantini et A.Farina [12] à fin de mettre un algorithme efficace qui nous fournit l'élévation réelle de chaque pixel.

Concernant la propagation de l'effet des résidus (saut de phase) lors de traitement de déroulement, on a introduit une étude comparative pour que notre méthode soit capable de choisir le résultat le plus pertinent par la sélection de l'image la moins distordue, donc il nous reste qu'a corriger ces distorsions par le filtrage à fin d'avoir l'image finale, ce qui ferait l'objet du prochain chapitre.

Chapitre 4

Correction de distorsions

Chapitre 4 :

Correction de distorsions

4.1 Introduction

La correction de distorsion ou le filtrage d'image après l'étape de comparaison (chapitre 3) constitue une étape très importante, car suite à n'importe quel traitement que l'image subisse il y a toujours des distorsions ou des bruits résultants, pour corriger ces erreurs on fait appel aux différents types de filtre selon le type de distorsion tel que les filtres passe-bas et passe-haut dans le domaine fréquentiel et les filtres moyenneur, Natachi et Nagao (domaine spatial).

Dans notre étude on a choisi le filtre moyenneur à cause de sa pertinence pour les images radar de phase malgré que ceci est utilisé pour corriger les contrastes et les niveaux de gris d'image tri matricielle, on l'utilisera pour la texture topographique (l'image de courbes de niveaux de la région) parce que le filtre moyenneur sert à lisser les niveaux de gris des pixels lorsque on a une grande différence entre eux, donc ce filtre est approprié pour lisser la texture de surface quand on a une grande différence de phase entre les pixels adjacents ce qui représentent les sauts de phase dues au traitement de déroulement.

4.2 Définition

Donc le filtre moyenneur [14] consiste à remplacer la valeur de phase d'un pixel dans l'image distordue par une autre égale à la moyenne des phases des pixels adjacents qui l'entourent dans une fenêtre à 3x3 ;

$$\varphi'(i, j) = \frac{\varphi(i-1, j-1) + \varphi(i, j-1) + \varphi(i+1, j-1) + \varphi(i-1, j) + \varphi(i+1, j) + \varphi(i-1, j+1) + \varphi(i, j+1) + \varphi(i+1, j+1)}{8}$$

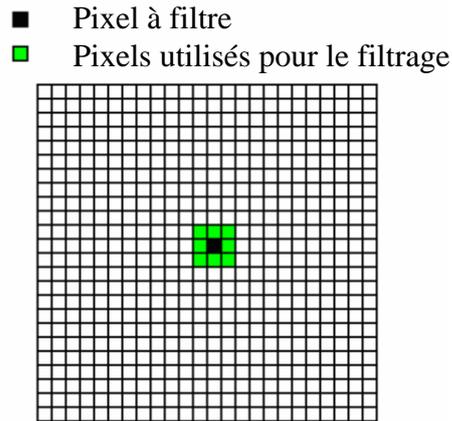


Fig. 4.1 : Filtre moyennneur 3x3

Et pour les phases de bornes le moyennage se fait comme il est monté ci-dessous, dont ces pixels représentent des postions particulières à tenir compte pour que l'algorithme soit fonctionnel quelque soit les coordonnées à traiter.

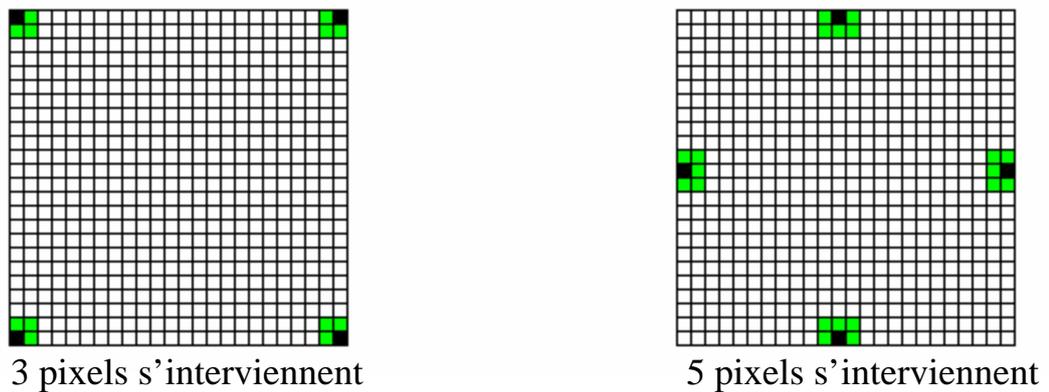


Fig. 4.2 : Filtre moyennneur pour les pixels de bornes

On met maintenant un simple algorithme permettant de calculer cette moyenne quelque soit la position du pixel concerné (coin, borne ou au milieu),

Ceci permet de calculer la moyenne de phase d'un pixel quelconque donné et lorsque on généralise cette procédure pour tous les pixels on obtient un filtrage général d'image, mais ceci est déconseillé si l'on a un nombre de sauts considérable ce qui diminue la visibilité d'image.

Alors il est de préférence au départ de localiser les pixels affectés par la propagation d'erreurs lors de traitement de déroulement, puis on applique le filtre moyenné seulement pour ces pixels et le contour qui les entoure, autrement dit un filtrage local pour lisser uniquement les distorsions.

Après avoir corrigé ces distorsions on peut appliquer un filtrage général ; que se soit moyenné ou un autre ; pour avoir une convergence entre les variations relatives de différentes régions de topographie.

- Pixels de saut de phase
- Pixels affectés après le déroulement
- Pixels de contour

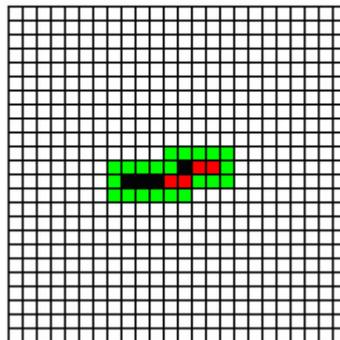


Fig. 4.4 : Filtrage local au niveau de la région distordue

Remarque : les pixels à filtrer constituent un ensemble des pixels de contour et ceux affectés qu'ils doivent s'introduire à la procédure de moyennage (fig(4.3)), on concerne ici les pixels verts, rouges et noir.

4.3 Localisation d pixels

Dans cette partie on explique une procédure et son algorithme pour localiser les pixels méritants le filtrage local, d'autre façon sélectionner la région distordue dans l'image.

Soit F la matrice de l'image choisie par la procédure de comparaison (étant F_1 ou F_2) et $\Delta_c F$, $\Delta_l F$ sa matrice dérivative partial respectivement de colonne et de ligne [12].

$$\begin{aligned}\Delta_c F(x_i, y_j) &= F_1(x_{i+1}, y_j) - F_1(x_i, y_j); & 1 \leq i \leq N-1 \text{ et } 1 \leq j \leq M \\ \Delta_l F(x_i, y_j) &= F_1(x_i, y_{j+1}) - F_1(x_i, y_j); & 1 \leq i \leq N \text{ et } 1 \leq j \leq M-1\end{aligned}\quad (4.1)$$

On note S^c et S^l l'ensemble des coordonnées correspondants aux sauts de phase (y compris affectés) dans la matrice dérivative respectivement au sens colonne et ligne, ils sont définis comme étant:

$$\begin{aligned}S^c &= \{(x_i, y_j) \in \Delta_c F \mid |\Delta_c F(x_i, y_j)| > \pi\}, & 1 \leq i \leq N-1, 1 \leq j \leq M \\ S^l &= \{(x_i, y_j) \in \Delta_l F \mid |\Delta_l F(x_i, y_j)| > \pi\}, & 1 \leq i \leq N, 1 \leq j \leq M-1\end{aligned}\quad (4.2)$$

Ces ensembles représentent des valeurs différentielles entre chaque deux pixels adjacents dans la matrice d'image F , donc chaque élément $(x_i, y_j) \in S^c$ dans la matrice dérivative $\Delta_c F$ désigne les deux pixels adjacents verticalement (colonne) à filtrer dans la matrice F , et de même pour S^l les pixels concernés sont adjacents horizontalement (ligne).

Alors les pixels localisés pour être filtré proportionnellement à l'équation (4.2) sont :

$$\begin{aligned}\text{pixels de colonne} &= \{(x_i, y_j), (x_{i+1}, y_j) \mid (x_i, y_j) \in S^c\} \\ \text{pixels de ligne} &= \{(x_i, y_j), (x_i, y_{j+1}) \mid (x_i, y_j) \in S^l\}\end{aligned}\quad (4.3)$$

Pour mieux comprendre la procédure de localisation on se met dans le cas où on a une seule région distordue contient un seul pixel représente le saut de phase et on résume cette procédure par le schémas suivant :

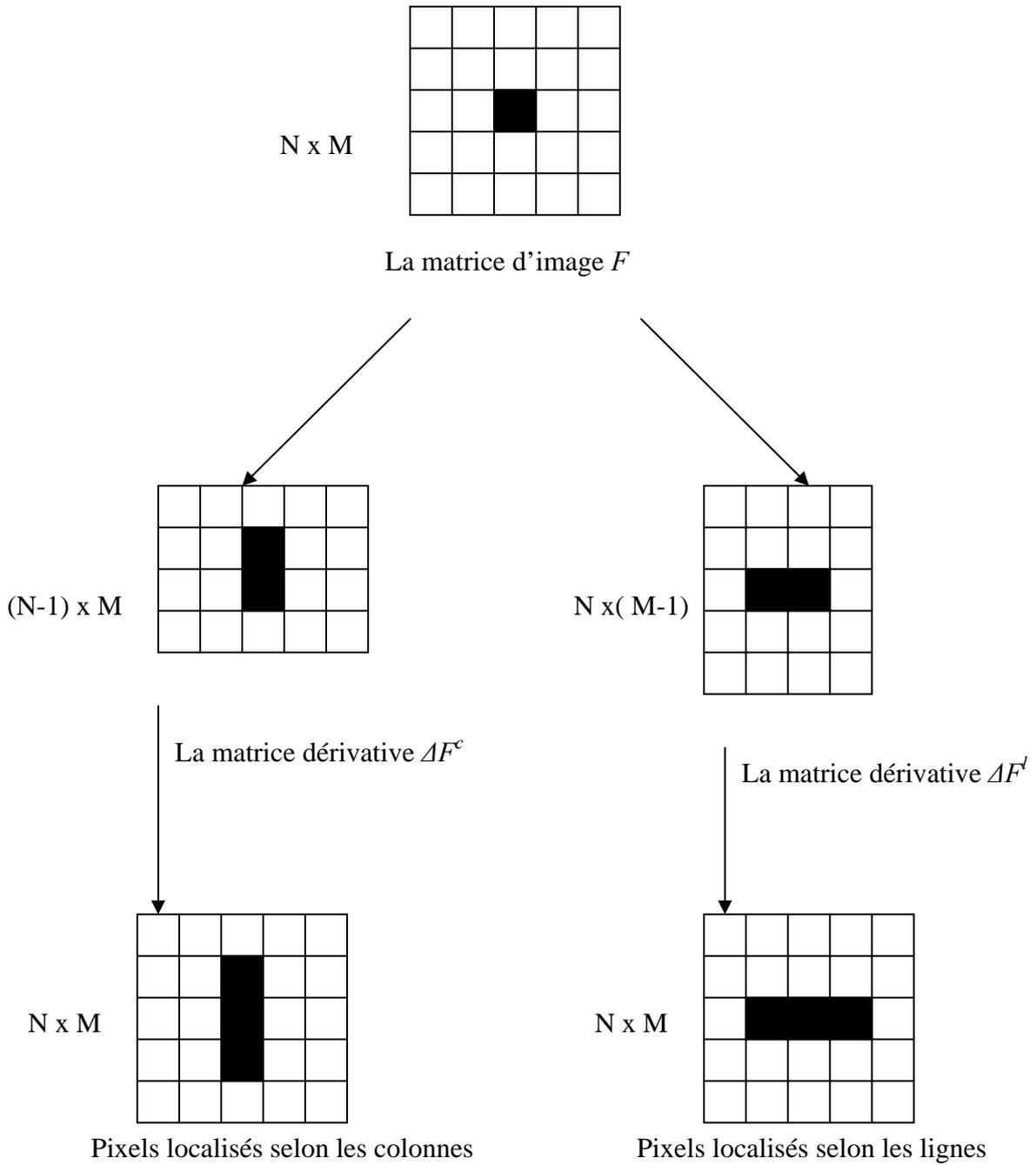


Fig. 4.5 : Localisation de pixels à filtrer

La valeur de phase de chacun de ces pixels localisés se remplace par celle de la moyenne des pixels entourant comme il est montré dans la figure (4.1).

D'autre part, si l'image choisie par la procédure de comparaison est l'image 1 (sa matrice correspondante est F_l), ça signifie que le nombre de sauts de phase dans le sens colonne est négligeable devant celui dans le sens ligne ($N_1^c \ll N_1^l$), ceci très évident parce que le déroulement de phase s'est fait au sens colonne et par conséquent cette régularisation de l'image colonne par colonne implique des distorsions vues au sens ligne, bien sûr dans le cas de présence d'erreur.

Alors pour des raisons de minimiser l'algorithme on ne calcule la matrice dérivative de ligne $\Delta_l F$, puis on détermine l'ensemble de ruptures S^l et finalement la localisation des pixels uniquement dans le sens ligne.

De même pour le cas où l'image 2 est choisie, on a ($N_2^l \ll N_2^c$) donc on calcule $\Delta_c F$, S^c pour la détermination de pixels à filtrer.

4.5 Les résultats obtenus

On choisit par exemple les deux images citées dans le chapitre précédent :

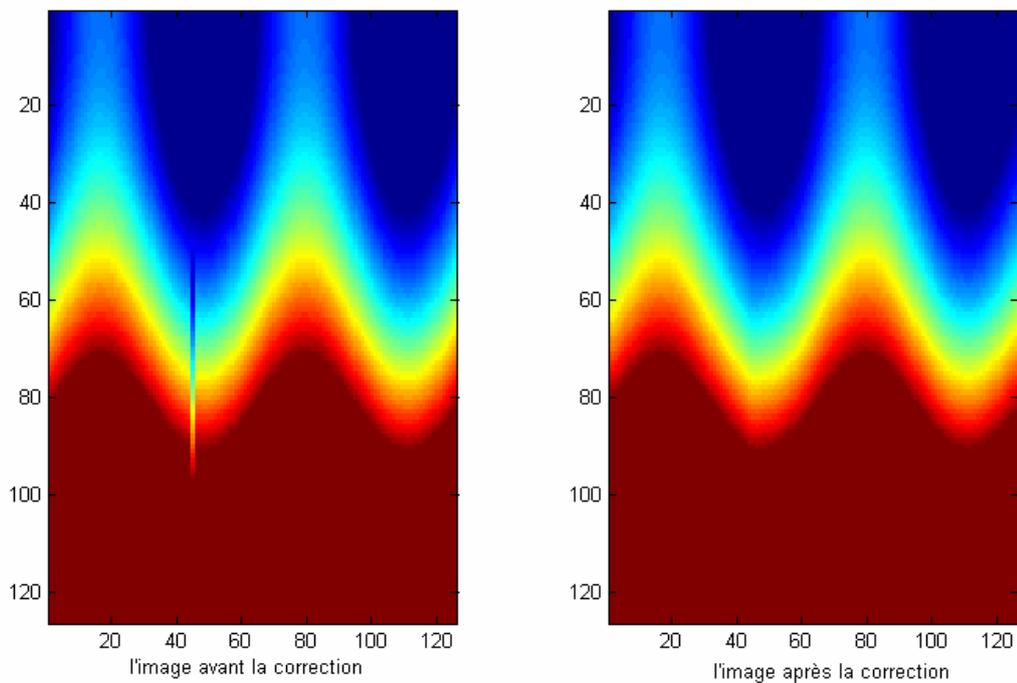
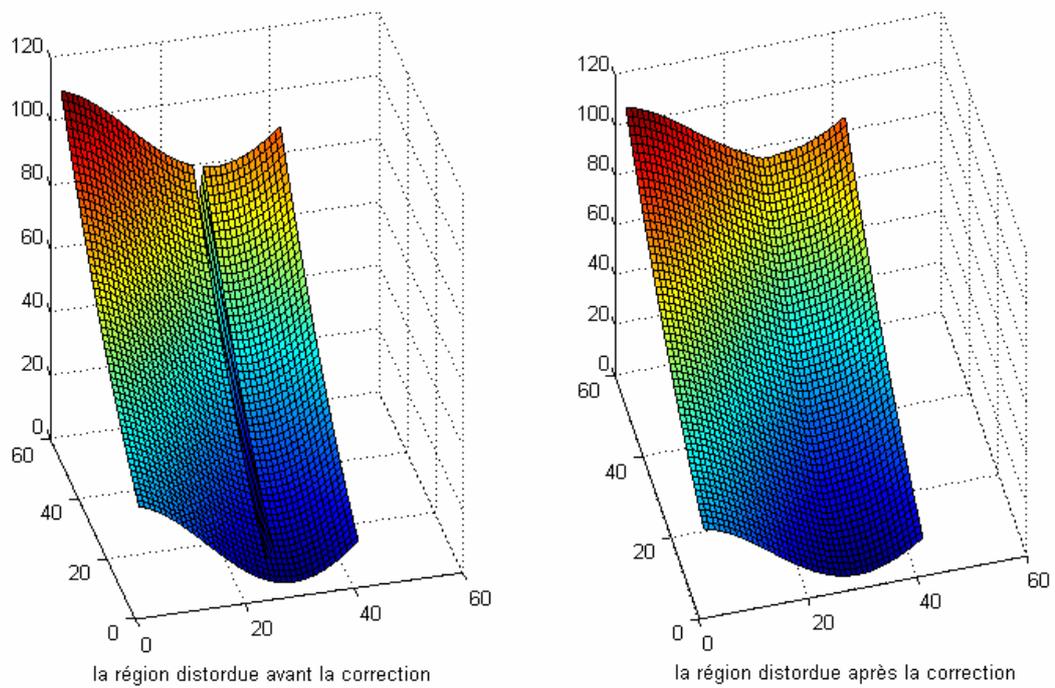


Fig. 4.7 : Correction de distorsions d'image choisie (1^{er} exemple)

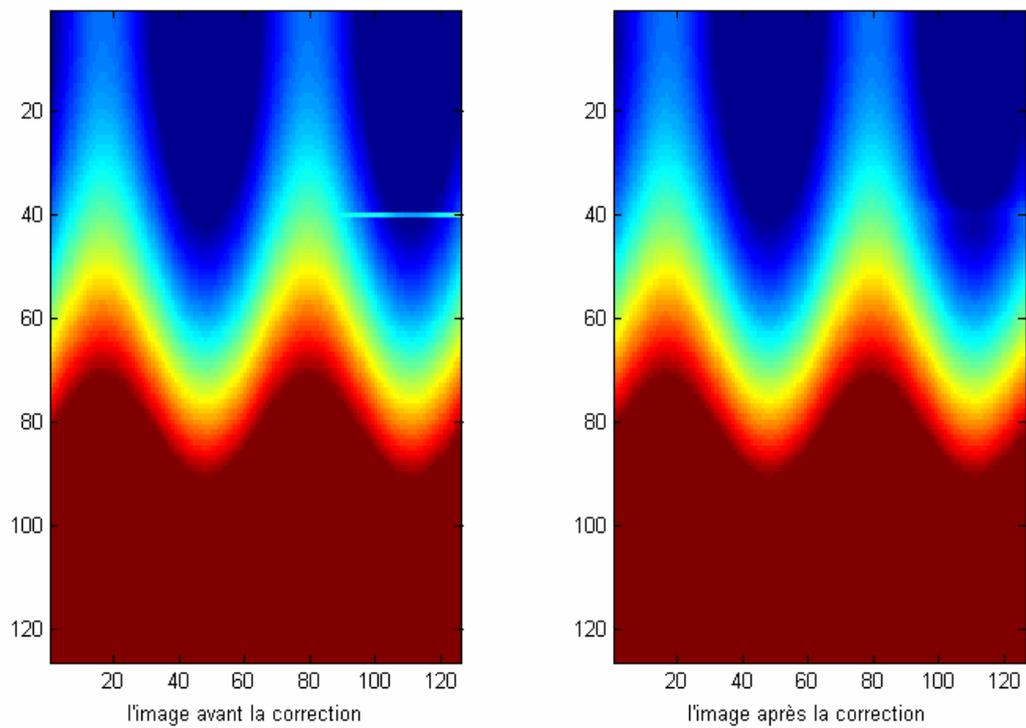
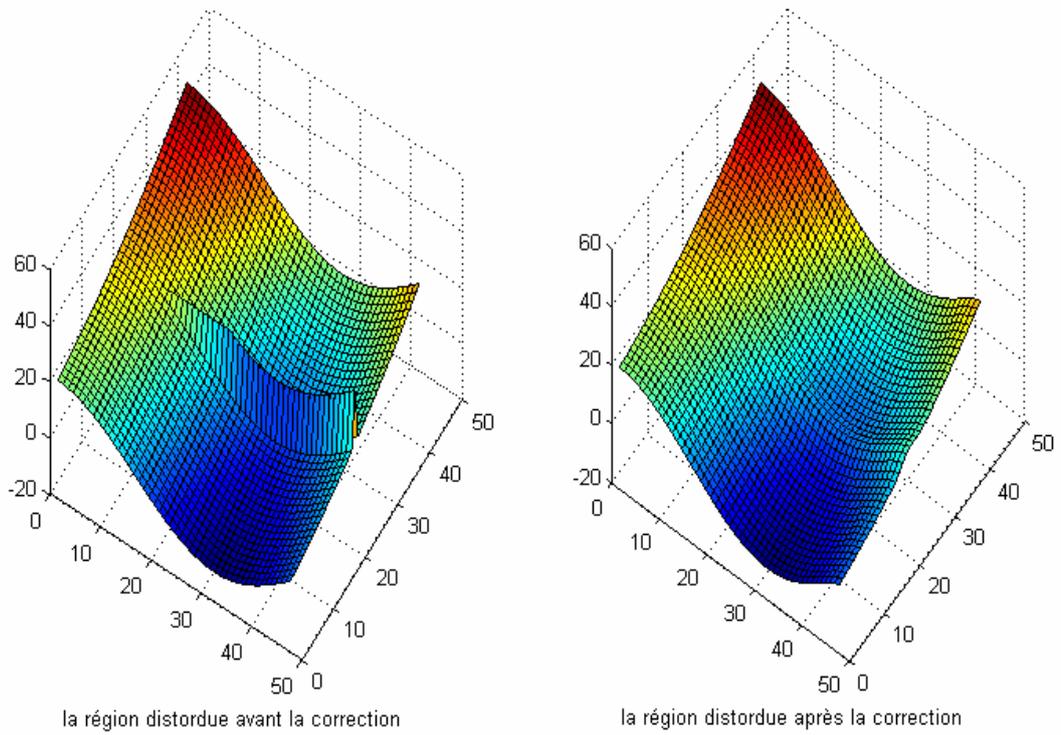


Fig. 4.8 : Correction de distorsions d'image choisie (2^{ième} exemple)

4.6 Limites

Quelque soit le filtre qu'on choisit, il y a toujours des limites à son utilisation en vue de la dégradation de qualité d'image, dans notre cas on se limite par la contrainte de nombre de pixels à filtrer (l'air de la région distordue), plus qu'on en a beaucoup plus qu'aura des déformations importantes qui rendent l'image différente de celle d'origine de plus en plus.

Selon les résultats que nous avons eu cette limite ne doit pas dépasser 270 pixels pour notre image d'exemple de 128 x 128 pixels, si non les déformations au niveau de la région distordue tendent d'être plus visibles comme il est montré dans la figure ci-dessous.

Cette contrainte peut être minimale, ça veut dire qu'on peut avoir une limite supérieur à 270 pixels (voir 400) mais selon la localisation des régions distordues dans l'image, parce que il y a des régions critiques de forte variations où on se limite plus et d'autre part des régions de faible variations dans lesquelles on peut avoir des régions distordues plus larges avec la moindre déformation après le filtrage, donc on a pris le cas le plus limité (région critique).

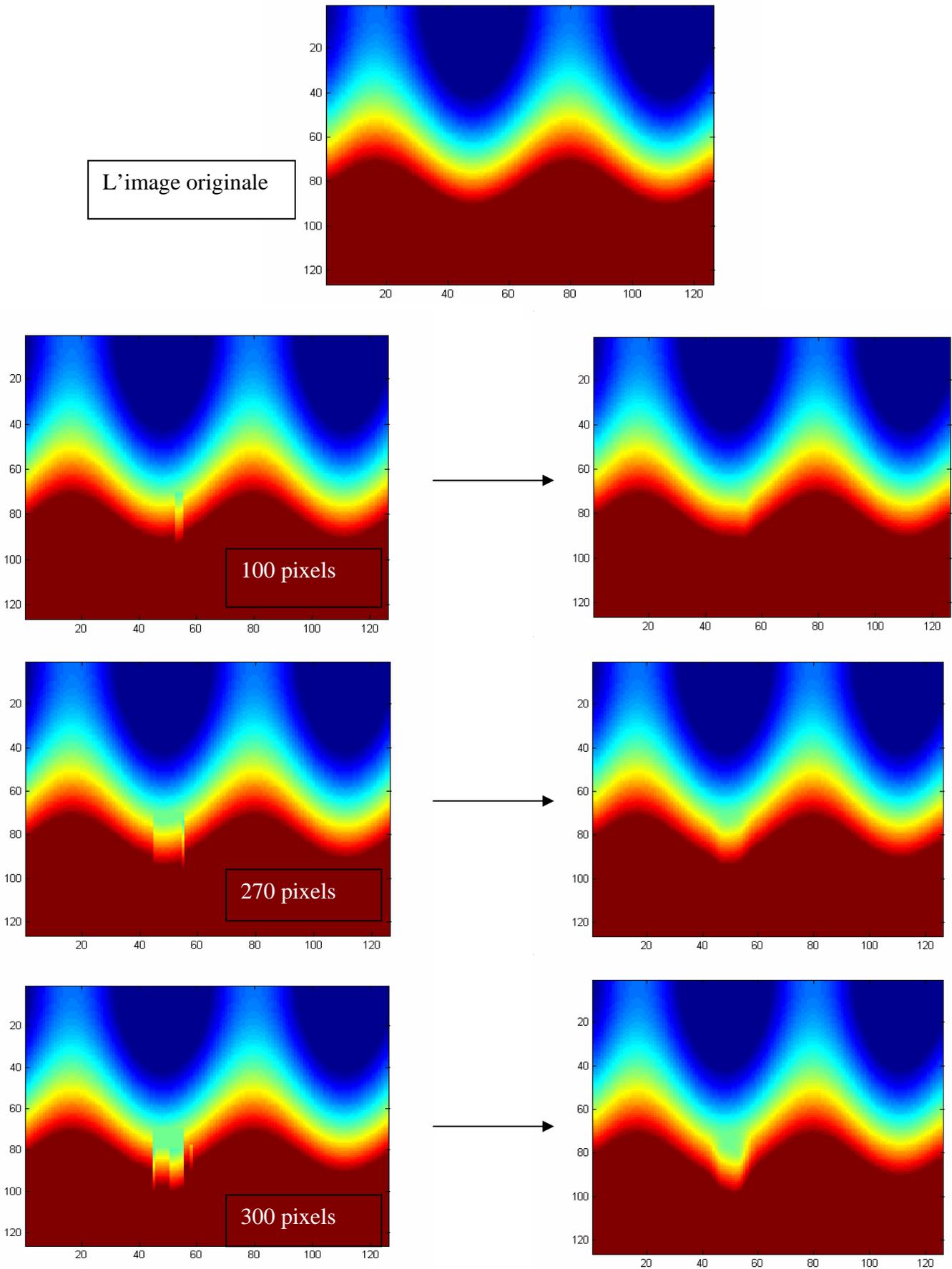


Fig. 4.9 : Les résultats de filtrage selon le nombre de pixels de la région distordue

4.7 Conclusion

L'objectif de ce supplément programme est de corriger les régions distordues dans l'image obtenue après le déroulement de phase par le lissage au niveau de la borne entre ces régions et celles de l'image correctes.

Le filtre élaboré est celui du moyenneur qui attribue à chaque pixel la valeur moyenne de ces voisins dont l'idée était de faire ce moyennage seulement au niveau de la distorsion à fin de maintenir l'allure générale de la topographie avec les moindres erreurs.

Conclusion Générale

CONCLUSION GENERALE

Le but tracé dans ce présent mémoire est de faire une proportionnalité entre les phases du signal d'écho issues des diffuseurs et l'élévation de ces derniers, ce qu'on appelle le fonctionnement du Radar interférométrique, et aussi de dresser un état de l'art de déroulement de phase à fin de rendre cette information de phase d'écho exploitable et utile pour reconstruire des images topographiques 3D (MNT) en tenant compte des problèmes des résidus qui constituent des point noires dans l'images, interprétants des zones d'ombre ou des erreurs d'acquisition des données du système.

Dans ce but, le travail est effectuée en quatre chapitres, le première chapitre est destiné à des généralités sur les différents types de Radar et leur fonctionnements, nous avons expliqué les processus de formation des images SAR et ses caractéristiques tel que la résolution dans les deux dimensions et l'influence de différents types de diffuseur.

Durant le deuxième chapitre et dans le but de manipuler l'image de phase interférométrique, nous avons examiné une étude pour la faisabilité de traitement d'interférométrie SAR et les étapes menant à générer l'image de phase par cette technique, en montrant la proportionnalité entre l'élévation de chaque cellule de résolution (pixel) et la phase d'écho mesurée par l'interférogramme, ainsi que les limites et les contraintes de cette technique.

Tant que cette information de phase interférométrique est prise modulo 2π , il était nécessaire de développer une méthode de telle manière qu'elle soit déroulée sans perdre l'information réelle d'altitude. Pour cela, nous avons détaillé dans le troisième chapitre une approche de déroulement de phase, en faisant un appui aux formulations de Spagnolini, M.Constantini et A. Farina.

Les résultats obtenus sont implantés dans un programme simulant l'efficacité d'attribuer le nombre de cycle entier de phase propre à chaque phase mesurée, autrement dit reconstruire la surface topographique à partir de l'information de phase interférométrique.

Nous avons amélioré cette approche pour remédié au problème de propagation de l'effet des résidus (saut de phase) lors du traitement de déroulement, ce qui le rend capable de choisir

le résultat le plus pertinent en sélectionnant l'image la moins distordue à fin de faciliter l'étape de correction des distorsions.

Dans le cadre de correction de ces distorsions, nous avons élaboré dans le quatrième chapitre le filtre moyenneur pour faire le moyennage notamment entre les pixels liants la région distordue avec celle de l'image correcte, autrement dit, lisser les distorsions proportionnellement avec les variations d'altitude d'autres régions.

Pour maintenir l'allure générale de la topographie avec les moindres erreurs nous avons mis au point un programme de filtrage moyenneur seulement au niveau de la distorsion et le contour avant de passer au filtrage général.

Comme perspective, ce travail peut s'étaler à traiter les problèmes des zones d'ombre (points noirs) en limitant la propagation de leur effet pendant l'étape de traitement de déroulement elle-même, non après, cet objectif peut être atteint en mettant une approche capable de distinguer entre les points noirs engendrés par les zones d'ombre et ceux représentant les franges de mesure modulo 2π avant de dérouler la phase.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] D. Petit : "Synopsis sur les techniques du Radar imageur", version 1.32, Magellium (2004-2005).
- [2] F. Adragna : "Radar à synthèse d'ouverture ", cours au GDTA, France, 1998.
- [3] F. Adragna : "Interprétation des images Radar", cours au CNES, France, 1998.
- [4] S. Dupont et M. Berthod : "Interférométrie Radar et déroulement de phase", INRIA, rapport de recherche N°2344, France, Septembre 1994.
- [5] F. Ulaby, R. Moore, A. Fung : "Microwave Remote Sensing", Vol. III, Editions Artech house, U.K, 1986.
- [6] L. Nocera : "Stéréoscopie à partir d'images de Radar à Ouverture de Synthèse : utilisation des images du capteur SIR-B", Rapport interne, INRIA, France 1993.
- [7] R. Chellappa : "Application of shape from shading technique to SAR imagery", IGARSS, mai 1987.
- [8] H. Benahmed : "Evaluation de modèle numérique de terrain obtenu par interférométrie", Thèse M SC, janvier 2001.
- [9] E. Rodriguez: "Théory and design of interferomtry SAR", IEEE, Vol. 139 N°02, 1992.
- [10] H. Zeber: "Decorrelation interferomertic Radar echoes", IEEE, Vol. 30 N°05, 1992, pp 950-959.
- [11] U. Spagnolini : "New phase unwrapping, poliecnico di milano society of exploration geophysics", SEG 1991 technical program volume 2.
- [12] M. Constantini, A. Farina et F. Zirilli : " A fast phase unwrapping for SAR interferometry", IEEE, Vol 37 N° 01 Janvier 1999.
- [13] T. Viola : " Etude sur la détermination d'une fonction discontinue", Analyse scientifique de l'ENS, 3^{eme} série, tome 50.
- [14] P. Lanbert : "Etude méthodologique du filtrage et de segmentation d'images multi composants", Habilitation à diriger des recherches, univ. de Savoie, juillet 2002.
- [15] J. T. Lapresté : "Aide-mémoire MATLAB", Edition ellipses 2002.