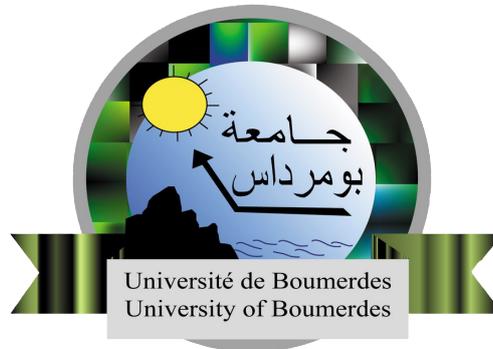


RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



Faculté des Sciences de Boumerdès  
Département de Physique  
Structure Télécommunication et Génie Biomédical (ex-Infotronique)

Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de  
Master II option Systèmes Électroniques Complexes

---

## Interférométrie à base de Radar à Ouverture Synthétique pour la génération d'un Modèle Numérique de Terrain

---

*Proposé et encadré par :*

M<sup>me</sup> Faiza HOCINE

*Rédigé et présenté par :*

Youcef Khalil MOHAREM

*Membres du jury :*

M. F. RAHMOUNE (président de jury)

M<sup>me</sup> R. HAROUN (examinatrice)

M. M. HAMADOUCHE (examineur)

M<sup>me</sup> F. HOCINE (promotrice)

Thèse soutenue le 22 Juin 2017



# Remerciements

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

En premier lieu, je remercie M<sup>me</sup> Faiza HOCINE qui, en tant que promotrice, m'a parfaitement guidé dans mon travail en m'accordant de son temps, son expérience et son enthousiasme.

Je remercie évidemment les membres de ma famille, à savoir ma mère, mon père, ma sœur Houda et mon beau-frère Taha, qui m'ont soutenu tout au long de ce périple et auxquels je dédie ce travail.

Enfin, je n'oublierai pas de remercier mes amis *El-Hadi, Mounir, Alilou, Naziha, Yacine* et *Amine* qui m'ont aidé, encouragé et donné de précieux conseils, ainsi que D<sup>r</sup> ILLOUL et D<sup>r</sup> OUSLIMANE pour le soutien psychologique qu'elles m'ont prodigué.

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

# Table des matières

<b>Résumé/Abstract</b>	<b>iii</b>
<b>Liste des sigles et acronymes</b>	<b>iv</b>
<b>Table des figures</b>	<b>v</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>vi</b>
<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>1 Le Radar à Synthèse d'Ouverture (SAR)</b>	<b>2</b>
Introduction . . . . .	2
1.1 Télédétection . . . . .	3
1.1.1 Définition . . . . .	3
1.1.2 Étapes . . . . .	3
1.2 Systèmes RADAR . . . . .	4
1.2.1 Définition du RADAR . . . . .	4
1.2.2 Types de RADAR en télédétection . . . . .	5
1.3 Le Radar à Synthèse d'Ouverture . . . . .	7
1.3.1 Problématique . . . . .	7
1.3.2 Types de plateformes SAR . . . . .	7
1.3.3 Principe d'acquisition et modèle géométrique . . . . .	9
1.3.4 Résolutions . . . . .	10
1.3.5 Modes d'acquisition SAR . . . . .	13
1.3.6 Distorsions radiométriques et géométriques des images SAR . . . . .	14
Conclusion . . . . .	17

---

<b>2</b>	<b>L'interférométrie à base d'un système SAR</b>	<b>18</b>
	Introduction . . . . .	18
2.1	Généralités sur l'interférométrie . . . . .	18
2.2	Interférométrie SAR (InSAR) . . . . .	19
2.2.1	Principe de l'InSAR . . . . .	19
2.2.2	Géométrie d'acquisition InSAR . . . . .	19
2.2.3	Paramètres mathématiques de l'INSAR . . . . .	20
2.2.4	Cohérence des interférogrammes et décorrélations . . . . .	23
2.2.5	Processus interférométrique . . . . .	24
2.3	Interférométrie différentielle SAR (DInSAR) . . . . .	25
	Conclusion . . . . .	27
<b>3</b>	<b>Le déroulement de phase</b>	<b>28</b>
	Introduction . . . . .	28
3.1	Méthodes de déroulement : état de l'art . . . . .	29
3.1.1	Approche globale . . . . .	29
3.1.2	Approche locale . . . . .	30
3.1.3	Approche mixte (hybride) . . . . .	33
3.2	Déroulement de phase par image de qualité . . . . .	33
	Conclusion . . . . .	37
<b>4</b>	<b>Application et résultats</b>	<b>38</b>
	Introduction . . . . .	38
4.1	Logiciel ENVI et Langage IDL . . . . .	38
4.2	Implémentation des algorithmes . . . . .	40
4.2.1	Images SLC utilisées . . . . .	41
4.2.2	Interférogramme généré à partir des images SLC . . . . .	42
4.3	Phase déroulée . . . . .	43
	Conclusion . . . . .	46
	<b>Conclusion générale</b>	<b>47</b>
	<b>Références bibliographiques</b>	<b>48</b>

## Résumé

Le relief de la surface de la Terre peut être mesuré par interférométrie à base de radar à ouverture synthétique (InSAR). Néanmoins, la différence de phase obtenue sur l'interférogramme varie de 0 à  $2\pi$  (on dit qu'elle est modulo  $2\pi$ ).

Dans ce contexte, notre travail porte sur l'étude et le développement d'une méthode dite de *déroulement de phase*, qui consiste à retrouver la phase absolue à partir de la phase ambiguë modulo  $2\pi$ , afin de pouvoir générer un modèle numérique du terrain étudié (MNT).

**Mots clés :** Télédétection, Radar à Ouverture Synthétique (ROS), Interférométrie, Déroulement de phase, Modèle Numérique de Terrain (MNT).

## Abstract

The relief of the Earth surface can be measured with Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR). However, the obtained phase difference on the interferogram varies from 0 to  $2\pi$  (the phase is known modulo  $2\pi$ ).

In this context, our work is focused on the study and the development of a *phase unwrapping* method so as to deduce the absolute phase from the ambiguous phase modulo  $2\pi$  and generate a digital terrain model (DTM).

**Keywords :** Remote sensing, Synthetic Radar Aperture (SAR), Interferometry, Phase Unwrapping, Digital Terrain Model (DTM).

# Liste des sigles et acronymes

<b>DInSAR</b>	<i>Differential InSAR</i>
<b>DTM</b>	<i>Digital Terrain Model</i>
<b>ENVI</b>	<i>ENvironment for Visualizing Images</i>
<b>FRI</b>	<i>Fréquence de répétition de l'impulsion</i>
<b>GCP</b>	<i>Ground Control Points</i>
<b>IDL</b>	<i>Interactive Data Language</i>
<b>InSAR</b>	<i>Interferometric SAR</i>
<b>MNT</b>	<i>Modèle Numérique de Terrain</i>
<b>PRF</b>	<i>Pulse Repetition Frequency</i>
<b>RADAR</b>	<i>Radio Detection And Ranging</i>
<b>RAR</b>	<i>Real Aperture Radar</i>
<b>ROR</b>	<i>Radar à Ouverture Réelle</i>
<b>ROS</b>	<i>Radar à Ouverture Synthétique</i>
<b>SAR</b>	<i>Synthetic Aperture Radar</i>
<b>SLAR</b>	<i>Sideway-Looking Airbone Radar</i>
<b>SLC</b>	<i>Single Look Complex</i>
<b>SRTM</b>	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
<b>TOPS</b>	<i>Terrain Observation by Progressive Scan</i>

# Table des figures

1.1	Étapes principales de la télédétection . . . . .	4
1.2	Différents types de systèmes RADAR : a. Radar altimètre. b. Radar scattéromètre. c. Radar météorologique. d. Radar à ouverture synthétique (SAR).	6
1.3	a. Visée verticale. b. Visée latérale . . . . .	7
1.4	Types de SAR : a. Aéroporté. b. Spatioporté. . . . .	8
1.5	Géométrie d'acquisition SAR . . . . .	9
1.6	Schéma d'un système SAR . . . . .	9
1.7	Axes d'une image radar . . . . .	10
1.8	Paramètres de la résolution en azimuth. a. Angle de vue. b. Effet Doppler .	11
1.9	Compression d'impulsion. a. Fréquence constante. b. Fréquence modulée linéairement . . . . .	12
1.10	Principaux modes d'acquisition SAR [12] . . . . .	13
1.11	Image radar avant (a) et après (b) réduction du speckle. . . . .	14
1.12	Filtrage Spatial . . . . .	15
1.13	Distorsions géométriques . . . . .	16
2.1	Modèle géométrique simplifié de l'interférométrie . . . . .	19
2.2	Modèle géométrique détaillé de l'InSAR . . . . .	21
2.3	Modèle géométrique du DInSAR . . . . .	25
3.1	a. Phase enroulée (mesurée). b. Phase déroulée (déduite) . . . . .	28
3.2	Déroulement de phase par la méthode du moindre carrée . . . . .	29
3.3	Déroulement de phase sur un interférogramme simulé d'une pyramide. . . .	30
3.4	Déroulement de phase de proche en proche. a) Interférogramme réel. b) Phase déroulée selon les lignes. c) Phase déroulée selon les colonnes. . . . .	31
3.5	Graphe de calcul des résidus . . . . .	31

3.6	Exemple d'images de résidus. a) Interférogramme 1. b) Images de résidus. c) Interférogramme 2. d) Résidus denses au niveau des transitions de franges.	32
3.7	Connexion des résidus . . . . .	32
3.8	Déroulement 2D d'un interférogramme. a) Interférogramme réel. b) Lignes de coupures sur l'interférogramme déroulé. c) Représentation 3D de l'interférogramme déroulé. . . . .	33
4.1	Menu principal ENVI 4.8 avec affichage des sous-menus "File" et "Radar".	39
4.2	Programme en langage IDL affichant des chaînes de caractères. . . . .	39
4.3	Diagramme de la chaîne de traitement des données interférométriques . . .	40
4.4	Images SLC de la région d'El-Harrach. . . . .	41
4.5	Interférogramme brut . . . . .	42
4.6	Interférogramme filtré . . . . .	42
4.7	Image de qualité par pseudo-corrélation . . . . .	43
4.8	Image de qualité par variance de la dérivée de phase . . . . .	43
4.9	Phase déroulée par pseudo-corrélation . . . . .	44
4.10	Histogramme de la phase déroulée par pseudo-corrélation . . . . .	44
4.11	Phase déroulée par variance de la dérivée de phase . . . . .	45
4.12	Histogramme de la phase déroulée par variance de la dérivée de phase . . .	45
4.13	Phase absolue (déroulée) de l'image radar acquise sur la région d'El-Harrach.	46

## Liste des tableaux

1.1	Bandes de fréquences utilisées en télédétection RADAR [5] . . . . .	4
1.2	Tableau comparatif des modes d'acquisition du satellite TerraSAR-X . . .	14



# Introduction générale

Depuis quelques années, les systèmes RADAR se sont imposés comme de puissants outils pour l'observation de la surface de la Terre et la collecte d'information concernant les phénomènes géologiques et géophysiques, tels que les séismes, les volcans, ...etc. La technologie RADAR est désormais incontournable dans le domaine de l'imagerie satellite, notamment pour la génération des modèles numériques de terrain (MNT).

Parmi ses applications les plus répandus, on trouve l'interférométrie à base de Radar à Synthèse d'Ouverture (InSAR). Cette dernière calcule la différence de phase entre deux images radar d'une même zone terrestre prélevées au même moment mais à différentes coordonnées (altitude et angle de visée).

L'interférogramme obtenu est une image 2D contenant un ensemble de franges. Chaque frange correspond à un domaine de phase s'étalant entre  $-\pi$  et  $\pi$ . Or, la phase réelle est supérieure à  $2\pi$ .

Notre travail consiste donc à retrouver la phase réelle en passant par une étape cruciale, à savoir le déroulement de phase. Une fois la phase réelle retrouvée, le modèle numérique de terrain peut enfin être généré et les caractéristiques du sol seront mises en évidence.

Cette thèse est structurée en plusieurs chapitres.

- Dans le 1<sup>er</sup> chapitre, nous définirons la télédétection et la technologie RADAR de manière globale et nous ferons connaissance du Radar à Ouverture Synthétique (SAR).
- Dans le 2<sup>eme</sup> chapitre, nous nous intéresserons à l'interférométrie et son application au Radar à ouverture synthétique (InSAR et DInSAR).
- Dans le 3<sup>eme</sup> chapitre, nous parlerons du déroulement de phase, de ses différentes méthodes ainsi que de l'algorithme que nous avons développé.
- Dans le 4<sup>eme</sup> chapitre, nous entamerons enfin l'implémentation de notre algorithme à l'aide du langage IDL et nous visualiserons les résultats sur le logiciel ENVI.

Enfin, nous achèverons cette thèse par une conclusion générale et les références bibliographiques consultées durant la réalisation de ce travail.

# Chapitre 1

## Le Radar à Synthèse d'Ouverture (SAR)

### Introduction

Dans ce chapitre, nous allons d'abord définir la **téledétection** et les **systèmes radar** de manière générale, avant d'aborder le **radar à synthèse d'ouverture** plus particulièrement. Pour ce, nous devons comprendre un concept fondamental : le capteur.

En téledétection, un capteur est un instrument recueillant une énergie radiative provenant d'une scène visée et délivrant en retour un signal électrique. Selon la source d'irradiation, il existe deux types de capteurs : passif et actif [1].

Un capteur passif mesure la radiation transmise ou réfléchiée par une surface ayant été irradiée par une source indépendante du capteur, cette source étant généralement le Soleil. Un capteur actif, quant à lui, envoie un signal électromagnétique pour illuminer (irradier) le terrain et mesurer la réponse de la surface. Les capteurs actifs ne dépendent pas du soleil et des conditions atmosphériques, ils peuvent donc opérer 24h/24.

Un des capteurs actifs les mieux connus est le RADAR. Le terme RADAR est un acronyme de l'anglais Radio Detection And Ranging, ce qui veut dire "Détection et télémessure à l'aide des ondes radio". L'imagerie radar exploite des longueurs d'onde allant de 1 millimètre à 1 mètre [2].

## 1.1 Télédétection

### 1.1.1 Définition

La télédétection est un ensemble de techniques permettant l'obtention d'informations sur la surface de la Terre sans contact physique avec celle-ci. Elle consiste à capter et enregistrer l'énergie d'un rayonnement électromagnétique émis (télédétection active) ou réfléchi (télédétection passive). L'énergie fournit alors une information à traiter, analyser et mettre en application.[3]

### 1.1.2 Étapes

La télédétection se déroule généralement en sept étapes principales [4] décrites comme suit (figure 1.1) :

1. **Source d'énergie (A)** : À l'origine de tout processus de télédétection se trouve nécessairement une source d'énergie pour illuminer la cible. Quand la source est externe (par exemple le soleil) on parle de télédétection passive. Si elle est interne (c'est-à-dire qu'elle provient de l'instrument de détection lui-même), on parle de télédétection active.
2. **Interaction avec l'atmosphère (B)** : Le rayonnement interagit deux fois avec l'atmosphère. Une fois lors du trajet entre la source d'énergie et la cible, et une deuxième fois lors du trajet entre la cible et le capteur.
3. **Interaction avec la cible (C)** : L'énergie interagit avec la surface de la cible. La nature de cette interaction dépend des caractéristiques du rayonnement et des propriétés de la surface, à savoir la rugosité, l'humidité, la biomasse, ...etc.
4. **Enregistrement de l'énergie par le capteur (D)** : Une fois l'énergie diffusée ou émise par la cible, elle doit être captée à distance pour être enfin enregistrée.
5. **Transmission, réception et traitement (E)** : Le signal enregistré par le capteur est transmis à une station de réception où l'information est transformée en images numériques.
6. **Interprétation et analyse (F)** : Une interprétation numérique de l'image traitée est ensuite nécessaire pour extraire l'information que l'on désire obtenir sur la cible.
7. **Application (G)** : La dernière étape du processus consiste à utiliser l'information extraite de l'image dans différents types d'applications, comme la navigation, l'agriculture, la sismologie, ...etc.

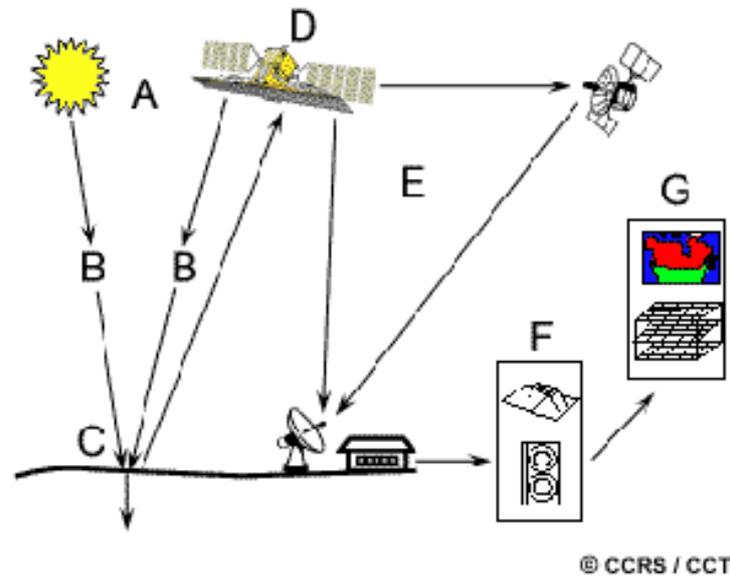


FIGURE 1.1 – Étapes principales de la télédétection

## 1.2 Systèmes RADAR

### 1.2.1 Définition du RADAR

Le RADAR (*Radio Detection And Ranging*) est un système actif permettant de détecter des objets et de fournir des informations sur leurs positions et leurs vitesses. Le radar opère dans la portion micro-ondes (hyperfréquences) du spectre électromagnétique, au-delà des régions visible et infrarouge thermique. Pour les applications en télédétection, les impulsions RADAR ont, du fait de leur grandes longueurs d'onde (voir la table 1.1), l'avantage de traverser facilement les couches nuageuses.

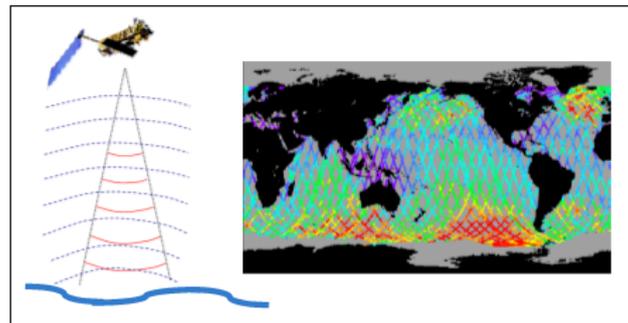
Bandes	Fréquence F (GHz)	Longueur d'onde $\lambda$ (cm)
X	8 – 12.5	2.4 – 3.75
C	4 – 8	3.75 – 7.5
S	2 – 4	7.5 – 15
L	1 – 2	15 – 30
P	0.3 – 1	30 – 100

TABLE 1.1 – Bandes de fréquences utilisées en télédétection RADAR [5]

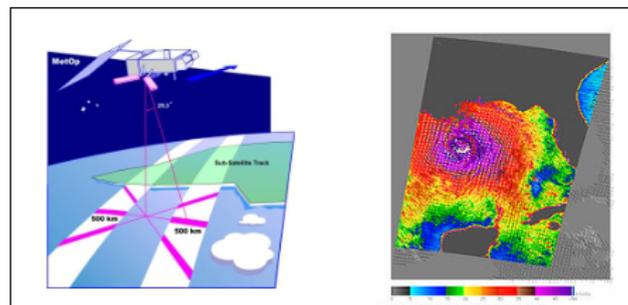
### 1.2.2 Types de RADAR en télédétection

Les principaux types de systèmes RADAR utilisés en télédétection sont les suivants (voir la figure 1.2) :

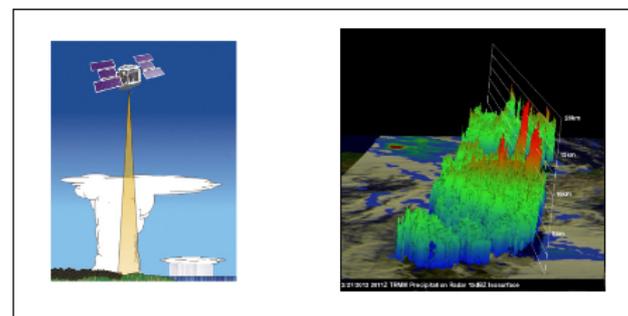
1. **Radar altimètre** : Aussi appelé radioaltimètre, c'est un appareil aéroporté destiné à mesurer la hauteur par rapport au sol ou la surface de l'eau. On l'utilise principalement en aéronautique dans le cas des vols à visibilité réduite. Il est couplé à un système avertisseur de proximité du sol ou de la mer pour éviter les écrasements. [6].
2. **Radar scattéromètre (diffusomètre)** : Un diffusomètre radar mesure la *surface efficace radar* de réflexion d'une cible en transmettant une impulsion et en mesurant la portion d'énergie retournée. En mesurant le retour moyen de plusieurs impulsions et en le soustrayant du signal des impulsions individuelles, on trouve les variations du signal qui sont reliées au variation de la surface dans le temps [6]. Son utilisation principale est la mesure de la hauteur des vagues et la force des vents.
3. **Radar météorologique** : C'est un type de radar utilisé pour repérer les précipitations, calculer leur déplacement, déterminer leur type (pluie, neige ou grêle) et mesurer leur intensité en temps réel. Leur portée est d'environ 100 km pour mesurer la quantité de précipitations et d'environ 200 km pour détecter des phénomènes dangereux. En outre, ces radars météorologiques fournissent également, en exploitant l'effet Doppler, des informations sur le vent dans les zones précipitantes [7].
4. **Radar à ouverture synthétique (SAR) et Radar à ouverture réelle (RAR)** : Ceux sont deux types de radar utilisés en télédétection pour acquérir diverses informations sur une zone terrestre étudiée. La résolution azimutale du radar à ouverture réelle (RAR) est obtenue en utilisant une antenne d'émission/réception de longueur allant de 1 à 3 mètres [8] possédant un lobe d'antenne étroit dans la direction azimutale. Le Radar à ouverture synthétique, quant à lui, utilise une antenne relativement petite pour obtenir une grande résolution qui ne dépend pas de la hauteur du porteur du radar, tout en simulant une grande antenne virtuelle. Nous allons le détailler dans la section suivante. (1.3).



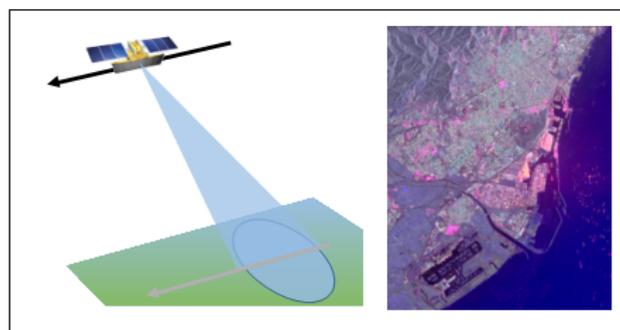
(a)



(b)



(c)



(d)

FIGURE 1.2 – Différents types de systèmes RADAR : a. Radar altimètre. b. Radar scattéromètre. c. Radar météorologique. d. Radar à ouverture synthétique (SAR).

## 1.3 Le Radar à Synthèse d'Ouverture

### 1.3.1 Problématique

Les premiers radars imageurs sont basés sur le principe du radar à ouverture réelle RAR (Real-Aperture Radar). Ce système offre une très bonne résolution dans l'axe distance (axe de propagation de l'onde électromagnétique) grâce à la technique de compression d'impulsions mais la résolution dans l'axe azimut (axe de déplacement du radar) est soumise à la longueur physique de l'antenne. Ainsi une bonne résolution en azimut est inversement proportionnelle à la longueur de l'antenne, ce qui nécessite, pour la plupart des applications d'imagerie de trop grandes antennes.

Par exemple, une antenne à bord d'un avion visant une cible à une distance  $R$  de 10 km et avec une longueur d'onde  $\lambda_c$  de 3 cm, une résolution de 25 cm requiert une longueur d'antenne d'environ 1.2 km ! Carl Wiley [8] propose alors de discriminer les cibles suivant leur réponse en fréquence Doppler et permet d'améliorer de manière considérable la résolution en azimut. Ce principe a permis des progrès remarquables dans l'observation de la Terre.

Le radar à synthèse d'ouverture est un radar à visée latérale. On dit qu'il est de type SLAR (Sideway-Looking Airborne Radar) (figure 1.3b). Cette technique permet d'éliminer l'ambiguïté rencontrée en visée verticale. En effet, cette dernière ne permet pas de discerner entre deux cibles A et B (figure 1.3a) car l'écho revient au même instant au capteur du satellite. La distance radiale étant la même, les points A et B se trouvent alors géographiquement confondus.

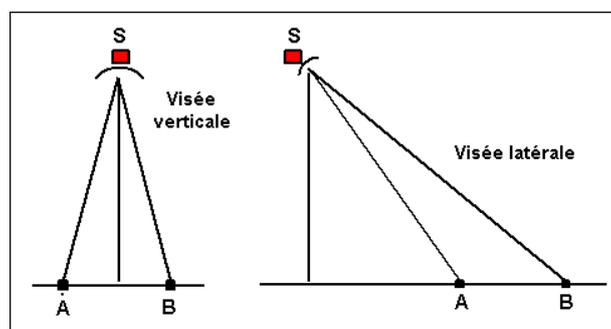


FIGURE 1.3 – a. Visée verticale. b. Visée latérale

### 1.3.2 Types de plateformes SAR

On distingue deux principaux types de plateformes dans l'imagerie radar SAR : aéroportée et spatioportée.

### Plateforme aéroportée

Un radar aéroporté est embarqué sur un aéronef (généralement un avion). Il couvre une grande étendue d'angles d'incidence (entre  $60^\circ$  et  $70^\circ$ ). [9]

### Plateforme spatioportée

Un radar spatial est embarqué sur un satellite en dehors de l'atmosphère. Son étendue d'angles d'incidence est étroite (entre  $5^\circ$  et  $15^\circ$ ). [9]

### Comparaison

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

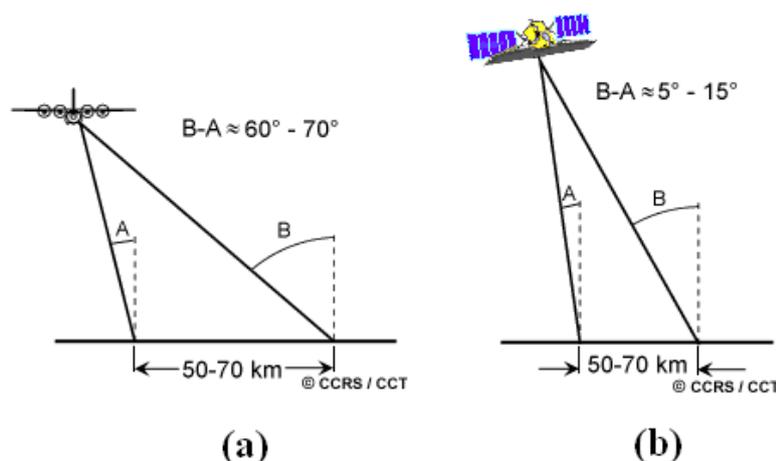


FIGURE 1.4 – Types de SAR : a. Aéroporté. b. Spatioporté.

### 1.3.3 Principe d'acquisition et modèle géométrique

L'antenne SAR irradie l'objet et récolte des signaux à une fréquence  $f_p$  (fréquence porteuse). L'onde rétrodiffusée par la surface est en partie absorbée par la cible, le reste est réfléchi dans des directions aléatoires.

L'irradiation a lieu en une période  $T$  pendant laquelle la porteuse aura parcouru une distance  $s$  à une vitesse  $v$ . Chaque réponse (ou écho) d'une impulsion reçue par l'antenne est fonction de l'ensemble des points de la surface terrestre présents à cet instant. C'est grâce à l'effet Doppler qu'on peut localiser l'origine des échos reçus.

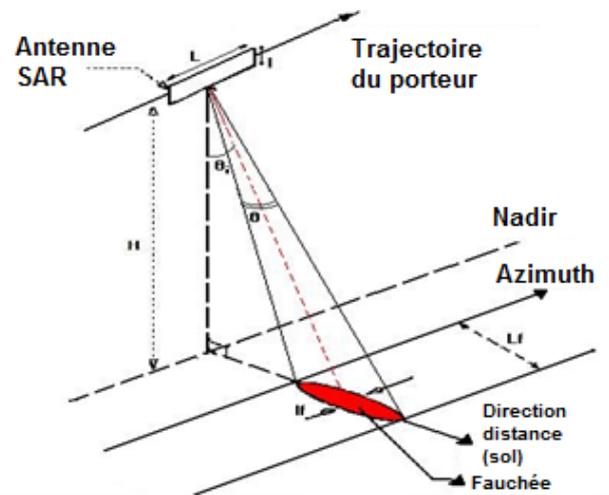


FIGURE 1.5 – Géométrie d'acquisition SAR

Lorsque des signaux sont reçus par l'antenne SAR, ils sont discrétisés et quantifiés. la largeur de l'image en distance est restreinte par la fauchée observée, et sa taille en azimuth est restreinte par le temps total d'acquisition. L'antenne de réception est la même qui émet l'impulsion hyperfréquence. Le système doit donc alterner (ou switcher) entre des phases d'émission et de réception afin de réceptionner les échos radar. Ceci se fait via un circulateur (ou switch) comme le montre la figure 1.6.

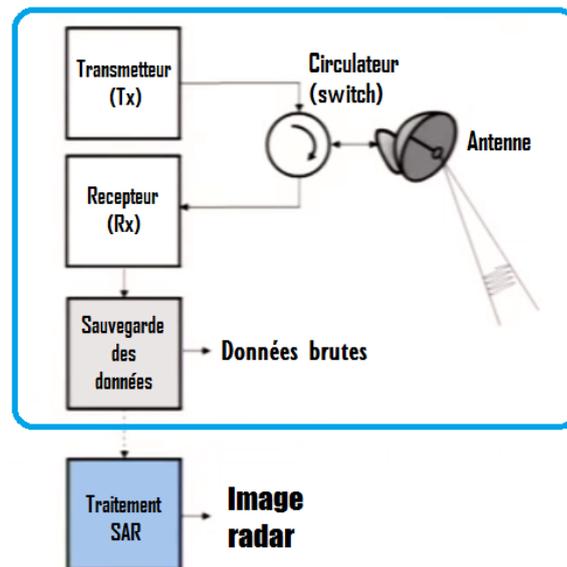


FIGURE 1.6 – Schéma d'un système SAR

### 1.3.4 Résolutions

En radar, la résolution est définie comme étant la largeur a -3db du lobe principal de la puissance de la réponse impulsionnelle [10].

Deux axes définissent l'image lors de l'acquisition (figure 1.7) :

1. **Axe Distance (Slant Range)** : La position en distance des différents éléments rétrodiffuseurs (backscatterers) est fournie par le temps de retour de l'impulsion électromagnétique. Les distances associées au premier point et au dernier point de l'image sont respectivement appelées "distance proximale" et "portée distale". La profondeur du champ éclairé est définie par la différence entre ces deux distances et est appelée "fauchée" (swath).
2. **Axe Azimuth (Azimuth Range)** : Les positions qu'occupe l'antenne portée tout au long de sa trajectoire sur cet axe indiquent la position de la projection orthogonale de la cible dans la direction de déplacement.

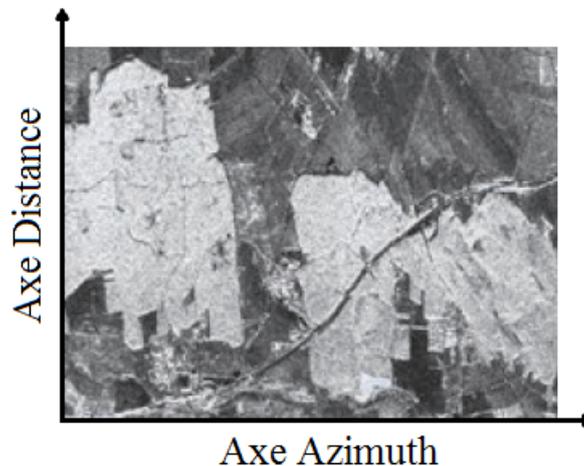


FIGURE 1.7 – Axes d'une image radar

Ces deux axes nous donnent donc deux résolutions : l'une en Azimuth et l'autre en distance.

**Résolution en Azimuth** : Elle est liée à la directivité de l'antenne, celle-ci étant d'autant plus forte que la longueur d'onde est petite ou que la taille de l'antenne est grande. Cette résolution est exprimée par :

$$r_a \approx R \frac{\lambda}{L} \quad (1.1)$$

R étant la distance radar-cible,  $\lambda$  la longueur d'onde radar et L la longueur de l'antenne.

L'amélioration de la résolution en azimuth passe par un compromis avec l'ouverture de l'antenne en combinant le mouvement du porteur, l'illumination séquentielle de la même cible pour  $n$  positions de l'antenne réelle (recouvrement d'empreintes des lobes) et l'effet Doppler. Pour une cible fixe, l'écart Doppler  $F_d$  de l'onde réémise dû au mouvement du porteur de vitesse  $V_p$  permet d'obtenir la coordonnée  $y$  (position en azimuth) de la cible à partir de l'angle de vue (noté  $\psi$ ) selon la direction azimuthale par rapport à la direction de pointage de l'antenne (figure 1.8a). Ainsi, le signal reconstitué est la somme des  $n$  échos de chaque cible éclairée  $n$  fois par l'antenne (figure 1.8b). L'expression de l'écart Doppler est la suivante :

$$F_d = \frac{2V_p}{\lambda} \sin(\psi) = \frac{2V_p}{\lambda} \frac{y}{R} = \frac{2V_p}{\lambda R} y \quad (1.2)$$

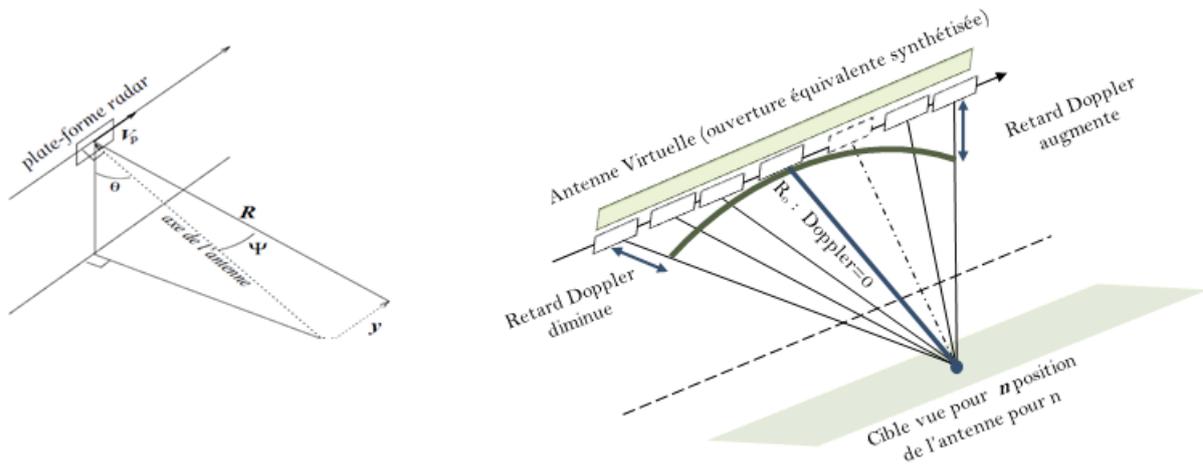


FIGURE 1.8 – Paramètres de la résolution en azimuth. a. Angle de vue. b. Effet Doppler

**Résolution en Distance :** Elle est liée à la durée de l'impulsion radar émise. En effet, si deux cibles A et B sont séparées par une distance  $\Delta r$  dans la direction de la visée radar, le temps séparant les deux échos sera égal à  $\Delta t = \frac{2\Delta r}{c}$  et sera supérieur ou égal à  $\tau$  ( $\Delta t \geq \tau$ ),  $\tau$  étant la durée du train de l'onde radar et  $c$  la vitesse de la lumière.

La résolution en distance oblique (slant range) est exprimée par :

$$r_{ds} \approx c \frac{\tau}{2} \quad (1.3)$$

La résolution sur le plan de la surface terrestre (ground range) correspondante, pour

un angle d'incidence  $\theta_i$  est donc :

$$r_{dg} = \frac{r_{ds}}{\sin(\theta_i)} \tag{1.4}$$

L'amélioration de la résolution en distance est réalisée par la modulation linéaire en fréquence de l'onde radar  $S(t) = p(t) \cos(2\pi f_0 t)$  en utilisant une fonction Chirp  $C(t)$  à l'intérieur d'une impulsion de durée  $\tau$  (figure 1.9b). La fréquence instantanée change donc linéairement avec le temps. La fonction Chirp est exprimée par :

$$C(t) = p(t) \cos\left(2\pi f_0 t + \frac{\alpha t^2}{2}\right) \tag{1.5}$$

$p(t)$  étant l'amplitude maximale de l'impulsion et  $\alpha = \frac{f_\tau - f_0}{\tau}$  le taux de la fonction Chirp (la pente de la variation linéaire de la fréquence en fonction du temps). [11]

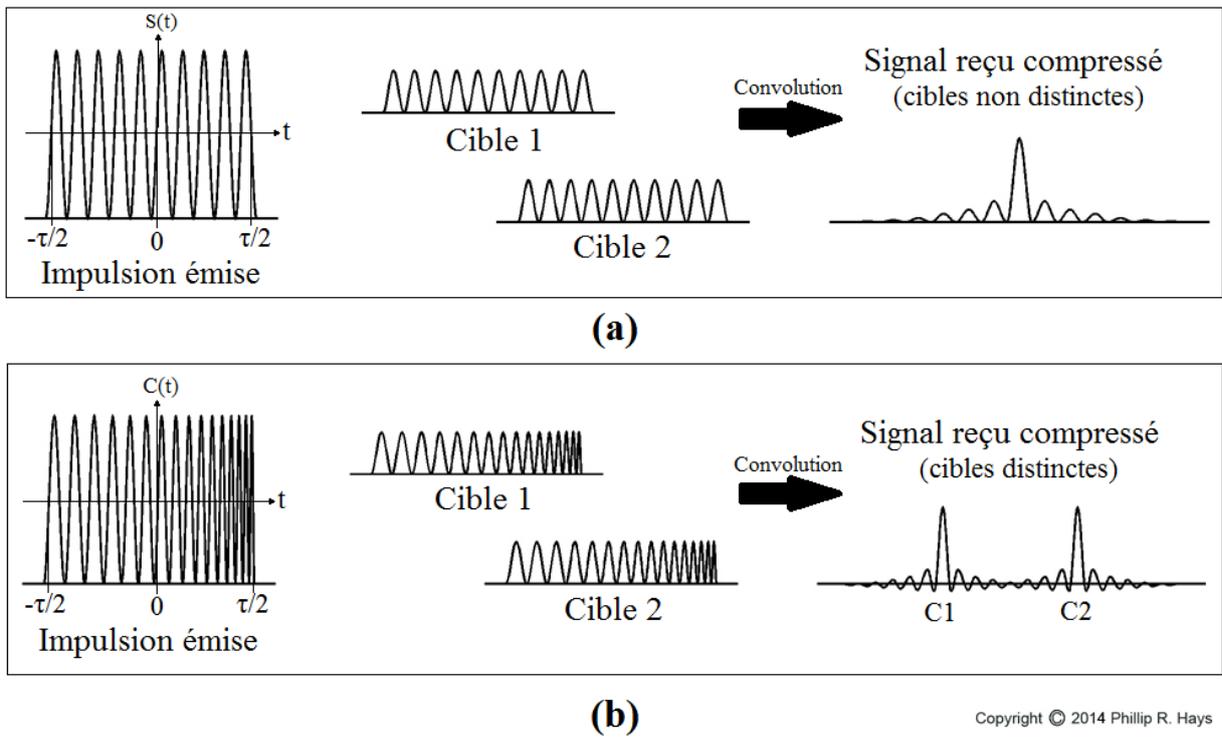


FIGURE 1.9 – Compression d'impulsion.

a. Fréquence constante. b. Fréquence modulée linéairement

A la réception, le signal radar reçu est convolué au signal Chirp transmis (signal de référence) et il en résulte plusieurs impulsions compressées qui correspondent aux cibles illuminées.

## 1.3.5 Modes d'acquisition SAR

1. **Stripmap** : C'est un mode conventionnel. C'est-à-dire que le pointage de l'antenne est fixé. Ce mode offre une cartographie continue, une bonne résolution et une bonne couverture de l'espace (Figure 1.10a).
2. **Spotlight** : L'antenne pointe vers un point précis, et donc le pointage de l'antenne change au fur et à mesure de son déplacement. La cartographie est discontinue, et la couverture spatiale est réduite. Cependant, la longueur d'ouverture est plus grande, et donc la résolution en azimuth est meilleure (Figure 1.10b).
3. **ScanSAR** : Comme pour le mode Spotlight, le pointage de l'antenne change, mais le lobe d'antenne fait des acquisitions multiples en altitude. La cartographie est continue et la couverture spatiale est large. Cependant, la résolution est inférieure et le traitement demande des opérations complexes (Figure 1.10c).
4. **TOPS-SAR** : Le lobe d'antenne fait des acquisitions multiples en élévation et en azimuth. La cartographie est continue, la couverture spatiale large mais la résolution est relativement faible. Le traitement est complexe mais est de meilleure qualité que le mode ScanSAR (Figure 1.10d).

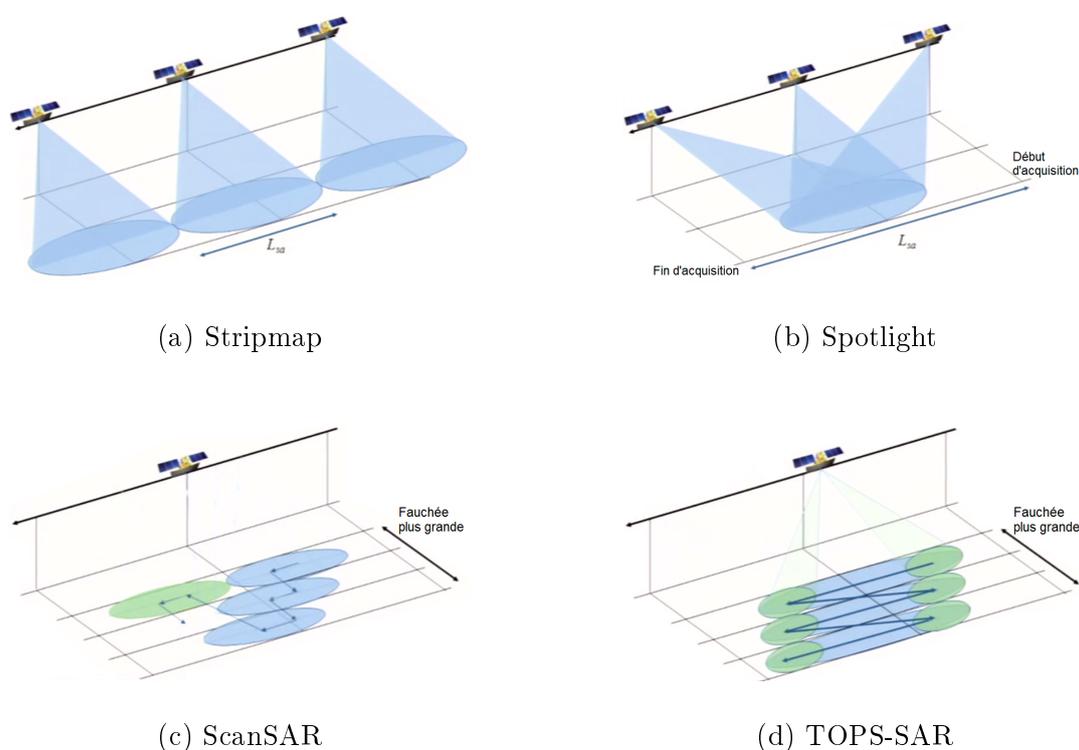


FIGURE 1.10 – Principaux modes d'acquisition SAR [12]

Voici ci-dessous un tableau de comparaison des paramètres pour les trois modes d'acquisition du satellite TerraSAR-X [12].

Mode d'acquisition	Stripmap	Spotlight	ScanSAR
Fauchée	30km	10km	100km
Taille de la scène en Azimuth	100km	5km	100km
Résolution au sol	2m	2m	2m
Résolution en Azimuth	3m	1m	16m

TABLE 1.2 – Tableau comparatif des modes d'acquisition du satellite TerraSAR-X

### 1.3.6 Distorsions radiométriques et géométriques des images SAR

Les images radar contiennent différentes formes d'altérations qui les empêchent d'être exploitées directement. Ces altérations sont appelées distorsions et on en distingue deux types : Radiométriques et géométriques.

#### Distorsions radiométriques : Speckle

Le *speckle* est un bruit produit par l'interaction de l'onde cohérente avec les diffuseurs élémentaires. L'interférence de manière constructive ou destructive engendre ainsi une très forte (ou très faible) rétrodiffusion. Les extrémités de ce phénomène donnent un aspect granuleux à l'image radar, dégradent sa qualité et rendent son interprétation difficile (figure 1.11).

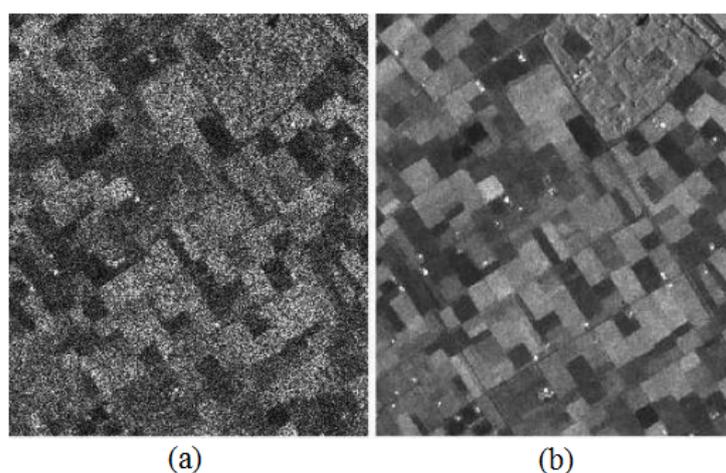


FIGURE 1.11 – Image radar avant (a) et après (b) réduction du speckle.

Il existe deux techniques principales permettant de réduire le speckle :

- **Traitement multilook** : Cette technique consiste à acquérir plusieurs images distinctes d'une même scène. Chaque acquisition produit sa propre image de la scène illuminée et chaque image est sujette au speckle. Pour réduire ce dernier, on fait la moyenne de toutes les images et l'image obtenue est plus nette. [13]
- **Filtrage spatial** : L'opération se fait numériquement sur l'image en prenant une fenêtre de quelques pixels au-dessus de chaque pixel de l'image. Le filtrage est effectué en calculant la moyenne des valeurs de la fenêtre de traitement et en remplaçant le pixel correspondant de l'image résultante par le résultat de l'opération mathématique. La fenêtre se déplace d'un pixel à la fois, selon les lignes et les colonnes, jusqu'à ce que l'image entière soit traitée. En calculant la moyenne d'une petite fenêtre autour de chaque pixel, on obtient un effet de lissage qui réduit le speckle [13] (figure 1.12).

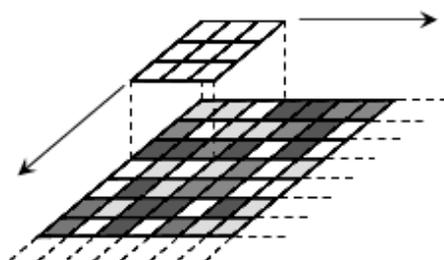


FIGURE 1.12 – Filtrage Spatial

### Distorsions géométriques

En plus du speckle, les images radars subissent des distorsions géométriques dues à la géométrie de visée oblique (side-looking) du système SAR. Ces distorsions se présentent sous forme de variations d'échelle de la portée proximale à la portée distale et sont regroupées en trois types :

1. **Raccourcissement/Compression (foreshortening)** : Sur un terrain en pente qui fait face au radar, la distance entre deux cibles (A, B) sur image est plus petite que la distance A, B du relief réel. On dit alors que la zone entre ces deux cibles se voit raccourcie ou compressée (figure 1.13). La limite de ce raccourcissement correspondra à une ambiguïté de cibles (si A et B se trouvent sur le même front d'onde, leurs signaux rétrodiffusés arrivent en même temps au capteur).

2. **Inversion/Repliement (Layover)** : Une inversion ou repliement du relief (relief layover) survient pour les fortes pentes. Sur la figure 1.13, on remarque que la réponse de la cible D arrive avant celle de la cible C ( $R_C > R_D$ ) et la pente CD, orientée face au radar, est supérieure à l'angle de vue. L'illumination de cette portion produit une inversion dans l'image radar.
3. **Zones d'ombre (shadowing)** : Les deux effets de raccourcissement "foreshortening" et de repliement "layover" induisent des ombres radars (figure 1.13). Ces ombres se produisent lorsque le faisceau n'est pas capable d'illuminer la surface du sol. Des ombres apparaissent dans la portée distale du couloir, derrière les formations verticales ou les pentes raides. Puisque le faisceau radar n'illumine pas la surface, les régions ombragées apparaîtront plus sombres sur une image car il n'y a pas d'énergie disponible pour la rétrodiffusion. À mesure que l'angle d'incidence augmente de la portée proximale à la portée distale, l'effet d'ombre augmentera suivant le faisceau radar qui illumine la surface de façon de plus en plus oblique [14].

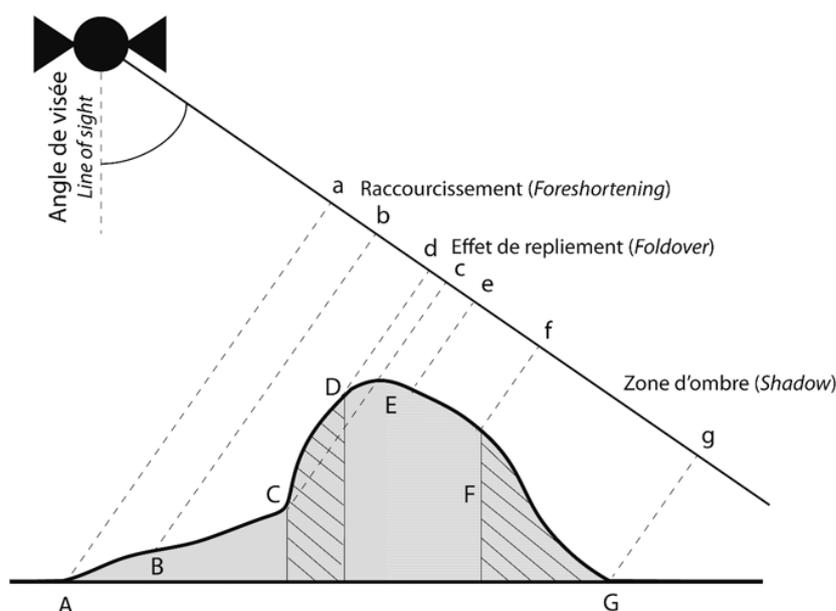


FIGURE 1.13 – Distorsions géométriques

Tout comme pour le speckle, il existe des techniques permettant de faire des corrections géométriques sur les images radar afin d'éliminer les distorsions citées précédemment. Parmi ces techniques, la plus répandue est le **géocodage** et se déroule en trois étapes [15] : Sélection d'un modèle mathématique de distorsion, transformation des coordonnées, et ré-échantillonnage.

- **1. Modèle mathématique de distorsion** : Un exemple de ce modèle est le modèle polynomial (équations 1.6 et 1.7) qui relie les coordonnées globales de l'image déformée à celles d'une image de référence ou d'une carte de référence.

$$x = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^{N-i} a_{(i,j)} x_{ref}^i y_{ref}^j \quad (1.6)$$

$$y = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^{N-i} b_{(i,j)} x_{ref}^i y_{ref}^j \quad (1.7)$$

Où  $a_{(i,j)}$  et  $b_{(i,j)}$  sont les coefficients qui représentent l'opération géométrique. Leur nombre dépend de l'ordre du polynôme. Habituellement, le polynôme quadratique (N=2) sera suffisant pour les images SAR.

- **2. Points de contrôle au sol - Ground Control Points (GCP)** : Les coefficients  $a_{(i,j)}$  et  $b_{(i,j)}$  peuvent être déterminés par spécification des GCP (points de contrôle au sol). Ces GCP doivent répondre aux critères suivants : Avoir un haut contraste, être invariants dans le temps et avoir la même élévation.
- **3. Ré-échantillonnage** : Un processus de ré-échantillonnage (ou interpolation) nécessite d'estimer un nouveau pixel entre les pixels existants. Trois méthodes de ré-échantillonnage sont utilisées. La 1<sup>ère</sup> est celle du *voisin le plus proche* dans laquelle les nouvelles valeurs des pixels sont obtenues du plus proche pixel d'un ancien pixel. La 2<sup>ème</sup> méthode est *l'interpolation bilinéaire* où les nouvelles valeurs des pixels sont calculées à partir de la moyenne pondérée de 4 ( $2 \times 2$ ) des pixels les plus proches. La 3<sup>ème</sup> méthode est la convolution cubique où les nouveaux pixels sont calculés à partir de la moyenne pondérée de 16 ( $4 \times 4$ ) pixels.

## Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre la télédétection de manière globale et ses étapes principales, ainsi que les différents systèmes RADAR et plus particulièrement le Radar à Synthèse d'Ouverture (SAR), son principe d'acquisition et ses types de plateforme. Dans le prochain chapitre, nous ferons connaissance de l'interférométrie et son rôle dans l'exploitation des images récoltées à l'aide du SAR.

# Chapitre 2

## L'interférométrie à base d'un système SAR

### Introduction

Après l'acquisition de deux images SAR et une fois la moyenne d'amplitude faite entre ces images, on mesure la différence de phase afin d'extraire l'information sur l'altitude du terrain. Cette technique s'appelle l'interférométrie et ce chapitre est consacré à son étude.

### 2.1 Généralités sur l'interférométrie

L'interférométrie radar est une technique de traitement d'images qui repose sur le calcul de la différence de phase pixel à pixel de deux images acquises dans les mêmes conditions de prise de vue mais par des antennes différentes. L'interférométrie repose sur l'hypothèse que la phase propre d'un pixel est stable entre deux prises de vues successives par le satellite [16]. A cet effet, les conditions géométriques, atmosphériques ainsi que l'état de la surface observée pour les deux acquisitions doivent être très proches. Cette technique exploite l'information de phase du signal radar rétrodiffusé et son but est de s'affranchir d'une partie des dépendances de la phase, afin de pouvoir extraire de celle-ci une information pertinente.

Comme le montre la figure 2.1, l'acquisition peut être réalisée soit simultanément dans le cas où le porteur (avion ou satellite) est équipé de deux antennes (technique dite mono-passe), ou espacée dans le temps si les deux images sont acquises par la même antenne lors de deux passages du porteur au-dessus de la même zone (technique dite double passe). Nous nommerons "baseline" la distance séparant les deux antennes au moment de l'acquisition d'un même pixel.

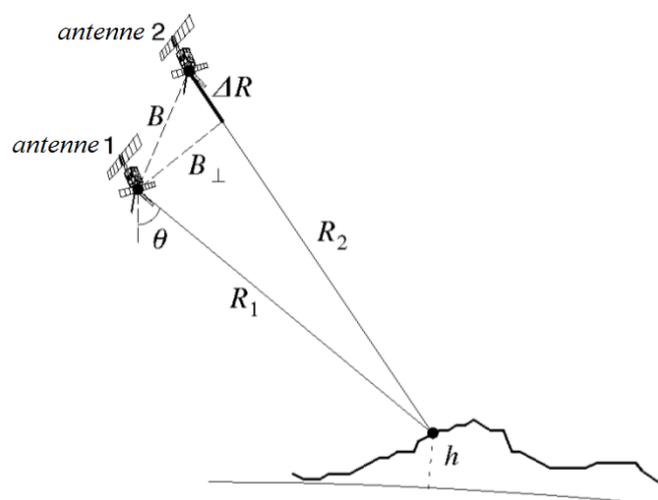


FIGURE 2.1 – Modèle géométrique simplifié de l'interférométrie

## 2.2 Interférométrie SAR (InSAR)

### 2.2.1 Principe de l'InSAR

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

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

### 2.2.2 Géométrie d'acquisition InSAR

A partir de des signaux rétrodiffusés et mesurés par le radar, des images de type SLC  $S_1$  et  $S_2$  sont générées. Leurs expressions respectives sont les suivantes :

$$\begin{cases} S_1 = A_1 \cdot e^{j\varphi_1} \\ S_2 = A_2 \cdot e^{j\varphi_2} \end{cases} \quad (2.1)$$

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

$$S_1.S_2 = A_1.A_2.e^{j(\varphi_1-\varphi_2)} \quad (2.2)$$

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

$$\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \Delta\varphi_{trajet} + \Delta\varphi_{propre} + \Delta\varphi_{atmosphere} + \Delta\varphi_{bruit} \quad (2.3)$$

Tel que :

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

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

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

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

### 2.2.3 Paramètres mathématiques de l'INSAR

L'interférométrie SAR dépend de deux paramètres principaux, qui sont la variation de la phase interférométrique  $\partial\varphi(p)$  et l'altitude d'ambigüité  $Z_{2\pi}$ . L'obtention de cette dernière passe par la mise en évidence de la relation entre la  $\partial\varphi(p)$  et l'altitude d'un point p quelconque  $Z(p)$  (figure 2.2).

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

#### Variation de la phase interférométrique

Les échos des cibles  $p$  et  $q$  à des altitudes respectives  $Z$  et  $Z=0$  sont confondus pour une seule et même acquisition. Ceci est du au fait que les deux cibles se trouvent sur le même front d'onde par rapport au capteur maître  $C_1$  (figure 2.2). De plus, on ne peut pas mesurer la variation de l'angle de vue  $\partial\theta$ . Par contre, si deux passage sont effectués par un

ou plusieurs capteurs avec des angles de vues différents, on pourra alors déterminer  $\partial\theta$  à partir de la phase interférométrique [17].

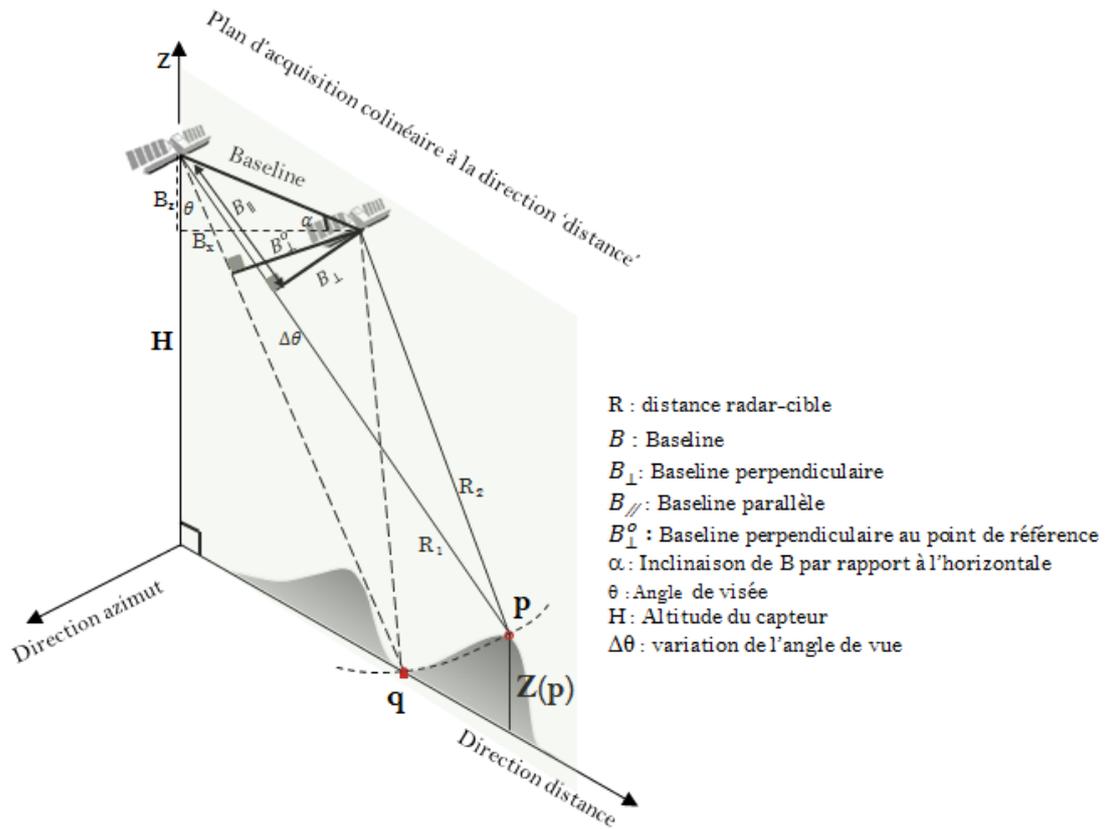


FIGURE 2.2 – Modèle géométrique détaillé de l'InSAR

En utilisant la hauteur du satellite et la distance  $R_1$  séparant le satellite aux points  $p$  et  $q$ , on peut calculer l'altitude  $Z_p$  (figure 2.2). La phase interférométrique du point  $p$  est donnée par l'équation suivante :

$$\varphi(p) = \varphi_1(p) - \varphi_2(p) = \frac{-4\pi}{\lambda}(R_1 - R_2) = \frac{-4\pi}{\lambda}\Delta R \quad (2.4)$$

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

$$\partial\varphi(p) = \frac{-4\pi}{\lambda}\partial\Delta R \quad (2.5)$$

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

vue  $\partial\theta$  et est donnée par :

$$\partial\Delta R = B \sin(\theta^0 - \alpha) \partial\theta \quad (2.6)$$

Tel que  $\theta^0$  est l'angle correspondant à la cible de référence.

Géométriquement, le terme  $B \sin(\theta^0 - \alpha)$  représente la baseline perpendiculaire au point de référence et est notée  $B_{\perp}^0$  (figure 2.2). D'où :

$$\partial\Delta R = B_{\perp}^0 \partial\theta \quad (2.7)$$

À partir des équations 2.5 et 2.7, on obtient la variation de la phase interférométrique dont l'expression est la suivante :

$$\partial\varphi(p) = \frac{-4\pi}{\lambda} B_{\perp}^0 \partial\theta \quad (2.8)$$

D'où :

$$\partial\theta = \frac{-\lambda}{4\pi} \frac{\partial\varphi(p)}{B_{\perp}^0} \quad (2.9)$$

### Relation Phase-Altitude

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

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

$$H_{sat} = R_1 \cos \theta \quad (2.10)$$

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

$$\partial H_{sat} = -Z(p) = -R_{1p} \sin \theta_p^0 \partial\theta \quad (2.11)$$

D'où :

$$Z(p) = R_{1p} \sin \theta_p^0 \partial\theta \quad (2.12)$$

- En injectant l'expression 2.9 de  $\partial\theta$  dans l'équation 2.12, on déduit l'altitude  $Z$  dont l'expression est donnée par :

$$Z(p) = \frac{-\lambda}{4\pi} \frac{R_{1p} \sin \theta_p^0}{B_{\perp}^0} \partial\varphi(p) \quad (2.13)$$

### Altitude d'ambigüité

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

$$Z_{2\pi} = \left| \frac{\lambda R_{1p} \sin \theta_p^0}{2B_{\perp}^0} \right| \quad (2.14)$$

L'expression 2.14 nous montre que l'altitude d'ambigüité est inversement proportionnelle à la baseline perpendiculaire. En d'autres termes, plus on augmente la baseline, plus l'altitude d'ambigüité sera réduite, ce qui offre une meilleure précision altimétrique.

Une courte altitude d'ambigüité entraîne l'apparition d'un grand nombre de frange sur l'interférogramme, ce qui rend l'opération du déroulement de phase (cf. Chapitre 3) plus complexe et plus long. D'un autre côté, une courte baseline correspond à une longue altitude d'ambigüité, rendant les franges trop grandes et causant donc une mauvaise détection de la topographie. Le compromis entre précision altimétrique et facilité du déroulement de phase se fait en fonction des besoins et des paramètres du terrain étudié.

### 2.2.4 Cohérence des interférogrammes et décorrélations

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

$$\gamma(i, j) = \frac{\sum_{i=1}^{k_1} \sum_{j=1}^{k_2} S_1(i, j) * s_2(i, j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{k_1} \sum_{j=1}^{k_2} |S_1(i, j)|^2 \sum_{i=1}^{k_1} \sum_{j=1}^{k_2} |S_2(i, j)|^2}} \quad (2.15)$$

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

1. **Décorrélation spatiale** : Elle est due à la séparation des deux antennes radars, et l'observation sous des angles d'incidences légèrement différents. Même si les pixels

des images SLC1 et SLC2 couvrent les mêmes cellules, le motif d'interférence des réflexions élémentaires varie en raison de l'évolution de la géométrie.

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

### 2.2.5 Processus interférométrique

L'exploitation d'un interférogramme pour générer l'information altimétrique  $Z$  passe par un processus regroupant les étapes suivantes :

1. **Superposition géométriques des images SAR** : Pour extraire la différence de phase entre deux grandeurs, les images SAR doivent être superposables. On parle alors de *coregistration*.
2. **Produit interférométrique** : C'est le calcul du produit normalisé  $\gamma$  de deux ou plusieurs signaux. Pour deux signaux  $S_1$  et  $S_2$ , on a :

$$\gamma(i, j) = \frac{\sum_{(i,j) \in F} (S_1(i, j) * S_2(i, j))}{\sqrt{\sum_{(i,j) \in F} S_1^2(i, j) \sum_{(i,j) \in F} S_2^2(i, j)}} \quad (2.16)$$

Le module de cette expression est une mesure de corrélation entre les deux images. Sa valeur est comprise entre 0 et 1. Elle constitue un indicateur de la fiabilité des images interférométriques. L'argument quand à lui représente la phase interférométrique.

3. **Estimation et élimination des franges orbitales** : La baseline crée un déphasage entre les deux signaux rétrodiffusés par la même cible (même si cette dernière représente un terrain plat). Ceci perturbe la phase topographique. Il est donc nécessaire d'éliminer toute composante qui existe dans la phase interférométrique et de garder uniquement la composante topographique. Le principe de base d'élimination de ces franges est de construire une phase représentative des variations de ces franges qui sera ensuite soustraite de l'interférogramme.

4. **Déroulement de phase** : C'est la reconstitution de la phase interférométrique absolue à partir de la phase modulo  $2\pi$ . Cette étape est détaillée dans le prochain chapitre.
5. **Conversion de la phase en altitude** : La conversion de la phase interférométrique *déroulée* permet de faire la correspondance entre la phase interférométrique *reconstruite* et l'altitude topographique.
6. **Géoréférencement** : C'est l'étape par laquelle on attribue un emplacement spatial à l'information altimétrique  $Z$  en lui donnant des coordonnées géographiques.

## 2.3 Interférométrie différentielle SAR (DInSAR)

L'interférométrie différentielle SAR (ou DInSAR) utilise les mêmes concepts que l'InSAR, sauf qu'on se focalise sur le déplacement *altimétrique* d'une cible selon la visée du satellite. Par exemple, si un séisme cause le déplacement vertical d'une montagne sur une distance  $D$  (figure 2.3), l'interférométrie différentielle a pour but de déterminer ce déplacement. Pour ce, on effectue une différence de différence de phase. En d'autres termes, le DInSAR exploite l'information contenue dans la phase d'au moins deux signaux SAR, acquis à des dates différentes sur la même scène.

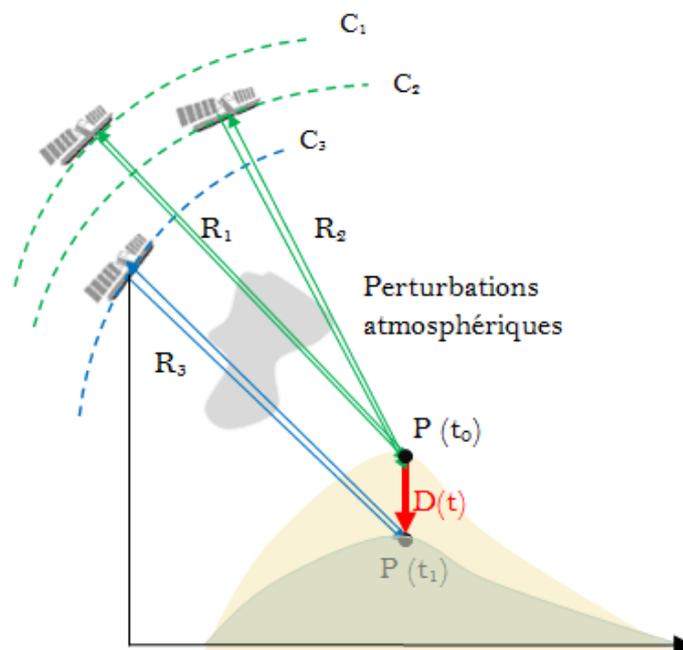


FIGURE 2.3 – Modèle géométrique du DInSAR

## Modèle géométrique du DInSAR

D'après la géométrie d'acquisition des deux passes  $C_1$  et  $C_2$  illustrée dans la figure 2.3, la différence des distances est donnée par l'équation suivante :

$$\Delta R = (R_1 - R_2) + D_p \quad (2.17)$$

$D_p$  étant la déformation de la cible P dans la direction de visée du satellite.

Pour rappel, la phase interférométrique du point P est donnée par l'équation suivante :

$$\varphi(p) = \varphi_1(p) - \varphi_2(p) = \frac{-4\pi}{\lambda}(R_1 - R_2) = \frac{-4\pi}{\lambda}\Delta R \quad (2.18)$$

En utilisant l'équation 2.18, la différence de phases des deux acquisitions (avant et après) est formulée par :

$$\Delta\varphi_p = \frac{-4\pi}{\lambda}(R_3 - R_1) + \frac{4\pi}{\lambda}D_p \quad (2.19)$$

Le premier terme est proportionnel aux franges topographiques et orbitales, tandis que le deuxième terme est proportionnel aux franges de déplacement. La variation de cette phase par rapport à une référence en fonction des paramètres géométriques du modèle d'acquisition interférométrique est donnée par l'expression suivante :

$$\delta\varphi_p = \frac{-4\pi}{\lambda} \left( D_p - \frac{B_{\perp}^0}{R_1 \sin\theta} Z_p + B \sin(\theta^0 - \alpha) \right) \quad (2.20)$$

En distribuant les termes, on aboutit à l'équation suivante :

$$\delta\varphi_p = \frac{-4\pi}{\lambda} D_p - \frac{-4\pi}{\lambda} \left( \frac{B_{\perp}^0}{R_1 \sin\theta^0} Z_p \right) + \frac{-4\pi}{\lambda} B \sin(\theta^0 - \alpha) \quad (2.21)$$

Tel que :

- $\frac{-4\pi}{\lambda} B \sin(\theta^0 - \alpha) = \varphi_{FO}$  : Phase due à la baseline.
- $\frac{-4\pi}{\lambda} \left( \frac{B_{\perp}^0}{R_1 \sin\theta^0} Z_p \right) = \varphi_{topo}$  : Phase topographique.

Les deux phases ci-dessus sont éliminées. On ne garde donc que la phase de déformation  $\varphi_p$  :

$$\varphi_p = \frac{-4\pi}{\lambda} D_p \quad (2.22)$$

D'où :

$$D_p = \frac{-\lambda}{4\pi} \varphi_p \quad (2.23)$$

Pour un déphasage de  $2\pi$ , on a donc :

$$D_p = \frac{-\lambda}{4\pi} 2\pi = \frac{-\lambda}{2} \quad (2.24)$$

Où  $\lambda$  est la longueur d'onde de l'impulsion radar.

## Conclusion

Après avoir présenté le Radar SAR, nous nous sommes intéressés à l'interférométrie SAR et l'interférométrie différentielle SAR, ainsi que leurs modèles géométriques respectifs. Dans le prochain chapitre, nous entamerons la problématique du déroulement de phase, étape crucial dans le traitement des images SAR.

# Chapitre 3

## Le déroulement de phase

### Introduction

Précédemment, nous avons vu que la phase  $\varphi$  donnée par l'interférogramme représente la phase interférométrique "enroulée", c'est-à-dire connue modulo  $2\pi$ ).  $\phi$  étant la phase absolue à retrouver, on a donc :  $\phi = \varphi + 2k\pi$ .

Tel que  $k$  est un entier indéterminé représentant le nombre de cycles à ajouter à chaque mesure de la phase. Toute la problématique de l'interférométrie réside dans la détermination  $k$ , d'où la nécessité du déroulement de phase. L'idée la plus répandue consiste à contraindre la variation de la phase absolue  $\phi$  entre deux points consécutifs. Si  $\varphi$  varie de plus de  $\pi$  ou de moins de  $-\pi$ , on suppose que la phase a changé d'un cycle et l'entier  $k$  sera respectivement incrémenté ou décrémenté de 1, comme illustré dans la figure 3.1.

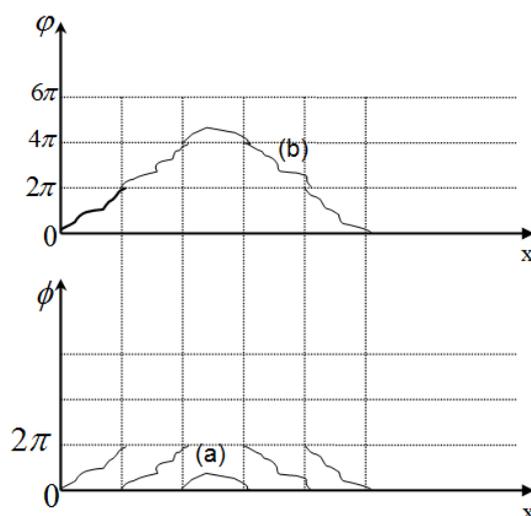


FIGURE 3.1 – a. Phase enroulée (mesurée). b. Phase déroulée (déduite)

## 3.1 Méthodes de déroulement : état de l'art

Différentes approches, techniques et méthodes de déroulement de phase ont été étudiées, développées et testées sur des interférogrammes obtenus pour différentes configurations d'acquisition et de baselines. Elles ont été regroupées en trois types d'approche essentielles : locale, globale et mixte.

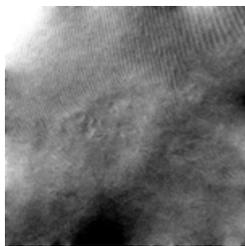
### 3.1.1 Approche globale

Les méthodes globales visent à minimiser un critère de régularité sur l'ensemble l'image. La méthode globale la plus connue est celle de la détection des contours. Elle fut utilisée pour la première fois en 1991 [18] afin de localiser les bords de franges de manière à segmenter l'interférogramme en régions. Pour ce, une série de filtres orientés ( $-90^\circ$ ,  $-45^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  et  $90^\circ$ ) sont appliqués, ensuite les contours obtenus sont regroupés et la phase est déroulée, en ajoutant ou en retranchant un multiple de  $2\pi$  à chaque fois, que l'on croise un bord de frange [18]. Une seconde image des contours à basse résolution est obtenue après un filtrage médian de l'interférogramme qui préserve les contours du moment que les franges sont suffisamment larges. Un algorithme de fermeture de contours s'appuyant sur ces images binaires est ensuite employé pour retrouver les bords des franges ayant les propriétés attendues.

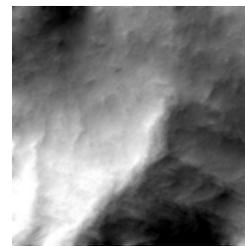
Une autre méthode globale utilisée est celle du moindre carré qui cherche à minimiser l'erreur quadratique  $E$  sur une image de  $N \times N$  pixels. L'expression de  $E$  est la suivante :

$$E = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=1}^N \left( \varphi(i+1, j) - \varphi(i, j) - \phi_x(i, j) \right)^2 + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{N-1} \left( \varphi(i, j+1) - \varphi(i, j) - \phi_y(i, j) \right)^2 \quad (3.1)$$

L'efficacité de cette méthode réside dans sa capacité à dérouler la phase sur des images de tailles importantes en un temps raisonnable. La figure 3.2 montre un interférogramme dont la phase est déroulée par la méthode des moindres carrés.



(a) Phase enroulée



(b) Phase déroulée

FIGURE 3.2 – Déroulement de phase par la méthode du moindre carrée

### 3.1.2 Approche locale

#### a) Proche en proche par propagation

Son principe est basé sur le traitement des phases (pixels) de manière séquentielle selon une initialisation et un parcours. Dans ce sens, la première méthode de déroulement de phase, dans cette approche, est dite de Proche en Proche par propagation. Le signal bidimensionnel de phase, connu modulo  $2\pi$  dans l'interférogramme, est échantillonné spatialement selon les tailles de pixels obtenues en azimuth et en distance. Après une série de traitements de reconstruction d'images radar, l'échantillonnage doit se faire au double des fréquences maximales respectives du signal. La différence de phase exacte entre deux échantillons (pixels) voisins doit alors être inférieure à la demi-période  $\pi$ . Si  $p_1$  et  $p_2$  désignent deux pixels voisins au sens de la 4-connexité, on a

$$|\Delta\varphi(p_1, p_2)| = |\varphi(p_2) - \varphi(p_1)| < \pi \quad (3.2)$$

De cette hypothèse, on peut définir les différences de phases corrigées  $\phi_c$  à partir des différences entre les phases principales  $\Delta\varphi(p_1, p_2) = \varphi(p_2) - \varphi(p_1)$ . La règle est la suivante :

$$\phi_c(p_1, p_2) = \begin{cases} \Delta\varphi(p_1, p_2) & \text{si } |\Delta\varphi(p_1, p_2)| \leq \pi \\ \Delta\varphi(p_1, p_2) \pm 2\pi & \text{si } |\Delta\varphi(p_1, p_2)| > \pi \end{cases} \quad (3.3)$$

La figure 3.3 représente un interférogramme simulé d'une pyramide ainsi que le processus de déroulement de phase.

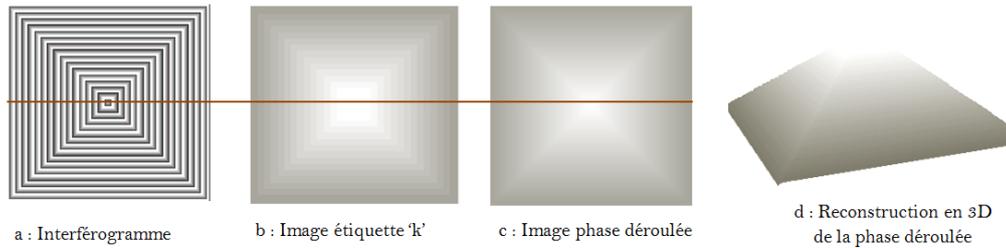


FIGURE 3.3 – Déroulement de phase sur un interférogramme simulé d'une pyramide.

Cette méthode, facile à implémenter, reste cependant impraticable dans le cas réel. La présence de bruit crée des discontinuités qui, lors du déroulement de phase, propagent l'erreur dans la direction (lignes ou colonnes) du déroulement (figure 3.4). Pour palier à cela, des travaux [19][20] cherchant à modéliser ces irrégularités ont été proposés dans le but de déterminer le chemin de déroulement le plus approprié, ou alors de créer des masques qui neutralisent les zones incohérentes et ne permettent pas la propagation des erreurs sur tout l'interférogramme lors du déroulement local des phases. L'identification

et la localisation de ces irrégularités peuvent être accomplies par l'évaluation de la somme des dérivées partielles selon un parcours fermé et la génération d'une image de résidus.

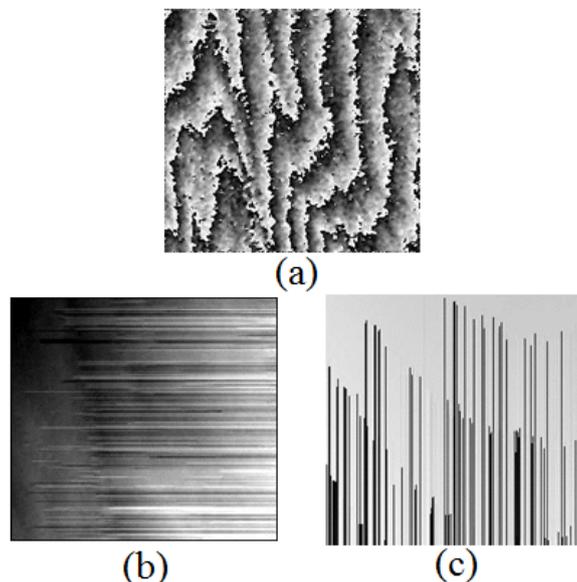


FIGURE 3.4 – Déroulement de phase de proche en proche.

a) Interférogramme réel.

b) Phase déroulée selon les lignes. c) Phase déroulée selon les colonnes.

### b) Localisation et détection des résidus

La quantification de la discontinuité de la phase enroulée consiste à calculer les pseudogradients sur le plus court chemin fermé [21]. Sur une grille régulière telle que l'image interférogramme, le calcul d'un résidu s'effectue sur un nœud de 2x2 pixels en additionnant la différence des phases (figure 3.5). Il est exprimé par l'équation suivante :

$$residu(i, j) = g_x(i, j) - g_y(i + 1, j) - g_x(i, j + 1) + g_y(i, j) \quad (3.4)$$

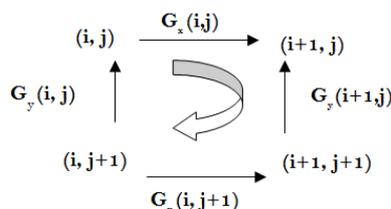


FIGURE 3.5 – Graphe de calcul des résidus

Selon la discontinuité, il prend la valeur '0' en l'absence des irrégularités des phases, et les valeurs +1 ou -1 (pour un interférogramme normalisé) dans le cas inverse. Les résidus sont affectés d'un signe que l'on appelle polarité du résidu ou encore charge du résidu. Le sens du parcours se fait, par convention dans le sens des aiguilles d'une montre. L'inversion de sens du parcours entraîne l'inversion de la polarité des résidus (figure 3.6).

Les résidus sont très proches au niveau des transitions de franges. Conséquemment, plus les franges sont proches les unes des autres, plus le nombre de résidus augmente. Une étape de filtrage de l'interférogramme est donc nécessaire avant le déroulement de phase.

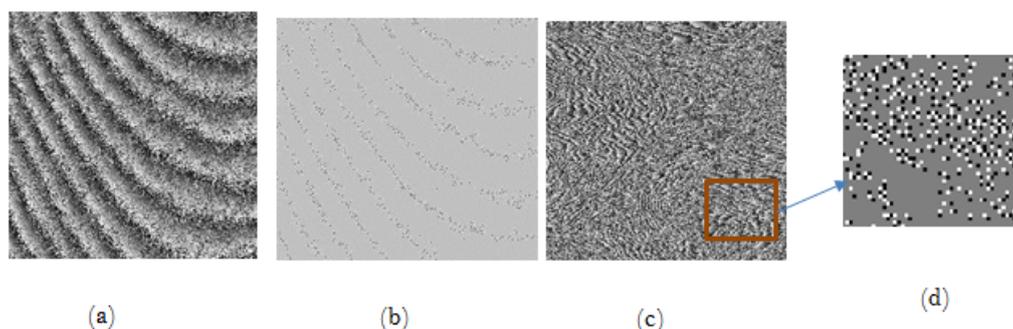


FIGURE 3.6 – Exemple d'images de résidus. a) Interférogramme 1. b) Images de résidus. c) Interférogramme 2. d) Résidus denses au niveau des transitions de franges.

### c) Proche en proche avec évitement des discontinuités

Une fois les résidus calculés, la méthode de Goldstein consiste à relier les résidus de signes opposés en supposant qu'un bruit sur l'interférogramme peut engendrer un couple de résidus (+1 et -1). Les lignes les plus courtes reliant les résidus sont appelées coupures. Les extrémités des coupures sont reliées aux bordures de l'image si la somme dans une coupure n'est pas nulle (si le nombre de résidus positifs diffère du nombre des résidus négatifs).

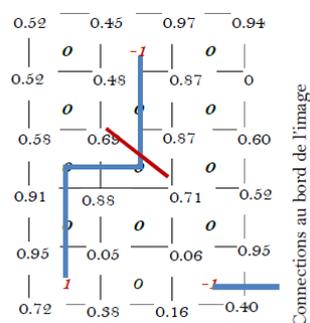


FIGURE 3.7 – Connexion des résidus

Lorsque tous les résidus sont reliés et les coupures tracées (figure 3.7), le déroulement devient indépendant du chemin du parcours choisi, il faut seulement éviter de franchir une coupure (ligne bleue de la figure 3.7). La figure 3.8 est un exemple de résultat de déroulement de proche en proche avec évitement des discontinuités.

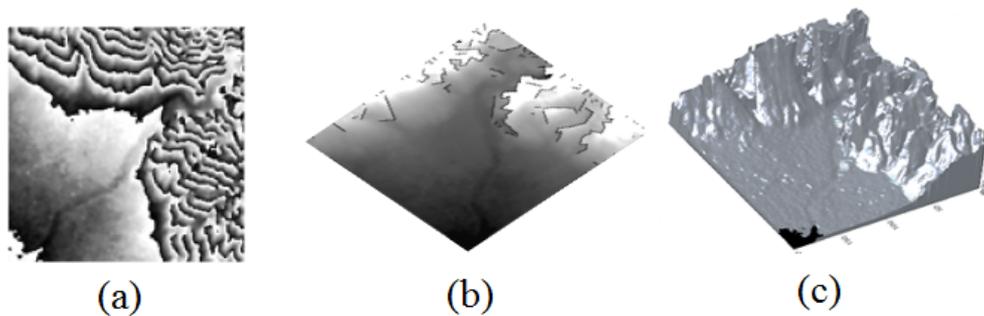


FIGURE 3.8 – Déroulement 2D d'un interférogramme.

- a) Interférogramme réel.
- b) Lignes de coupures sur l'interférogramme déroulé.
- c) Représentation 3D de l'interférogramme déroulé.

### 3.1.3 Approche mixte (hybride)

L'approche mixte ou hybride comprend un ensemble de méthodes qui permettent d'exploiter efficacement les méthode locale et globale. Une des méthodes les plus utilisées dans les méthodes mixtes est la segmentation Markovienne.

La méthode Markovienne formalise le problème de déroulement de phase comme un problème étiquetage de graphe. Chaque pixel est un nœud du graphe que l'on doit classer. Les classes possibles sont des étiquettes qui correspondent à un nombre  $k$  de cycles de phase à ajouter.

## 3.2 Déroulement de phase par image de qualité

*Dans cette section, nous allons présenter la méthode à laquelle nous nous sommes intéressés, et qui est le **déroulement de phase par image de qualité**.*

Le déroulement de phase par la qualité guidée (quality-guided) est une approche appartient à la catégorie *path-following* (suivi du chemin). Elle est essentiellement basée sur la génération d'une image de qualité d'interférogramme à partir de celle de cohérence originale issue du processus d'imagerie InSAR, ou bien directement à partir de l'interférogramme

filtré (ceci sera détaillé dans cette section). L'image de qualité est utilisée comme un chemin guidant le filtrage de l'interférogramme. [22].

Pour comprendre cette méthode, il est nécessaire de faire un rappel sur la notion de segmentation. La segmentation d'une image est une opération qui a pour but de rassembler des pixels entre eux suivant des critères pré-définis. Les pixels sont ainsi regroupés en régions, qui constituent un pavage ou une partition de l'image.

Les méthodes de segmentation les plus connues sont :

- La segmentation fondée sur les régions (region-based segmentation). On y trouve par exemple la croissance de région (region-growing) et la fusion (merge).
- La segmentation fondée sur les contours (edge-based segmentation).
- La segmentation fondée sur la classification ou le seuillage des pixels en fonction de leur intensité (thresholding).
- La segmentation fondée sur la coopération entre ces trois segmentations.

## Algorithme global

On associe à chaque pixel  $(i,j)$  sa phase  $\varphi(i,j)$  et une valeur de qualité  $\rho(i,j)$  comprise entre 0 et 1. Le déroulement commence par le pixel ayant la valeur de qualité la plus élevée. La propagation du déroulement des autres pixels se fait par décroissance des valeurs de qualité associées à chaque pixel. Le dernier pixel à dérouler correspond à la plus faible valeur de la qualité. L'algorithme est le suivant [23] :

### DEBUT

Calcul des résidus.

Déclaration des pixels entourant les résidus.

Initialisation du seuil de qualité.

### REPETER

#### REPETER

Déclarer les composants non fusionnés.

**POUR** (chaque pixel de l'image)

**SI** (qualité < seuil

ET le pixel n'est pas dans le masque des résidus

ET [le pixel est une graine OU juxtapose un composant du masque]

ET Le pixel ne juxtapose pas un composant fusionné).

**ALORS**

(

```
Ajouter le pixel au masque.

SI (Le pixel juxtapose plusieurs composants du masque)
ALORS (fusionner ces composants)
FIN SI

SI (Le pixel juxtapose un contour)
ALORS (Mettre la charge résiduelle à zéro).
FIN SI
)
FIN SI
FIN POUR
JUSQU'À (Aucun pixel ajouté).

Incréments le seuil.

JUSQU'À (Tous les composants sont déchargés).

Ajouter les voisins des résidus au masque.

FIN
```

Le succès de l'algorithme repose sur la façon dont la carte de qualité est calculée et les résultats de ces méthodes varient d'une carte à une autre. Leur inconvénient est qu'elles reposent entièrement, pour le déroulement, sur les images de qualité. Or, celles-ci sont pour la plupart calculées sur la base de la carte de phase en utilisant les méthodes générales de traitement d'image sans aucune connaissance des discontinuités.

## Méthodes de calcul

Les méthodes de calcul de la matrice de qualité les plus utilisées en interférométrie sont : la mesure de pseudo-corrélation, la dérivée de la variance de phase, le gradient maximal de la phase et la deuxième différence [24].

### Image de qualité par mesure de pseudo-corrélation

La mesure de pseudo-corrélation estime l'image de qualité à partir de phase enroulée, elle converge vers la carte de corrélation lorsque les amplitudes de l'intéférogramme complexes sont inconnus. La mesure de la pseudo-corrélation définit la qualité de chaque pixel

de l'interférogramme, elle est calculée par l'équation suivante :

$$q(m, n) = Ph_{PC(m,n)} = \frac{1}{k^2} \times \sqrt{\left( \sum_{i=m-w}^{m+w} \sum_{j=n-w}^{n+w} \cos(\varphi_{i,j}) \right)^2 + \left( \sum_{i=m-w}^{m+w} \sum_{j=n-w}^{n+w} \sin(\varphi_{i,j}) \right)^2} \quad (3.5)$$

$$\text{Tel que } w = \frac{k-1}{2}$$

Les termes  $\varphi(i, j)$  sont les valeurs de la phase interférométrique des pixels (i,j). Les sommes sont calculées dans une fenêtre de taille  $k \times k$  pour chaque pixel de coordonnées (m,n).

### Image de qualité par la dérivée de la variance de phase

Cette méthode mesure la variance statistique locale des dérivés des phases enroulées. C'est la carte de qualité la plus fiable qui peut être extraite de la phase enroulée. La qualité d'un pixel est définie comme étant l'inverse de la variance, donnée par :  $q(m, n) = \frac{1}{Ph_{D(m,n)}}$ .

Tel que :

$$Ph_{D(m,n)} = \frac{1}{k^2} \times \sqrt{\sum_{i=m-w}^{m+w} \sum_{j=n-w}^{n+w} (\nabla^h \varphi_{i,j} - \overline{\nabla^h \varphi_{i,j}})^2} + \frac{1}{k^2} \times \sqrt{\sum_{i=m-w}^{m+w} \sum_{j=n-w}^{n+w} (\nabla^v \varphi_{i,j} - \overline{\nabla^v \varphi_{i,j}})^2} \quad (3.6)$$

$\nabla^h \varphi_{i,j} = \frac{k-1}{2} (\varphi(i+1, j) - \varphi(i, j))$  et  $\nabla^v \varphi_{i,j} = \frac{k-1}{2} (\varphi(i, j+1) - \varphi(i, j))$  sont les gradients de la phase enroulée respectivement dans les directions horizontale et verticale, avec :

$$\nabla^h \varphi_{i,j} = w\varphi(i+1, j) - \varphi(i, j) \quad \nabla^v \varphi_{i,j} = w\varphi(i, j+1) - \varphi(i, j)$$

Tel que  $w$  est un opérateur de correction de la phase entre deux pixels où on ajoute/soustrait  $\pi$  respectivement à chaque fois que la différence est supérieur à  $\pi$  ou inférieur à  $-\pi$ .

$\overline{\nabla^h \varphi_{i,j}}$  et  $\overline{\nabla^v \varphi_{i,j}}$  sont les moyennes de ces gradients dans la fenêtre  $k \times k$ .

### Image de qualité par le gradient maximal de la phase

La méthode du gradient maximal de phase mesure l'amplitude du plus grand gradient de la phase, qui correspond aussi aux dérivées partielles ou les différences de phase enroulée dans une fenêtre de taille  $k \times k$ . L'expression de calcul est donnée par :

$$max_{Grad\_Phase}(m, n) = \left\{ \begin{array}{l} \max \{ |\nabla^h \varphi_{i,j}| \}_{sur\ k \times k} \\ \max \{ |\nabla^v \varphi_{i,j}| \}_{sur\ k \times k} \end{array} \right\} \quad (3.7)$$

$|\nabla^h \varphi_{i,j}|$  et  $|\nabla^v \varphi_{i,j}|$  sont les dérivées partielles de la phase enroulée selon les directions horizontale et verticale.

La qualité d'un pixel est définie comme étant l'inverse du maximum de gradient, donnée par l'équation suivante :

$$q(m, n) = \frac{1}{\max_{Grad\_Phase}(m, n)} \quad (3.8)$$

### Image de qualité par la deuxième différence

Les critères pour déterminer la qualité d'un pixel, dans ce cas, se basent sur sa différence par rapport à ses 8 voisins orthogonaux et diagonaux dans une fenêtre de  $(3 \times 3)$ .

La deuxième différence d'un pixel  $(i, j)$  est calculée par l'équation suivante :

$$D(i, j) = \sqrt{H(i, j)^2 + V(i, j)^2 + D_1(i, j)^2 + D_2(i, j)^2} \quad (3.9)$$

Avec :

$$H(i, j) = \gamma[\varphi(i, j-1) - \varphi(i, j)] - \gamma[\varphi(i, j) - \varphi(i, j+1)]$$

$$V(i, j) = \gamma[\varphi(i-1, j) - \varphi(i, j)] - \gamma[\varphi(i, j) - \varphi(i+1, j)]$$

$$D_1(i, j) = \gamma[\varphi(i-1, j-1) - \varphi(i, j)] - \gamma[\varphi(i+1, j+1) - \varphi(i, j+1)]$$

$$D_2(i, j) = \gamma[\varphi(i+1, j-1) - \varphi(i, j)] - \gamma[\varphi(i, j) - \varphi(i-1, j+1)]$$

Tel que  $\gamma$  est un opérateur de correction de la phase entre deux pixels où on ajoute/soustrait  $\pi$  respectivement à chaque fois que la différence est supérieur à  $\pi$  ou inférieur à  $-\pi$ .

La fiabilité R d'un pixel est défini comme suit :  $R(i, j) = \frac{1}{D(i, j)}$

## Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le déroulement de phase, ses différentes méthodes ainsi que l'algorithme que nous avons implémenté. Les résultats de l'implémentation seront présentés dans le prochain chapitre.

# Chapitre 4

## Application et résultats

### Introduction

Dans ce chapitre, nous entamerons la partie pratique de notre travail. Nous présenterons d'abord le logiciel ENVI et le langage IDL, puis nous présenterons les résultats de l'implémentation des deux algorithmes développés dans le chapitre précédent sur des interférogrammes réels issus d'acquisitions radar dans la région d'El-Harrach.

#### 4.1 Logiciel ENVI et Langage IDL

ENVI, acronyme d'*ENvironment for Visualizing Images*, est un logiciel utilisé pour traiter et analyser les images géospatiales. ENVI regroupe un bon nombre d'algorithmes contenus dans un menu permettant aux utilisateurs d'accomplir des tâches complexes de manière rapide et automatique. (figure 4.1).

IDL, acronyme d'*Interactive Data Language*, est un langage de traitement de données et de visualisation issu d'un autre logiciel interactif de traitement de données solaires conçu par la NASA au début des années 1980 pour le traitement des données du satellite Solar Maximum Mission. Aujourd'hui, IDL s'est imposé comme le principal langage de programmation en télédétection et en astronomie car il présente des avantages clés, notamment la clarté de la syntaxe, la similitude avec le langage C, la rapidité de programmation ainsi que l'accessibilité (la commande "help" permettant d'exploiter pleinement les fonctionnalités du langage) [25]. La programmation en langage IDL se fait principalement dans des environnements appelés *procédures* (figure 4.2).

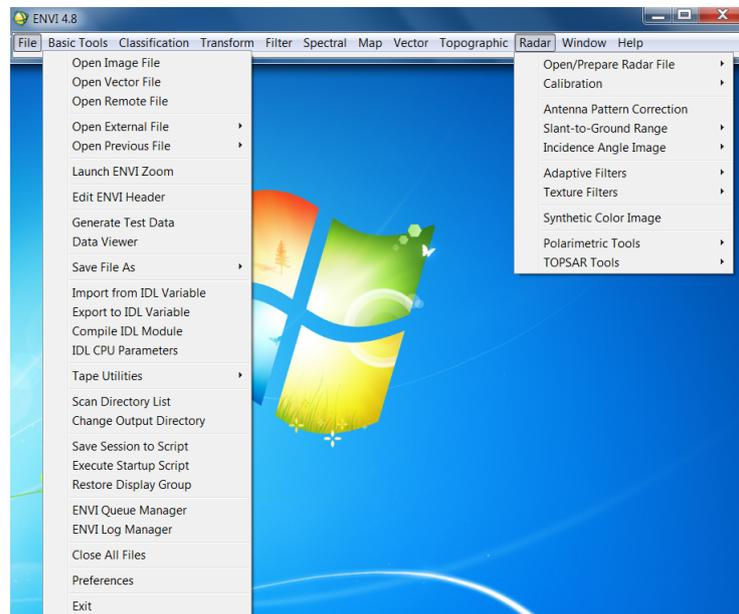
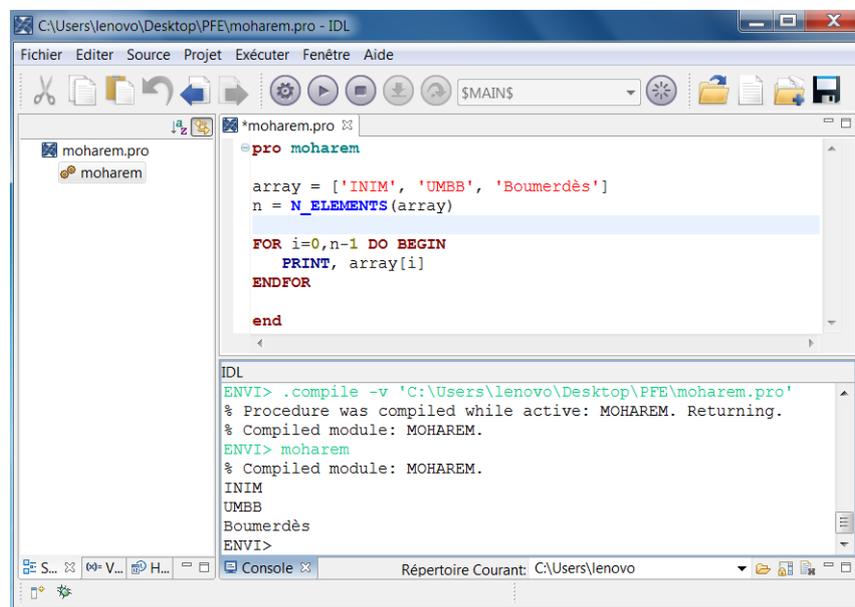


FIGURE 4.1 – Menu principal ENVI 4.8 avec affichage des sous-menus "File" et "Radar".

The image displays an IDL script editor window titled 'C:\Users\lenovo\Desktop\PF\moharem.pro - IDL'. The script contains the following code:

```
pro moharem
array = ['INIM', 'UMBB', 'Boumerdès']
n = N_ELEMENTS(array)

FOR i=0,n-1 DO BEGIN
  PRINT, array[i]
ENDFOR

end
```

The console window at the bottom shows the execution output:

```
ENVI> .compile -v 'C:\Users\lenovo\Desktop\PF\moharem.pro'
% Procedure was compiled while active: MOHAREM. Returning.
% Compiled module: MOHAREM.
ENVI> moharem
% Compiled module: MOHAREM.
INIM
UMBB
Boumerdès
ENVI>
```

The status bar at the bottom indicates the current directory is 'C:\Users\lenovo'.

FIGURE 4.2 – Programme en langage IDL affichant des chaînes de caractères.

## 4.2 Implémentation des algorithmes

**Rappel :** Avant de nous attaquer à l'implémentation, nous ferons, sous forme de diagramme (figure 4.3), un bref rappel du processus interférométrique détaillé dans le chapitre 2 section 2.2.5. Suivant les étapes mentionnées dans ce diagramme, nous exposerons ensuite les images utilisées et le résultat de leur traitement à l'aide des algorithmes développés.

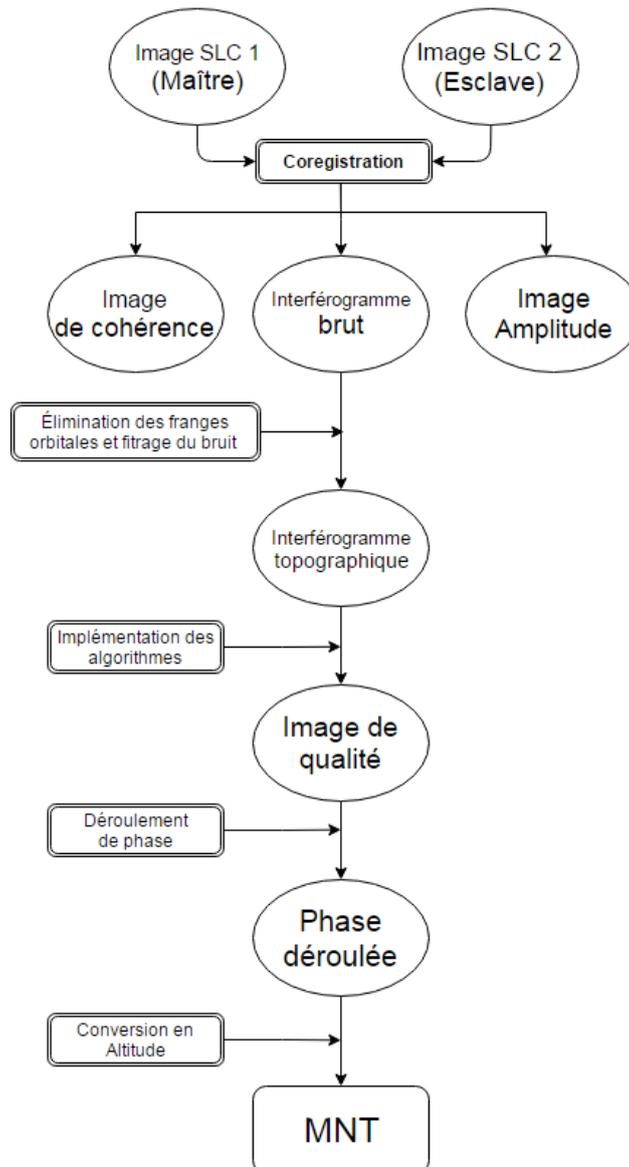
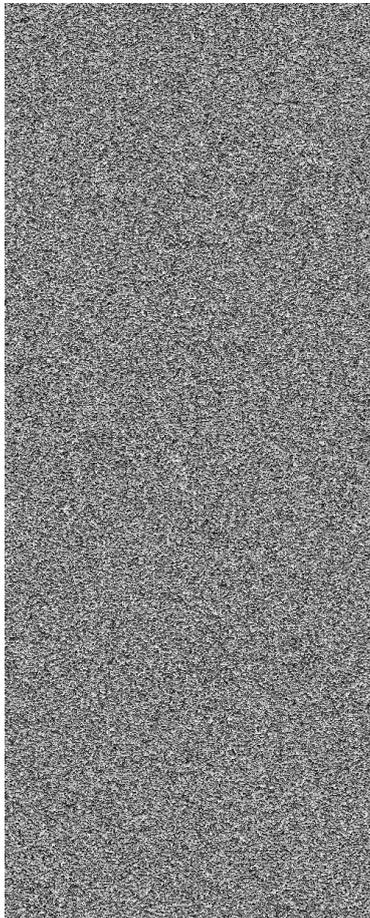


FIGURE 4.3 – Diagramme de la chaîne de traitement des données interférométriques

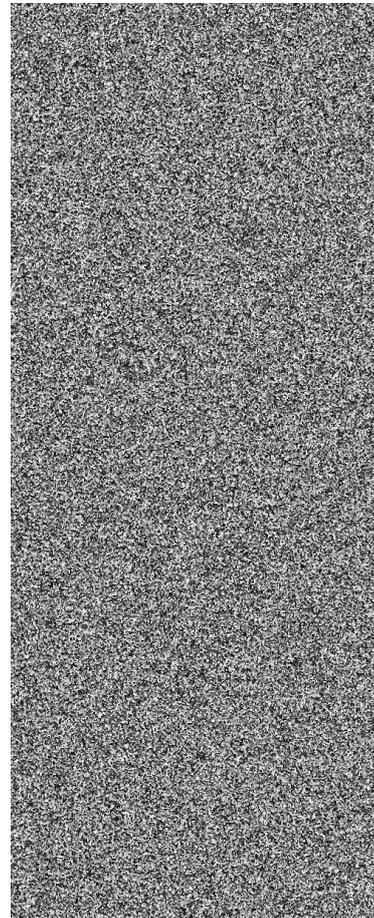
### 4.2.1 Images SLC utilisées

Voici ci-dessous les images SLC acquises dans la région d'El-Harrach avec leur caractéristiques :

- Taille en distance : 20.154203m. Taille en azimuth : 4.047244m.
- Baseline : 407.255m.
- Altitude d'ambiguïté : 22.696m.
- Décalage en azimuth : 1.84m. Décalage en distance : 2.096m.



(a) Image SLC 1 (Maître)



(b) Image SLC 2 (Esclave)

FIGURE 4.4 – Images SLC de la région d'El-Harrach.

### 4.2.2 Interférogramme généré à partir des images SLC

L'interférogramme obtenu à partir des images SLC1 et SLC2 contient quelques granules du au speckle (distortion radiométrique) (figure 4.5). Un algorithme de filtrage a été appliqué afin de ne garder que la phase porteuse d'information sur la topographie de la région étudiée (figure 4.6).

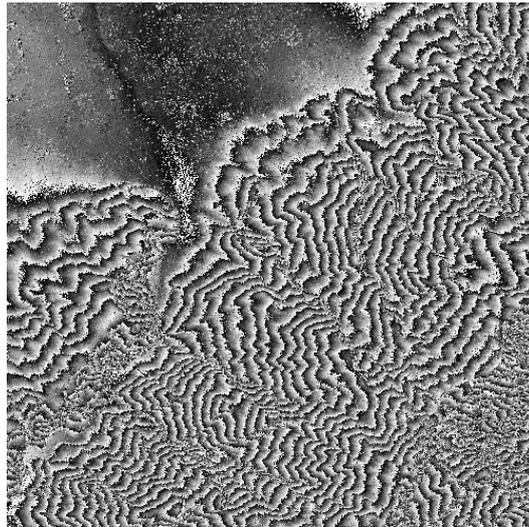


FIGURE 4.5 – Interférogramme brut

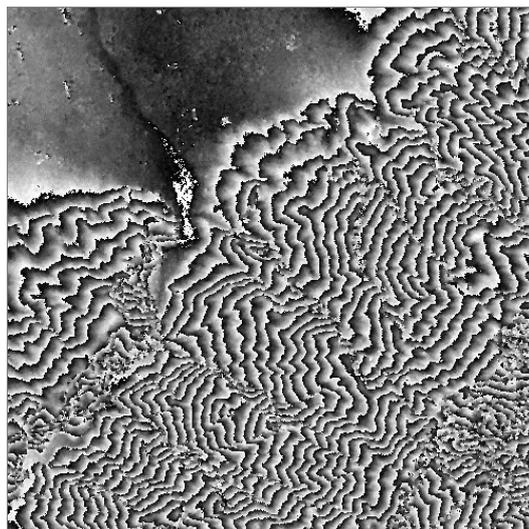


FIGURE 4.6 – Interférogramme filtré

## 4.3 Phase déroulée

### Génération des images de qualité

Nous avons appliqué les algorithmes développés dans le chapitre 3 et nous avons obtenu les images de qualité suivantes. Nous remarquons que les résultats sont quasi-similaires pour les deux techniques.

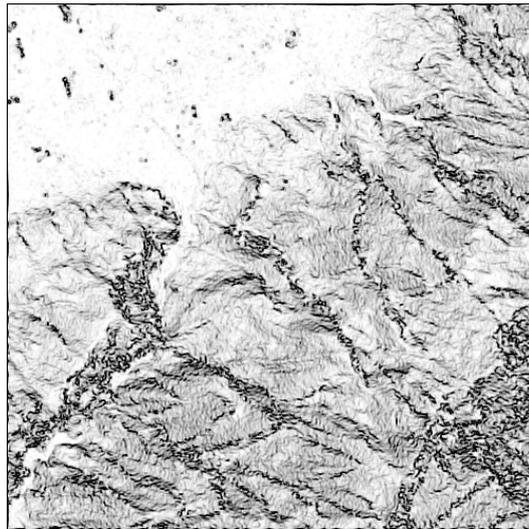


FIGURE 4.7 – Image de qualité par pseudo-corrélation

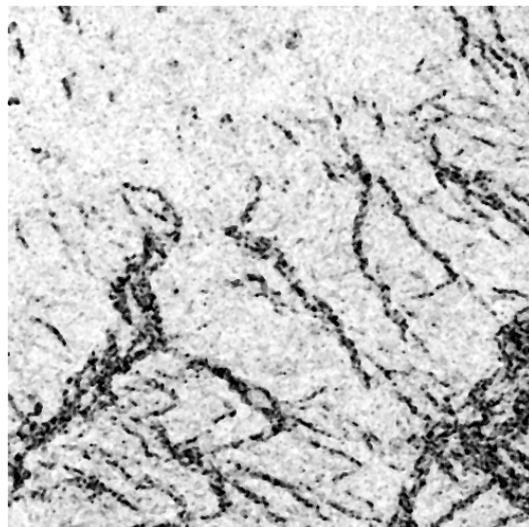


FIGURE 4.8 – Image de qualité par variance de la dérivée de phase

## Déroulement de phase

Voici ci-dessous les phases déroulées respectivement par pseudo-corrélation et par variance de la dérivée de phase, ainsi que leurs histogrammes correspondants :



FIGURE 4.9 – Phase déroulée par pseudo-corrélation

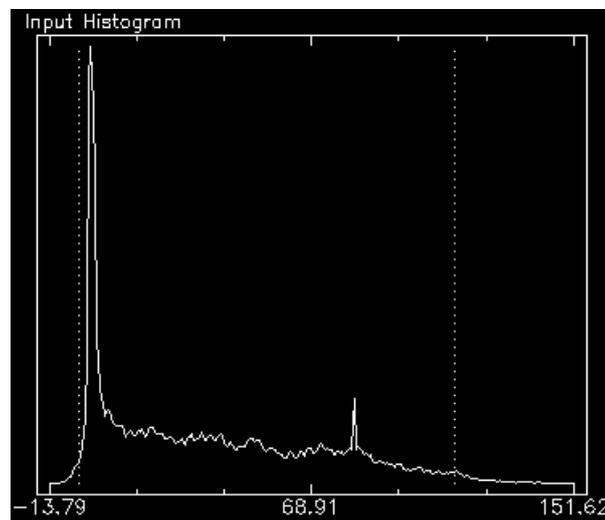


FIGURE 4.10 – Histogramme de la phase déroulée par pseudo-corrélation



FIGURE 4.11 – Phase déroulée par variance de la dérivée de phase

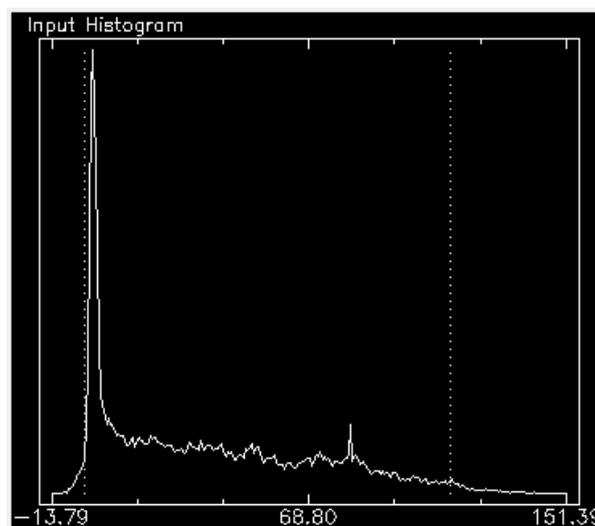


FIGURE 4.12 – Histogramme de la phase déroulée par variance de la dérivée de phase

### Interprétation

Sur la figure 4.9 qui représente la phase déroulée par pseudo-corrélation, nous remarquons un effet de blocs. On rappelle que la méthode de déroulement de phase guidée par chemin de qualité est une méthode régionale. Le chemin de déroulement dépend de la qualité des pixels. On déroule donc pixel par pixel, ce qui explique l'effet de blocs apparent sur les phases déroulées.

## Représentation en 3D de la phase déroulée

Voici un aperçu en 3D de la phase déroulée (l'image choisie est celle générée par pseudo-corrélation).

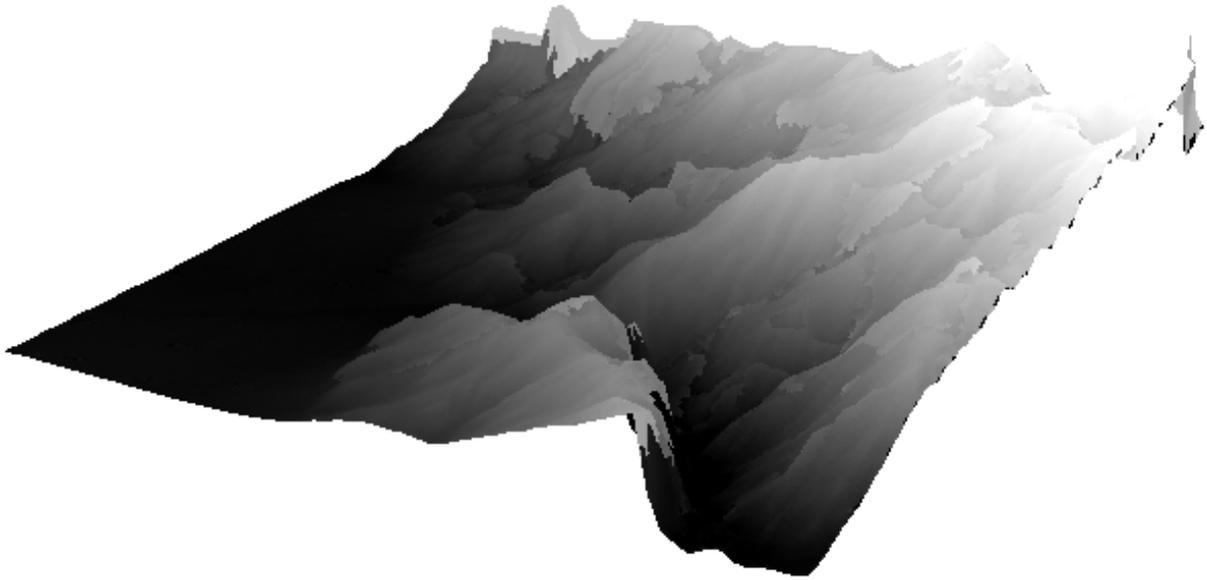


FIGURE 4.13 – Phase absolue (déroulée) de l'image radar acquise sur la région d'El-Harrach.

## Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats des implémentations effectuées lors de ce projet de fin d'études. Nous avons appliqué un déroulement de phase 2D en utilisant deux algorithmes de calcul d'image de qualité par chemin guidé : en mesurant la pseudo-corrélation et en mesurant la variance de la dérivée de phase. L'implémentation a été faite sur des interférogrammes réels obtenus à partir des acquisitions satellitaires sur la région d'El-Harrach.

# Conclusion générale

Ce projet nous a permis de nous initier à la télédétection, de nous intéresser à la technologie RADAR et de faire une étude applicative dans le domaine du traitement d'images.

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

Puis, nous nous sommes intéressés à l'*interférométrie*, étape nécessaire dans l'exploitation des données radar et la génération des interférogrammes à partir desquelles se font l'analyse et l'interprétation des informations géodésiques.

Ces interférogrammes, étant des images sous forme de franges correspondant à un tour de phase de  $2\pi$ , sont inexploitable tels quels. La recherche des multiples de ces franges pour reconstruire la phase absolue nous a ensuite mené à l'étude du déroulement de phases et au développement d'un algorithme. Nous avons choisi la méthode de déroulement par chemin guidé appliquée à l'image de qualité. Cette dernière engendre quelques erreurs au niveau des contours des franges où la fiabilité est minimale, mais ces erreurs peuvent être corrigées rapidement et efficacement (notamment grâce à la méthode Markovienne).

Enfin, nous avons implémenté et testé deux algorithmes de génération d'image de qualité : par pseudo-corrélation et par dérivée de la variance de phase. Les programmes ont été rédigés, compilés et exécutés à l'aide du langage IDL, et les résultats ont été visionnés sur le logiciel ENVI 4.8.

En perspective, et en complément de ce travail, nous proposons l'étude de la polarimétrie, une technique permettant d'exploiter pleinement les ondes radar en donnant plus de propriétés physiques sur la zone terrestre étudiée, notamment en ce qui concerne la végétation, les terres agricoles, les minéraux, l'urbanisation et la profondeur des couvertures neigeuses.

# Références bibliographiques

- [1] Droit Français. *Arrêté du 20 février 1995 relatif à la terminologie des sciences et techniques spatiales*. NOR : INDD9500269A.
- [2] Vishal Riché. *Etude et réalisation d'un système d'imagerie SAR exploitant des signaux et configurations de communication numérique*. Université Rennes 1, 2013.
- [3] Lillesand T. M., Kiefer R. W., *Remote Sensing and Image Interpretation*, 3rd ed, 1994.
- [4] Centre canadien de télédétection, *Notions fondamentales de télédétection*, Ressources naturelles Canada, 2002.
- [5] K. P. Papathanassiou, *Synthetic Aperture Radar (SAR) - Principles & Applications*, German Aerospace Center (DLR), 2014.
- [6] Abderrahim Bentamy et Jean-François Piollé, *Observation des vents de surface sur les océans au moyen de mesures diffusométriques*, Télédétection, Contemporary Publishing International, vol. 4, n°2, 2004, p. 125-137.
- [7] Pascal Taburet, *Les radars météorologiques*, Météo France, [www.meteofrance.fr](http://www.meteofrance.fr) (consulté le 11 Juin 2017)
- [8] Rébecca Giret. *Imagerie radar par synthèse d'ouverture pour la gestion du trafic autoroutier. Traitement du signal et de l'image*. INSA de Rennes, 2003. Français.
- [9] Ressources naturelles Canada, *Radars aéroportés et spatioportés*. [www.rncan.gc.ca](http://www.rncan.gc.ca) (consulté le 10 Juin 2017).
- [10] Synthetic aperture radar : Systems and Signal Processing, John C. Curlander et Robert N et Mc Donough, 1991.
- [11] Easton, R.L. (2010). Fourier Methods in Imaging. Wiley. p. 703. ISBN 9781119991861.
- [12] J. M. Lopez Sanchez, *Introduction to SAR Remote Sensing*, 5th ESA Advanced Training Course on Land Remote Sensing. University of Valencia, 2014.
- [13] Najeh Maher, *Filtrage et analyse des images Radar*, Université Laval, 1997, p. 27.

- [14] Ressources naturelles Canada, *Distorsion des images radar*. [www.rncan.gc.ca](http://www.rncan.gc.ca) (consulté le 13 Mai 2017).
- [15] A. L. Choo, Y. K. Chan, and V. C. Koo, *Geometric Correction on SAR Imagery*, PIERS Proceedings, Kuala Lumpur, MALAYSIA, March 27-30, 2012.
- [16] Johann CHAMPENOIS. *Caractérisation des déformations tectoniques intersismiques de l'île de Taiwan par interférométrie radar*. Géophysique [physics.geo-ph]. Université Paris-Est, 2011.
- [17] F. Li, R.M. Goldstein. *Studies of multibaselines space borne interferometric synthetic aperture radars*. In Proc. of IGARSS, Ann Arbor, 1987.
- [18] David LABROUSSE, *Modélisation Markovienne pour le déroulement de phases interférométriques SAR*, 1996.
- [19] R.M. Goldstein, H.A. Zebker et C.L. Werner. *Satellite radar interferometry, Two-dimensional phase unwrapping*. Radio Science, 23(4):713-720, July, 1988.
- [20] C. Prati, M. Giani, et N. Leuratti, *SAR interferometry : a 2D phase unwrapping technique based on phase and absolute values informations*, in IGARSS'90, Washington D.C., USA, vol. 3, Mai 1990.
- [21] F. Hocine, A. Haddoud, M. Belhadj-aissa, M. Fekir et A. Belhadj-aissa. *Méthode de déroulement de phase interférométrique. Étude comparative et application.*, JAS09, USTHB, Novembre 2009.
- [22] T. Bentahar. *Approche de déroulement de phase éliminant l'effet de propagation d'erreur due aux sauts de phase par l'interférogramme SAR*. Université de Batna, 2017.
- [23] FLYNN, Thomas J. *Consistent 2-D phase unwrapping guided by a quality map*. In : Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1996. IGARSS'96. IEEE, 1996. p. 2057-2059.
- [24] D. C. Ghiglia, M. D. Pritt, *Two-Dimensional Phase Unwrapping : Theory, Algorithms, and Software*. New York : Wiley, 1998.
- [25] Steven R. Cranmer, *IDL Basics*, Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, March 1997.