REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES

Faculté de Technologie

Département Ingénierie des Systèmes Electriques

Mémoire de Master

Présenté par

BouisriMarwa

Ferhati Amina

Filière :Télécommunications

Spécialité :Réseaux et Télécommunications

Déroulement de phase interférométrique basé sur le placement des lignes de coupures dans les zones à faible qualité

Soutenu le : 18 novembre 2020 devant le jury composé de:

Mme BELKACEM	Samia	MCA	Président
Mr. AKLIOUAT	Hacene	MAA	Examinateur
Mme HOCINE	Faiza	MCB	Rapporteur

Année Universitaire : 2019/2020

Remerciement

Nous remercions tout d'abord, Allah qui nous a donné la force et le courage afin de parvenir à élaborer ce modeste travail.

On adresse nos grands remerciements au Dr. HOCINE Faiza pour avoir accepté de nous encadrer et pour nous faire profiter de son expérience, pour la confiance qu'elle nous a accordée, ses encouragements, sa disponibilité et surtout pour sa patience et ses précieux conseils.

Nous tenons à remercier les membres du jury qui ont accepté d'examiner notre mémoire et l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail.

Nos remerciements vont également à tous les enseignants et les responsables de notre département qui ont contribués à notre formation.

Nous tenons aussi à remercier, tous ceux qui nous ont enseigné durant toutes nos années d'études.

Dédicaces

À ma maman adorée, qui a toujours tout fait pour me rendre heureuse et qui m'a donnée tout l'amour du monde,
À mon papa, et tous ses efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être,
À ma famille ; Nassim, Walid, Ali, son épouse Siham et leur fils Adam, qui ont toujours été présents pour m'encourager et me conseiller,
À Marwa, chère amie avant d'être binôme, qui m'a tant encouragée et avec qui j'ai adoré travailler,
À toutes mes amies, Mahdia, Wissem, et Yasmine avec qui j'ai de merveilleux souvenirs,
À ma chère amie Asma,
Je dédie ce travail.

-Amina

À ma mère, qui a toujours été là pour moi, par son soutien, tous ses sacrifices, ses conseils et sa présence aux moments difficiles,
À mon père, mon exemple, qui peut être fier de sa fille et du résultat des longues années de sacrifices et de privations,
Merci pour votre éducation, votre soutient, et vos sacrifices pour vos enfants.
À ma sœur Ines, sa petite fille Wiam, et mes frères Samy et Shihab avec qui j'ai partagé le bon et le mauvais, merci pour votre soutien à tous.
À ma chère amie et binôme Amina, qui a été comme une sœur c'était un grand plaisir de travailler avec toi.
À ma famille et mes amis spécialement Zahra que je remercie pour leur soutien envers moi.
À toute personne qui a eu un impact positif sur ma vie.
Je dédie ce travail.

-Marwa

Table des matières

Remerciements i

Dédicaces ii

Résumé vi

Liste des abréviations vii

Introduction générale 1

1 Généralités sur les Radars SAR 3

1.1 Introduction . . . 3
1.2 Principe du radar à Ouverture Réelle . . . 3
1.3 Radar à visée latérale : radar imageur . . . 4
1.4 Radar à ouverture synthétique ROS (SAR) . . . 5
1.5 Caractéristiques d'image radar SAR . . . 6
1.6 Distorsion géométrique des images SAR . . . 8
1.6.1 Raccourcissement des distances . . . 8
1.6.2 Repliement . . . 8
1.6.3 Ombres . . . 9
1.7 Distorsions radiométriques . . . 9
1.8 Principe de l'InSAR . . . 9
1.9 Géométrie de l'INSAR . . . 11
1.10 Modes d'acquisition en SAR . . . 12
1.10.1 Mono-passe . . . 13
1.10.2 Multi-passe . . . 13
1.11 Altitude d'ambiguïté . . . 14
1.12 Processus InSAR . . . 15
1.12.1 Recalage des images . . . 15
1.12.2 Produit interférométrique . . . 15
1.12.3 Estimation du Baseline . . . 15
1.12.4 Élimination des franges orbitales . . . 15

1.12.5 Déroulement de phase 15
1.12.6 Conversion de la phase en altitude 16
1.13 Conclusion 16

2 Méthodes de déroulement de phase **17**
2.1 Introduction 17
2.2 Déroulement de phase 17
2.3 Principe de déroulement de phase 18
2.4 Approche locale 19
2.4.1 Concept des Résidus 21
2.4.2 Approche de Déroulement par Evitement des Discontinuités 22
2.4.3 Méthodes de déroulement guidé par chemin de qualité 23
2.5 Approche régionale et globale 28
2.5.1 Déroulement par détection de contours 28
2.5.2 Approche de Minimum norme 28
2.5.3 Méthode des moindres carrés 29
2.5.4 Méthode de minimum Lp-norme 29
2.5.5 Approche Probabiliste 29
2.6 Conclusion 29

3 Déroulement par placement des Branch Cut basé sur l'ordre de fiabilité **31**
3.1 Introduction 31
3.2 Algorithmes de suivi de chemin 31
3.3 Limitations des algorithmes connus 32
3.4 Algorithme de déroulement par placement des Branch Cut basé sur l'ordre de fiabilité 33
3.4.1 Placement des branch Cuts par l'utilisation des images de qualité . 34
3.4.2 Déroulement de phase basé sur l'ordre de fiabilité 39
3.5 Conclusion 41

4 Résultats et discussion **42**
4.1 Introduction 42
4.2 Images utilisées pour les tests 42
4.3 Tests sur données simulées 'Isolation peak' 44
4.3.1 Images de qualités 44
4.3.2 Images des Branch Cuts 44
4.3.3 Nouvelles images de Qualité 45
4.3.4 Phase déroulée Par l'image de qualité originale 46
4.3.5 Phase déroulée Par la nouvelle image de qualité 46
4.3.6 Analyse quantitative des résultats 47

4.4 Tests sur donnés réelles 48
4.4.1 Evaluation par comparaison 50
4.5 Interface 52
4.6 Conclusion 53

Conclusion générale **54**

Bibliographie **55**

ملخص :

يمكن قياس تضاريس سطح الأرض بواسطة تقنية على أساس الرادار InSAR. ومع ذلك، فإن اختلاف الطور الذي تم الحصول عليه في مخطط التداخل Interférogramme محصورة من 0 إلى 2π (يُعرف بالمقياس 2π). للعثور على الطور المطلق الذي يتناسب مع الارتفاع، فإن خطوة توضيح الطور ضرورية. تحدد هذه الخطوة دقة نتائج قياس التداخل.

في هذا السياق ، يركز عملنا على دراسة وتطوير طريقة توضيح الطور بطريقة ترتيب الجودة، والتي تتمثل في إيجاد الطور المطلق من الطور المبهم (بالمقياس2π) ، بهدف إنشاء نموذج رقمي للتضاريس(MNT).

كلمات مفتاحية : الاستشعار عن بعد, رادار ذات فتحة اصطناعية (SAR),Interferometry, توضيح الطور, نموذج رقمي للتضاريس (DTM).

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 2π (elle est connue modulo 2π).). Pour retrouver la phase absolue qui est proportionnelle à l'altitude, une étape de déroulement de phase est nécessaire. Cette étape conditionne la précision des résultats interférométriques.
Dans ce contexte, notre travail porte sur l'étude et le développement d'une méthode de déroulement de phase par ordre de fiabilité, qui consiste à retrouver la phase absolue à partir de la phase ambiguë modulo 2π, afin de pouvoir générer un modèle numérique du terrain (MNT).
Mots clés : Télédétection, Radar à Ouverture Synthétique (ROS), Interférométrie, Déroulement de phase, Modèle Numérique de Terrain (MNT).

Abstract

The relief of the Earth's surface can be measured by synthetic aperture radar based interferometry (InSAR). Nevertheless, the phase difference obtained on the interferogram varies from 0 to 2π (it is known modulo 2π). To find the absolute phase which is proportional to the altitude, a phase unwrapping step is necessary. This step conditions the precision of the interferometric results.
In this context, our work focuses on the study and development of a phase unwrapping method by order of reliability, which consists in finding the absolute phase from the ambiguous phase modulo 2π, in order to be able to generate a Digital Terrain Model (DTM).
Keywords : Remote sensing, Synthetic Radar Aperture (SAR), Interferometry, Phase Unwrapping, Digital Terrain Model (DTM)

Liste des abréviations

EM	électromagnétiques
ERS	European Remote Sensing
ESA	European Space Agency
IDL	IDL Interactive Data Language
InSAR	Interférométrie SAR
IRM	Imagerie par Résonance Magnétique
MNE	Modèles Numériques d'Elévation
MNT	Modèles Numériques de Terrain
RADAR	RAdio Detection And Ranging
RAR	Real Aperture Radar
RF	radiofréquence
ROR	Radar à Ouverture Réelle
ROS	Radar à ouverturede synthèse
SAR	Synthetic Aperture Radar
SLC	Single Look Complex
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission

Table des figures

1.1 Schéma simplifié d'un radar . . . 3
1.2 géométrie d'acquisition Radar imageur . . . 5
1.3 Géométrie de la Synthèse d'ouverture . . . 6
1.4 Distorsions géométriques dans les images radar SAR. . . . 8
1.5 Principe d'acquisition d'images SAR . . . 10
1.6 géométrie générale de l'INSAR . . . 12
1.7 Géométrie d'acquisition en mode Mono-passe . . . 13
1.8 Géométrie d'acquisition en mode multi-passe . . . 14

2.1 Principe de déroulement phase . . . 17
2.2 Déroulement de phase en une dimension . . . 19
2.3 Déroulement de phase par la méthode de proche en proche. . . . 20
2.4 Déroulement de phase de proche en proche. . . . 21
2.5 Graphe de calcul des résidus . . . 22
2.6 Exemple d'images de résidus a)Interférogramme. b) Image de qualité (pseudo-corrélation). c) Image des résidus. d) Zoom sur les résidus. . . . 22
2.7 (a) Interférogramme (b) Image de qualité par pseudo corrélation . . . 24
2.8 a) Interférogramme (b) Image qualité par la Variance des Dérivées de phase 25
2.9 a) Interférogramme b) Image qualité par le maximum de gradient . . . 26
2.10 a) interférogramme b) image qualité par la seconde dérivée . . . 27
2.11 a) Interférogramme b) Image de qualité hybride . . . 28

3.1 Organigramme de l'algorithme . . . 33
3.2 Image des résidus Q0 . . . 34
3.3 Etape 2 du placement des Branch Cuts . . . 35
3.4 Etape 3 du placement des Branch Cuts . . . 35
3.5 Etape 4 du placement des Branch Cuts . . . 36
3.6 Branch Cuts . . . 36
3.7 Organigramme de placement des Branch Cuts . . . 38
3.8 Organigramme de déroulement de phase . . . 40
3.9 Exemple de déroulement de phase par ordre de fiabilité . . . 41

4.1 a) Interférogramme simulé 'Isola' b) Image des résidus c) Image de cohérence 43
4.2 a) Interférogramme réel (Région de Blida) b) Image des résidus 43
4.3 Image de qualité par : a) Pseudo-corrélation b) Variance dérivée c) Seconde dérivée d) MMG e) Qualité hybride 44
4.4 Image des Branch Cuts par a) Pseudo-corrélation b) Variance dérivée c) Seconde dérivée la d) MMG e) Qualité hybride 45
4.5 Nouvelle image de qualité par a) Pseudo-corrélation b) Variance dérivée c) Seconde dérivée la d) MMG e) Qualité hybride 45
4.6 : Image de phase déroulée par l'image de qualité originale de : a) Pseudo-corrélation b) Variance dérivée c) Seconde dérivée d) MMG e) Qualité hybride 46
4.7 Image de phase déroulée par la nouvelle image de qualité par : a) Pseudo-corrélation b) Variance dérivée c) Seconde dérivée d) MMG e) Qualité hybride 46
4.8 Image de phase déroulée par l'image de qualité originale de : a) Pseudo-corrélation b) Variance dérivée c) Seconde dérivée d) MMG e) Qualité hybride 48
4.9 Image de phase déroulée par la nouvelle image de qualité de : a) Pseudo-corrélation b) Variance dérivée c) Seconde dérivée d) MMG e) Qualité hybride 49
4.10 Image 'Isola' déroulée en dégradé de couleurs avec a)la méthode de Goldstein b) L'ordre de fiabilité c)Image des résidus (point noirs : résidus positifs et négatifs) 50
4.11 Zoom sur l'image déroulée avec a)la méthode de Goldstein b) L'ordre de fiabilité c)Image des résidus (point noirs : résidus positifs et négatifs) 50
4.12 Image réelle déroulée en dégradé de couleurs avec a)la méthode de Goldstein b) L'ordre de fiabilité c)Image des résidus (point noirs : résidus positifs et négatifs) 51
4.13 Représentation 3D de l'image de phase déroulée par a) Méthode de Goldstein b) Ordre de fiabilité 52
4.14 Interface de déroulement 2D 52
4.15 Options de la liste déroulante 53

Liste des tableaux

2.1 Résultat de déroulement de phase en une dimension 18

4.1 Valeurs du Lp Norm de l'interférogramme simulé 47
4.2 Valeurs de l'écart-type de l'interférogramme simulé 47
4.3 Valeurs du Lp norm de l'interférogramme réel 49
4.4 Valeurs de l'écart-type de l'interférogramme réel 49
4.5 Valeurs de l'écart-type et du Lp norm des deux méthodes 51

Introduction générale

Depuis quelques décennies, 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, les variations des niveaux des mers, ...etc. La technologie RADAR est désormais incontournable dans le domaine de l'imagerie satellite, notamment pour la génération des modèles numériques de terrain (MNT).

Apparus au cours de la seconde guerre mondiale, les radars se sont tout d'abord révélés comme des atouts militaires pour la détection de cibles et pour mesurer leurs portées et leurs vitesses. Embarqué à bord d'un porteur (avion, navette spatiale ou satellite), le radar à ouverture réelle (ROR) est rapidement employé pour observer des cibles fixes au sol, il est alors utilisé en visé latérale, ce système appelé SLAR (Side Looking Airborne RADAR) fournit les premières images radar, mais leur résolution azimutal reste très faible. L'apparition, dans les années 50, de la théorie de l'antenne à ouverture synthétique a permis l'exploitation du déplacement du porteur et le principe de l'effet Doppler des signaux reçus par le capteur pour synthétiser une antenne virtuelle de longueur très importante. Ce système (ROS : Radar à Ouverture Synthétique ou SAR) a amélioré considérablement la résolution spatiale des images radar qui a contribué à l'émergence de diverses axes de recherche et d'application de l'imagerie radar.

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 a une variation de phase entre 0 et 2π (elle est connue modulo 2π). Or, la phase absolue qui est proportionnelle à l'altitude est supérieure à 2π. Notre travail consiste donc à retrouver la phase absolue en passant par une étape cruciale, à savoir le déroulement de phase. Une fois la phase absolue retrouvée, le modèle numérique de terrain peut en être généré après une étape de géo-référencement et les caractéristiques du sol seront mises en évidence. [1]

Dans ce travail, nous avons abordé le déroulement de phase en 2D, en particulier la méthode déroulement par image de qualité. Le document comporte quatre chapitres :

Le premier chapitre définit le concept de Radar à ouverture synthétique SAR et l'inter-

férométrie inSAR.

Le deuxième chapitre rassemble les méthodes de déroulement de phase connues en mettant l'accent sur les méthodes de suivi de chemin.

Le troisième chapitre introduit une nouvelle méthode de déroulement par suivi de chemin proposée par [2].

Le quatrième chapitre montre les résultats obtenus et la comparaison entre ces derniers. Le document se terminera par une conclusion générale et les références bibliographiques consultées lors de ce travail.

Chapitre 1

Généralités sur les Radars SAR

1.1 Introduction

Le SAR (Synthetic Aperture Radar) est l'un des principaux instruments de télédétection à partir de plates-formes mobiles. C'est un capteur radar actif qui fonctionne dans la bande hyperfréquence. Il est largement utilisé car il fournit des résolutions spatiales bien meilleures que celles obtenues par les techniques radar conventionnelles (RAR :Real Aperture Radar).

1.2 Principe du radar à Ouverture Réelle

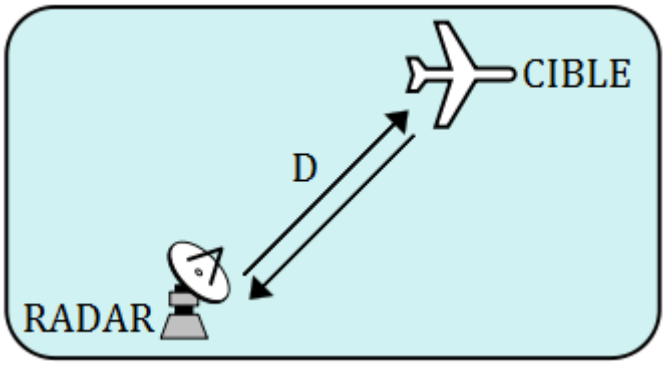


FIGURE 1.1 – Schéma simplifié d'un radar

Un radar (RAdio Detection And Ranging) est un système électrique actif qui transmet par un émetteur des ondes électromagnétiques (EM) radiofréquence (RF) vers une région d'intérêt à travers un environnement. L'antenne de réception du radar reçoit les ondes EM qui sont «réfléchies» soit par la cible, ou par d'autres éléments de l'environnement ce dernier est un signal indésirable est appelé Clutter).

La Distance, D, séparant la cible du radar peut être déterminée grâce au temps, ΔT, que met l'onde à aller et revenir et à la vitesse de propagation de l'onde dans le milieu. Dans le

cas où l'environnement est l'air l'expression de la distance en fonction de temps est donné par : [3]

$$D = \frac{c\,\Delta T}{2} \tag{1.1}$$

Où c est la vitesse de la lumière.

1.3 Radar à visée latérale : radar imageur

La géométrie de l'acquisition est donné par la fig 1.2. Une antenne est placée à bord d'un porteur (Avion ou satellite) et orientée latéralement à celui-ci, qui se déplace parallèlement à la zone à imager, la visée latérale définit les deux axes de l'image, axe azimutale ou direction du mouvement le long de la trajectoire et axe de distance ou direction transversale normale au mouvement.

L'antenne émet une impulsion vers le sol. Pour une impulsion donnée, le récepteur reçoit une réponse appelée écho, fonction de tous les réflecteurs présents dans le lobe de l'antenne au moment où l'impulsion émise est reçue au sol. Ceci permet d'obtenir une ligne de l'image brute. A l'impulsion suivante, le radar se déplace, et on obtient pour le nouvel écho une autre ligne de l'image.

Les signaux reçus sont discrétisés et quantifiés, la résolution de l'image en distance est restreinte par la durée de l'impulsion radar émise. La résolution en distance est donnée par : [4]

$$r_{ds} \approx c\,\frac{\tau}{2} \tag{1.2}$$

c : est la vitesse de la lumière
τ : est la durée d'impulsion de l'onde radar.

En revanche sa résolution en azimut est plus forte lorsque la longueur d'onde est petite ou lorsque la taille de l'antenne est grande. Cette résolution est exprimée par : [4]

$$r_a \approx D\frac{\lambda}{L} \tag{1.3}$$

Où :
L : est la longueur de l'antenne
D : est la distance radar-cible
λ : est la longueur de l'onde radar

Les deux résolutions, en azimut et en distance, conditionnent fortement l'exploitation des images radar dans diverses applications des sciences de la terre. Or les résolutions sont

limitées par des considérations technologiques relatives aux éléments du système radar à savoir la dimension de l'antenne (longueur de l'antenne) d'émission et de réception des signaux radar émis et rétrodiffusés et la durée du train de l'onde radar émise.

L'amélioration des deux résolutions passe, respectivement par la compression d'impulsion et la synthèse d'ouverture (synthèse d'une grande antenne virtuelle). Les systèmes radars qui exploitent ces deux concepts sont appelés les radars à ouverture synthétique (SAR : Synthetic Aperture Radar).

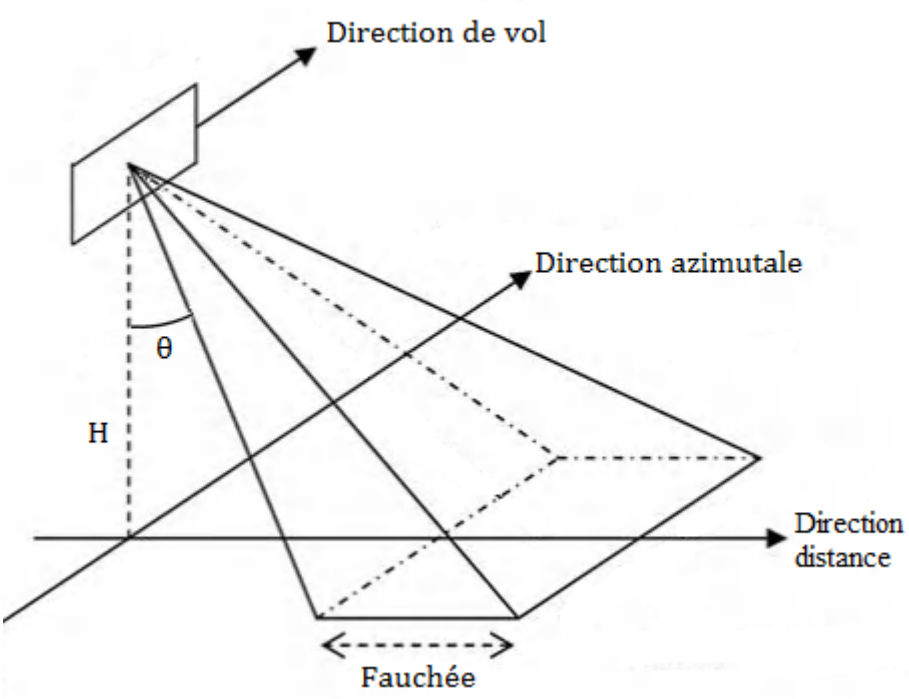


FIGURE 1.2 – géométrie d'acquisition Radar imageur

1.4 Radar à ouverture synthétique ROS (SAR)

Le radar SAR, pour Synthetic Aperture Radar ou ROS pour Radar à ouverture de synthèse, exploite le déplacement de l'antenne pour former une antenne "de synthèse" de dimension plus importante, et donc d'une résolution plus élevée que la même antenne, immobile. La grande antenne est reconstituée par traitement du signal.

L'amélioration de la résolution en distance dans les capteurs SAR est réalisée par la modulation linéaire en fréquence de l'onde radar. En effet, l'onde radar émise est modulée en fréquence par une fonction Chirp. Elle devient inversement proportionnelle a la bande passante du signal modulé : [5]

$$r_{ds} \approx \frac{C}{2B} \tag{1.4}$$

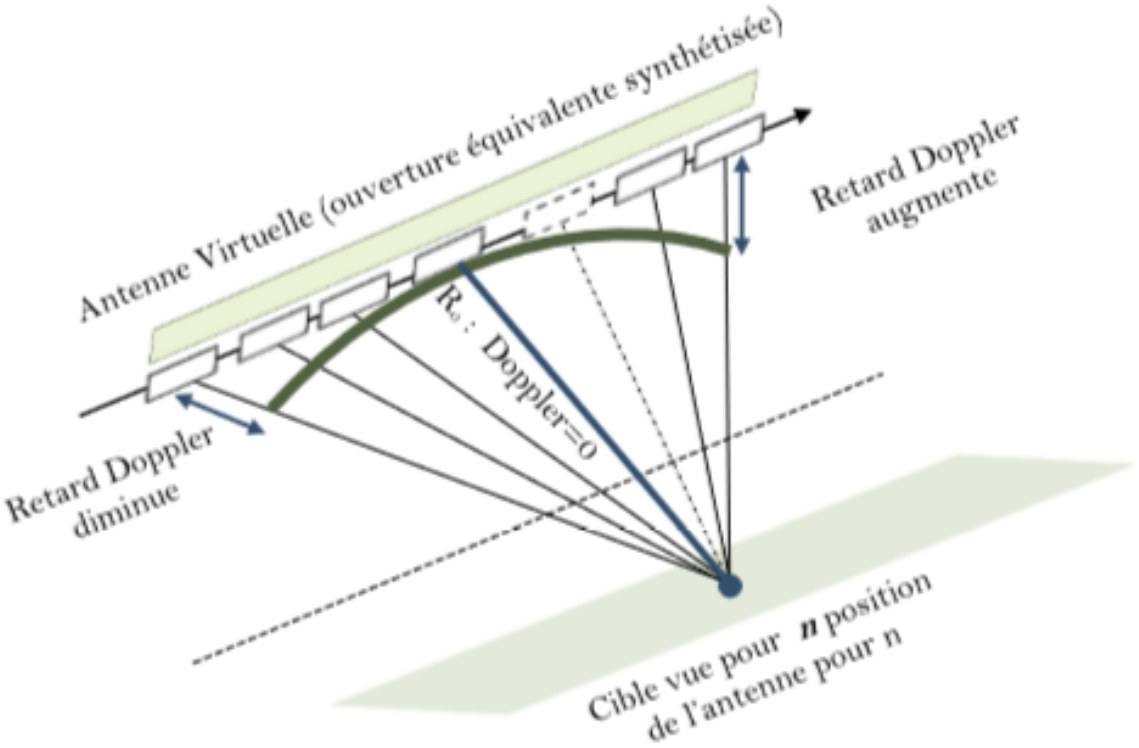


FIGURE 1.3 – Géométrie de la Synthèse d'ouverture

B :bande passante du signal modulé

L'amélioration de la résolution en azimute exploite l'effet Doppler, qui permet de simuler une antenne virtuelle très grande a partir d'une antenne réelle. La résolution devient alors proportionnel a la longueur de l'antenne réelle :

$$r_{az} \approx \frac{L}{2} \tag{1.5}$$

L : longueur de l'antenne réelle

1.5 Caractéristiques d'image radar SAR

L'onde radar est une onde cohérente et un pixel est reconstruit à partir des signaux rétrodiffusés par N diffuseurs élémentaires formant une cellule de résolution. Dans le plan complexe, le champ total peut s'écrire comme l'addition des N vecteurs représentant les N contributions élémentaires comme suit :

$$S(x,y) = R_e(x,y) + jI_m(x,y) = A(x,y)e^{j\varphi(x,y)} = \sum_{k=1}^{N} a_k e^{j\varphi k} \tag{1.6}$$

Où a_k et φ_k sont l'amplitude et la phase du diffuseur k, A(x,y) et $\varphi(x,y)$ sont l'amplitude et la phase du champ résultant. Ce dernier peut être obtenu par sommation 'constructive' ou 'destructive' des ondes cohérentes rétrodiffusées par les N diffuseurs élémentaires donnant

ainsi une allure caractéristique au signal reçu dite le chatoiement ou le Speckle qui perturbe l'estimation du coefficient de rétrodiffusion de la surface observée.

— **Image Amplitude** A(x,y) dépend des propriétés physiques (rugosité, humidité, etc...) de la cible de résolution et la polarisation de l'onde radar. Quant à Image Intensité (I) :I=I^2, elle est très dépendante de l'état de surfaces des régions imagées. De ce fait, les images 'intensités' peuvent être utilisées dans la détection de changements des états de surfaces par des acquisitions multi temporelles.

— **Image Phase** $\varphi(x,y)$: elle dépend des propriétés géométriques de la cible de résolution (rugosité, pente, orientation, etc...), des paramètres du système d'acquisition radar SAR (fréquence, angle d'incidence, etc..) ainsi que les conditions atmosphériques. En effet, la phase d'une image SAR est une information difficile à exploiter directement car elle est la somme de plusieurs termes, définis à partir d'une description physique des propriétés sus-cités, qui sont principalement :

La phase propre φ_{propre} est due au processus d'interaction 'onde-diffuseurs élémentaires' dans une cellule de résolution. Ce terme est généralement inaccessible car il dépend des paramètres inconnus tels que la pénétration des ondes, le constant diélectrique du milieu, la répartition et la nature des diffuseurs élémentaires, etc...

Une phase atmosphérique due aux retards introduits par les couches atmosphériques

Une phase bruit dues aux dispositifs électroniques d'acquisition et de traitement des signaux radar

Un terme de phase dit géométrique « φ_{traj} » qui est dû au temps de trajet aller-retour entre l'antenne et la cible. Cette phase est donnée par :

$$\varphi_{traj} = 2\pi ft = \frac{4\pi R}{\lambda} \tag{1.7}$$

Où f et λ sont la fréquence et la longueur d'onde du signal radar, c la vitesse de la lumière et R la distance radar-cible.

La phase étant connue en modulo 2π, la mesure de distance radar-cible est accessible modulo $\lambda/2$. Malgré son ambigüité, cette mesure présente un grand intérêt du fait de sa précision de l'ordre d'une fraction de longueur d'onde. La phase résultante du signal radar rétrodiffusé est ainsi donnée par :

$$\varphi = \varphi_{traj} + \varphi_{propre} + \varphi_{atm} + \varphi_{bruit} \tag{1.8}$$

L'exploitation, séparément, de chaque contribution n'est pas possible, car ces contributions constituent un processus corrélé de distribution uniforme. L'idée de leurs séparabilités a conduit au développement de la technique interférométrie (InSAR). cette technique exploite la partie géométrique. La phase propre peut être éliminée en formant la différence de phase

entre deux images acquises par deux antennes séparées spatialement. On peut alors mesurer la différence de chemin entre les deux acquisitions et en déduire l'altitude du terrain.

1.6 Distorsion géométrique des images SAR

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

1.6.1 Raccourcissement des distances

Ce phénomène se traduit au niveau des faibles pentes (la pente (A, B) est inférieur à l'angle de visée). Dans la figure 1.4 , la pente (A B) va apparaître compressée et sa longueur (a b) sera représentée de manière incorrecte. Le raccourcissement dépend de la pente du relief et l'angle de visée du radar, le maximum du raccourcissement arrive quand le faisceau radar est perpendiculaire à la pente du relief, et les deux points précédemment A et B seront observés simultanément. 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).

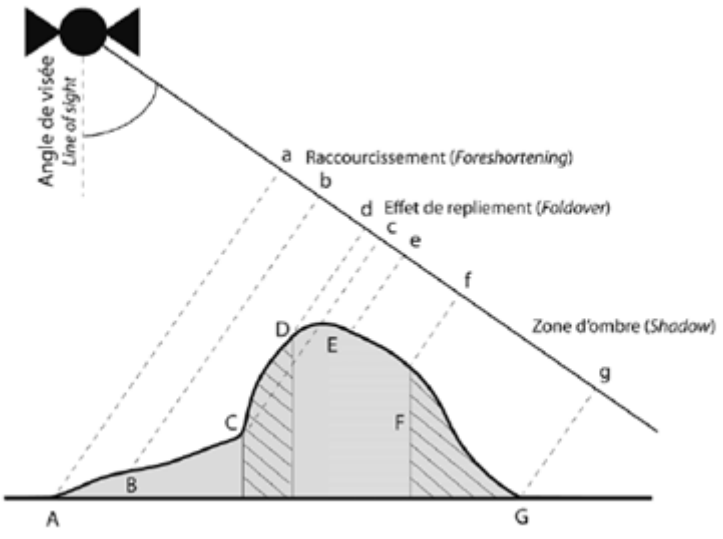


FIGURE 1.4 – Distorsions géométriques dans les images radar SAR.

1.6.2 Repliement

Ce phénomène apparaît lorsque la pente du relief (C D) est supérieure à l'angle de visée, la partie inférieur de la pente du relief (C) sera imagée avant sa partie supérieure (D). Une inversion ou repliement du relief (relieflayover) survient pour les fortes pentes. Sur la figure

1.4,on remarque que la réponse de la cible D arrive avant celle de la cible C (RC > RD) et la pente CD, orientée faiceau radar, est supérieure à l'angle de vue. L'illumination de cette portion produit une inversion dans l'image radar.

1.6.3 Ombres

Il s'agit d'absence du signal, ce phénomène intervient lorsqu'une surface n'est pas illuminée par l'onde incidente parce qu'elle est cachée par un obstacle (grande pente de relief, bâtiments, etc.). Dans ce cas, aucun écho n'est enregistré au niveau du capteur et une zone noire en résulte sur l'image. La figure 1.4 explique l'effet d'ombre dans l'image radar, la partie (FG) n'est pas observée par le radar, elle est occultée par la face avant du relief (AD), donc elle sera représentée par une région noire.[6]

1.7 Distorsions radiométriques

La modélisation statistique du signal radar rétrodiffusé est une étape importante et complexe. Cette difficulté réside dans la nature probabiliste de la surface et le caractère aléatoire du phénomène de rétrodiffusion. En effet, l'interaction de l'onde cohérente avec N diffuseurs élémentaires, dans certains cas, peut interférer de manière constructive ou destructive engendrant ainsi une forte rétrodiffusion ou inversement. Les extrémités de ce phénomène donnent un aspect de granularité à l'image radar, dit 'Speckle' rendant difficile son interprétation et son exploitation directement. Le phénomène de Speckle est inhérent à l'onde cohérente (onde sinusoïdale), il représente l'information image-elle même s'il n'a pas de valeurs extrêmes Les techniques de réduction du Speckle sont regroupées en deux catégories. La première dite multi-looks qui est considérée comme étant un prétraitement du Speckle. La deuxième technique regroupe les méthodes de filtrage adaptatif du Speckle.

1.8 Principe de l'InSAR

On parle de SAR interférométrique (InSAR), lorsqu'on utilise simultanément deux radars à synthèse d'ouverture, ou bien le même radar utilisé à des instants différents. On étudie alors les différences de phase point à point de deux images superposées (appelées 'couples interférométriques') afin de retrouver la topographie du terrain. Les deux positions d'acquisition sont séparés d'une distance appelée 'Baseline' ou ligne de base.

Il est également possible de prendre deux images SAR à deux dates différents pour étudier l'évolution de la surface. Comme illustré sur la figure 1.5, la connaissance de la position de l'antenne lors de l'acquisition des signaux permet de calculer l'altitude d'une cible à partir de la différence de phase des deux signaux rétrodiffusés par cette dernière.

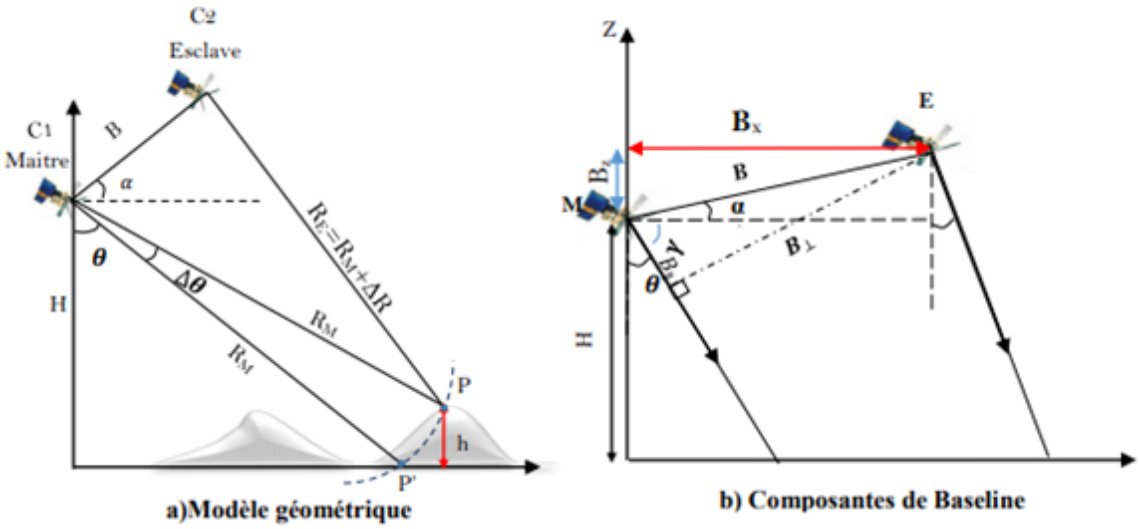


FIGURE 1.5 – Principe d'acquisition d'images SAR

L'intervalle temporel d'acquisition de couples interférométriques doit être très réduit, afin de minimiser la décorrélation temporelle et négliger les variations topographiques. Pour cela, on distingue deux procédés d'acquisition de ces couples.

— Le premier procédé, une seule antenne est utilisée, le porteur réalise alors deux passages. En effet, le temps de passage dépend de la périodicité d'un porteur, particulièrement spatio-porté ou de l'intervalle de temps qui sépare deux capteurs à caractéristiques identiques. **Exemple :** La mission en tandem de ERS1 et ERS2 (de l'agence ESA) où les satellites ont fonctionné ensemble pendant 9 mois avec un intervalle de passage de 23h 30mn.

— Le deuxième procédé, deux antennes physiques éclairent la cible simultanément c'est le cas des capteurs radar aéroportés (deux capteurs sur le même plateforme) **Exemple** La navette spatiale américaine SRTM.

Dans le cas d'un couple interférométrique, les signaux mesurés par les deux capteurs, en configuration interférométrique, sont S1 et S2. Les valeurs complexes de l'image 1 et 2 respectivement, en termes d'amplitude et de phase sont :

$$S_1 = A_1 e^{j\varphi_1} \tag{1.9}$$

$$S_2 = A_2 e^{j\varphi_2} \tag{1.10}$$

Le produit interférométrique est obtenu par la multiplication de la première image par le conjugué de la deuxième. Il est donné par l'équation suivante :

$$S_1 . S_2^* = A_1 . A_2 . e^{-j(\varphi_1 - \varphi_2)} \tag{1.11}$$

Chacune des deux phases 1 et 2 est constituée d'un ensemble de contributions données

par l'équation 1.8. Cette différence de phase, dite aussi phase interférométrique est donnée par l'expression suivante :

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \Delta\varphi_{trajet} + \Delta\varphi_{propre} + \Delta\varphi_{atm} + \Delta\varphi_{bruit} \tag{1.12}$$

Afin de n'exploiter que la phase proportionnelle à la position de la cible par rapport au capteur, des hypothèses et des approximations doivent être considérées sur les différences de phase des deux signaux radar [7].

Sous les hypothèses de faibles corrélations spatiales dues aux Baselines spatial et temporel, les composantes relatives aux variations de phases propres, de bruit et d'atmosphère entre deux acquisitions peuvent être négligeables, l'expression de la différence de phase due au trajet de l'onde devient :

$$\Delta\varphi_{trajet} = \Delta\varphi_{topo} + \Delta\varphi_{flat} + \Delta\varphi_{bruit} \tag{1.13}$$

Où, le premier terme représente la phase topographique, proportionnelle à l'altitude de la cible, le second terme représente la phase de la terre plate, et a la fin la phase du bruit. La phase topographique est liée à la hauteur de la cible entre les deux acquisitions, peut être déterminées par la technique InSAR. Quant à la phase de la terre plate, qui est due à la géométrie d'acquisition (la visée oblique du satellite et le baseline) elle doit être estimée et soustraite de la phase 'trajet'.

1.9 Géométrie de l'INSAR

La géométrie générale de l'interférométrie SAR est illustrée sur la figure 1.6.

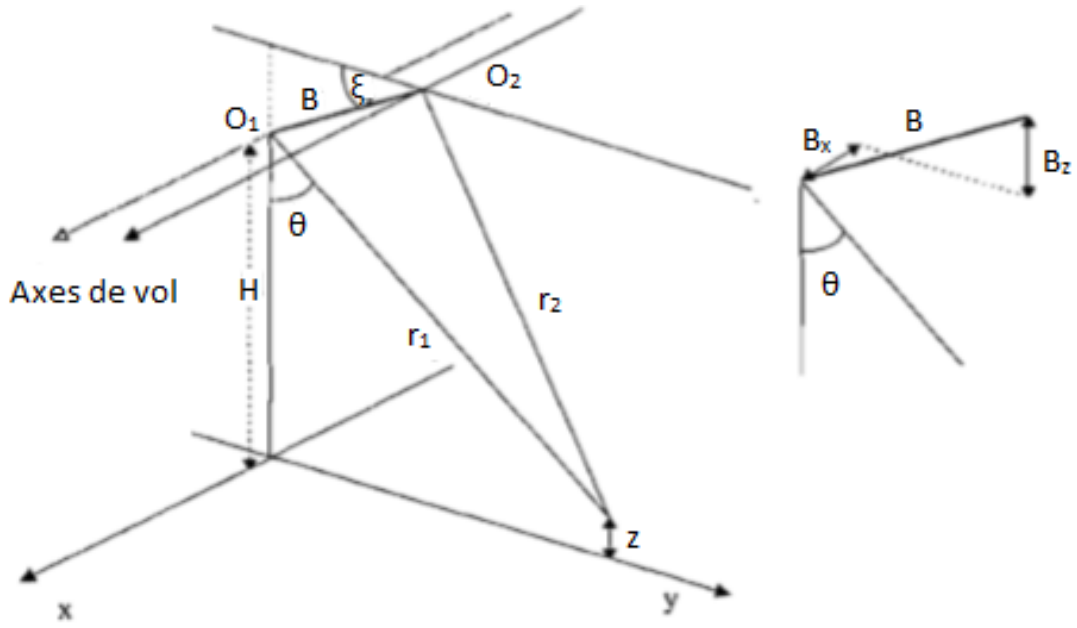


FIGURE 1.6 – géométrie générale de l'INSAR

La différence de phase ϕ entre les signaux reçus du même élément de surface aux deux positions d'antenne est donnée par l'équation :

$$\phi = \frac{4\pi}{\lambda}(r_2 - r_1) = \frac{4\pi}{\lambda}(B_x \sin\theta - B_z \cos\theta) \tag{1.14}$$

Avec la longueur d'onde λ et les distances entre les antennes radar et le diffuseur (la cible) r_1 et r_2 qui peuvent également être décrites en termes des composantes de la Baseline B_x et B_z, et l'angle d'incidence θ. La hauteur du point z(x, y) peut alors être déterminée par :

$$z(x,y) = H - r_1 \cos\theta \tag{1.15}$$

$$= H - r_1\left(\cos\xi\sqrt{1-\sin^2(\theta-\xi)} - \sin\xi\sin(\theta-\xi)\right) \tag{1.16}$$

Où H est la hauteur de vol, ξ est l'angle d'inclinaison de la Baseline et $\sin(\theta-\xi)$ peut être dérivée de la différence de distance interférométrique et de la Baseline.

1.10 Modes d'acquisition en SAR

En imagerie SAR, l'interférogramme est obtenu grâce à deux images SLC (Singe Look Complex) radar de la même scène, acquises à partir de deux orbites séparées par une distance dite « base interférométrique » ou « Baseline ». Les deux images peuvent être acquises simultanément par des plateformes contenant deux antennes ou à deux dates différentes (cas d'une plateforme survolant la scène dans un intervalle d'un jour ou plusieurs jours). Ces méthodes sont les suivates :

1.10.1 Mono-passe

La figure 1.7 illustre la géométrie de cette méthode, la position des 2 antennes montées sur le porteur est perpendiculaire à la direction du vol. L'élévation du terrain est proportionnelle à la hauteur de vol, la pente du terrain, et l'angle d'incidence. Il est donc possible de déterminer une carte d'élévation.

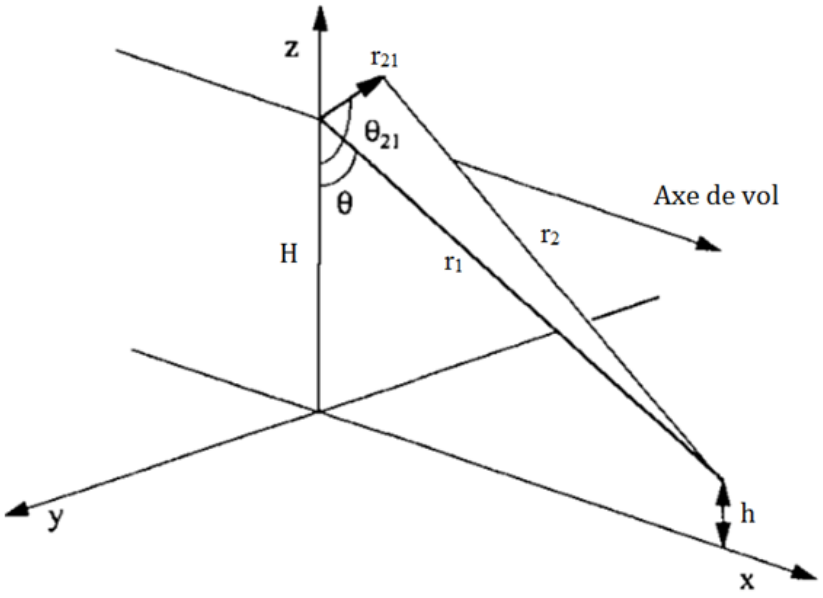


FIGURE 1.7 – Géométrie d'acquisition en mode Mono-passe

1.10.2 Multi-passe

Cette méthode ne requiert qu'une seule antenne, elle est de ce fait la mieux adaptée aux systèmes spatioportés. Elle nécessite également une haute précision de la location de l'axe de vol, et les satellites ont un axe de vol très précis et stable en l'absence d'atmosphère, par rapport aux avions. Le satellite doit passer sur 2 orbites presque identiques pour couvrir une zone et avoir 2 passes avec des géométries légèrement différentes. Cette méthode est par exemple employée dans la mission ESA ERS-I/ERS-2, où 2 satellites récoltent des données sur la même zone, à partir de 2 orbites légèrement différentes, à 1 jour d'intervalle.

Gray et Farris-Manning ont fixé 3 conditions pour obtenir des résultats concluants :

• Un terrain à rétrodiffusion fixe (non changeante)

• Une géométrie stable

• Un processeur SAR qui préserve l'information inhérente de la phase dans les données de signal compensées par le mouvement

La dernière condition s'est avérée être la plus difficile à respecter. Si ces conditions sont respectées, un plus court lapse de temps entre les passes des satellites conduit à de meilleurs résultats.

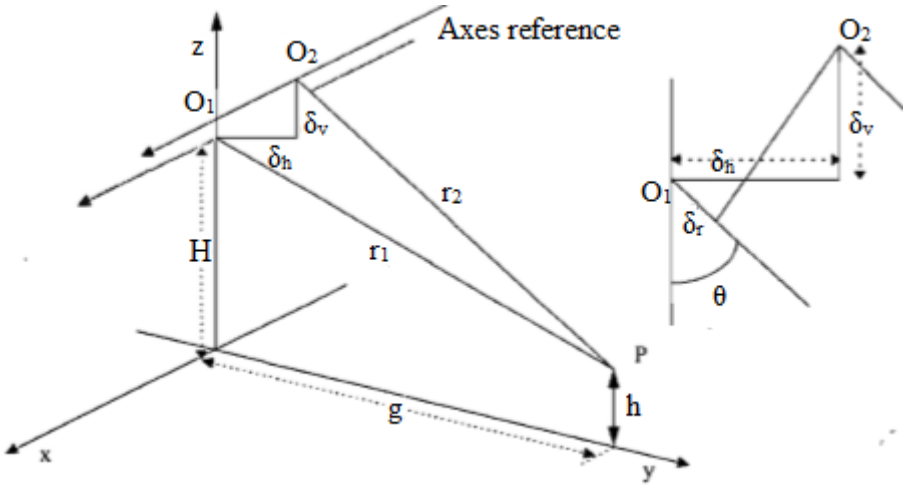


FIGURE 1.8 – Géométrie d'acquisition en mode multi-passe

Comme illustré sur la figure1.8, la baseline (la ligne de séparation entre les 2 points d'acquisition O_1 et O_2) peut être décrite par la séparation des axes de vol horizontale et verticale δ_h et δ_v respectivement, en supposant que les axes de vol soient parallèles. La variation de pente δ_r est donnée par :

$$\delta_r = r_1 - r_2 = \frac{g\delta_h - (H-h)\delta_v}{\bar{r}} - \frac{B^2}{2\bar{r}} \tag{1.17}$$

Avec :

$$\bar{r} = \frac{(r_1 + r_2)}{2} \tag{1.18}$$

Et :

$$B = \sqrt{\delta_h^2 + \delta_v^2} \tag{1.19}$$

1.11 Altitude d'ambiguïté

Lorsque la variation de phase interférométrique est égale à 2π, la valeur de l'altitude est appelée altitude d'ambiguïté et est notée $h_{2\pi}$. Elle correspond à une frange sur un interférogramme et peut être utilisée comme unité de mesure interférométrique pour une baseline donnée. Elle 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 entraine l'apparition d'un grand nombre de frange sur l'interférogramme, ce qui complique l'opération de déroulement de phase (cf. Chapitre 2).

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.

1.12 Processus InSAR

Pour obtenir des résultats de bonne qualité, il est nécessaire de suivre un processus de correction géométrique :

1.12.1 Recalage des images

Pendant les passages des satellites les capteurs ne visent pas exactement à la même scène, les images ne sont pas exactement dans la même géométrie. Le recalage consiste à effectuer des transformations géométriques sur une image esclave par rapport à une image maitresse.

1.12.2 Produit interférométrique

Le produit interférométrique normalisé d'un couple d'images est donné par l'expression suivante :

$$\gamma(x,y) = \frac{\sum_{(x,y)\in F}\left(S_1(x,y) * S_2^*(x,y)\right)}{\sqrt{\sum_{(x,y)\in F} S_1^2(x,y)\sum_{(x,y)\in F} S_2^2(x,y)}} \tag{1.20}$$

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.

1.12.3 Estimation du Baseline

La variation de la géométrie du baseline dans la direction azimutale de la prise de vue engendre des variations de phase ou de frange dans les interférogrammes. Il est donc indispensable de toujours avoir une estimation du baseline.

1.12.4 Élimination des franges orbitales

Les franges orbitales sont dues à la vision oblique à partir de deux positions d'antennes séparées par le baseline. Cela crée une différence de phase représentée par des franges parallèles à la ligne de vol.

1.12.5 Déroulement de phase

La phase est seulement connue modulo 2π. Il est donc nécessaire de déterminer le multiple de 2π à additionner à la phase mesurée pour chaque point et obtenir une estimation de

la phase réelle (cf. Chapitre2).

1.12.6 Conversion de la phase en altitude

La conversion de la phase interférométrique déroulée permet de faire la correspondance entre la phase interférométrique et l'altitude topographique.

1.13 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons vu les méthodes employées pour obtenir l'image Radar. Nous savons que l'information contenue dans la phase ne peut pas être déduite directement, mais qu'il faut faire un traitement. Nous allons voir dans le chapitre suivant les méthodes utilisées pour le déroulement de phase.

Chapitre 2

Méthodes de déroulement de phase

2.1 Introduction

L'ultime étape d'un processus interférométrique est le déroulement de phase. Celui-ci consiste à trouver la phase absolue de chaque cible à partir de la phase ambiguë (mesurée). Pour cela, on présente dans ce chapitre les principes et les approches de déroulement de phase.

2.2 Déroulement de phase

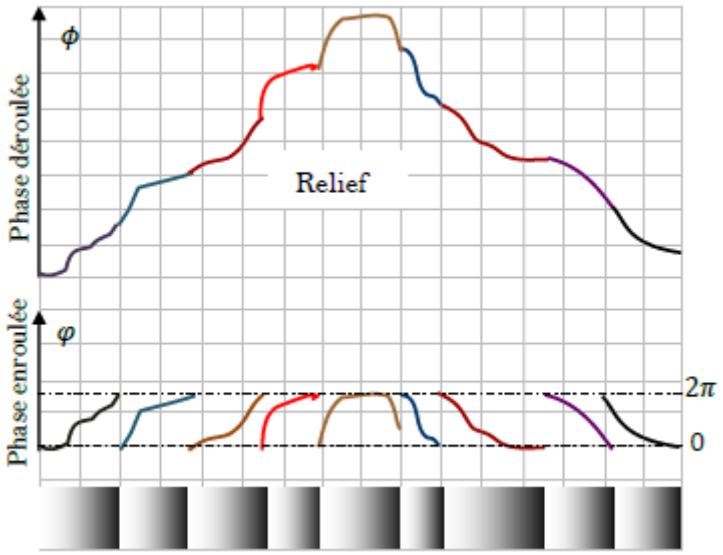


FIGURE 2.1 – Principe de déroulement phase

Le déroulement de phase représente l'une des principales difficultés pour la réalisation d'un modèle numérique de terrain par l'interférométrie SAR. Cette étape consiste à calculer la phase exacte (phase absolue ϕ) en chaque pixel à partir de la phase mesurée φ dans

l'interférogramme. Cela nous permet de trouver le facteur k qui vérifie l'équation suivante : [8]

$$\phi(p)_{Déroulée} = \varphi(p)_{enroulée} + 2k\pi \tag{2.1}$$

Avec : k $\in Z$ La figure 2.1 montre le principe de déroulement de phase.

2.3 Principe de déroulement de phase

Pour trouver l'étiquette **k**, le procédé de base en une dimension est comme suit :

Étape 1 : Prendre le deuxième échantillon en partant de la gauche dans le signal de phase enroulée.

Étape 2 : Calculer la différence entre l'échantillon actuel et son voisin de gauche directement adjacent.

Étape 3 : Si la différence entre les deux est plus grande que $+\pi$, Soustraire 2π de cet échantillon et de tous les échantillons à sa droite (ou soustraire 1 à l'étiquette K de cet échantillon et de tous les étiquette à sa droite). Exemple itération6 : 3-(-1.36)=4.36 alors étiquette =1-1=0

Étape 4 : Si la différence entre les deux est inférieure à $-\pi$, ajouter 2π à cet échantillon et à tous les échantillons à sa droite (ou ajouter 1 à l'étiquette K de cet échantillon et de tous les étiquette à sa droite). Exemple itération3 : -1.36-(-3)=-4.36 alors : étiquette=0+1=1.

Étape 5 : Tous les échantillons de la ligne de données ont-ils été traités ? Si tel est le cas, arrêter. Sinon, Avancer d'un échantillon vers la droite et revenir à l'étape 2.

Le tableau 2.1 présente les résultats du déroulement de phase à une dimension et la figure 2.2 montre le graphe qui représente le déroulement.

Phase enroulée	0	1.5	3	-1.36	-2.86	-1.36	3	1.5	0	-1.5	-3	1.36	2.86	1.36	-3	-1.5	0
Initialisation de l'étiquette	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Itération 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Itération 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Itération 3	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Itération 4	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Itération 5	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Itération 6	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
.....	..	..	..	..	..	..	.	.	..	...	...	...	....	...	....	...	...
Etiquette finale	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	-1	-1	1	0	0	0
Phase déroulée	0	1.5	3	4.5	6	4.5	3	1.5	0	-1.5	-3	-4.5	-6	-4.5	-3	-1.5	0

TABLE 2.1 – Résultat de déroulement de phase en une dimension

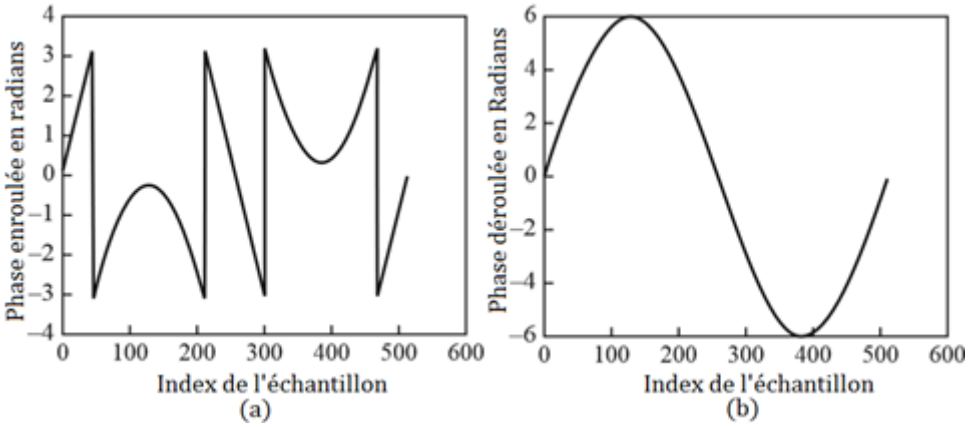


FIGURE 2.2 – Déroulement de phase en une dimension

La figure 2.2 montre que l'algorithme garde la valeur de la phase lorsqu'elle est proche de celle de son voisin, mais lorsqu'il trouve un saut de phase de 2π, il corrige la phase.

Les algorithmes utilisés peuvent être classés en 2 grandes familles : l'approche locale et l'approche globale.

2.4 Approche locale

Elle est la plus simple et se base sur le calcul de la différence de phase, « pixel par pixel » selon une initialisation et un parcours. Elle détermine la valeur de l'étiquette k en minimisant la différence de phases entre deux pixels voisins comme suit : Soit p1 et p2 deux pixels voisins, en prenant p1 comme une référence, p2 est déroulé par rapport à cette référence. Nous calculons la différence de phase enroulée $\Delta\phi$ et la différence de la phase déroulée $\Delta\varphi$ selon les trois conditions suivantes :

$$\begin{aligned} &Si\ |\Delta\varphi(p_1,p_2)| \leq \pi\ \ alors\ \ \Delta\phi(p_1,p_2) = \Delta\varphi(p_1,p_2) \Rightarrow k(p_2) = k(p_1) \\ &Si\ |\Delta\varphi(p_1,p_2)| > \pi\ alors\ \ \Delta\phi(p_1,p_2) = \Delta\varphi(p_1,p_2) - 2\pi \Rightarrow k(p_2) = k(p_1) - 1 \\ &Si\ |\Delta\varphi(p_1,p_2)| < -\pi\ alors\ \Delta\phi(p_1,p_2) = \Delta\varphi(p_1,p_2) + 2\pi \Rightarrow k(p_2) = k(p_1) + 1 \end{aligned} \tag{2.2}$$

Pour dérouler en deux dimensions, il suffit de répéter l'opération pour chaque ligne de l'image. Cette méthode est appelée le déroulement 'de proche en proche'. Dans le cas parfait (absence des discontinuités), le résultat de déroulement est identiques quel que soit le chemin de déroulement choisi sur l'interférogramme. Voir l'exemple de la figure 2.3 le déroulement sur un interférogramme simulé. Cependant, dans le cas des interférogrammes réels le déroulement de proche en proche est extrêmement vulnérable aux erreurs. Si un seul pic de bruit est confondu avec un enroulement de phase, non seulement ce point est faux, mais également chaque point à partir de là vers la droite et en dessous dans l'image sera incorrect on parle de la propagation d'erreurs. [9] Voir l'exemple de la figure 2.4

Pour éviter la propagation des erreurs dues au bruit, des travaux ont été effectués.[10] et

[11] ont proposé de modéliser ces irrégularités afin de déterminer le chemin de déroulement le plus approprié. Ou 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. Pour identifier et localiser ces irrégularités, il faut évaluer la somme des dérivées partielles selon un parcours fermé et générer une image des résidus.

La figure 2.3 représente l'image de phase, l'image des étiquettes 'k' ainsi que la phase déroulée et les profils.

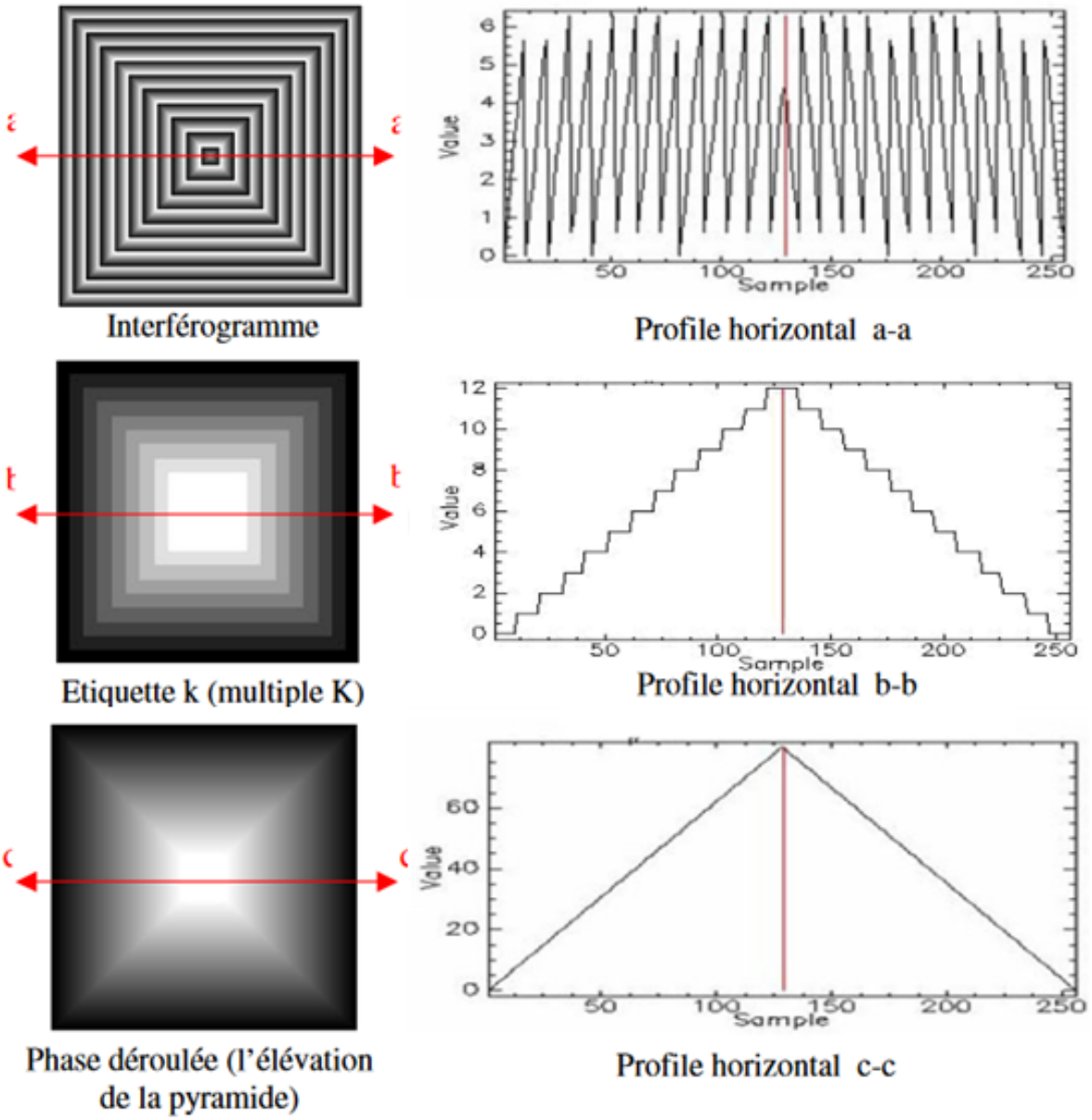


FIGURE 2.3 – Déroulement de phase par la méthode de proche en proche.

La figure 2.4 montre l'application de la méthode de proche en proche sur des interférogrammes réels.

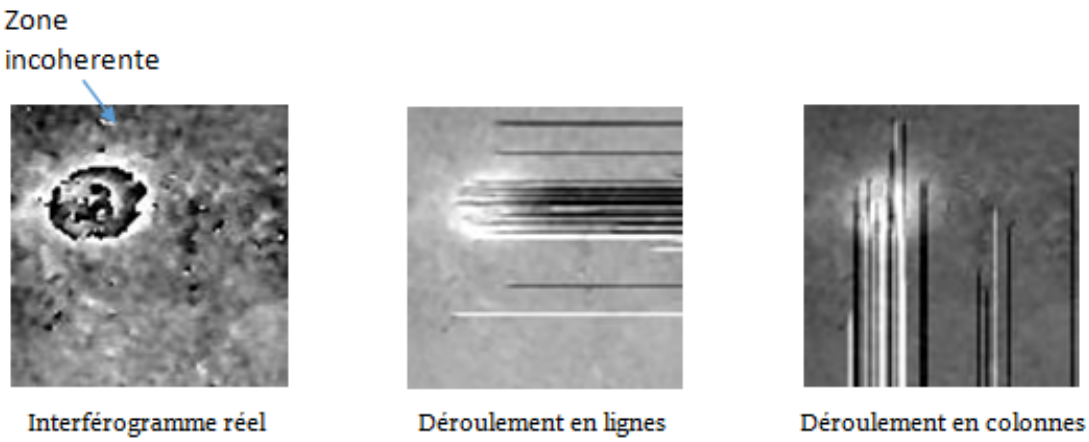


FIGURE 2.4 – Déroulement de phase de proche en proche.

2.4.1 Concept des Résidus

Les problèmes des décorrélations, de la géométrie d'acquisition interférométrique et de relief se manifestent dans les images de cohérence et l'interférogramme par des pixels bruités et des ruptures des franges. Ces anomalies sont quantifiées en premier lieu par l'analyse statistique de l'image de cohérence et en deuxième lieu par l'intégration du concept des résidus dans un espace complexe (phase).

Localisations des résidus

La quantification de la discontinuité de la phase enroulée consiste à calculer les pseudos-gradients sur le plus court chemin fermé, [12][10]. 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, Il est exprimé par l'équation 2.3 :

$$résidu(x,y) = G_i\{\varphi_n(x+1,y) - \varphi_n(x,y)\} + G_i\{\varphi_n(x+1,y+1) - \varphi_n(x+1,y)\}$$

$$+G_i\{\varphi_n(x,y+1) - \varphi_n(x+1,y+1)\} + G_i\{\varphi_n(x,y) - \varphi_n(x,y+1)\} \quad (2.3)$$

Où G_i est l'opérateur de correction de la phase et φ_n est la phase interférométrique normaliséeentre 0 et 1.

L'équation 2.4 nous donne les expressions de calcul d'un pseudo-gradient G_i phase corrigée :

$$G_i = \begin{cases} \varphi_n(x+1,y) - \varphi_n(x,y) & Si \ -0.5 \leq \varphi_n(x+1,y) - \varphi_n(x,y) \leq 0.5 \\ \varphi_n(x+1,y) - \varphi_n(x,y) + 1 & Si \quad \varphi_n(x+1,y) - \varphi_n(x,y) < -0.5 \\ \varphi_n(x+1,y) - \varphi_n(x,y) - 1 & Si \quad \varphi_n(x+1,y) - \varphi_n(x,y) > 0.5 \end{cases} \quad (2.4)$$

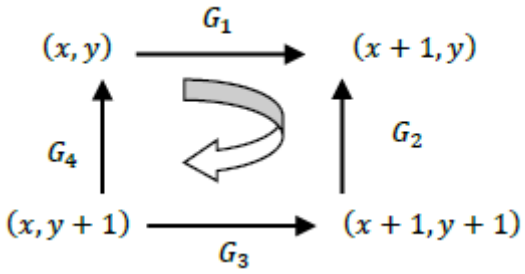


FIGURE 2.5 – Graphe de calcul des résidus

On calcule les G_i en utilisant la même formulation en changeant juste les indices ; L'objectif de la correction de phase est de ramener la différence entre les deux pixels dans l'intervalle $[-0.5, 0.5]$, c.à.d. corriger la condition de régularité de la phase. Les pixels pour lesquels la condition n'est pas vérifiée vont produire des résidus. Le résidu prend la valeur "0" en l'absence d'irrégularités de phases et les valeurs +1 ou -1 (pour un interférogramme normalisé) dans le cas contraire. Les résidus sont affectés d'un signe que l'on appelle polarité du résidu ou 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 entraine l'inversion de la polarité des résidus. [12]

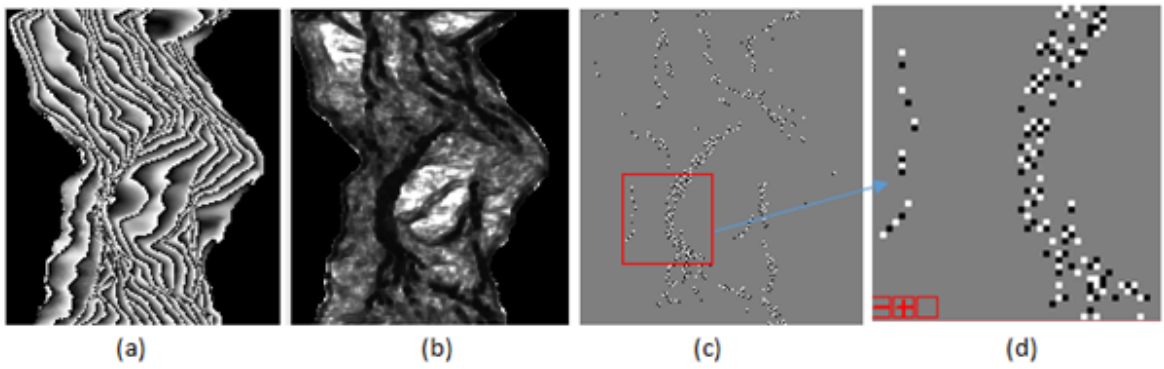


FIGURE 2.6 – Exemple d'images de résidus a)Interférogramme. b) Image de qualité (pseudo-corrélation). c) Image des résidus. d) Zoom sur les résidus.

Généralement, dans tous processus interférométriques une étape de filtrage des interférogrammes est réalisée avant le déroulement de phase [1].

2.4.2 Approche de Déroulement par Evitement des Discontinuités

L'approche de Déroulement de Phase par Evitement des Discontinuités est une approche efficace puisque elle permet de dérouler la phase sans aucune approximation de la solution. La méthode de base, dans cette approche, a été développée par Goldstein & al en 1988 [10].

Ça consiste de trouver le chemin le plus approprié pour dérouler la phase en assurant la cohérence du résultat de déroulement. Elle se base sur le critères suivant :

• Aucune propagation d'erreur de déroulement sur un chemin fermé si et seulement si la somme des différences de phase corrigées le long de ce chemin est nulle ; Le chemin fermé de déroulement doit assurer la condition suivante :

$$\sum_{i=1}^{m} W[\varphi_i - \varphi_{i+1}] = 0$$

Où l'opérateur W permet de corriger la phase enroulée entre deux pixels adjacents et m est le nombre de pixels sur le parcours.

Afin d'assurer ces propriétés en présence des discontinuités ces dernières doivent être localisées et quantifiées par les résidus. Les résidus sont ensuite reliés entre eux pour former les lignes saturées (nombre de résidus positifs= nombre de résidus négatifs) empêchant la propagation de l'erreur [12].[13] et d'autres ont apporté des améliorations à cette méthode.

2.4.3 Méthodes de déroulement guidé par chemin de qualité

Ces méthodes initialement proposées par [14], se basent sur l'image de qualité pour définir le meilleur chemin de déroulement. Elles s'appuient, d'une part sur l'analyse et la modélisation locales des relations entre pixels (phases) voisins et d'autre part, sur une évolution globale du contexte, par une mise à jour itérative des phases déroulées en fonction du voisinage. Les pixels à haute qualité sont déroulés en premier et les pixels de moins bonne qualité en dernier. L'efficacité de ces méthodes est liée à la façon dont l'image de qualité est calculée et les différences de phase dans l'interférogramme. Leur développement repose sur deux niveaux de traitement :

•Estimation d'un indicateur de qualité de la phase à dérouler

•Déroulement par propagation progressive de régions de haute qualité aux régions de faible qualité à travers un processus itératif.

Génération des images 'indices de qualité' interférométrique

Leur objectif est d'étiqueter la phase par sa qualité, isolée ou dans son contexte de voisinage. L'efficacité de ces indices, dans le contexte InSAR est mise en évidence par la précision des résultats de déroulement de phase.[12]

Il est possible de calculer ces indices de plusieurs façons, les plus efficaces sont :

•Image de qualité par la Pseudo-corrélation

La pseudo-corrélation est une mesure le degré de corrélation des pixels dans un voisinage (contexte) des phases enroulées (interférogramme). Elle est déduite de l'expression trigonométrique de l'interférogramme complexe, donnée comme suit :

$$\gamma = \gamma(\cos\psi) + i\gamma(\sin\psi) = Re(\gamma) + iIm(\gamma) \tag{2.5}$$

Avec : $Re(\gamma)$: partie réelle, $Im(\gamma)$: partie imaginaire

Le module de γ :

$$|\gamma| = \sqrt{Re(\gamma)^2 + Im(\gamma)^2} = \sqrt{(\gamma\cos\psi)^2 + (\gamma\sin\psi)^2} = |\gamma|\sqrt{(\cos\psi)^2 + (\sin\psi)^2} \quad (2.6)$$

Pour $|\gamma|$ égale à 1, l'estimation de la valeur de perte en cohérence de $|\gamma|$ est appelée pseudo-corrélation. En utilisant cette valeur, on passe de l'espace de corrélation (cohérence) des deux signaux formant l'interférogramme à l'espace de corrélation entre les valeurs de la phase de produit interférométrique, prises dans un contexte spatial prédéfini. Evaluée sur une fenêtre de taille k x k, la pseudo-corrélation peut être définie, pour chaque pixel de l'interférogramme, par l'équation suivante :

$$|\gamma|_{m,n} = |PC_{m,n}| = \frac{1}{k^2} \times \sqrt{\left(\sum_{i=m-(\frac{k-1}{2})}^{m+\frac{k-1}{2})} \sum_{j=n-(\frac{k-1}{2})}^{n+\frac{k-1}{2})} \cos(\varphi_{i,j})\right)^2 + \left(\sum_{i=m-(\frac{k-1}{2})}^{m+\frac{k-1}{2})} \sum_{j=n-(\frac{k-1}{2})}^{n+\frac{k-1}{2})} \sin(\varphi_{i,j})\right)^2} \quad (2.7)$$

Où les sommes sont évaluées dans la fenêtre de taille k x k, pour chaque pixel central (m,n). Les termes $\varphi_{i,j}$ sont les valeurs de la phase interférométrique. Cette mesure met en évidence les régions à variations brusques de la phase enroulée, ces régions auront des faibles valeurs de corrélation. Nous présentons, dans la figure des exemples d'images 'pseudo-corrélation', ayant des zones accidentées et peu accidentées en les comparant à la même image de cohérence. Nous remarquons que, sur l'image de pseudo-corrélation, toutes les transitions brusques sont marquées par des faibles valeurs proches de 'zéro'.

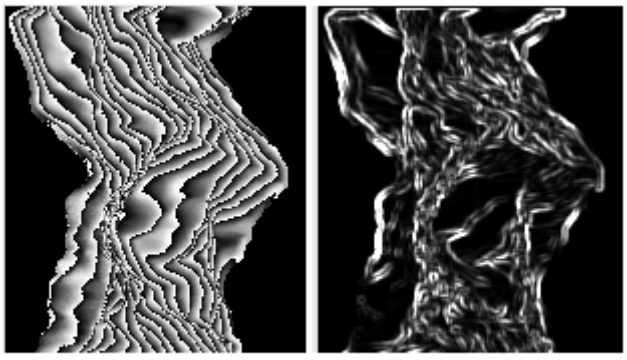


FIGURE 2.7 – (a) Interférogramme (b) Image de qualité par pseudo corrélation

• Image de qualité par la Variance des Dérivées de phase

Cette méthode mesure la 'Variance Statistique Locale des Dérivés des Phases enroulées'. D'après Ghiglia et Pritt [8], elle est considérée comme la carte la plus fiable qui peut être

extraite directement de l'interférogramme. Mais en fait, cette image met en évidence les zones de faibles qualités plutôt que les zones de hautes qualités. L'indice de qualité, dans ce cas-là, sera défini en fonction de la variance des dérivées premières dans le voisinage 8-connexité pour un pixel (m,n) comme suit : $q_{m,n} = \frac{1}{VDP_{m,n}}$

En utilisant une fenêtre de traitement k $\times$ k, la Variance des Dérivées de Phase est définie par l'équation suivante :

$$VDP_{m,n} = \frac{1}{k^2}\sqrt{\sum_{i=m-(\frac{k-1}{2})}^{m+\frac{k-1}{2})}\sum_{j=n-(\frac{k-1}{2})}^{n+\frac{k-1}{2})}\left(\nabla\varphi^x_{i,j} - \overline{\nabla\varphi^x_{m,n}}\right)^2} + \frac{1}{k^2}\sqrt{\sum_{i=m-(\frac{k-1}{2})}^{m+\frac{k-1}{2})}\sum_{j=n-(\frac{k-1}{2})}^{n+\frac{k-1}{2})}\left(\nabla\varphi^y_{i,j} - \overline{\nabla\varphi^y_{m,n}}\right)^2} \tag{2.8}$$

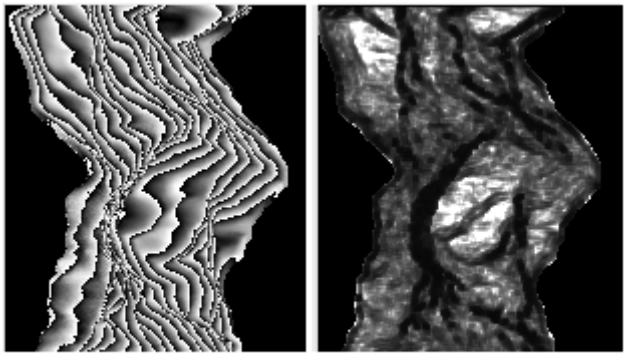
Où, les termes $\nabla\varphi^x_{i,j}$ et $\nabla\varphi^y_{i,j}$ sont les différences de phases corrigées, respectivement dans les deux directions x et y.

$$\nabla\varphi^x_{i,j} = W[\varphi_{i+1,j} - \varphi_{i,j}]$$

$$\nabla\varphi^y_{i,j} = W[\varphi_{i,j+1} - \varphi_{i,j}]$$

Les termes $\overline{\nabla\varphi^x_{m,n}}$ et $\overline{\nabla\varphi^y_{m,n}}$ sont les moyennes de ces différences dans la fenêtre k x k .

La figure 2.8 correspond à un exemple d'image de qualité par Variance des Dérivées de phase.



(a) (b)

FIGURE 2.8 – a) Interférogramme (b) Image qualité par la Variance des Dérivées de phase

• Image de qualité par le maximum de gradient

Elle correspond à une mesure de l'inverse du 'Maximal_Module_Gradient' de phase qui correspond au maximum des dérivées partielles en x et en y de la phase enroulée dans une

fenêtre k x k. Son expression est donnée comme suit :

$$MMG_{m,n} = \frac{1}{Bm,n}$$
$$B_{m,n} = Max\Big\{Max\big\{|\nabla\varphi^{x}_{i,j}|\big\}, Max\big\{|\nabla\varphi^{y}_{i,j}|\big\}\Big\} \tag{2.9}$$

Les termes $|\nabla\varphi^{x}_{i,j}|$ et $|\nabla\varphi^{y}_{i,j}|$ sont les modules des dérivées partielles de la phase enroulée. L'inconvénient de l'image du maximum de gradient de phase c'est que les régions fiables ayant des variations de pentes très importantes seront masquées comme de faible qualité, ce qui est similaire à celle de l'image de la pseudo-corrélation. Cependant, l'avantage du maximum de gradient est que les zones de transitions auront de fortes valeurs pour ce paramètre et donc inversement un bon indicateur de qualité.

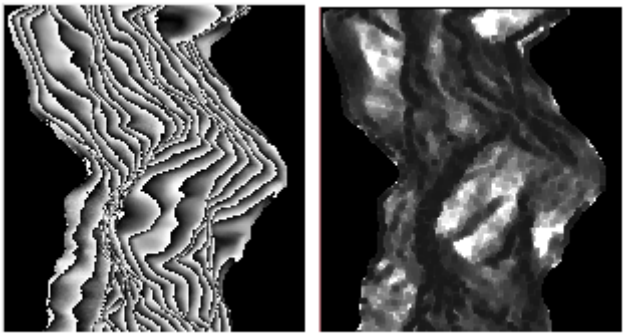


FIGURE 2.9 – a) Interférogramme b) Image qualité par le maximum de gradient

La figure 2.9 montre un exemple d'image de qualité par le maximum de gradient.

• Image de qualité par la seconde dérivée

L'estimation de la deuxième dérivée de la phase dans un voisinage permet de révéler les transitions brusques de la phase interférométrique. Cette mesure de la qualité de chaque pixel dans une fenêtre de taille k x k est déterminée à partir de l'expression suivante :

$$\mathrm{SD}_{m,n} = \Delta(\varphi_{m,n}) = \frac{1}{\sqrt{\big(\Delta_H(\varphi_{m,n})\big)^2 + \big(\Delta_V(\varphi_{m,n})\big)^2 + \big(\Delta_{D1}(\varphi_{m,n})\big)^2 + \big(\Delta_{D2}(\varphi_{m,n})\big)^2}} \tag{2.10}$$

Avec :

$$\Delta_H(\varphi_{m,n}) = W\left[\varphi_{m,n-1} - \varphi_{m,n}\right] - W\left[\varphi_{m,n} - \varphi_{m,n+1}\right]$$
$$\Delta_V(\varphi_{m,n}) = W\left[\varphi_{m-1,n} - \varphi_{m,n}\right] - W\left[\varphi_{m,n} - \varphi_{m+1,n}\right]$$
$$\Delta_{D1}(\varphi_{m,n}) = W\left[\varphi_{m-1,n-1} - \varphi_{m,n}\right] - W\left[\varphi_{m,n} - \varphi_{m+1,n+1}\right]$$

$$\Delta_{D2}(\varphi_{m,n}) = W\left[\varphi_{m+1,n} - \varphi_{m,n}\right] - W\left[\varphi_{m,n} - \varphi_{m-1,n+1}\right]$$

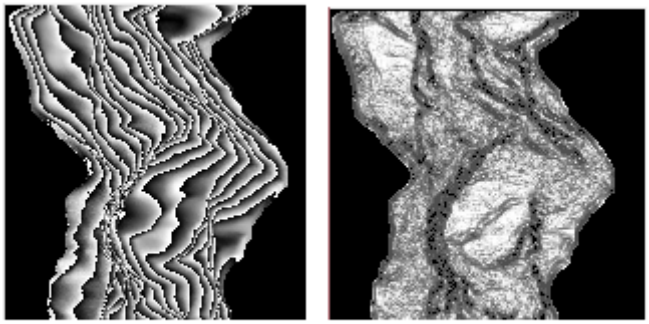


FIGURE 2.10 – a) interférogramme b) image qualité par la seconde dérivée

• Nouvelle image de qualité hybride

[2] proposent une nouvelle image de qualité, c'est un hybride de l'image de pseudo corrélation et de l'image de variance dérivée de phase. Indépendamment du fait que l'image de pseudo-corrélation n'est pas aussi efficace que l'image de variance dérivée de phase dans de nombreux cas, elle est sensible aux changements rapides et capable de reconnaître les données de phase avec sous-échantillonnage en leur attribuant des valeurs de faible qualité. Par conséquent, la combinaison des deux images de qualités devrait en générer une meilleure.

La nouvelle image de qualité est définie par l'équation suivante :

$$q_{m,n} = \frac{\left[\sum_{i=m-l/2}^{m+l/2}\sum_{j=n-l/2}^{n+l/2}\left(\Delta_{i,j}^{x} - \overline{\Delta_{m,n}^{x}}\right)^2\right]^{1/2} + \left[\sum_{i=m-l/2}^{m+l/2}\sum_{j=n-l/2}^{n+l/2}\left(\Delta_{i,j}^{y} - \overline{\Delta_{m,n}^{y}}\right)^2\right]^{1/2}}{l \times l} \times \left\{1 - \frac{\left[\left(\sum_{i=m-l/2}^{m+l/2}\sum_{j=n-l/2}^{n+l/2}\cos\phi_{i,j}\right)^2 + \left(\sum_{i=m-l/2}^{m+l/2}\sum_{j=n-l/2}^{n+l/2}\sin\phi_{i,j}\right)^2\right]^{1/2}}{l \times l}\right\} \tag{2.11}$$

Où la qualité du pixel (m, n) est calculée à partir de son voisinage $l \times l$. Les termes $\Delta_{i,j}^{x}$ et $\Delta_{i,j}^{y}$ sont les dérivées partielles de la phase. Le terme $\phi_{i,j}$ est la valeur de phase enroulée.

Les termes $\Delta_{i,j}^{x}$ et $\Delta_{i,j}^{y}$ peuvent être calculés par les formules :

$$\Delta_{i,j}^{x} = W(\phi_{i+1,j} - \phi_{i,j}) \tag{2.12}$$

et

$$\Delta_{i,j}^{y} = W(\phi_{i,j+1} - \phi_{i,j}) \tag{2.13}$$

$\overline{\Delta_{i,j}^{x}}$ et $\overline{\Delta_{i,j}^{y}}$ sont les valeurs moyennes des dérivées partielles de la phase dans la fenêtre $l \times l$.

De plus, W est l'opérateur de correction de la phase, où :

$$W(\phi_{i,j}) = \phi_{i,j} + 2\pi k_{i,j} \tag{2.14}$$

Et $k_{i,j}$, un entier inconnu, est choisi de telle manière que :
$W(\phi_{i,j}) \in (-\pi, \pi)$

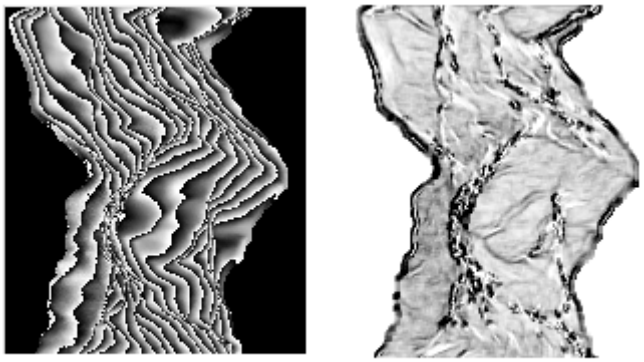


FIGURE 2.11 – a) Interférogramme b) Image de qualité hybride

2.5 Approche régionale et globale

Contrairement aux méthodes locales, les méthodes dites 'Régionales ou 'Globales' tentent d'exploiter l'appartenance des pixels aux franges ou de représenter la phase à dérouler par un modèle global continu.

2.5.1 Déroulement par détection de contours

Proposée par [15], la méthode de détection de contours cherche l'appartenance du pixel à une frange. Son principe consiste à d'abord rehausser le contraste des franges en appliquant une série de filtres orientés à -90°,-45°,0°,45°, et 90° et un filtrage médian 7x7 à l'interférogramme pour obtenir une image des contours à basse résolution. Un algorithme de fermeture de contours est ensuite appliqué pour retrouver les bords des franges. Une fois les franges détectées, on peut dérouler la phase en ajouter ou en soustrayant 2π à chaque changement de frange. Cette méthode est efficace dans le cas où les lignes de franges sont nettement séparées et continues. On peut citer parmi ces filtres les filtres orientés le filtre de lissage ISEF

2.5.2 Approche de Minimum norme

Ces méthodes cherchent une solution globale en utilisant un formalisme mathématique et en imposant une contrainte sur la solution, le problème est résolu par le biais des procé-

dures d'optimisation qui impliquent l'image dans son ensemble. Les algorithmes basés sur la minimum norme cherchent à minimiser la différence entre le gradient de la phase déroulée et le gradient corrigé de la phase enroulée.

2.5.3 Méthode des moindres carrés

Le but de cette méthode est de faire tendre l'erreur vers 0. Ghiglia et Al [16] proposent d'initialiser les phases déroulées à 0, puis, de mettre à jour la solution de manière itérative jusqu'à ce que l'erreur atteigne une certaine tolérance. Cette méthode est très lente mais il est possible d'utiliser une autre solution qui est basée sur l'utilisation de la transformée de Fourier rapide.

D'après les travaux publiés sur le déroulement de phase, la solution donnée par les moindres carrés est considérée simple par rapport aux autres algorithmes cités dans la littérature [8]. Or, dans le cas où la phase enroulée présente des discontinuités importantes, la solution avec les moindres carrés est erroné, cela est dû à la manière globale de recherche de solution par les moindres carrés, et conduit à une solution qui n'est pas conforme aux variations du terrain étudié.

2.5.4 Méthode de minimum Lp-norme

Développée par Ghiglia et Al [8], cette méthode est similaire à celle des moindres carrés pour résoudre le problème de déroulement de phase. Cette méthode est plus robuste que la méthode des moindres carrés mais ne garantit pas, dans tous les cas de figure, des résultats cohérents [12].

2.5.5 Approche Probabiliste

Cette méthode reconstruit la phase en préservant au mieux les discontinuités du relief et en utilisant l'estimation *Maximum à Posteriori* (MAP). Cette estimation nécessite la définition de modèle de vraisemblance déduit des statistiques sur les données InSAR.

Remarque :

Les méthodes sus citées ont prouvé leur efficacité au fil des années et elles sont les plus utilisées. Cependant, d'autres méthodes ont été développées. Il est par exemple possible d'utiliser les méthodes polynomiales [9]. Il existe aussi des méthodes dites *'mixtes'* qui tentent d'exploiter les avantages des méthodes locales et globales.

2.6 Conclusion

Les méthodes de déroulement de phase sont nombreuses, chacune d'elles a ses propres avantages et inconvénients. Nous avons choisi une méthode basée sur le déroulement par

image de qualité pour son efficacité et sa simplicité d'implémentation.

Chapitre 3

Déroulement par placement des Branch Cut basé sur l'ordre de fiabilité

3.1 Introduction

De nombreux algorithmes de déroulement de phase ont été proposés. Chacun de ces algorithmes est utilisé pour gérer avec succès certaines sortes de problèmes et chacun a ses propres inconvénients. Dans ce chapitre nous tentons de contourner les limitations de l'algorithme de déroulement par suivi de chemin en implémentant un nouveau algorithme de déroulement de phase basé sur l'mage de qualité.

3.2 Algorithmes de suivi de chemin

Les algorithmes de suivi de chemin effectuent une intégration de phase dans une séquence d'étapes pour récupérer le vrai champ de phase. Ils peuvent être sous-classés en trois groupes : (1) algorithmes dépendants du chemin, (2) algorithmes de compensation des résidus et (3) algorithmes guidés par la qualité.

1. Les algorithmes dépendant du chemin [17] (proche en proche) sont les plus simples parmi les algorithmes de suivi de chemin. Ils utilisent une stratégie de recherche définie à priori, telle que le balayage linéaire. Bien que ces algorithmes soient généralement rapides, ils sont incapables de gérer les images de phase bruitées.
2. Les algorithmes de compensation des résidus [10] recherchent des résidus dans une image de phase enroulée et placent des 'Branch Cuts' entre les résidus positifs et négatifs. Avec cette méthode, les branches qui se ferment sur elles-mêmes, créent des zones isolées non accessibles lors du déroulement. Cependant, la qualité de déroulement et le temps d'exécution de ces algorithmes dépendent du critère de génération des Branch Cuts.

3. Les algorithmes guidés par la qualité [14] utilisent une image de qualité, qui indique la fiabilité des pixels de l'image de phase enroulée, pour guider le chemin d'intégration. Ils déroulent les pixels de la plus haute qualité qui ont les valeurs de fiabilité les plus élevées en premier et les pixels de qualité la plus basse avec les valeurs de fiabilité les plus faibles en dernier pour empêcher la propagation des erreurs. En général, la qualité de déroulement de ces algorithmes dépend de la stratégie de sélection de l'image de qualité. Étant donné que ces algorithmes ne génèrent pas des Branch Cuts entre les résidus, il n'y a aucune garantie que le chemin d'intégration n'entoure pas un résidu déséquilibré et n'introduise pas un multiple de 2π erroné.

3.3 Limitations des algorithmes connus

Certains algorithmes de compensation de résidus, tels que l'algorithme de Goldstein et al. [10], peuvent échouer dans le cas où des données de phase bruitées ou des données sous-échantillonnées sont présentes. Cela est dû au fait que les Branch Cuts ne sont pas placées correctement. Une partie des Branch Cuts mal placés dans les régions de haute qualité forcent le chemin d'intégration à traverser des régions de faible qualité qui ne contiennent pas des pixels de Branch Cuts. Ainsi, une erreur de déroulement se produit lorsque ces régions de faible qualité sont traversées. Pour résoudre le problème, Flynn a proposé un «algorithme de coupe de masque (Mask Cut algorithm) » [18] qui utilise une image de qualité pour générer des Branch Cuts dans les images de phases enroulées. L'algorithme commence depuis un résidu et développe un masque de pixels à travers les pixels de la plus basse qualité. La croissance s'arrête lorsque la polarité totale des résidus dans le masque est nulle. Ce processus est répété jusqu'à ce que tous les résidus dans le masque soient équilibrés. Le masque est ensuite aminci avec des opérateurs morphologiques. Enfin, le résultat déroulé est obtenu par simple intégration de chemin autour des découpes de masque. Parce que les Branch Cuts sont raisonnablement confinées pour se situer autant que possible dans des régions de faible qualité. L'algorithme de coupe de masque réussit dans certaines applications,[8] telles que le l'interférométrie SAR (InSAR) et l'IRM. Malgré ses mérites, l'algorithme a ses propres inconvénients. Lors de l'étape d'intégration de chemin, l'algorithme rejette l'image de qualité et déroule la phase enroulée par un simple déroulement 1-D le long des chemins qui évitent le masque. Comme il n'y a aucune garantie que les pixels de qualité faible soient tous confinés au masque, l'algorithme échouera certainement lorsque le chemin d'intégration traverse pour la première fois ces régions de faible qualité qui sont en dehors du masque, en particulier lorsque l'image de phase enroulée contient un niveau de bruit ou discontinuités complexes.

3.4 Algorithme de déroulement par placement des Branch Cut basé sur l'ordre de fiabilité

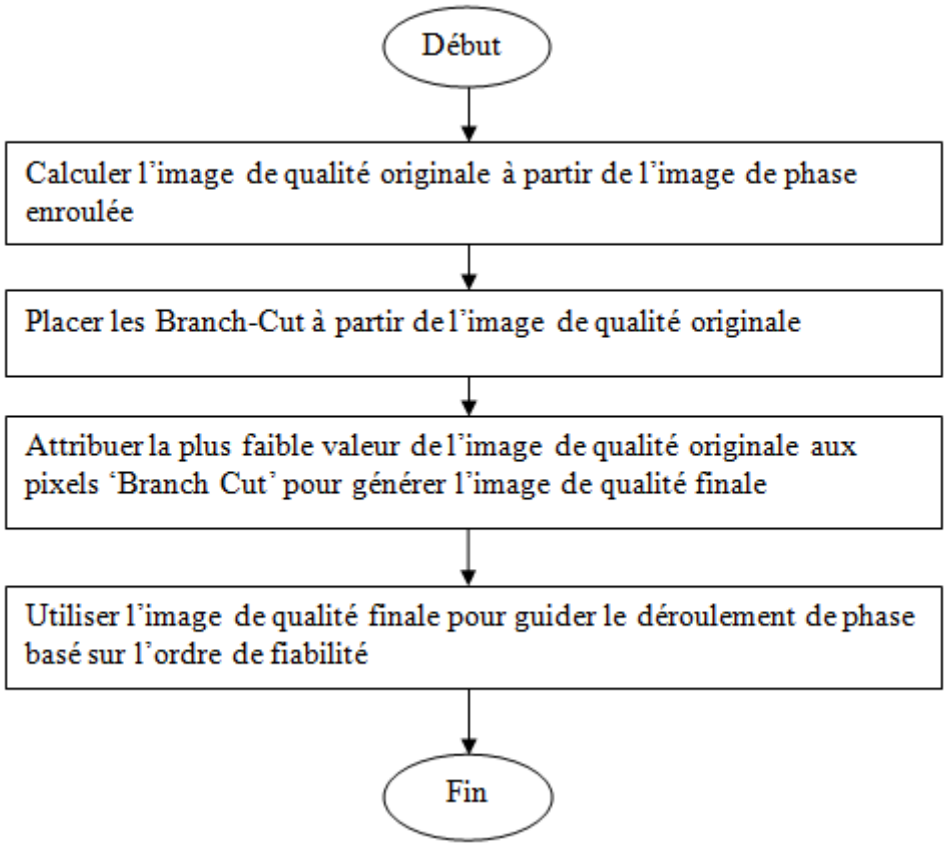


FIGURE 3.1 – Organigramme de l'algorithme

Pour surmonter les inconvénients de l'algorithme suivi de chemin et produire un meilleur chemin de déroulement de phase, [2] présentent un nouveau algorithme qui combine les avantages des algorithmes de compensation des résidus et ceux des algorithmes guidés par la qualité. Le nouveau algorithme appartient au groupe guidé par la qualité. Sa structure consiste à placer les Branch Cuts à partir d'une image de qualité originale et un classement de fiabilité réalisé sur une image de qualité finale. Tout d'abord, une image de qualité, qui peut refléter la fiabilité de l'image de phase enroulée, est utilisée comme image de qualité d'origine pour guider le placement des Branch Cuts. Cette étape équilibre tous les résidus et confine les Branch Cuts aux zones de mauvaise qualité. Ensuite, la valeur de qualité minimale est attribuée aux pixels des Branch Cuts pour générer une image de qualité finale. Enfin, l'image de phase enroulée est déroulée en fonction de l'ordre de fiabilité qui est effectué sur l'image de qualité finale. Les pixels de la plus haute qualité avec la plus grande fiabilité sont intégrés en premier et les pixels avec une fiabilité progressivement décroissante sont intégrés séquentiellement. Dans cette étape, l'algorithme recherche le pixel de qualité minimale dans

leurs 8 voisins.

Pour une meilleure compréhension, un organigramme simple du fonctionnement de l'algorithme est illustré sur la figure 3.1

L'algorithme utilise une image de qualité originale pour générer les Branch Cuts, qui sont limités pour se trouver autant que possible dans des zones de faible qualité. Ensuite, les informations de position des pixels Branch Cuts sont utilisées pour générer une image de qualité finale. Enfin, l'opération de classement de fiabilité est effectuée sur la dernière image de qualité, qui détermine un chemin optimal de déroulement de phase.

3.4.1 Placement des branch Cuts par l'utilisation des images de qualité

Une image de qualité est utilisée pour placer les Branch Cuts. L'image de qualité utilisée pour placer les Branch Cuts est appelée «image de qualité originale». Cette dernière peut être n'importe laquelle de celles dérivées directement de l'image de phase enroulée, comme la variance des dérivées de phase, le maximum de gradient...etc. [Cf. chapitre2]. [8]

Le placement des Branch Cuts suit les étapes suivantes :

Etape 1 : Identifier chaque résidu de l'image de phase enroulée et mettre tous les résidus dans une file d'attente vide Q0. Voir la figure 3.2

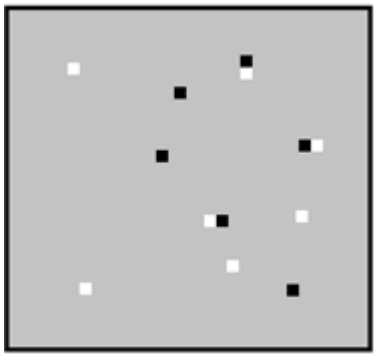


FIGURE 3.2 – Image des résidus Q0

Etape 2 : Marquer chaque «dipôle adjacent» ; le dipôle adjacent est deux résidus adjacents de polarité opposées voir figure 3.3(a) dipôles entourés en rouge ; en tant que pixels Branch Cut (figure 3.3(c)) et les supprimer de Q0 (figure 3.3(b)). Si Q0 est vide, c'est-à-dire que tous les résidus ont été équilibrés, le placement des Branch Cut est terminé. Sinon passer à l'étape 3.

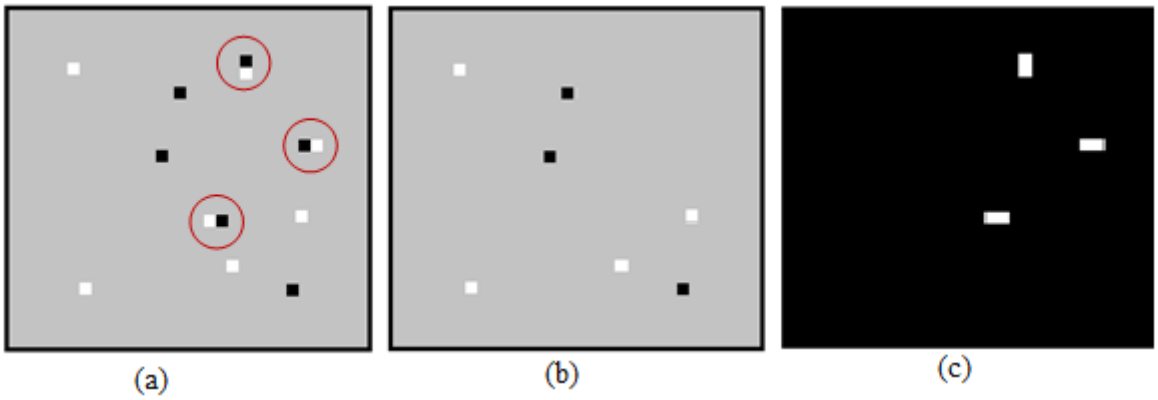


FIGURE 3.3 – Etape 2 du placement des Branch Cuts

Etape 3 : Prendre un résidu P0 (pixel bleu dans la figure 3.4(a) dans la file d'attente Q0 comme point de départ, le marquer comme pixel 'Branch Cut' et le supprimer de Q0. Créer une variable 'Polarité'=1 si P0 est positif ou polarité=-1si P0 est négatif. Ensuite, mettre les valeurs de qualité des 8 pixels voisins de P0 dans une file d'attente vide Q1 et les trier par valeur de qualité. **Exemple :** voir la figure 3.4(f). Le pixel de qualité minimum est marqué comme Branch Cut (le pixel jaune).

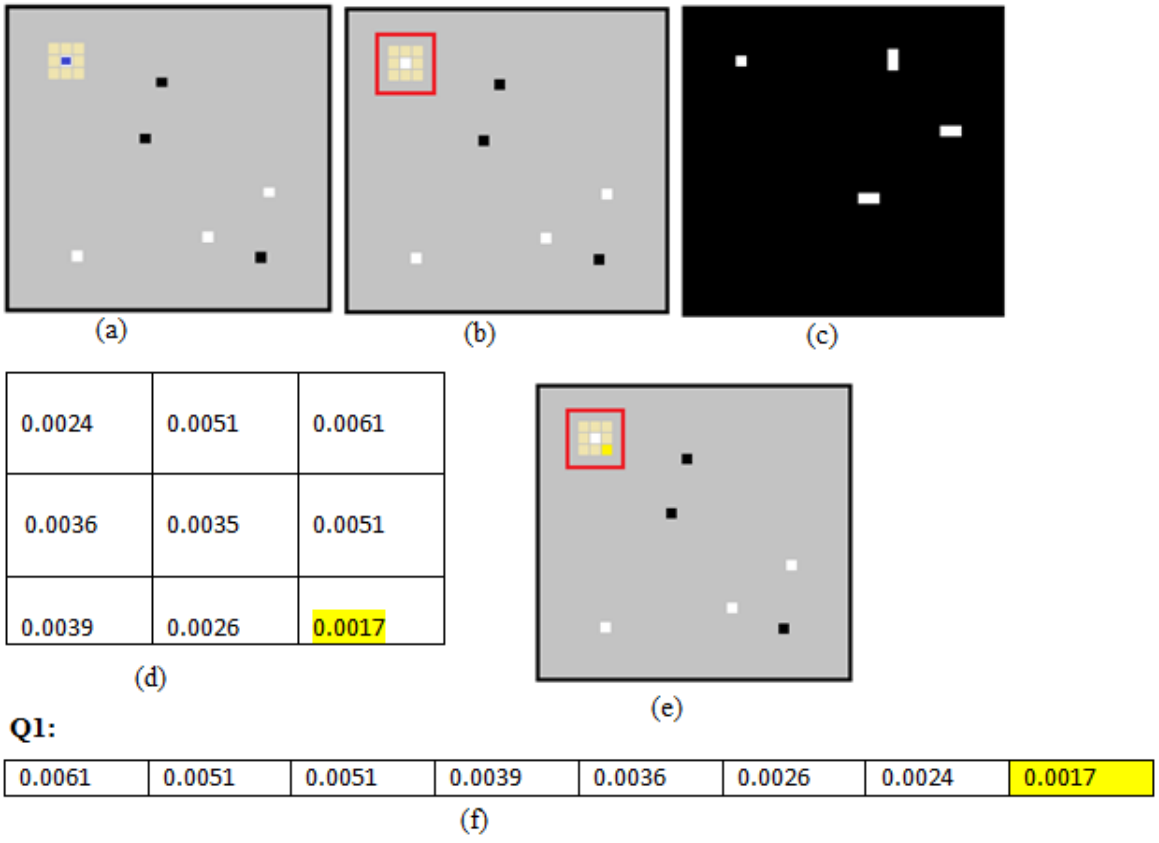


FIGURE 3.4 – Etape 3 du placement des Branch Cuts

Etape 4 : Retirer le pixel de qualité minimum de la file d'attente Q1 et le marquer

comme traité. Il existe trois cas possibles auxquels appartient le pixel :

— Si le pixel est un résidu, on le retire de Q0 et on ajoute sa polarité (1 ou -1) à la 'polarité'.

— Si le pixel est un pixel de bordure, on met 'polarité' = 0.

— Si le pixel n'est ni résidu ni pixel de bordure, la polarité reste inchangée.

Répéter cette étape jusqu'à ce que la polarité=0, c'est-à-dire que les Branch Cuts contiennent un pixel de bordure ou un nombre égal de résidus opposés.

Selon notre exemple : Puisque le pixel n'est pas un résidu, et qu'il n'appartient pas aux bords de l'image, on met la qualité de ses 8 voisins dans Q1 et le pixel de qualité minimum est marqué comme Branch Cut (le pixel vert) dans la figure 3.5(c)

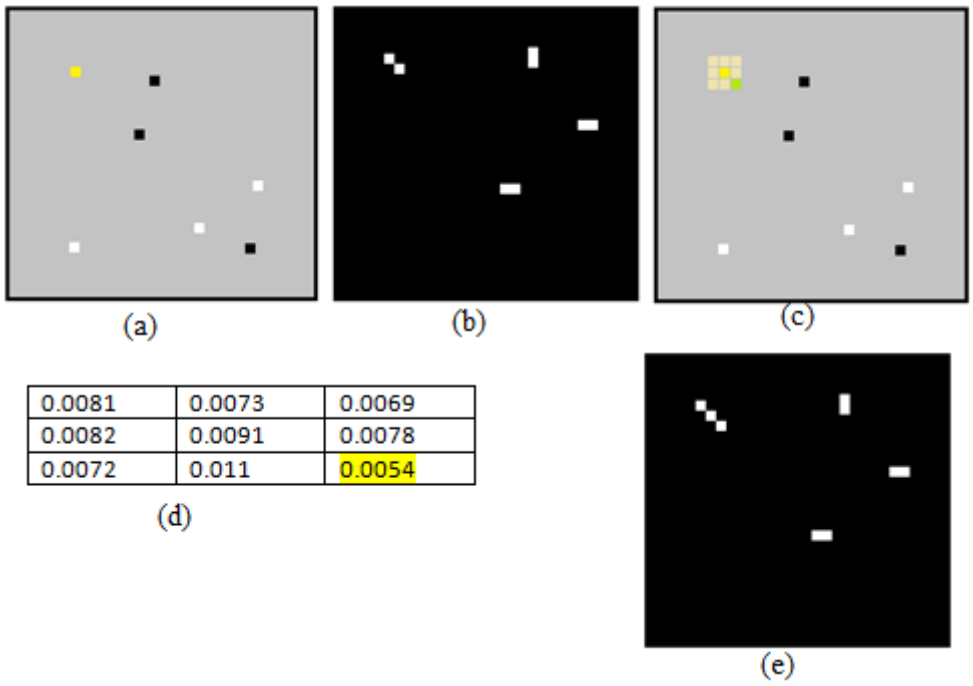


FIGURE 3.5 – Etape 4 du placement des Branch Cuts

Etape 5 : Répéter les étapes 3 et 4 jusqu'à ce que la file d'attente Q0 soit vide. La procédure de mise en place des Branch Cuts est terminée.

FIGURE 3.6 – Branch Cuts

Organigramme de l'image des Branch Cuts :

Étant donné que les pixels Branch Cuts sont déroulés en dernier, ces pixels peuvent être considérés comme les pixels de fiabilité la plus faible. l'idée de l'algorithme est de remplacer la valeur de qualité des pixels Branch Cuts par la valeur minimale de l'image de qualité d'origine pour générer une image de qualité finale, qui est utilisée pour produire un chemin de déroulement de phase optimisé basé sur un ordre de fiabilité.

L'organigramme de l'algorithme est montré à la figure suivante :

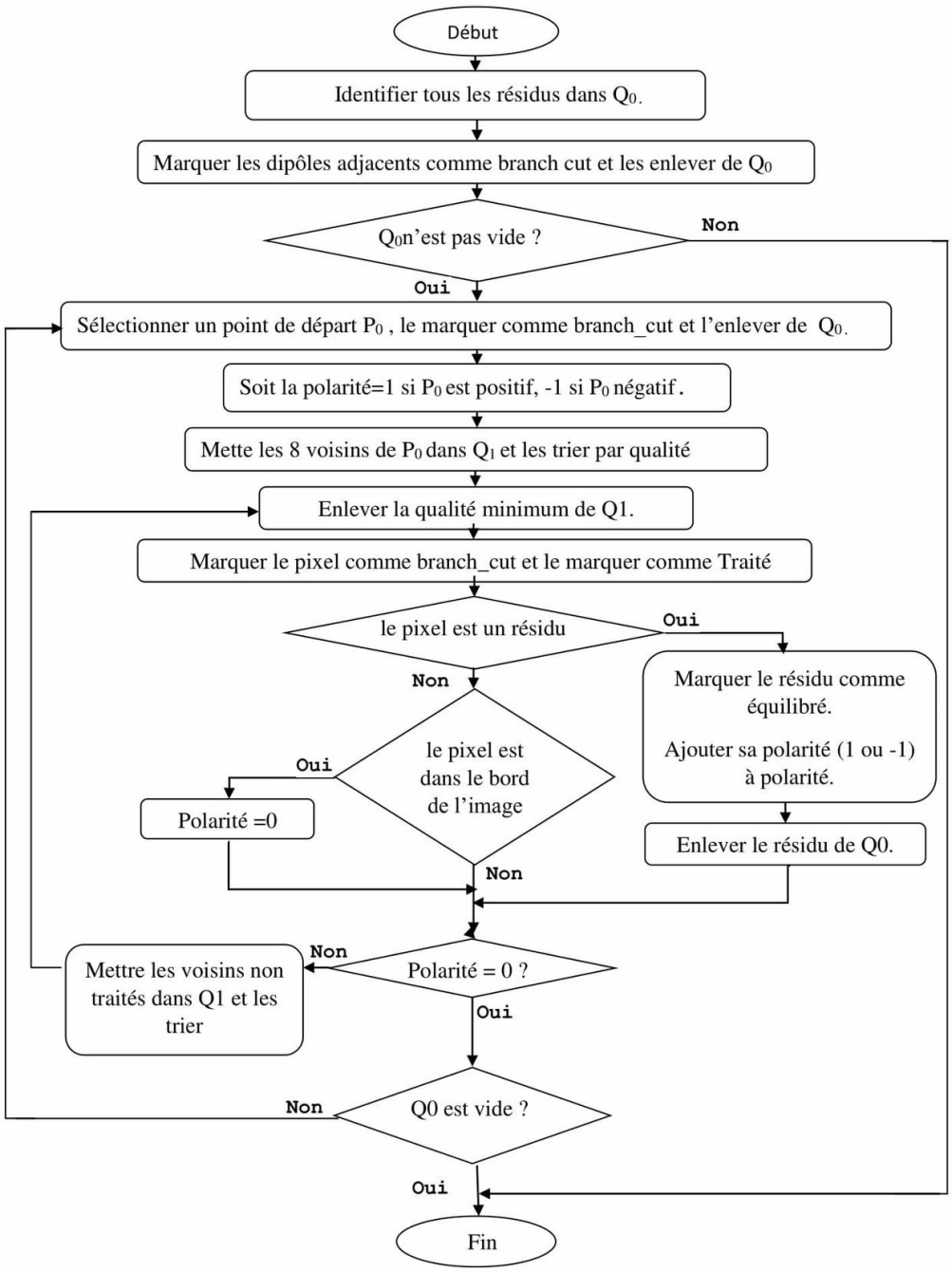


FIGURE 3.7 – Organigramme de placement des Branch Cuts

3.4.2 Déroulement de phase basé sur l'ordre de fiabilité

Au cours de l'étape de déroulement de phase, pour s'assurer que la phase de faible fiabilité n'affecte pas la phase de haute fiabilité, le classement de fiabilité doit être effectué afin que le nouvel algorithme déroule la phase de haute qualité en premier et la phase de faible qualité à un stade ultérieur. Du fait qu'une image de qualité originale fiable est sélectionnée et qu'une opération de placement des Branch Cuts est effectuée, on peut s'attendre à ce que l'image de qualité finale reflète vraiment la fiabilité de l'image de phase enroulée. Le déroulement de phase basé sur l'ordre de fiabilité est le suivant :

Etape 1 : Trier les valeurs de l'image de qualité par ordre décroissent et la mettre dans une file d'attente Q1. Définir le pixel de la plus haute qualité comme pixel a traiter. Mettre ses 8 pixels voisins dans une file d'attente Q2.

Etape 2 : Dérouler les pixels voisins dans Q2 sur la base du pixel central. Néanmoins, nous pouvons avoir quatre situations dans le processus de déroulement de phase :

1. Si tous les pixels de la fenêtre sont non déroulés. les pixels seront déroulés par rapport au pixel central et rassemblés en un nouveau groupe de pixels déroulé. Remarque : le déroulement est réalisé selon l'équation 2.2 du chapitre 2.
2. Si le pixel central est déjà déroulé mais parmi ses pixels voisins il y a ceux qui ne sont pas déroulés (n'appartenant à aucun groupe). Ces derniers seront déroulés par rapport au pixel central et ajoutés à son groupe.
3. Si le pixel central est déjà déroulé, et tous ses voisins sont également déroulés et appartiennent à des groupe différents. Tous les groupes seront déroulés par rapport au pixel central et fusionnés avec son groupe.
4. Si le pixel central n'est pas déroulé (n'appartient à aucun groupe) et parmi ses voisins il y a ceux qui appartiennent à différents groupe et d'autres n'appartiennent à aucun groupe, l'algorithme déroule la phase comme suit :
   — Les pixels voisins qui n'ont pas encore été déroulés seront déroulés par rapport au pixel central et seront regroupés dans un nouveau groupe
   — Le nouveau groupe sera déroulé par rapport au plus grand groupe des groupes voisins.

Etape 3 : Répéter les étapes 1 et 2 jusqu'à ce que la file d'attente Q2 soit vide ou l'ensemble des pixels appartiennent au même groupe.

Organigramme de déroulement de phase : L'organigramme est montré à la figure 3.8

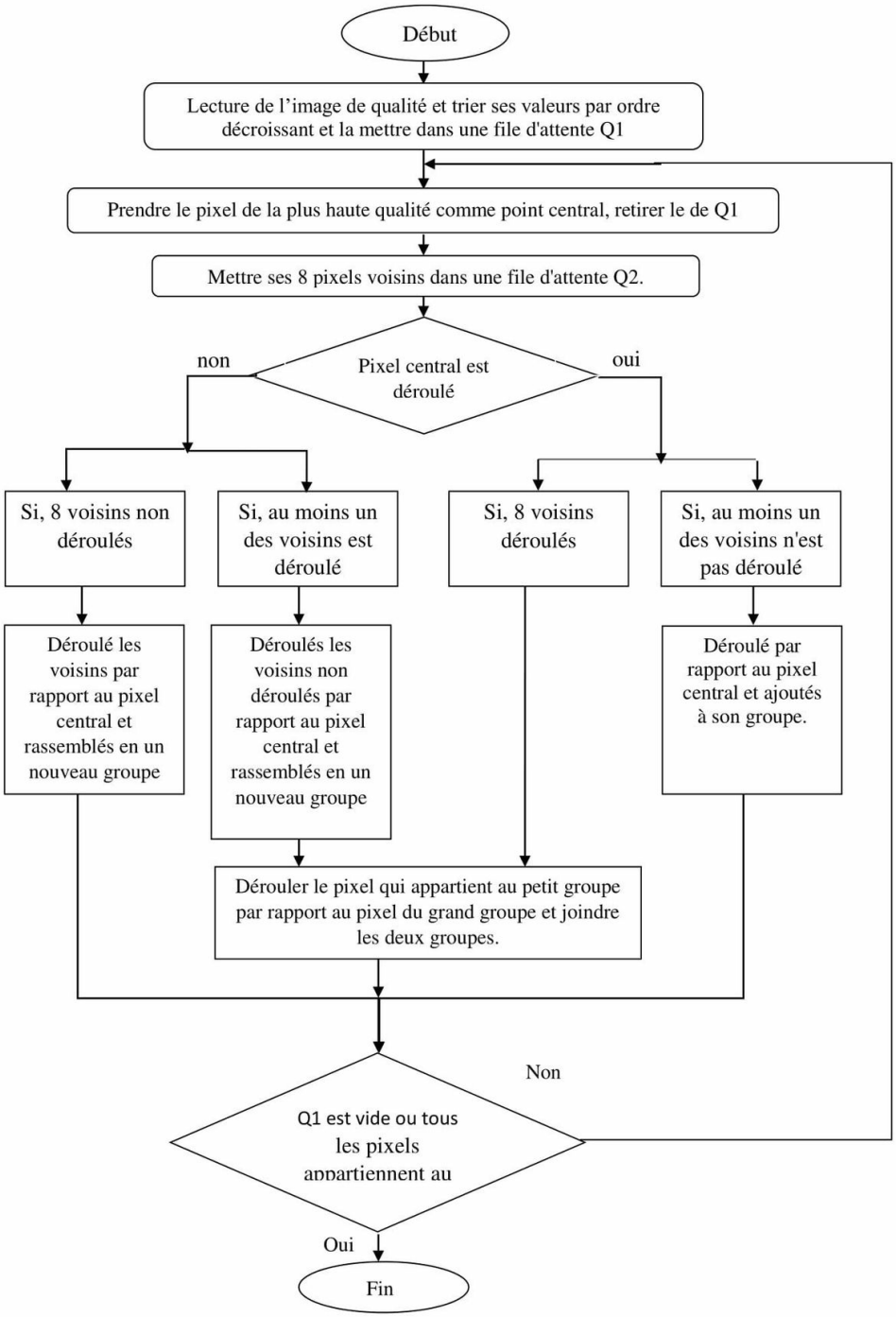


FIGURE 3.8 – Organigramme de déroulement de phase

Exemple de traitement : Un exemple de déroulement par ordre de fiabilité est montré à la figure 3.9

FIGURE 3.9 – Exemple de déroulement de phase par ordre de fiabilité

3.5 Conclusion

Nous avons rappelé dans ce chapitre les méthodes de déroulement par suivi de chemin. Ensuite, nous avons présenté les méthodes que nous avons étudiées et implémentées dans le cadre de notre projet de fin d'études. Le prochain chapitre sera dédié à la présentation des résultats et les tests des algorithmes développés ainsi que l'interface réalisée dans ce travail.

Chapitre 4

Résultats et discussion

4.1 Introduction

Dans les chapitres précédents, nous avons introduit les méthodes de déroulement de phase, nous nous sommes intéressées à la méthode de déroulement par image de qualité, en particulier la nouvelle méthode citée dans le chapitre 3. Dans ce dernier chapitre, nous dévoilerons les résultats obtenus de toutes les étapes de notre travail, ensuite nous les comparons aux résultats des méthodes déjà existantes. Un aperçu de l'interface conçue sera aussi mis en évidence à la fin du présent chapitre.

4.2 Images utilisées pour les tests

Les interférogrammes utilisés dans ce projet pour les tests sont :

— Le premier interférogramme est une image produite par un simulateur [19]. L'image a été simulée à partir de modèles de terrain à haut relief. Elle montre la vue à vol d'oiseau de la région montagneuse autour du sommet 'Isolation Peak' au Colorado, aux Etats Unis. La figure 4.1(a) représente l'interférogramme qui correspond à Long's Peak. Sur l'interférogramme, on observe des zones où les franges se resserrent. Cela est dû aux effets géométriques. Les zones noires indiquent l'absence du signal. La figure 4.1(b) montre l'image des résidus correspondante. L'interférogramme contient 1240 résidus concentrés dans les zones affectées par les effets géométriques. La dernière image est l'image de cohérence (image de qualité) originale créée lors de la simulation.

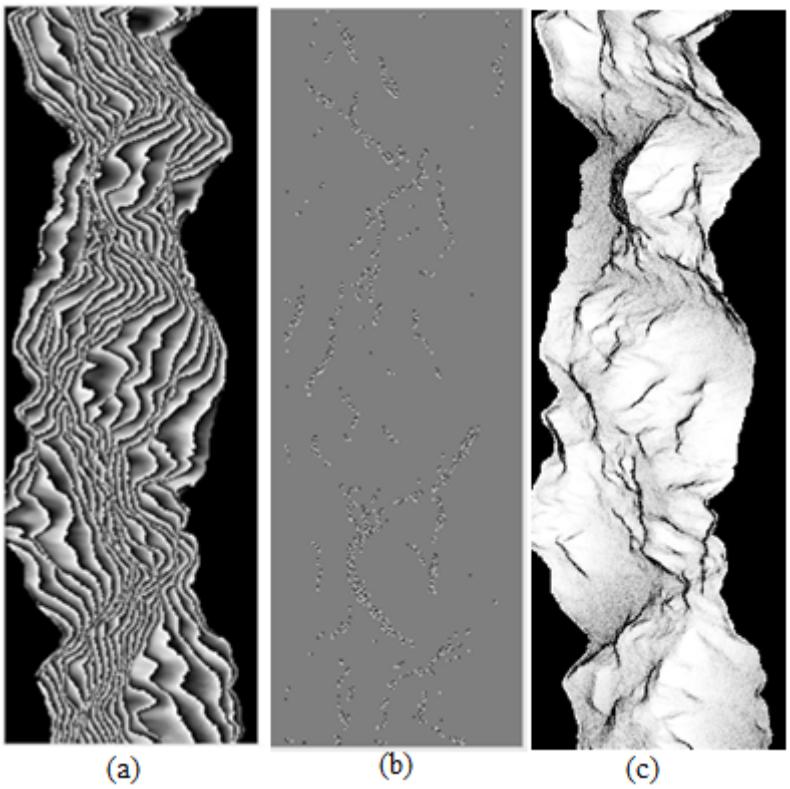


FIGURE 4.1 – a) Interférogramme simulé 'Isola' b) Image des résidus c) Image de cohérence

— Le deuxième interférogramme est un interférogramme réel. Il est généré à partir d'une série d'images radar SAR acquises par les satellites radar européens ERS1 et ERS2 couvrant une région montagneuse de Blida, en Algérie.

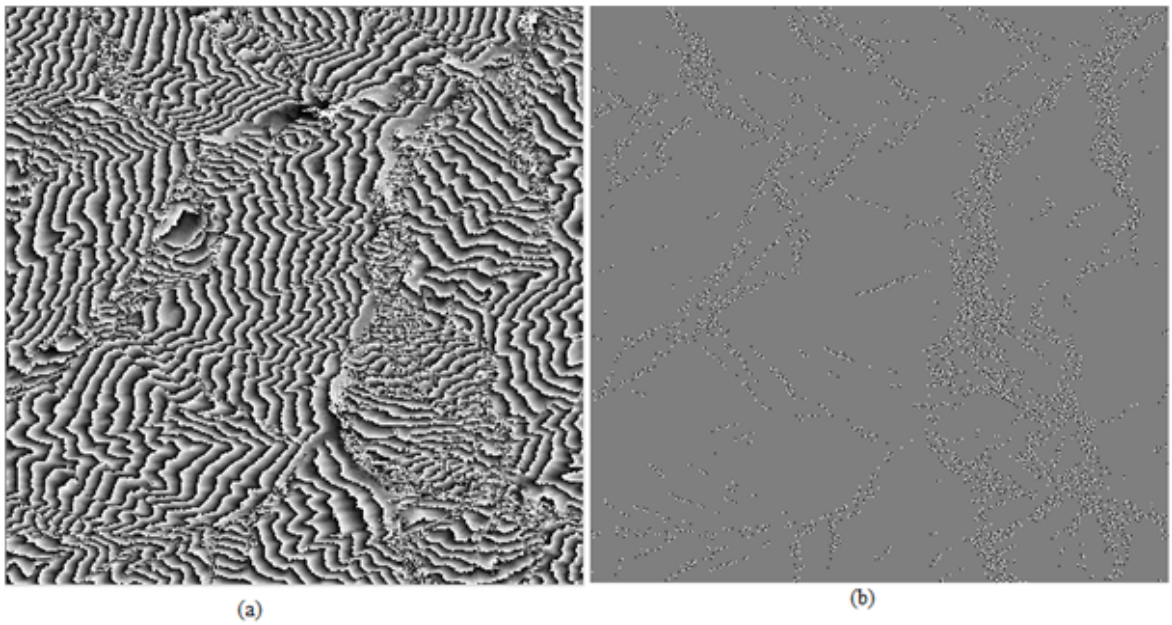


FIGURE 4.2 – a) Interférogramme réel (Région de Blida) b) Image des résidus

4.3 Tests sur données simulées ‘Isolation peak’

4.3.1 Images de qualités

Dans ce travail, nous avons utilisé cinq images de qualités différentes dans le but de comparer les résultats donnés par chacune d’entre elles.

Les zones de couleur foncée indiquent une faible qualité et vice versa. Nous remarquons que la fiabilité des pixels dans les différentes images de qualité est faible dans les zones où les franges se resserrent. Néanmoins, L’efficacité de ces indices de qualité est mise en évidence par la précision des résultats de déroulement de phase.

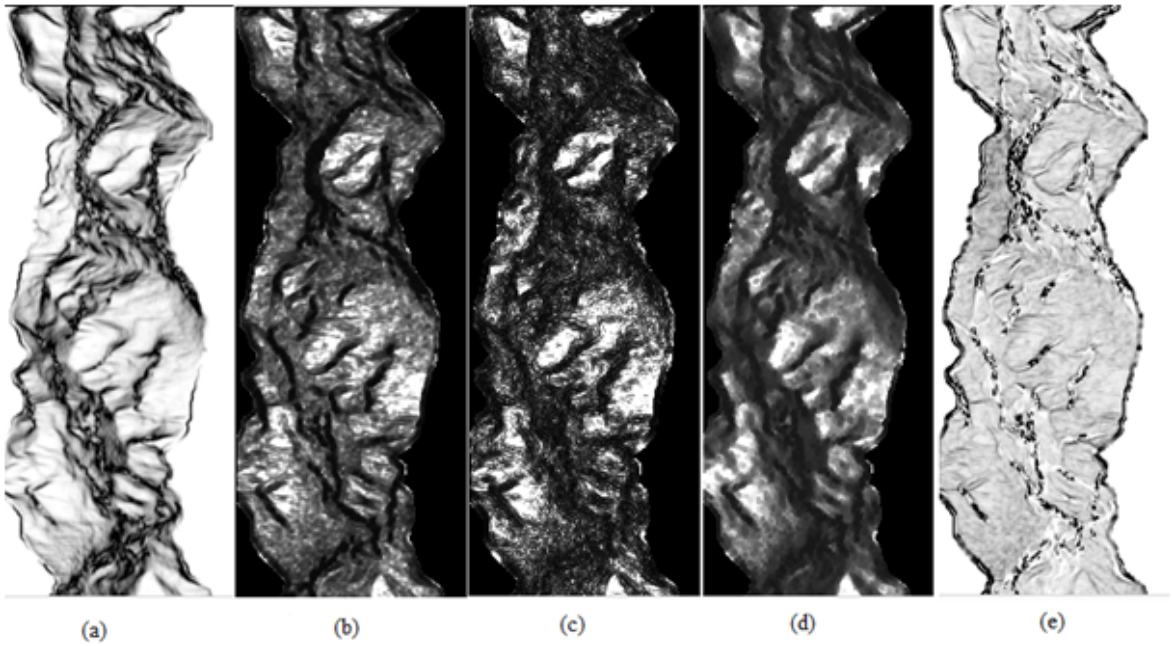


FIGURE 4.3 – Image de qualité par : a) Pseudo-corrélation b) Variance dérivée c) Seconde dérivée d) MMG e) Qualité hybride

4.3.2 Images des Branch Cuts

Nous avons implémenté l’algorithme de placement de Branch Cuts par ordre de fiabilité (Cf. chapitre 3). Les résultats obtenus sont montrés à la figure 4.4.

Nous remarquons que les Branch Cuts sont principalement placés dans les zones à faible fiabilité.

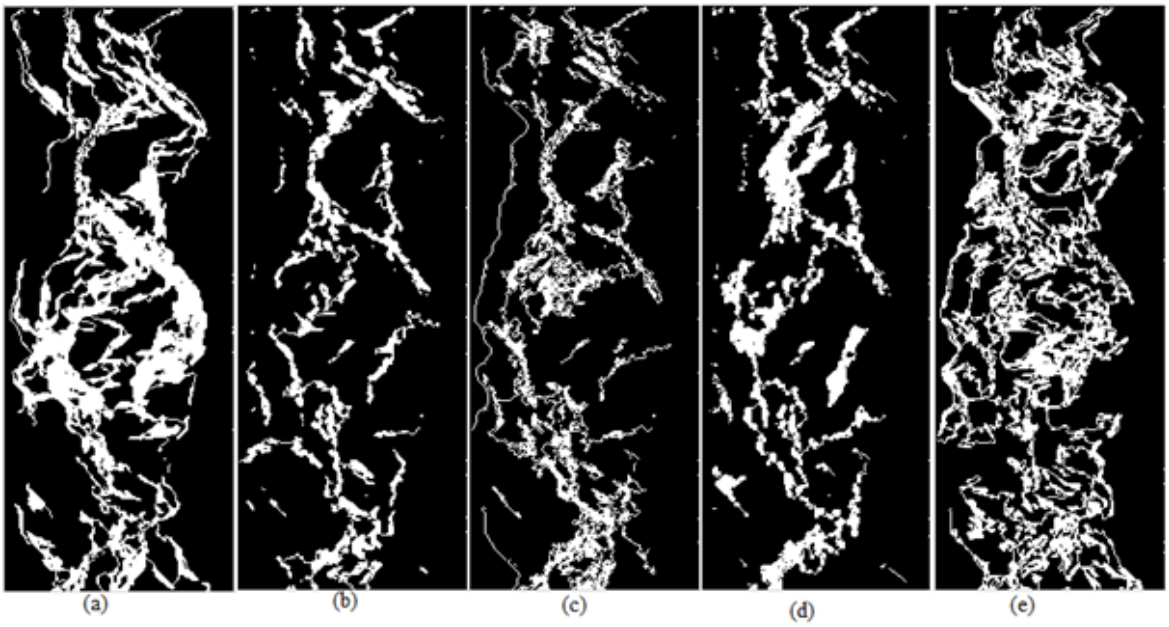


FIGURE 4.4 – Image des Branch Cuts par a) Pseudo-corrélation b) Variance dérivée c) Seconde dérivée la d) MMG e) Qualité hybride

4.3.3 Nouvelles images de Qualité

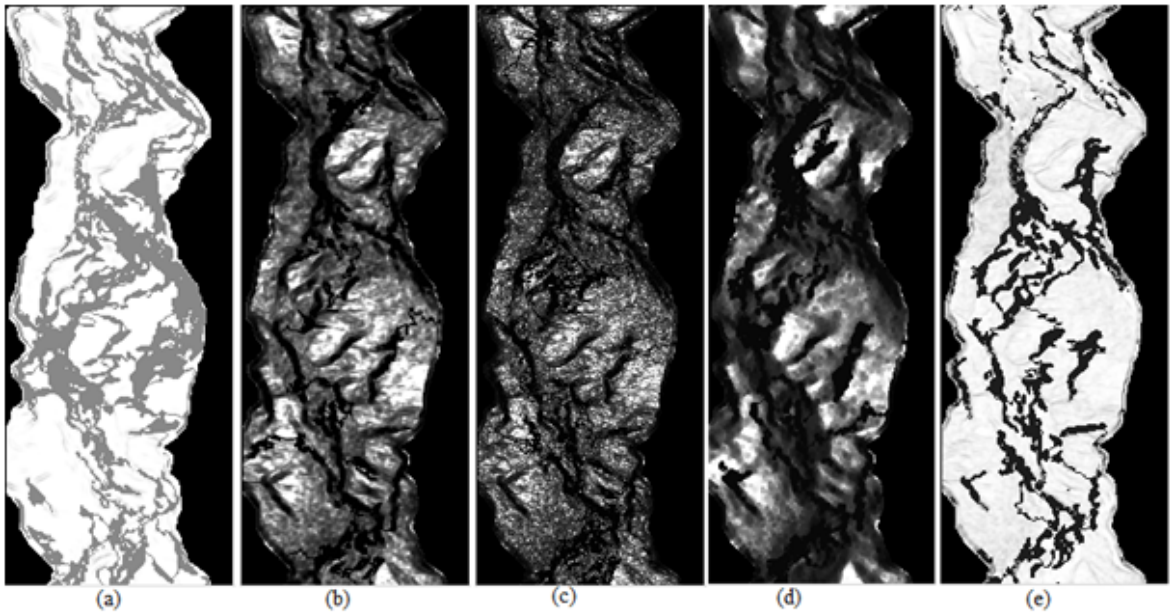


FIGURE 4.5 – Nouvelle image de qualité par a) Pseudo-corrélation b) Variance dérivée c) Seconde dérivée la d) MMG e) Qualité hybride

En suivant l'algorithme créé par Lu et Al.[2], nous avons généré une nouvelle image de qualité où les pixels 'Branch Cuts' se voient attribués la valeur de qualité minimum. Les résultats obtenus sont montrés à la figure 4.5.

4.3.4 Phase déroulée Par l'image de qualité originale

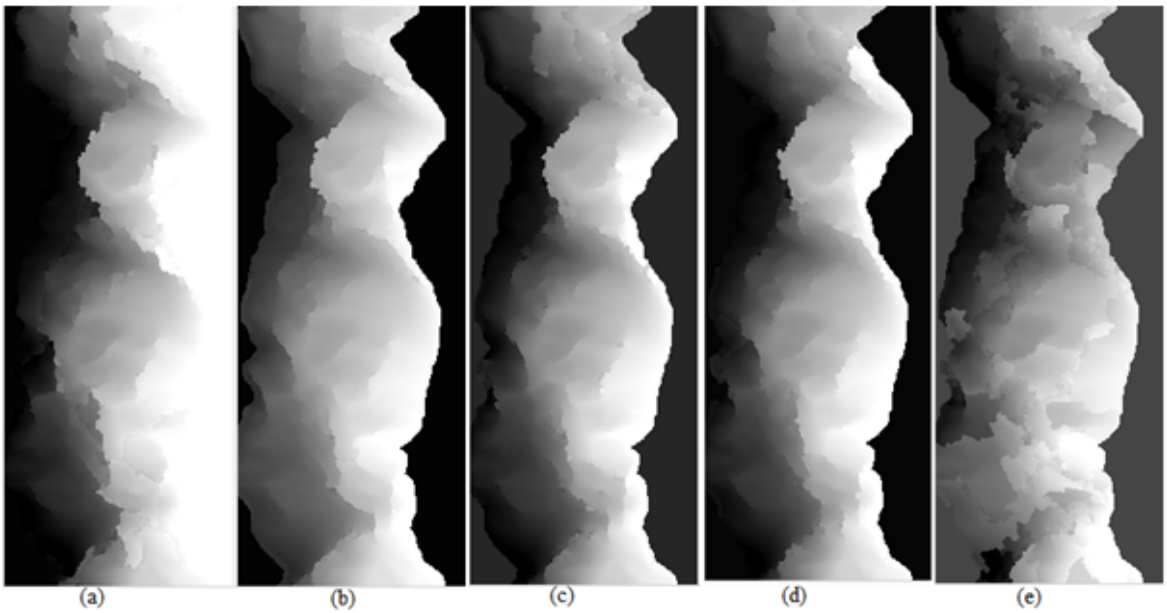


FIGURE 4.6 – : Image de phase déroulée par l'image de qualité originale de : a) Pseudo-corrélation b) Variance dérivée c) Seconde dérivée d) MMG e) Qualité hybride

La figure 4.6 montre le résultat du déroulement de phase par ordre de fiabilité à partir des différentes images de qualité originales.

4.3.5 Phase déroulée Par la nouvelle image de qualité

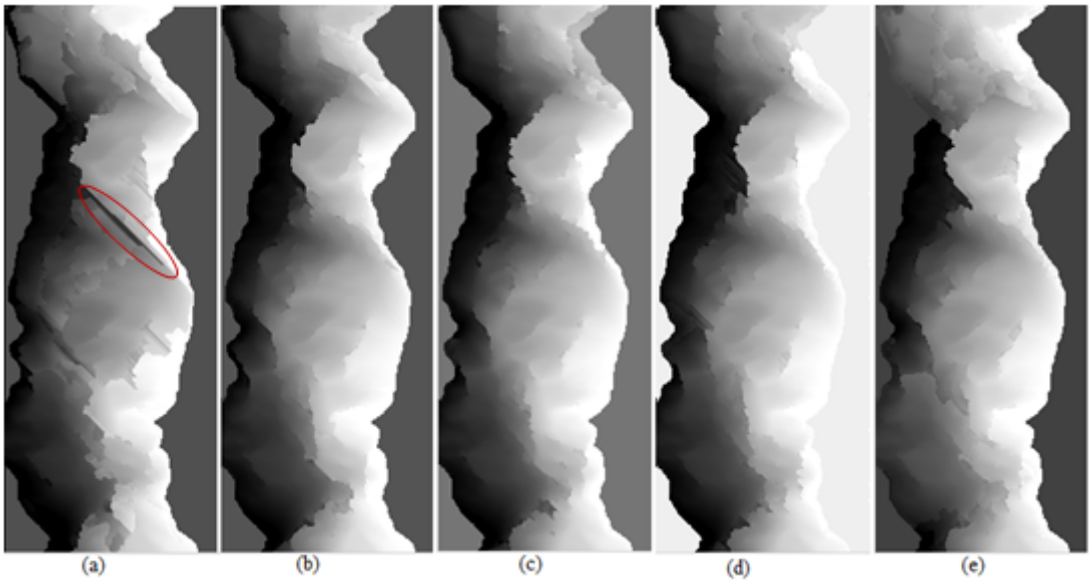


FIGURE 4.7 – Image de phase déroulée par la nouvelle image de qualité par : a) Pseudo-corrélation b) Variance dérivée c) Seconde dérivée d) MMG e) Qualité hybride

La figure 4.7 montre le résultat du déroulement de phase par ordre de fiabilité à partir des nouvelles images de qualité.

Nous remarquons visuellement, que la plupart des résultats sont améliorés, moins d'effet de bloc. Sauf pour l'image pseudo-corrélation où nous remarquons la trainée de déroulement dans l'image (zone entourée de rouge).

4.3.6 Analyse quantitative des résultats

Même si l'œil nu demeure sans doute l'un des meilleurs moyens d'évaluation de la qualité de l'image, néanmoins nous avons quelques critères qui nous permettent d'avoir une bonne appréciation sur sa qualité. Ces critères sont :

— **Valeur de LP norm**

Le lp-norm est un algorithme d'évaluation de qualité de l'image, plus le résultat est minime moins l'image présente de cassures et donc est de meilleure qualité[20]. Le LP norm est calculé comme suit :

$$LP = \sum_{i=0}^{M-2}\sum_{j=0}^{N-1} |\nabla^x \Phi(i,j) - W[\nabla^x \varphi(i,j)]| + \sum_{i=0}^{M-1}\sum_{j=0}^{N-2} |\nabla^y \Phi(i,j) - W[\nabla^y \varphi(i,j)]| \quad (4.1)$$

Où : W est l'opérateur de correction de phase et M et N sont le nombre de lignes et colonnes de l'image.

— **Valeur de l'écart type** L'écart type permet de mesurer le taux de dispersion des pixels. Plus le résultat est minime plus l'image est linéaire.

Les tableaux d'évaluations sont donnés ci-dessous :

Lp_Norm image 'Isola' :

Image de qualité	MMG	PC	Hybride	SD	VD
Originale	1931462.9	2086993.0	1300029.3	1697483.2	2415386.3
Nouvelle	1915202.9	1433785.0	1603447.7	1521250.5	1602553.0

TABLE 4.1 – Valeurs du Lp Norm de l'interférogramme simulé

Ecart type image 'Isola' :

Image de qualité	MMG	PC	Hybride	SD	VD
Originale	41.40	41.00	30.59	36.71	49.98
Nouvelle	37.87	30.91	33.35	31.11	33.57

TABLE 4.2 – Valeurs de l'écart-type de l'interférogramme simulé

Interprétation

Le calcul du Lp-Norm montre que le meilleur résultat est donné par l'image de qualité hybride originale. Cependant, nous remarquons qu'en majeure partie il y a une diminution de celui-ci dans les résultats déroulés à partir des nouvelles images de qualité. Il y a donc une amélioration de la linéarité. Le résultat obtenu est confirmé par le calcul du paramètre de dispersion où nous remarquons que l'écart type a diminué considérablement lorsqu'il est calculé à partir d'images de phases déroulées par la nouvelle image de qualité.

Quantitativement, le meilleur résultat semble être celui donné par l'image de pseudo-corrélation. Cependant, l'analyse qualitative a montré que ce n'est pas le cas (présence de trainée de déroulement). Donc, suivant les paramètres d'évaluation nous avons jugé que le meilleur résultat est obtenu par la nouvelle image de qualité Seconde dérivée.

4.4 Tests sur donnés réelles

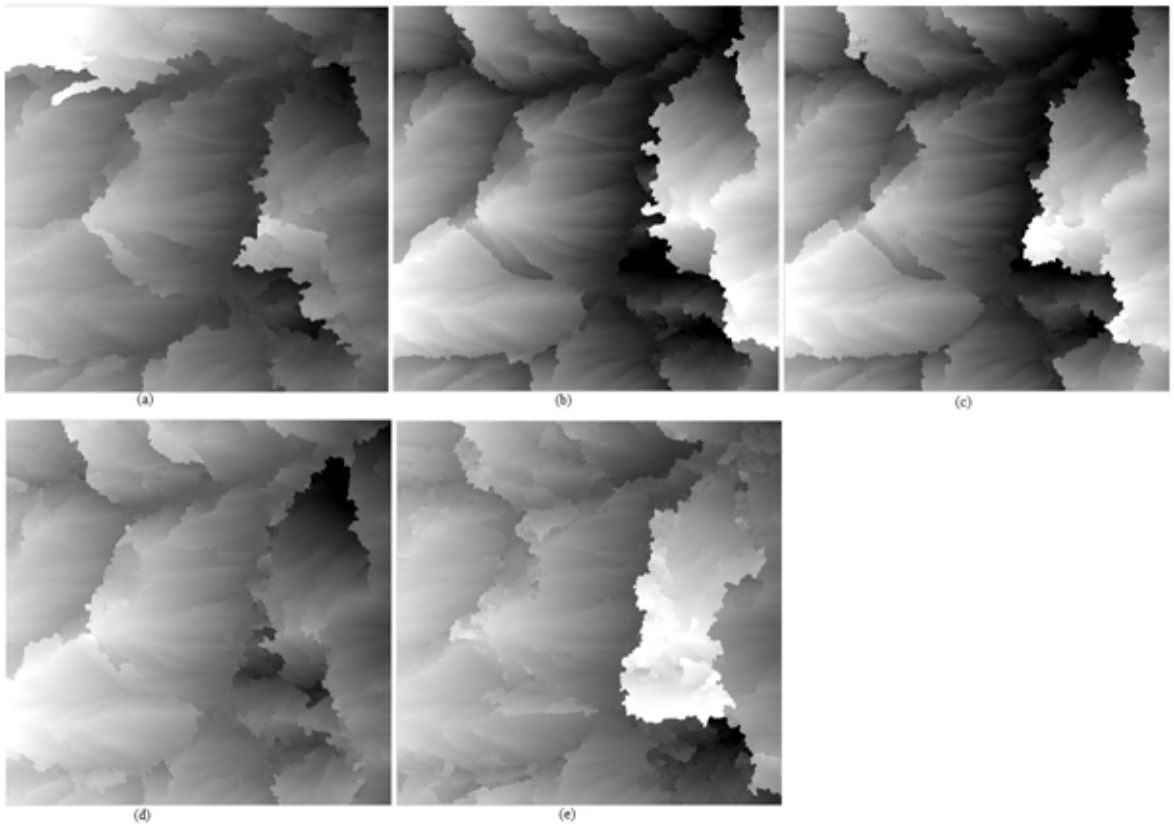


FIGURE 4.8 – Image de phase déroulée par l'image de qualité originale de : a) Pseudo-corrélation b) Variance dérivée c) Seconde dérivée d) MMG e) Qualité hybride

Afin de confirmer nos résultats, nous avons effectué des testes sur un second interférogramme réel de [12] qui couvre aussi une région montagneuse. Le déroulement de l'interférogramme réel présente un défi pour l'algorithme du fait du nombre élevé de résidus

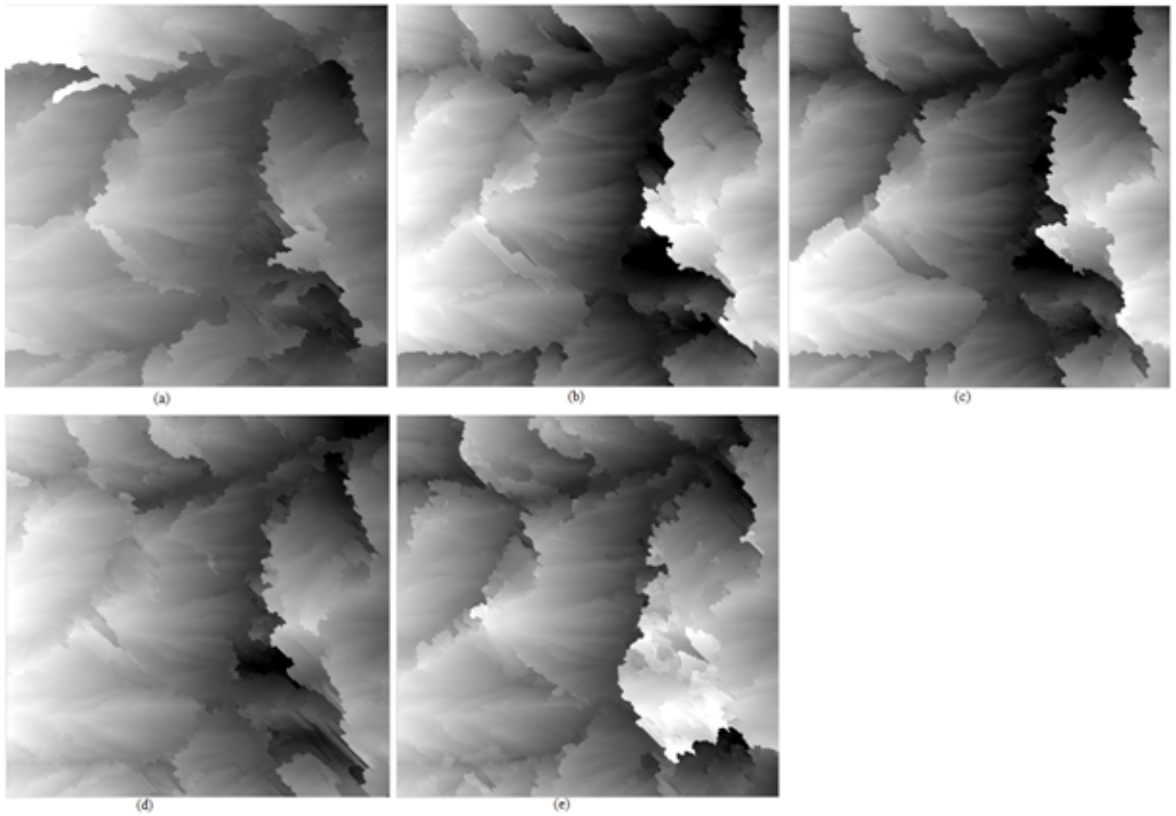


FIGURE 4.9 – Image de phase déroulée par la nouvelle image de qualité de : a) Pseudo-corrélation b) Variance dérivée c) Seconde dérivée d) MMG e) Qualité hybride

qu'il présente d'une part, et d'autre part de la complexité de l'arrangement des résidus. Les résultats obtenus ainsi que les tableaux d'évaluations sont donnés ci-dessous :

Image de qualité	MMG	PC	Hybride	SD	VD
Originale	2520511.1	3498887.3	1787269.1	1338164.1	1096947.3
Nouvelle	2120840.8	3472944.5	1257746.5	1229711.1	1390151.1

TABLE 4.3 – Valeurs du Lp norm de l'interférogramme réel

Image de qualité	MMG	PC	Hybride	SD	VD
Originale	40.91	39.16	42.78	31.10	32.68
Nouvelle	36.38	42.10	33.15	30.97	32.74

TABLE 4.4 – Valeurs de l'écart-type de l'interférogramme réel

Nous remarquons que le meilleur résultat quantitatif est donné par l'image de seconde dérivée. Nous remarquons aussi que les résultats obtenus à partir de l'image réelle confirment nos conclusions.

4.4.1 Evaluation par comparaison

Afin d'évaluer les résultats obtenus, nous procédons à une comparaison de résultat obtenu avec l'algorithme de base de Goldstein [10], nous considérons les deux interférogrammes simulé et réel.

Les résultats de déroulement ainsi que les tableaux d'évaluations sont donnés ci-dessous :

Pour l'image simulée :

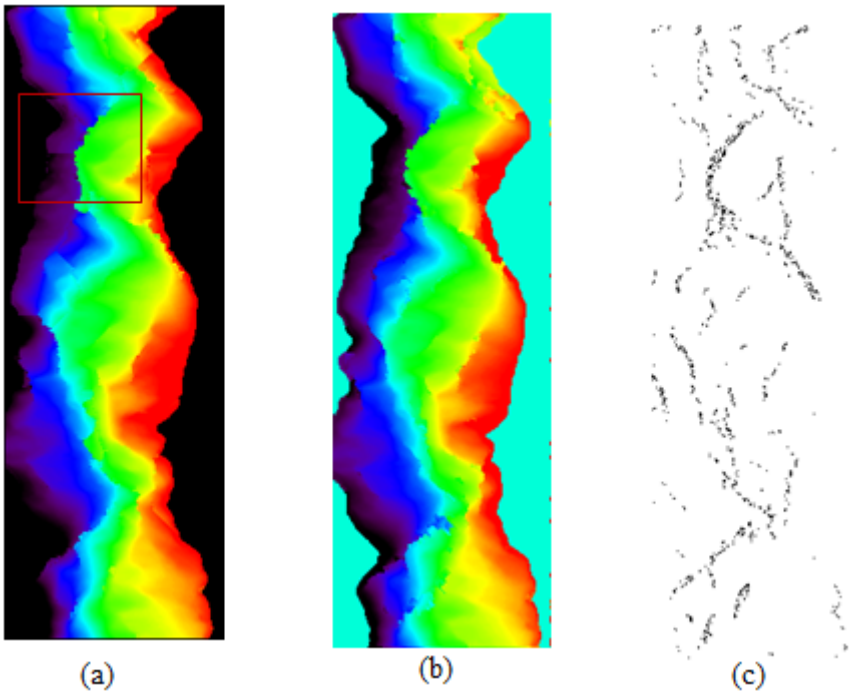


FIGURE 4.10 – Image 'Isola' déroulée en dégradé de couleurs avec a)la méthode de Goldstein b) L'ordre de fiabilité c)Image des résidus (point noirs : résidus positifs et négatifs)

Zoom sur la partie encadrée :

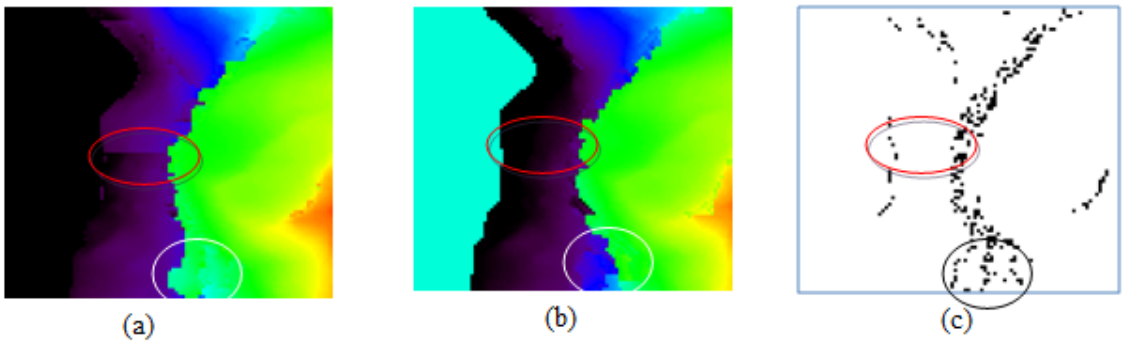


FIGURE 4.11 – Zoom sur l'image déroulée avec a)la méthode de Goldstein b) L'ordre de fiabilité c)Image des résidus (point noirs : résidus positifs et négatifs)

	LP-norm		Ecart-type	
	Implémenté	Goldstein	Implémenté	Goldstein
Image simulée	1521250.5	4121625.3	31.11	85.56
Image réelle	1229711.1	3647261.1	30.97	44.49

TABLE 4.5 – Valeurs de l'écart-type et du Lp norm des deux méthodes

Remarques :

Nous remarquons un trait (encerclé en rouge) dans le déroulement par Goldstein qui est absent dans le déroulement par ordre de fiabilité. Une raison probable de sa présence est qu'il y a 2 résidus de polarités opposées qui ont formé un Branch Cut, et c'est ce dernier qui a engendré une erreur de déroulement. La deuxième zone entourée en blanc montre que le déroulement par ordre de fiabilité a mieux exploité les données, puisqu'il a pu diviser les zones et retrouver l'information tandis que l'algorithme de Goldstein a fusionné toutes les zones. Le déroulement par ordre de fiabilité a donc mieux exposé les sauts de phase (cassures).

Pour l'image réelle :

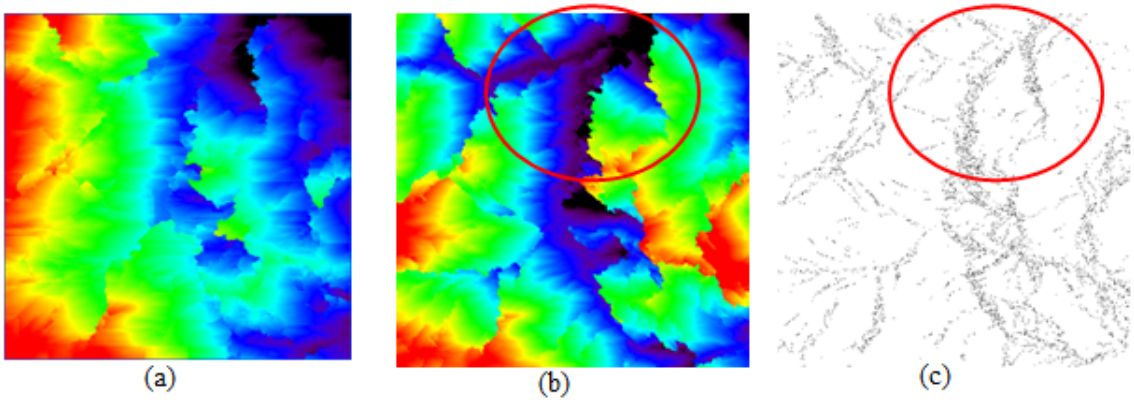


FIGURE 4.12 – Image réelle déroulée en dégradé de couleurs avec a)la méthode de Goldstein b) L'ordre de fiabilité c)Image des résidus (point noirs : résidus positifs et négatifs)

Remarques :

Nous remarquons que dans le déroulement par ordre de fiabilité les zones entourées en rouge sont celles dont la qualité est inférieure, son emplacement est correct quand on le compare à l'image des résidus. Le déroulement par méthode de Goldstein quant à lui change la morphologie de l'image, cela est plus visible dans la représentation 3D de l'image dans la figure 4.13. Le déroulement par ordre de fiabilité représente mieux le terrain montagneux.

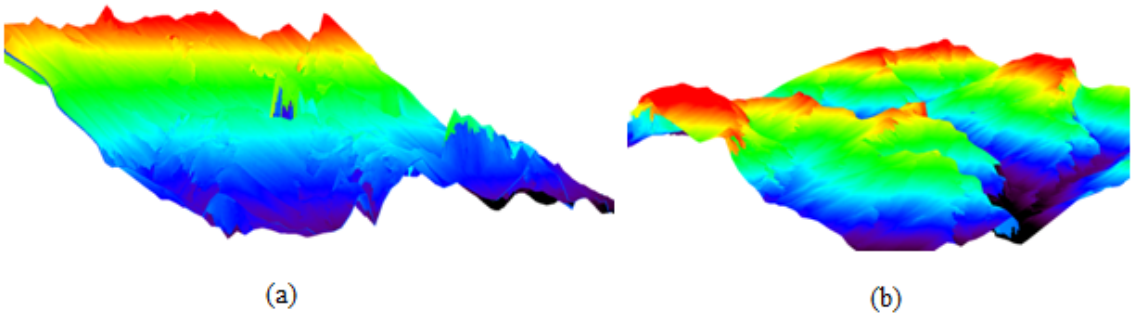


FIGURE 4.13 – Représentation 3D de l'image de phase déroulée par a) Méthode de Goldstein b) Ordre de fiabilité

4.5 Interface

Nous avons réalisé une interface graphique avec le langage de programmation IDL (Interactive Data Language), cette interface regroupe les procédures développées et nécessaires au déroulement de phase.

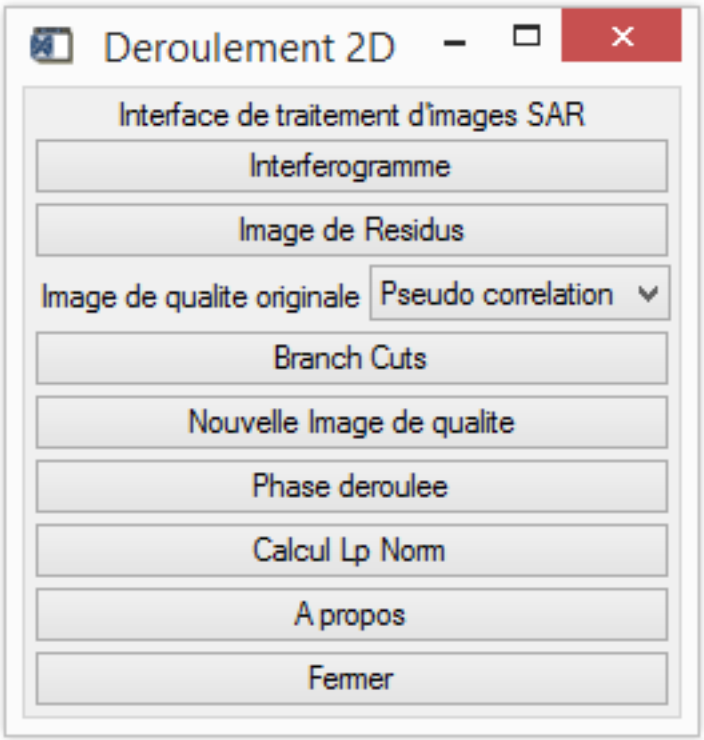


FIGURE 4.14 – Interface de déroulement 2D

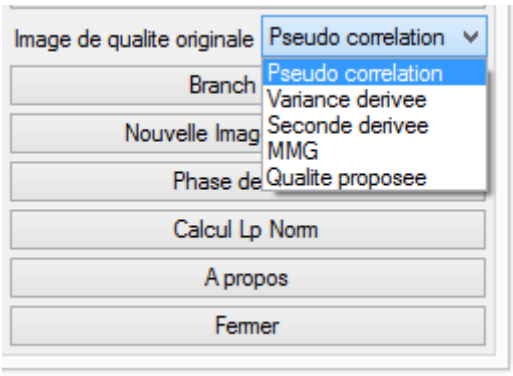


FIGURE 4.15 – Options de la liste déroulante

4.6 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 2D en utilisant un nouvel algorithme de déroulement par ordre de fiabilité, nous avons pu constater que cette méthode offre de meilleurs résultats en comparaison aux méthodes classiques.

Conclusion générale

Dans ce travail, nous nous sommes intéressées à la télédétection et la technologie RADAR. Nous nous sommes surtout penchées sur les Radar SAR (Radar à Synthèse d'Ouverture). Nous nous sommes aussi initiées au traitement d'images SAR. Dans ce cadre, nous avons d'abord présenté le Radar SAR, ses types de plateformes, modes d'acquisitions et son modèle géométrique. Cependant, les interférogrammes obtenus sont inexploitable tel quels, en effet, ce sont des images sous forme de franges où chaque frange correspond à un tour de phase de 2π. La recherche des multiples de ces franges pour reconstruire la phase absolue nous a ensuite mené à l'étude du déroulement de phases. Cette phase interférométrique est exploitée dans diverses applications, telles que la génération des MNTs, des Modèles Numériques d'Elévation (MNE) ainsi que la détection et le suivi des déformations des surfaces terrestres.

Nous avons choisi la méthode de déroulement par ordre de fiabilité. Pour cela, nous avons utilisé 5 images de qualités, dont une nouvelle image hybride introduite par Lu et Al.[2], l'algorithme utilisé utilise une 'image de qualité originale' pour guider la placement des Branch Cuts. Cette image des Branch Cuts est alors utilisée pour créer une 'nouvelle image de qualité' où les pixels Branch Cuts se voient attribués la valeur de qualité minimum.

Nous avons réalisé des expérimentations dans le but d'évaluer l'algorithme implémenté, ce dernier a été testé sur deux types d'échantillons d'images simulée et réelle. Nous avons comparé les résultats donnés par les 5 images de qualité. A partir des résultats obtenus des tests effectués sur les échantillons, nous avons constaté que la meilleure image de qualité est l'image de seconde dérivée. Nous avons également démontré que la 'nouvelle image de qualité' améliore le rendu du déroulement par ordre de fiabilité. Elle diminue également l'effet de 'blocs' dans l'image déroulée.

Nous avons également comparé les résultats de cette méthode avec celle de Goldstein, nous nous sommes aperçues qu'elle offre de meilleurs résultats que cette dernière. En effet, la méthode de déroulement par ordre de fiabilité déroule les zones à faible qualité en dernier et évite donc les erreurs qu'elles engendrent tandis que la méthode de Goldstein rencontre des difficultés en présence de résidus en grand nombre.

Nous avons regroupé tous les algorithmes nécessaires au déroulement sous une interface simple d'utilisation réalisée avec le langage IDL (Interactive Data Language).

Bibliographie

[1] M. Esmaeilzade, J. Amini, and S.Zakeri. Georeferencing on synthetic aperture radar imagery. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-1-W5 :179–184, 12 2015.

[2] Y. Lu, X. Wang, and G. He. Phase unwrapping based on branch cut placing and reliability ordering. *Optical Engineering - OPT ENG*, 44, 05 2005.

[3] M. A. Richards, editor. *Principles of Modern Radar : Basic principles*. Radar, Sonar amp ; Navigation. Institution of Engineering and Technology, 2010.

[4] R. N. McDonough J. C. Curlander. *Synthetic aperture radar : Systems and Signal Processing*. A WILEY-INTERSCIENCE PUBLICATION, 1991.

[5] R. Bamler. Principles of synthetic aperture radar. *Surveys in Geophysics*, 21, 01 2000.

[6] Ressources naturelles Canada. Distorsion des images radar. `http://www.rncan.gc.ca`, 2017.

[7] H. A. Zebker and R. M. Goldstein. Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar observations. *Journal of Geophysical Research : Solid Earth*, 91(B5) :4993–4999, 1986.

[8] D.C. Ghiglia and M.D. Pritt. *Two-Dimensional Phase Unwrapping : Theory, Algorithms, and Software*. Living Away from Home : Studies. Wiley, 1998.

[9] E. Hack P. Rastogi. *Phase Estimation in Optical Interferometry*. Institution of Engineering and Technology, 2014.

[10] R. M. Goldstein, H. A.Zebker, and C. L. Werner. Satellite radar interferometry : Two-dimensional phase unwrapping. *Radio Science*, 23(4) :713–720, 1988.

[11] C. Prati, M. Giani, and N. Leuratti. Sar interferometry : A 2-d phase unwrapping technique based on phase and absolute values informations. In *10th Annual International Symposium on Geoscience and Remote Sensing*, pages 2043–2046, 1990.

[12] F. Hocine. *Interférométrie et interférométrie différentielle d'images SAR appliquées à la région d'Alger*. PhD thesis, Université des sciences et de la Technologie Houari Boumediene, 2015.

[13] J. M. Huntley. Noise-immune phase unwrapping algorithm. *Appl. Opt.*, 28(16) :3268–3270, Aug 1989.

[14] D. J. Bone. Fourier fringe analysis : the two-dimensional phase unwrapping problem. *Appl. Opt.*, 30(25) :3627–3632, Sep 1991.

[15] Q. Lin, J. F. Vesecky, and H. A. Zebker. New approaches in interferometric sar data processing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(3) :560–567, 1992.

[16] D. C. Ghiglia and L. A. Romero. Robust two-dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods. *J. Opt. Soc. Am. A*, 11(1) :107–117, Jan 1994.

[17] M. A. Herráez, D. R. Burton, M. J. Lalor, and M. A. Gdeisat. Fast two-dimensional phase-unwrapping algorithm based on sorting by reliability following a noncontinuous path. *Appl. Opt.*, 41(35) :7437–7444, Dec 2002.

[18] T. J. Flynn. Consistent 2-d phase unwrapping guided by a quality map. In *IGARSS '96. 1996 International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, volume 4, pages 2057–2059 vol.4, 1996.

[19] M.W. Roth. Phase Unwrapping for Interferometric SAR by the Least-Error Path. *Johns Hopkins University Applied Physics Lab Technical Report, Laurel, Md*, 30, 1995.

[20] D.C. Ghiglia and L.A. Romero. Minimum lp-norm two-dimensional phase unwrapping. *J. Opt. Soc. Am. A*, 13(10) :1999–2013, Oct 1996.