



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET  
POPULAIRE MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE LARBI TEBESSI - TEBESSA  
FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES  
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

## MEMOIRE

DE FIN D'ETUDES POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER EN

Réseaux et Télécommunication

## THEME

Déroulement de phase hybride entre les branches coupées et la qualité guidée basé sur la mappe des branches

Présenté par le binôme :

- SELATNIA Zahoua
- BENKHEDIME Chaima

Devant le jury :

- |                  |           |
|------------------|-----------|
| - MAYACHE Hichem | Président |
| - BENTAHAR Tarek | Encadreur |
| -SAIDI Riad      | Examineur |

Année Universitaire 2019 / 2020

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

A decorative floral element consisting of a central flower with several petals and leaves, positioned at the beginning of the calligraphic text.

## Remerciements

Je remercie Dieu Tout Puissant

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui on voudrait témoigner toute ma gratitude

Nous voudrions tout d'abord adresser toute nos reconnaissances à notre encadreur, Monsieur **BENTAHAR Tarek**, pour la patience, la

disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui

ont contribué à alimenter notre réflexion.

Nous désirons aussi remercions l'ensemble des membres du jury, qui nous ont fait l'honneur de bien vouloir étudier avec

attention notre travail.

## Dédicace

Au symbole le plus précieux de la persévérance, mon modèle de vie, mon mentor, et la raison de mon succès, mon cher père, que Dieu le protège et le préserve

À ceux qui m'ont donné la force et la détermination de continuer le chemin et m'ont soutenu poursuivre mes études, à ceux qui m'ont appris la patience et l'assiduité, à ma mère

Je remercie mes sœurs Ibtessem, Chahinez et Zahra, et mon frères Yazid, Yaakoub, koussai et Zaid pour leurs encouragements.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mon directeur de mémoire, Monsieur

BENTAHAR Tarek. Je le remercie de m'avoir encadré, orienté,

aidé et conseillé

Enfin, je remercie mes amis Mentionnez particulièrement Manel, Rania et Saoussen qui ont toujours été là pour moi. Leur soutien inconditionnel et leurs encouragements

ont été d'une grande aide.

*zahoua*

## Dédicace

Que ce travail témoigne de mes respects A mes parents, grâce à leurs tendres encouragements et leurs grands sacrifices, ils ont pu créer le climat affectueux et propice à la poursuite de mes études.

Aucune dédicace ne pourrait exprimer mon respect, ma considération et mes profonds sentiments envers eux.

Je prie le bon Dieu de les bénir, de veiller sur eux, en espérant qu'ils seront toujours fiers de moi. A mes frères. A tout la famille.

Ils vont trouver ici l'expression de mes sentiments de respect et de reconnaissance pour le soutien qu'ils n'ont cessé de me porter.

A tous mes enseignants :

Leur générosité et leur soutien m'oblige de leurs témoigner mon profond respect et ma loyale considération.

A tous mes amis et mes collègues : Ils vont trouver ici le témoignage d'une fidélité et d'une amitié infinie.

Tous personnes, qui nous encouragé et aidé pour réaliser ce travail.

# Table des matières

**Table des figures**

**Liste des tableaux**

**Introduction générale.....1**

## **Chapitre 1 : Généralités sur le système d'imagerie inSAR et SAR**

1 Les bases du radar à synthèse d'ouverture.....3

1.1 Introduction .....3

1.2 Images SAR de la surface de la Terre.....4

1.2.1 Qu'est-ce qu'un système d'imagerie SAR à bande magnétique?.....4

1.2.2 Qu'est-ce qu'une image SAR complexe ?.....5

1.2.2.1 L'image SAR détectée.....5

1.2.2.2 L'image SAR de phase .....6

1.2.2.3 Speckle .....7

1.2.3 Projection des cellules de résolution SAR au sol.....7

2. SAR interférométrie: applications and limités.....8

2.1 Mesure de l'altitude du terrain à travers la phase interférométrique.....9

2.2.1 Aplatissement de l'interférogramme.....10

2.2.1 Déroulement de phase et génération de DEM.....	11
2.3 Mesure du mouvement du terrain: interférométrie différentielle.....	12
2.4 Autres sources de bruit de phase.....	13
3. Sélection d'images ERS pour le traitement InSAR.....	13
3.1 Sélection d'images pour la génération de DEM InSAR.....	14
3.2 Sélection d'images pour les applications InSAR différentielles.....	15
4. Reconstruction du DEM InSAR.....	16
4.1 Techniques de déroulement de phase pour la reconstruction de DEM InSAR .....	16
4.1.2 Que recherchons-nous? .....	17
4.2 Sources d'erreurs, stratégies multi-références et fusion de données.....	20
5. Statistiques des images SAR et InSAR.....	20
5.1 Images interférométriques: cohérence .....	20
6. Progrès dans le déroulement de la phase.....	22
6.1 Résidus et charges.....	23
7 Conclusion.....	24

## **Chapitre 2: aperçue sur le déroulement de phase**

1	Introduction.....	25
2	Aperçu de l'interférométrie radar d'aperture synthétique.....	25
3	Les méthodes du suivi de cheminement.....	31
3.1	Les méthodes basées sur la théorie des résidus.....	31
3.2	Méthodes guidées par la qualité.....	31
3.3	Les méthodes basées sur l'optimisation.....	32
3.3.1	Méthodes basés sur des statistiques.....	33
4	Examen du déroulement de phase multi Baseline.....	34
5	Examen du dérapage de phase à grande échelle.....	41
1.	Les avantages et les limites .....	45
2.	Conception d'algorithme sur le déroulement de phase à grande échelle.....	45
6	Conclusion.....	46

## **Chapitre 3 déroulement hybride**

1	Introduction .....	47
2	methode de coupe de branche.....	48
2.1	Identification des points résiduels.....	49
2.2	Connexion de branche.....	49
2.3	Opération Path-Integral.....	49
3	Méthode de déballage de phase guidée par une carte de qualité .....	50
3.1	Sélection de la carte de qualité.....	50
3.2	Estimation du gradient de phase.....	51
3.3	Intégration Guidée par carte de qualité.....	51

4 Stratégie de déroulement de phase basée sur une table adjacente dynamique.....52

    4.1 Stratégie de correction des trous de déballage de phase.....52

    4.2 Planification efficace des trajectoires d'intégration basée sur une table adjacente  
dynamique.....54

5 Expériences InSAR aéroportées et traitement réel des données .....57

6 Conclusion .....58

**Conclusion générale.....59**

**Références Bibliographique**

# Tables des figures

<b>Figure 1.1</b> Un système SAR depuis un satellite.....	4
<b>Figure 1.2</b> image ERS SAR détectée de Milan (Italie). La taille de l'image est d'environ 25 km en portée au sol (verticale) et 25 km en azimut (horizontal).....	6
<b>Figure 1.3</b> Une fonction sinusoïdale $\sin \varphi$ est périodique avec une période de $2 \pi$ radian.....	6
<b>Figure 1.4</b> Effet du terrain sur l'image SAR.....	8
<b>Figure 1.5</b> Géométrie d'un système SAR interférométrique par satellite.....	9
<b>Figure 1.6</b> Paramètres géométriques d'un système SAR interférométrique par satellite.....	10
<b>Figure 1.7</b> Gauche: interférogramme d'une partie des Alpes italiennes et du Pianura Padana obtenu à partir des données ERS. À droite: interférogramme aplati. Ici, les discontinuités de phase ressemblent aux courbes de niveau.....	11
<b>Figure 1.8</b> Gauche: Phase interférométrique SAR générée au moyen de deux images ERS. Les discontinuités de la phase $2 \pi$ sont clairement visibles sous forme de transitions noir / blanc.....	12
<b>Figure 1.9</b> Données tandem ERS acquises sur le volcan Etna (Sicile) du 1er au 2 août 1995 (la ligne de base normale était d'environ 60 m). Gauche: interférogramme aplati. À droite: carte de cohérence. Les données ont été filtrées et sous-échantillonnées.....	17
<b>Figure 1.10</b> Un exemple visuel qui montre le principal problème lié aux incohérences de phase: l'intégration des valeurs de phase donne des résultats différents selon le chemin suivi.....	18
<b>Figure 1.11</b> Carte des résidus de phase .....	19
<b>Figure 1.12</b> Cohérence en tandem de l'Etna à différentes saisons.....	22
<b>Figure 2.1</b> Le principe de fonctionnement d' InSAR.....	25
<b>Figure 2.2</b> Statistiques des publications SB PU de 1995 à 2017.....	26

**Figure 2.3.** (a) Un interférogramme réaliste, (b) la cohérence de (a), (c) la variance de la dérivée de phase de (a), et (d) la distribution des résidus de (a).....28

**Figure 2.4** Un exemple auxiliaire de différentes voies d'intégration.....30

**Figure 2.5** Le débit charts de traitement des méthodes SB PU.....30

**Figure 2.6.** (a) Résultat PU de la méthode de la coupe en branche. (b) Le résultat PU de la méthode guidée par la qualité en utilisant la carte de qualité présentée à la figure 2.2 (b). (c) Le résultat PU de la méthode guidée par la qualité en utilisant la carte de qualité présentée à la figure 2.2 (c).....32.

**Figure 2.7.** (a) Résultat PU de la méthode de la coupe en branche. (b) Le résultat PU de la méthode guidée par la qualité en utilisant la carte de qualité présentée à la figure 2.2 (b). (c) Le résultat PU de la méthode guidée par la qualité en utilisant la carte de qualité présentée à la figure 2.2 (c).....32

**Figure 2.8** (a) Un interférogramme non filtré de la figure 2.2 (a). (b) Le résultat PU de la méthode PU basée sur un filtre de Kalman. (c) Les franges de phase reconditionnées de (b).....33

**Figure 2.9** Statistiques des publications MB PU de 1995 à 2017.....35

**Figure 2.10** Organigrammes de traitement des méthodes MB PU. PDF: fonction de densité de probabilité.....36

**Figure 2.11** (a) Un profil de référence. (b) Un interférogramme simulé avec la ligne de base la plus longue. (c) Reconstruction obtenue par la méthode ML. (d) Reconstruction obtenue par la méthode CA. (e) Reconstruction obtenue par la méthode MAP [80].....37

**Figure 2.12** (a) Un interférogramme simulé avec une ligne de base normale courte. (b) Un interférogramme simulé avec une longue ligne de base normale. (c) La distribution des résidus SB de (b). (d) La distribution résiduelle MB de (b) [99].....38

**Figure 2.13** (a) L'interférogramme ALOS PALSAR 1 avec une ligne de base de 104,07 m. (b) L'interférogramme ALOS PALSAR 2 avec une ligne de base de 192,89 m. (c) L'interférogramme ALOS PALSAR 3 avec une ligne de base de 1 032,4 m. (d) La distribution des résidus de (a) obtenue par TSPA en utilisant (a) et (b). (e) La distribution des résidus de (a) obtenue par TSPA en utilisant (a) et (c) [100].....39

**Figure 2.14** (a) L'interférogramme ALOS PALSAR avec une longue ligne de base normale. (b) L'interférogramme ALOS PALSAR avec une ligne de base normale courte. (c) La solution PU de (a) obtenue par la méthode SB MCF PU. (d) La solution PU de (a) obtenue par la méthode TSPA MB PU. (e) La phase de référence non emballée de (a). (f) Les erreurs entre (c) et (e). (g) Les erreurs entre (d) et (e).....40

**Figure 2.15** Organigrammes de traitement des méthodes LS PU.....41

**Figure 2.16** (a) Les données LS TerraSAR-X InSAR. (b) Le résultat PU de la méthode LS SNAPHU. (c) Le résultat PU de la méthode GAMMA LS MCF. (d) Le résultat PU de la méthode PU rapide pour les interférogrammes LS [19].....42

**Figure 2.17.** (a) Les données InSAR simulées. (b) Le résultat de pavage de (a) obtenu en utilisant la méthode ODLS [44].....43

**Figure 3.1,** (a) l'interférogramme (b) la mappe des résidus, (c) la mappe des branches.....49

**Figure 3.2** Opération intégrale de chemin basée sur la carte de qualité.....51

**Figure 3.3** Stratégie de croissance régionale (a) Première étape, (b) Deuxième étape, (c) Troisième étape, (d) Quatrième tape.....54

**Figure 3.4** Stratégie de croissance de la région basée sur le DAT (a) Étape un, (b) Étape deux, (c) Étape trois, (d) Étape quatre .....56

**Figure 3.5** Organigramme de déroulement de phase proposée.....57

**Figure 3. 6** Résultats de déroulement de phase par la méthode (a) BC, (b) QG, (c) l'hybridation proposée .....58

## Liste des tableaux

**Tableau 2.1** les limitations et les avantages des méthodes SB, MB et LS PU.....45

**Tableau 3.1** Table adjacente dynamique .....55

**Tableau 3.2** paramètres techniques de l'interférogramme réel choisis.....57





## Liste des sigles et acronymes

<b>InSAR</b>	Interferometric SAR
<b>DTM</b>	Digital Terrain Model
<b>DAT</b>	Table Adjacente à la Dynamique
<b>MNT</b>	Modèle Numérique de Terrain
<b>ROS</b>	Radar à Ouverture Synthétique(SAR)
<b>PU</b>	Déroulement de Phase
<b>BC</b>	branches coupées
<b>QG</b>	qualité guidée
<b>SB</b>	Base Unique
<b>MB</b>	Ligne Base
<b>LS</b>	Grande Echelle

## **Résumé**

Le déroulement de phase est une étape clé pour reconstruire les images de phase du système inSAR. Il est utilisé afin de fournir un modèle 3D de la surface communément appelé DEM. Parmi ces méthodes nous trouvons celles de des branches coupées (BC) et la qualité guidée (QG), les deux appartiennent à la catégorie parcours-suivi où l'intégration des phases (gradient) suit à parcours prédéfini. Dans ce travail nous proposons une hybridation entre ces deux algorithmes dans le but de combiner les avantages envisagés et fur à mesure contourner les inconvénients de chacun. L'algorithme proposé sera appliqué sur un interferogramme réel typique, ainsi les résultats seront discutés et comparés selon les critères d'exactitude et de temps de traitement.

**Mot clé :** interferogramme inSAR, déroulement de phase. Parcours-suivi. Branches-

## **Abstract**

The phase process is a key step in reconstructing the live images of the inSAR system. It is used to provide a 3D model of the surface commonly called DEM. Among these methods we find those of cut branches (BC) and guided quality (HQ), both of those belong to the path-follow category where phase integration (gradient) follows with a predefined path. In this work we propose a hybridization between these two algorithms in order to combine the intended advantages and gradually bypass the disadvantages of each. The proposed algorithm will be applied to a typical actual interferogram, so the results will be discussed and compared according to the criteria of accuracy and time processing.

**Key word:** interferogram inSAR, unfolding phase. Path-follow. Branches-cut and guided quality.

## **Introduction générale**

Le radar à ouverture synthétique interférométrique, abrégé en anglais par l'InSAR, est un technique radar utilisé en géodésie et en télédétection. Il peut être aéroporté ou spatioporté par un survole doté d'antennes à onde radar. Cette méthode géodésique utilise deux ou plusieurs images radar à synthèse d'ouverture pour générer des cartes de déformation de surface ou d'élévation numérique, en utilisant des différences de phase des ondes revenant au satellite ou à l'aéronef. La technique peut potentiellement mesurer des changements de déformation à l'échelle millimétrique sur des périodes allant de quelques jours à plusieurs années ou instantanément pour les mesures des élévations. Il a des applications pour la surveillance géophysique des risques naturels, par exemple les tremblements de terre, les volcans et les glissements de terrain, et dans l'ingénierie structurale, en particulier la surveillance de l'affaissement et de la stabilité structurelle.

Premièrement, Le radar à synthèse d'ouverture (SAR) est une forme de radar dans laquelle un traitement sophistiqué des données radar est utilisé pour produire un faisceau efficace très étroit. Il peut être utilisé pour former des images de cibles relativement immobiles; les cibles en mouvement peuvent être floues ou déplacées dans les images formées. Le SAR est une forme de télédétection active - l'antenne transmet le rayonnement réfléchi par la zone d'image, par opposition à la détection passive, où la réflexion est détectée par l'éclairage ambiant. L'acquisition d'images SAR est donc indépendante de l'éclairage naturel et les images peuvent être prises la nuit. Le radar utilise le rayonnement électromagnétique aux fréquences micro-ondes; l'absorption atmosphérique aux longueurs d'onde radar typiques est très faible, ce qui signifie que les observations ne sont pas empêchées par la couverture nuageuse.

L'inSAR est conjugué du SAR le fait d'utiliser deux acquisitions soit par deux antennes et un seul passage ou une antenne et deux (voire multi) passages. Les deux images acquises sont nécessaires pour produire un interférogramme; ceux-ci peuvent être obtenus prétraités ou produits à partir de données brutes par l'utilisateur avant le traitement InSAR. Les deux images doivent d'abord être co-enregistrées, en utilisant une procédure de corrélation pour trouver le décalage et la différence de géométrie entre les deux images d'amplitude. Une image inSAR est ensuite rééchantillonnée pour correspondre à la géométrie de l'autre, ce qui signifie que chaque pixel représente la même surface au sol dans les deux images. L'interférogramme est ensuite formé par multiplication croisée de chaque pixel dans les deux

images, et la phase interférométrique due à la courbure de la Terre est supprimée, un processus appelé aplatissement. Pour les applications de déformation, un MNT peut être utilisé en conjonction avec les données de base pour simuler la contribution de la topographie à la phase interférométrique, celle-ci peut ensuite être supprimée de l'interférogramme.

Une fois l'interférogramme de base est produit, il est généralement filtré à l'aide d'un filtre à spectre de puissance adaptatif pour amplifier le signal de phase. Pour la plupart des applications quantitatives, les franges consécutives présentes dans l'interférogramme devront ensuite être déroulées, ce qui implique une interpolation sur les sauts de phase de  $0$  à  $2\pi$  pour produire un champ de déformation continu. À un moment donné, avant ou après le déballage, les zones incohérentes de l'image peuvent être masquées. La dernière étape du traitement consiste à géocoder l'image, qui ré-échantillonne l'interférogramme de la géométrie d'acquisition (liée à la direction du trajet du satellite) dans la projection géographique souhaitée.

Donc le déroulement de phase est une étape indispensable pour le traitement inSAR, sans lui le produit final ne peut pas être obtenu. Il permet de récupérer les phases réelles roulées par la mesure modulo  $2\pi$ . Plusieurs techniques de déroulement ont été proposées qui sont catégorisées en quelques catégories principales. Parmi elles, nous trouvons deux techniques pionnières dites : branche de coupure et guidée par la qualité. Notre proposition consiste à hybrider les deux techniques pour un compromis entre l'exactitude et le temps de traitement. L'hybridation proposée est basée sur la mappes des branches et une table adjacente dynamique et testé sur un interférogramme réel afin de discuter les résultats sous une comparaison crédible.

Le manuscrit est organisé comme suit : premier chapitre dédié à présenter le système inSAR , les paramètres techniques qu'il possède et les type d'images générées. Deuxième chapitre a pour le but de faire un état de l'art sur les algorithmes de déroulement actuels et matures avec une discussion technique sur les images produites par chaque algorithme. Troisième chapitre est la partie pratique où l'hybridation proposée et les deux algorithmes susmentionnés sont implémentés sous l'environnement Matlab, ainsi qu'une discussion des résultats selon plusieurs critères pertinents notamment le temps de traitement.





**Chapitre 1 :**  
**Généralités sur le**  
**système d'imagerie**  
**inSAR et SAR**

## **1.1 Introduction :**

Le radar à synthèse d'ouverture (SAR) est un système d'imagerie à micro-ondes. Il a des capacités de pénétration dans le Cloud car il utilise des micro-ondes. Il a des capacités opérationnelles de jour comme de nuit car il s'agit d'un système actif. Enfin, sa «configuration interférométrique», SAR interférométrique ou InSAR, permet des mesures précises du trajet de rayonnement car il est cohérent. Les mesures des variations du trajet en fonction de la position du satellite et du temps d'acquisition permettent de générer des modèles numériques d'élévation (DEM) et de mesurer les déformations de surface centimétriques du terrain. Ce chapitre est dédié aux débutants qui souhaitent acquérir une compréhension de base de ce qu'est l'interférométrie SAR. Des exemples réels dérivés des satellites ESA, ERS-1, ERS-2 et Envisat, seront exploités pour donner une première idée intuitive des informations qui peuvent être extraites des images InSAR, ainsi qu'une idée des limites de la technique. Le satellite européen de télédétection, ERS-1, a été le premier satellite d'observation de la Terre de l'ESA; il transportait une charge utile complète comprenant un radar à synthèse d'ouverture (SAR). Avec ce lancement en juillet 1991 et la validation de sa capacité interférométrique en septembre de la même année, un ensemble toujours croissant de données interférométriques est devenu disponible pour de nombreux groupes de recherche. ERS-2, qui était identique à ERS-1 en plus d'avoir un instrument supplémentaire, a été lancé en 1995. De plus, les données renvoyées par sa suite d'instruments facilitent également le développement d'un certain nombre d'applications opérationnelles et commerciales. Le plus grand instrument unique d'Envisat est le radar à synthèse d'ouverture avancée (ASAR), fonctionnant en bande C. Cela garantit la continuité des données après ERS-2, malgré un petit décalage de fréquence centrale (31 MHz). Il présente des capacités améliorées en termes de couverture, plage d'angles d'incidence, polarisation et modes de fonctionnement. Les améliorations permettent le pilotage de l'élévation du faisceau radar et la sélection de différents azimuts, de 100 ou 400 km de large.

## **1.2 Images SAR de la surface de la Terre**

### **1.2.1 Qu'est-ce qu'un système d'imagerie SAR à bande magnétique?**

Un système d'imagerie SAR [Curlander91] à partir d'un satellite (comme ERS ou Envisat) est esquissé à la figure 1-1. Un satellite porte un radar dont l'antenne est dirigée vers la surface de la Terre dans le plan perpendiculaire à l'orbite (en pratique, ce n'est pas strictement vrai, car il est nécessaire de compenser la rotation de la Terre). L'inclinaison de l'antenne par

rapport au nadir est appelée l'angle hors-nadir et dans les systèmes contemporains se situe généralement comprise entre 20 ° et 50 ° (elle est de 21 ° pour l'ERS). En raison de la courbure de la surface de la Terre, l'angle d'incidence du rayonnement sur un terrain horizontal plat est plus grand que l'off-nadir (généralement 23 ° pour l'ERS). Cependant, pour des raisons de simplicité, nous supposons ici que la Terre est plate, et donc que l'angle d'incidence est égal à l'angle hors-nadir, comme le montre la figure.

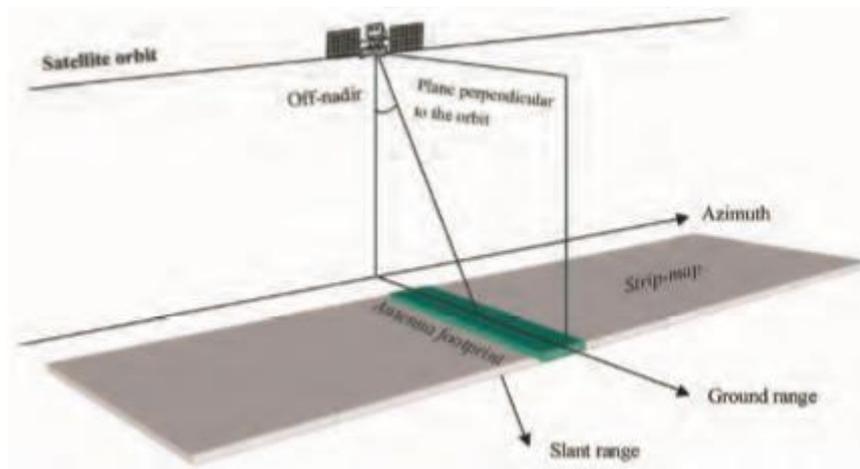


Figure 1.1 : Un système SAR depuis un satellite

Actuellement, les systèmes SAR par satellite opérationnels fonctionnent dans l'une des bandes micro-ondes suivantes:

Le nom de la band	Fréquence en (GHz)	Société propriétaire
C	3.5	missions ERS et Envisat de l'ESA, Radar sat canadien et missions de navette américaines
L	1.2	J-ERS japonais et ALOS
X	10	le X-SAR germano-italien sur les missions navettes

Dans le cas de l'ERS, la zone éclairée au sol (l'empreinte de l'antenne) est :

\*d'environ 5 km dans le sens longitudinal (également appelée direction azimutale).

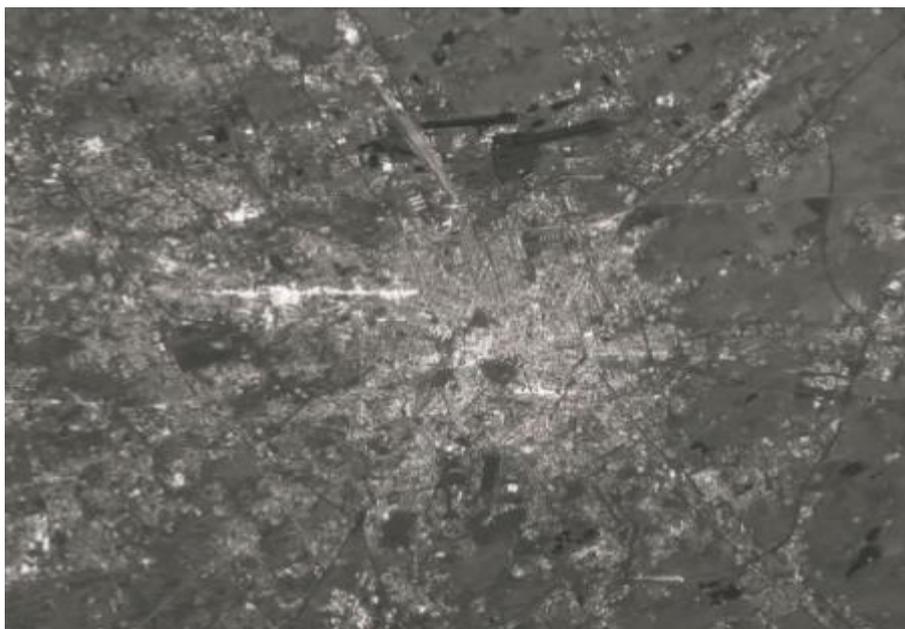
\* d'environ 100 km dans la direction transversale (également appelée direction de la portée au sol).

## 1.2.2 Qu'est-ce qu'une image SAR complexe ?

Une image SAR numérique peut être considérée comme une mosaïque (c'est-à-dire un réseau bidimensionnel formé de colonnes et de rangées) de petits éléments d'image (pixels). Chaque pixel est associé à une petite zone de la surface de la Terre (appelée cellule de résolution). Chaque pixel donne un nombre complexe qui transporte des informations d'amplitude et de phase sur le champ micro-ondes rétrodiffusé par tous les diffuseurs (roches, végétation, bâtiments, etc.) dans la cellule de résolution correspondante projeté au sol. Différentes lignes de l'image sont associées à différents emplacements d'azimut, tandis que différentes colonnes indiquent différents emplacements de plage oblique.

### 1.2.2.1 L'image SAR détectée

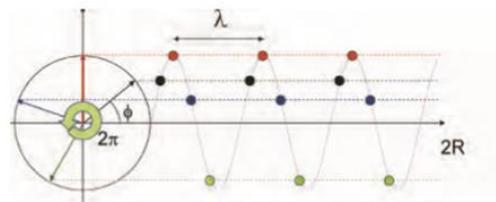
L'image SAR détectée contient une mesure de l'amplitude du rayonnement rétrodiffusé vers le radar par les objets (diffuseurs) contenus dans chaque cellule de résolution SAR. Cette amplitude dépend plus de la rugosité que de la composition chimique des diffuseurs sur le terrain. En règle générale, les roches exposées et les zones urbaines présentent de fortes amplitudes, tandis que les surfaces planes lisses (comme les bassins d'eau calmes) présentent de faibles amplitudes, car le rayonnement est principalement réfléchi loin du radar. L'image SAR détectée est généralement visualisée au moyen de niveaux d'échelle de gris comme le montre l'exemple de la figure 1-2. Les pixels clairs correspondent à des zones de fort rayonnement rétrodiffusé (par exemple les zones urbaines), tandis que les pixels sombres correspondent à un faible rayonnement rétrodiffusé (par exemple, un bassin d'eau calme).



**Figure 1-2:** image ERS SAR détectée de Milan (Italie). La taille de l'image est d'environ 25 km en portée au sol (verticale) et 25 km en azimuth (horizontal).

### 1.2.2.2 L'image SAR de phase

Le rayonnement transmis par le radar doit atteindre les diffuseurs au sol puis revenir au radar pour former l'image SAR (aller-retour). Des diffuseurs à différentes distances du radar (différentes portées obliques) introduisent des retards différents entre la transmission et la réception du rayonnement. Du fait de la nature presque purement sinusoïdale du signal émis, ce retard  $\tau$  équivaut à un changement de phase  $\phi$  entre les signaux émis et reçus. Le changement de phase est ainsi proportionnel à la distance de déplacement bidirectionnelle  $2R$  du rayonnement divisée par la longueur d'onde transmise  $\lambda$ . Ce concept est illustré à la figure 1-3.



**Figure 1-3:** Une fonction sinusoïdale  $\sin \phi$  est périodique avec une période de  $2 \pi$  radian.

Cependant, en raison de la nature périodique du signal, des distances de déplacement qui diffèrent par un multiple entier de la longueur d'onde introduisent exactement le même changement de phase. En d'autres termes, la phase du signal SAR est une mesure de seulement la dernière fraction de la distance de déplacement bidirectionnelle qui est plus petite que la longueur d'onde transmise. En pratique, en raison de l'énorme rapport entre la dimension de la cellule de résolution (de l'ordre de quelques mètres) et la longueur d'onde ( $\sim 5,6$  cm pour l'ERS), le changement de phase passant d'un pixel à l'autre au sein d'une seule image SAR semble aléatoire et est aléatoire. D'aucune utilité pratique.

### 1.2.2.3 Speckle

La présence de plusieurs diffuseurs dans chaque cellule de résolution SAR génère ce que l'on appelle l'effet «speckle», commun à tous les systèmes d'imagerie cohérents. Le pointillé est présent en SAR, mais pas dans les images optiques. Des zones de terrain homogènes qui s'étendent sur de nombreuses cellules de résolution SAR (imaginez, par exemple, un grand

champ agricole couvert par un type de culture) sont imagées avec différentes amplitudes dans des cellules de résolution différente. L'effet visuel est une sorte d'écran «sel et poivre» superposé à une image d'amplitude uniforme. Cet effet de speckle est une conséquence directe de la superposition des signaux réfléchis par de nombreux petits diffuseurs élémentaires (ceux ayant une dimension comparable à la longueur d'onde radar) à l'intérieur de la cellule de résolution. Ces signaux, qui ont une phase aléatoire en raison de multiples réflexions entre les diffuseurs, s'ajoutent au rayonnement directement réfléchi. D'un point de vue intuitif, l'amplitude résultante dépendra du déséquilibre entre les signaux de signe positif et négatif.

### 1.2.3 Projection des cellules de résolution SAR au sol

La zone de terrain imagée dans chaque cellule de résolution SAR (appelée cellule de résolution au sol) dépend de la topographie locale. Elle dépend fortement de la pente du terrain dans le plan perpendiculaire à l'orbite (direction de la portée du sol) et de la pente du terrain dans la direction d'azimut. La dimension de la cellule de résolution au sol en azimut est liée à celle de la cellule de résolution SAR par la déformation en perspective habituelle que nous rencontrons chaque jour en regardant les surfaces sous différents angles (par exemple, une carte postale vue à 90 degrés est une ligne). La dimension de la cellule de résolution au sol à portée est liée à celle de la cellule de résolution SAR par une déformation en perspective inhabituelle. La figure 1-4 montre comment la portée oblique est projetée sur le sol.

Ici, cinq cellules de résolution à plage oblique identiques sont représentées. Les deux premières cellules correspondent à un terrain plat et contiennent chacune trois triangles. La troisième cellule contient sept de ces triangles en raison de la pente positive du terrain. Enfin, les quatrième et cinquième cellules contiennent moins de trois triangles en raison de la pente négative du terrain.

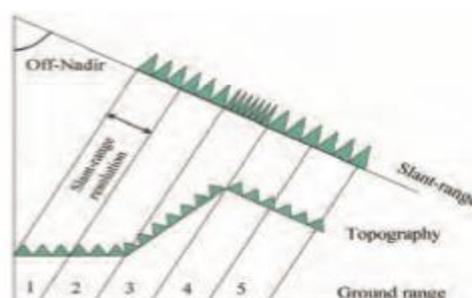
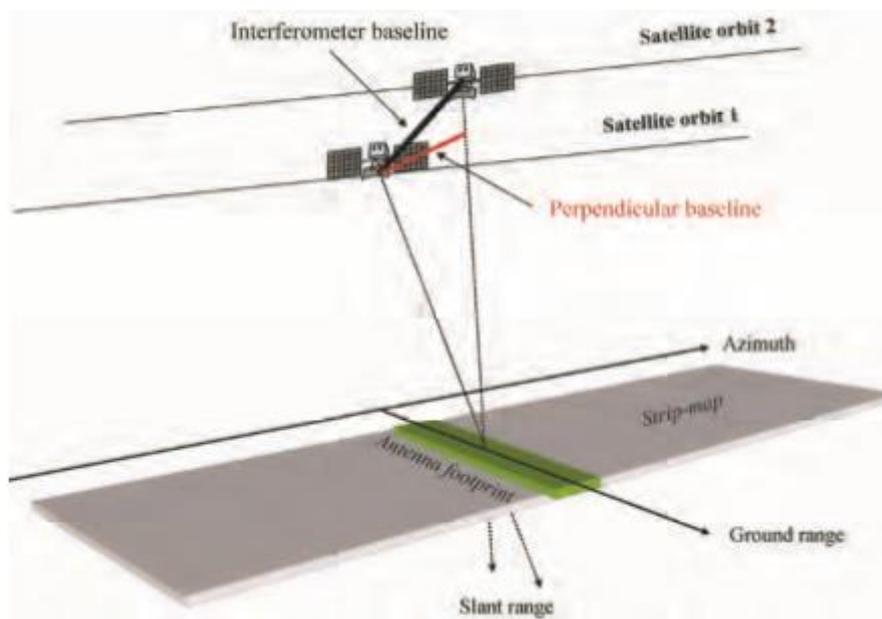


Figure 1.4 : Effet du terrain sur l'image SAR

## 2. SAR interférométrie: applications and limites

Un satellite SAR peut observer la même zone sous des angles de vue légèrement différents. Cela peut se faire soit simultanément (avec deux radars montés sur la même plateforme) soit à des moments différents en exploitant des orbites répétées du même satellite. C'est le cas pour ERS-1, ERS-2 et Envisat. Pour ces satellites, des intervalles de temps entre les observations de 1, 35 ou un multiple de 35 jours sont disponibles. La distance entre les deux satellites (ou orbites) dans le plan perpendiculaire à l'orbite est appelée ligne de base de l'interféromètre (voir figure 1.5) et sa projection perpendiculaire à la plage oblique est la ligne de base perpendiculaire.



**Figure 1.5 :** Géométrie d'un système SAR interférométrique par satellite

### 2.1 Mesure de l'altitude du terrain à travers la phase interférométrique

Supposons que nous ayons un seul diffuseur à point dominant dans chaque cellule de résolution au sol qui ne change pas avec le temps. Ces diffuseurs ponctuels sont observés par deux SAR sous des angles de vue légèrement différents, comme le montre la figure 1.5. Dans ce cas, la phase interférométrique de chaque pixel d'image SAR ne dépendrait que de la différence des trajets entre chacun des deux SAR et la cellule de résolution considérée. Toute contribution de phase possible introduite par les diffuseurs ponctuels n'affecte pas la phase interférométrique car elle est annulée par la différence. Une fois qu'un point de référence au sol a été identifié, la variation de la différence de chemin de parcours  $\Delta r$  qui se traduit par le passage de la cellule de résolution de référence à une autre peut être donnée par une

expression simple (une approximation qui vaut pour les petites lignes de base et les cellules de résolution qui ne sont pas trop loin) qui dépend de quelques paramètres géométriques illustrés à la figure 1.6.

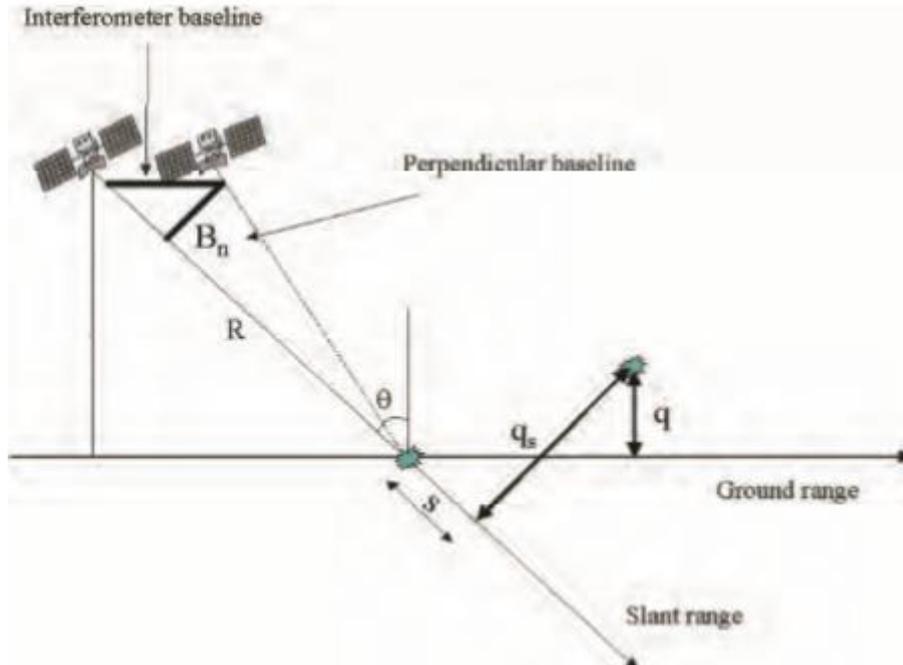


Figure 1.6 : Paramètres géométriques d'un système SAR interférométrique par satellite

Les paramètres sont:

1. La ligne de base perpendiculaire  $B_n$
2. La distance radar-cible  $R$
3. Le déplacement entre les cellules de résolution le long de la perpendiculaire à la plage oblique,  $q_s$

L'expression approximative suivante de  $\Delta r$  est la suivante:

$$\Delta r = -2 \frac{B_n q_s}{R} \quad (1.1)$$

La variation de phase interférométrique  $\Delta \phi$  est alors proportionnelle à  $\Delta r$  divisée par la longueur d'onde transmise  $\lambda$ :

$$\Delta \phi = \frac{2\pi \Delta r}{\lambda} = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_n q_s}{R} \quad (1.2)$$

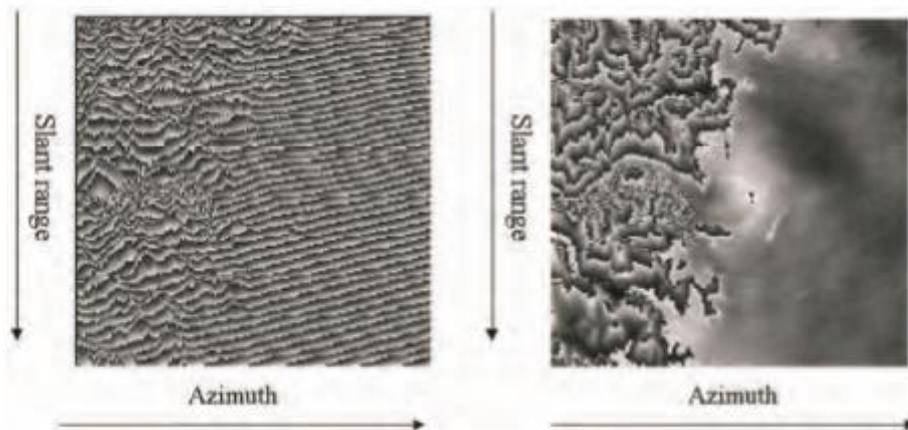
### 2.2.1 Aplatissement de l'interférogramme

La variation de phase interférométrique peut être divisée en deux contributions:

1. Une variation de phase proportionnelle à la différence d'altitude  $q$  entre les cibles ponctuelles, rapportée à un plan de référence horizontal
2. Une variation de phase proportionnelle au déplacement de distance oblique  $s$  des cibles ponctuelles

$$\Delta\phi = -\frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_n q}{R \sin \theta} - \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_n s}{R \tan \theta} \quad (1.3)$$

Où  $\theta$  est l'angle d'incidence du rayonnement par rapport à la référence. Il convient de noter que la ligne de base perpendiculaire est connue à partir de données orbitales précises, et le second terme de phase peut être calculé et soustrait de la phase interférométrique. Cette opération est appelée aplatissement interférogramme et, par conséquent, elle génère une carte de phase proportionnelle à l'altitude relative du terrain. Un exemple d'aplatissement de l'interférogramme est illustré à la figure 1.7. Un interférogramme d'une partie des Alpes italiennes et du Pianura Padane obtenu à partir des données ERS-1 et ERS-2 (prises à un jour d'intervalle avec une ligne de base normale d'environ 30 mètres) est illustré à gauche. L'interférogramme aplati est indiqué sur le côté droit. Ici, les discontinuités de phase ressemblent aux courbes de niveau.



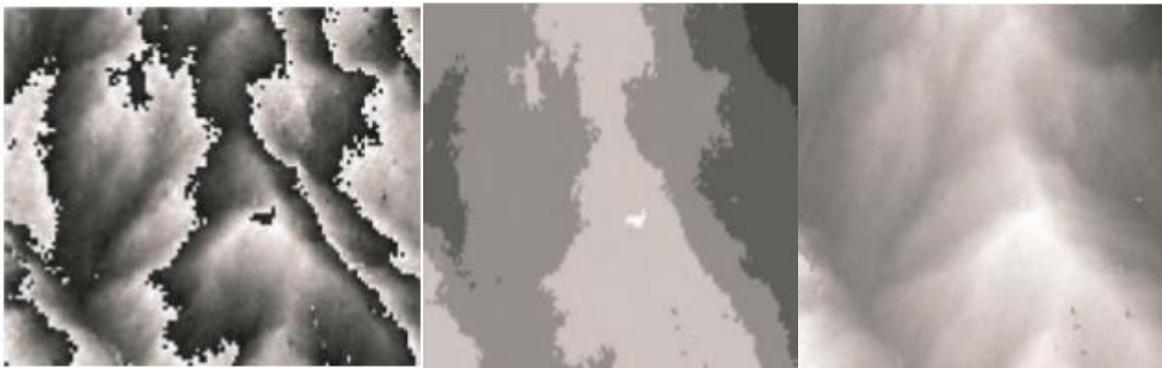
**Figure 1.7:** Gauche: interférogramme d'une partie des Alpes italiennes et du Pianura Padana obtenu à partir des données ERS. À droite: interférogramme aplati. Ici, les discontinuités de phase ressemblent aux courbes de niveau.

### 2.2.1 Déroulement de phase et génération de DEM

L'interférogramme aplati fournit une mesure ambiguë de l'altitude relative du terrain en raison de la nature cyclique  $2\pi$  de la phase interférométrique. La variation de phase entre deux points sur l'interférogramme aplati fournit une mesure de la variation d'altitude réelle, après suppression de tout nombre entier d'altitudes d'ambiguïté (équivalent à un nombre entier de

cycles de phase  $2\pi$ ). Le processus d'ajout du multiple entier correct de  $2\pi$  aux franges interférométriques est appelé déroulement de phase. Un exemple de déroulement de phase est montré dans la figure suivante, dans laquelle la phase interférométrique SAR, sa version non enveloppée et une carte avec le multiple entier correct de  $2\pi$  ajouté à la phase d'origine sont montrées ensemble.

Il existe plusieurs techniques de déroulement de phase bien connues qui seront décrites dans la section avancée de ce manuel. Cependant, il convient de noter ici que le déroulement de phase n'a généralement pas de solution unique et que les informations a priori doivent être exploitées pour obtenir la bonne solution.



**Figure 1.8:** Gauche: Phase interférométrique SAR générée au moyen de deux images ERS. Les discontinuités de la phase  $2\pi$  sont clairement visibles sous forme de transitions noir / blanc. Droite: phase non emballée. Ci-dessous: Les discontinuités de phase  $2\pi$  ont été éliminées en ajoutant ou en soustrayant un multiple entier de  $2\pi$  à chaque pixel de l'image de phase interférométrique d'origine

### 2.3 Mesure du mouvement du terrain: interférométrie différentielle

Supposons que certains des diffuseurs ponctuels au sol changent légèrement leur position relative dans l'intervalle de temps entre deux observations SAR (comme, par exemple, en cas d'affaissement, de glissement de terrain, de tremblement de terre, etc.). Dans de tels cas, le terme de phase additive suivant, indépendant de la ligne de base, apparaît dans la phase interférométrique:

$$\Delta\phi_d = \frac{4\pi}{\lambda} d \quad (1.4)$$

Où  $d$  est le déplacement relatif du diffuseur projeté sur la direction de la plage oblique. Cela signifie qu'après l'aplatissement de l'interférogramme, la phase interférométrique contient à la fois des contributions d'altitude et de mouvement:

$$\Delta\phi = -\frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_n q_s}{R \sin \theta} + \frac{4\pi}{\lambda} d \quad (1.5)$$

De plus, si un modèle d'élévation numérique (DEM) est disponible, la contribution de l'altitude peut être soustraite de la phase interférométrique (générant ce que l'on appelle l'interférogramme différentiel) et la composante de mouvement du terrain peut être mesurée. Dans le cas ERS avec  $\lambda = 5,6$  cm et en supposant une ligne de base perpendiculaire de 150 m (une valeur assez courante), l'expression suivante est vraie:

$$\Delta\phi = -\frac{q}{\lambda} + 225d \quad (1.6)$$

D'après cet exemple, on peut voir que la sensibilité de l'interférométrie SAR au mouvement du terrain est beaucoup plus grande que celle à la différence d'altitude. Une composante de mouvement de 2,8 cm dans la direction de la plage oblique générerait une variation de phase interférométrique de  $2\pi$ .

## 2.4 Autres sources de bruit de phase

Dans les sections précédentes, il a été émis l'hypothèse qu'un seul diffuseur stable dominant était présent dans chaque cellule de résolution. C'est rarement le cas en réalité. Nous devons analyser la situation où de nombreux diffuseurs élémentaires sont présents dans chaque cellule de résolution (diffuseurs distribués), dont chacun peut changer dans l'intervalle de temps entre deux acquisitions SAR. Le principal effet de la présence de nombreux diffuseurs par cellule de résolution et de leurs changements dans le temps est l'introduction de bruit de phase.

Trois contributions principales au bruit de phase doivent être prises en considération:

- Bruit de phase dû au changement temporel des diffuseurs
- Bruit de phase dû à un angle de vue différent
- Bruit de phase dû à la diffusion de volume

## 3. Sélection d'images ERS pour le traitement InSAR

La sélection d'images SAR adaptées à l'utilisation de l'interférométrie est la première étape à effectuer pour tout traitement interférométrique. Il s'agit d'une étape clé, car les critères retenus pour la sélection des images ont un fort impact sur la qualité des résultats finaux. Ces critères dépendent de l'application spécifique pour laquelle les images interférométriques SAR sont requises. Dans ce chapitre, quelques critères de sélection seront donnés concernant les deux applications InSAR les plus importantes: la génération de modèle

d'élévation numérique (DEM) et l'interférométrie différentielle ( InSAR). En particulier, nous analyserons comment sélectionner les paramètres suivants afin d'obtenir les meilleurs résultats de l'analyse interférométrique SAR:

- Angle de vue (passes ascendantes et descendantes)
- Ligne de base géométrique
- Ligne de base temporelle
- Heure de l'acquisition
- Cohérence
- Conditions météorologiques Avant de commencer l'analyse des critères de sélection, il convient de consacrer quelques mots aux informations disponibles sur les images ERS.

### **3.1 Sélection d'images pour la génération de DEM InSAR**

En général, les recommandations suivantes doivent être suivies lors de la création de modèles d'élévation numériques à partir de données interférométriques ERS:

- Sélectionnez les acquisitions en tandem pour réduire la décorrélation temporelle.
- Les interférogrammes avec de très petites valeurs de ligne de base perpendiculaire (<30 m), bien que faciles à dérouler, sont presque inutiles en raison de leur grande sensibilité au bruit de phase et aux effets atmosphériques.
- La ligne de base perpendiculaire optimale se situe entre 150 et 300 mètres. Cependant, le meilleur résultat est obtenu en utilisant plus d'un interférogramme: les interférogrammes avec de petites lignes de base peuvent être exploités pour aider à dérouler les interférogrammes avec des lignes de base élevées. De plus, différents interférogrammes peuvent être combinés afin de réduire les artefacts atmosphériques.
- Si aucune paire tandem n'est disponible, envisagez d'utiliser les acquisitions de phase A, B et D ERS-1 (cycle de répétition de 3 jours) au lieu de la phase C (cycle de répétition de 35 jours).
- Les valeurs de cohérence sont affectées par la météo locale. Évitez les acquisitions par temps de pluie, neige ou vent fort. Ces phénomènes provoquent généralement une perte de cohérence de phase. Les informations météorologiques peuvent souvent être récupérées à partir de bases de données historiques disponibles sur le Web

- Les acquisitions nocturnes sont généralement moins affectées par les effets atmosphériques [Hanssen98].
- Jeter les images acquises pendant les journées très chaudes: l'air chaud peut contenir beaucoup plus de vapeur d'eau que l'air froid (une cause majeure d'artefacts atmosphériques dans les interférogrammes SAR) [Hanssen98].
- Habituellement, les couples tandem acquis sur des zones végétalisées pendant la saison sèche présentent des valeurs de cohérence plus élevées que celles acquises pendant une saison humide.

### 3.2 Sélection d'images pour les applications InSAR différentielles

Dans cette section, les critères de sélection des images ERS pour mesurer les déformations du sol sont répertoriés sans commentaires détaillés. Les chapitres B4 et C6 sont consacrés aux applications InSAR différentielles (D'InSAR), avec une analyse plus détaillée. En répétant l'équation (5), la phase interférométrique est donnée par:

$$\Delta\phi = -\frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_n q}{R \sin \theta} + \frac{4\pi}{\lambda} d \quad (1.7)$$

De cela, on peut voir qu'il existe différentes manières de produire un interférogramme différentiel:

- **Paire interférométrique unique et ligne de base proche de zéro**

Avec une seule paire interférométrique (deux images SAR) et une ligne de base  $B_n$  proche de zéro: la phase interférométrique contient uniquement la contribution du mouvement (voir équation (1.7)). Aucune autre étape de traitement n'est requise.

- **Paire interférométrique unique et ligne de base non nulle**

Avec une paire interférométrique unique (deux images SAR) et une ligne de base non nulle: la phase interférométrique contient à la fois les contributions d'altitude et de mouvement (voir équation (1.7)). Les étapes de traitement suivantes sont requises:

- Un MNT disponible doit être rééchantillonné des coordonnées géographiques aux coordonnées SAR et l'élévation doit être convertie en phases interférométriques en inversant l'équation (1.7). La même ligne de base doit être utilisée que pour la paire interférométrique.

- Ces franges «synthétiques» doivent être soustraites de celles de la paire interférométrique disponible. Notez que cette opération peut être effectuée commodément dans le domaine complexe en multipliant l'interférogramme réel par le conjugué complexe du synthétique.

- **Trois images interférométriques et aucun mouvement**

Avec trois images SAR interférométriques et aucun mouvement de terrain entre deux d'entre elles, une image doit être sélectionnée comme maître commun. Deux interférogrammes sont alors formés: les deux images esclaves sont enregistrées sur le maître commun. La différence temporelle la plus courte (pour gagner en cohérence et éviter le mouvement du terrain) et une ligne de base moyenne / élevée (pour gagner en précision d'élévation) doivent être sélectionnées pour la première paire interférométrique: généralement un jour et 100 à 300 mètres dans le cas ERS. La deuxième paire devrait avoir une plus grande différence temporelle (elle devrait contenir le mouvement du terrain) et une ligne de base courte. Les étapes de traitement suivantes sont nécessaires:

- 1) Le premier interférogramme doit être déplié et mis à l'échelle par le rapport des deux lignes de base.
- 2) Sa phase doit être à nouveau enveloppée et soustraite de celle du deuxième interférogramme (généralement effectuée dans le domaine complexe comme décrit au point 2 ci-dessus).

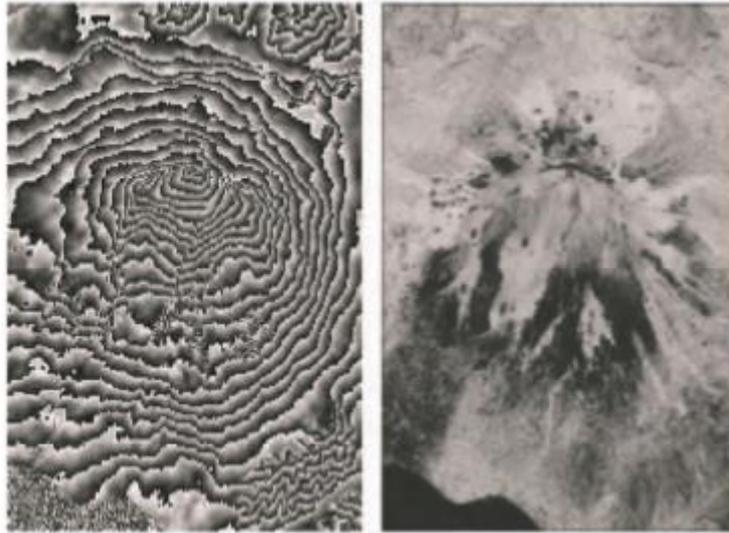
- **Deux paires d'images et aucun mouvement dans l'une d'elles**

Avec deux paires interférométriques (quatre images SAR) et aucun mouvement de terrain dans l'une d'elles: il y a deux images maîtres, chacune avec une image esclave. Toutes les images doivent être enregistrées les unes aux autres. On se retrouve avec deux interférogrammes comme dans le cas de trois images SAR analysées au point 3, donc les mêmes étapes sont nécessaires.

## **4. Reconstruction du DEM InSAR**

### **4.1 Techniques de déroulement de phase pour la reconstruction de DEM InSAR**

Comme déjà mentionné dans la section précédente, nous supposons que les interférogrammes ont déjà été générés et correctement filtrés. Les exemples de cette section sont basés sur la figure 1.9.



**Figure 1.9:** Données tandem ERS acquises sur le volcan Etna (Sicile) du 1er au 2 août 1995 (la ligne de base normale était d'environ 60 m). Gauche: interférogramme aplati. À droite: carte de cohérence.

Les données ont été filtrées et sous-échantillonnées.

Nous commençons notre analyse directement avec la plus importante des étapes de traitement impliquées dans la reconstruction InSAR DEM. C'est un problème qui reviendra à notre attention plusieurs fois dans les prochains chapitres: le déroulement de phase.

La phase interférométrique n'étant connue que modulo- $2\pi$  et la variation de hauteur maximale dans la zone d'intérêt pouvant donner lieu à des centaines de cycles, une procédure de déroulement est nécessaire afin d'estimer la topographie locale. Si la contribution de phase due à une Terre idéalement plate a été correctement estimée et compensée (c'est-à-dire que l'interférogramme a été aplati), le déroulement de phase permet de passer du modèle de frange (similaire à un ensemble de lignes de contour) à un champ de phase proportionnel à la topographie locale. Dans la plupart des cas, c'est l'obstacle majeur à surmonter dans la chaîne de traitement pour la reconstruction InSAR DEM, et ne peut souvent pas être effectué de manière totalement automatique [Ghiglia98]. Les raisons de cela deviennent évidentes une fois que nous avons exposé le problème plus précisément et que nous l'avons analysé d'un point de vue mathématique.

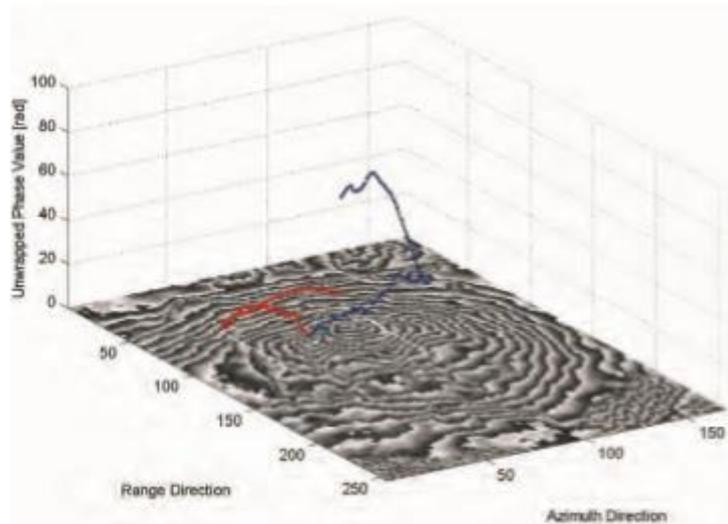
#### 4.1.2 Que recherchons-nous?

Le déroulement de phase (PU) a pour but de récupérer le nombre entier de cycles  $n$  à ajouter à la phase enveloppée  $\varphi$  de sorte que la valeur de phase non ambiguë  $\psi$  puisse être finalement obtenue pour chaque pixel d'image:

$$\psi = \varnothing + 2\pi.n \quad (1.8)$$

En général, si aucune information a priori sur  $\varphi$  n'est disponible, c'est-à-dire qu'aucune contrainte n'est donnée à la solution (par exemple, bande de fréquence maximale et puissance du signal), le déroulement de phase est un problème inverse mal posé et donc un nombre infini de solutions différentes peut être trouvé, tous honorant les données.

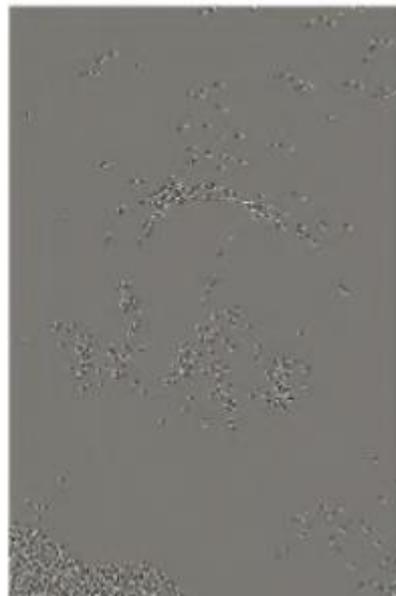
La procédure PU la plus simple serait une simple intégration des différences de phase, à partir d'un point de référence. Cependant, en raison des discontinuités de phase, elle n'est pas toujours précise. Presque tous les algorithmes PU sont basés sur l'hypothèse que le véritable champ de phase non enveloppé est «lisse» et varie «lentement». Plus précisément, les valeurs des phases voisines sont supposées être à l'intérieur d'un demi-cycle ( $\pi$  radians) les unes des autres. Bien que cette hypothèse soit souvent valable pour la plupart des pixels de l'image, la présence de certaines discontinuités de phase (c'est-à-dire des variations de phase absolues entre pixels voisins de plus de  $\pi$  radians) provoque des incohérences, car l'intégration donne des résultats différents selon le chemin suivi (figure 1.10).



**Figure 1.10:** Un exemple visuel qui montre le principal problème lié aux incohérences de phase: l'intégration des valeurs de phase donne des résultats différents selon le chemin suivi [Goldstein88, Ghiglia98].

Dans cet exemple, les premier et dernier pixels des chemins d'intégration sont communs, mais un chemin traverse une zone de transition, caractérisée par des valeurs de cohérence très faibles, et propage d'importantes erreurs de déroulement de phase.

Cette caractéristique est évidente chaque fois que la somme des différences de phase enveloppées (l'intégrale du gradient de phase estimé) autour d'un chemin fermé diffère de zéro. Pour être cohérent, un champ de gradient doit être irrotationnel; c'est-à-dire que la boucle de  $\nabla \varphi$  doit être nulle partout [Spagnolini95] [Goldstein88, Ghiglia98]. Chaque fois que cette condition est vérifiée sur l'ensemble de l'interférogramme, nous avons un «problème insignifiant de PU». Malheureusement, ce n'est presque jamais le cas dans le traitement des données InSAR. La composante rotationnelle du champ de gradient peut facilement être estimée en additionnant les différences de phase enveloppées autour des chemins fermés formés par chaque ensemble mutuellement voisin de quatre pixels. Chaque fois que la somme n'est pas nulle, un résidu se produit [Goldstein88]. Sa valeur est généralement normalisée à un cycle et elle peut être positive (+1) ou négative (-1). La somme des variations de phase enveloppées le long d'un chemin fermé arbitraire est égale à la somme algébrique des résidus enfermés dans le chemin. Un exemple de champ de résidus (par rapport à l'interférogramme de la figure 1.9) est illustré à la figure 1.11.



**Figure 1.11:** Carte des résidus de phase

Étant donné que les résidus de phase ne font que marquer les points limites des «lignes de discontinuité», le vrai problème est leur identification complète. Les discontinuités sont essentiellement dues à deux facteurs indépendants: (1) le bruit de phase; (2) pentes raides du terrain. En interférométrie à passes répétées, nous traitons généralement de faibles valeurs SNR ( $\sim 0$  dB) en raison de la décorrélation temporelle ou géométrique, et la probabilité sur

terrain plat d'une variation de phase (bruyante) supérieure à  $\pi$  n'est pas du tout négligeable (pour la cohérence  $\gamma = 0,5$  et un nombre effectif de regards

$$N_{eff} = 3p(|\Delta\phi| > \pi) \approx 0.01 \quad (1.9)$$

## 4.2 Sources d'erreurs, stratégies multi-références et fusion de données

Outre le problème de déroulement de phase, la précision InSAR DEM dépend de plusieurs facteurs, notamment:

- 1) le bruit de phase  $\phi_w$
- 2) les effets atmosphériques  $\phi_a$
- 3) l'indétermination de l'orbite (erreurs de ligne de base)

Comme déjà discuté dans la section précédente, les erreurs de ligne de base sont systématiques et peuvent être fortement réduits grâce à une procédure d'optimisation utilisant quelques points de contrôle au sol (GCP) dans une scène d'image donnée [Werner93]. Ici, nous nous concentrons sur les deux premières sources d'erreur. Encore une fois, par souci de simplicité, nous utilisons l'approximation linéaire pour la conversion phase-hauteur, nous négligeons les erreurs de ligne de base possibles, et nous supposons que la phase interférométrique a été compensée pour le terme Terre plate (c'est-à-dire que l'interférogramme a été aplati). Le profil topographique estimé est alors donné par l'expression suivante:

$$q = \frac{K}{B_n} (\phi_t + \phi_w + \phi_a) = t + w + a \quad (1.10)$$

Où K est une constante (pour les petites zones)

$\phi$  est la contribution de la phase topographique

t est le profil topographique local

a est le bruit d'élévation dû à l'atmosphère

w est le bruit d'élévation dû à la décorrélation de phase

## 5. Statistiques des images SAR et InSAR

### 5.1 Images interférométriques: cohérence

Dans le cas d'images interférométriques, l'amplitude  $|v|$  de chaque pixel de l'interférogramme est proportionnel au produit des amplitudes  $|u_1|$ ,  $|u_2|$  des deux images initiales, et sa phase  $\phi$  est égale à leur différence de phase. Nous avons vu que les pixels de l'image SAR sont la réalisation de processus aléatoires et nous pouvons donc nous attendre à

ce que les amplitudes de l'interférogramme fluctuent fortement, même dans le cas le plus favorable d'absence de décorrélation temporelle (c'est-à-dire que la cible n'a pas changé entre les deux prises) et zéro ligne de base (c'est-à-dire qu'il n'y a absolument aucun changement dans l'angle hors nadir). Par conséquent, le bruit de phase change de pixel en pixel en raison de l'impact différent du bruit aléatoire superposé aux amplitudes aléatoires des pixels. Les pixels avec des retours faibles montreront des phases interférométriques plus dispersées; des diffuseurs puissants et stables donneront des phases plus fiables. De plus, il y a des changements importants entre les deux acquisitions: temporels, dus au changement de l'angle hors nadir, et dus au bruit aléatoire. Nous définissons maintenant la mesure de ce changement  $\gamma$ , la cohérence des deux images SAR (aussi appelé coefficient de corrélation complexe):

$$\gamma = \frac{E[u_1 u_2^*]}{\sqrt{E[|u_1|^2]} \sqrt{E[|u_2|^2]}} = \frac{E[v]}{\bar{I}} \quad ; \quad |\gamma| < 1; \angle \gamma = \phi_0 \quad (1.11)$$

Où E est la valeur attendue de la variable aléatoire x

L'argument de  $\gamma$ ,  $\phi_0$  est égal à la valeur attendue de la phase interférométrique. Évidemment,  $\gamma$  est une fonction des valeurs attendues que nous devons estimer à partir des données. En utilisant N échantillons d'images indépendants, l'estimateur habituel est:

$$\hat{\gamma} = \frac{\sum_{i=1}^N u_{1i} u_{2i}^*}{\sqrt{\sum_{i=1}^N |u_{1i}^*|^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N |u_{2i}^*|^2}} \quad (1.12)$$

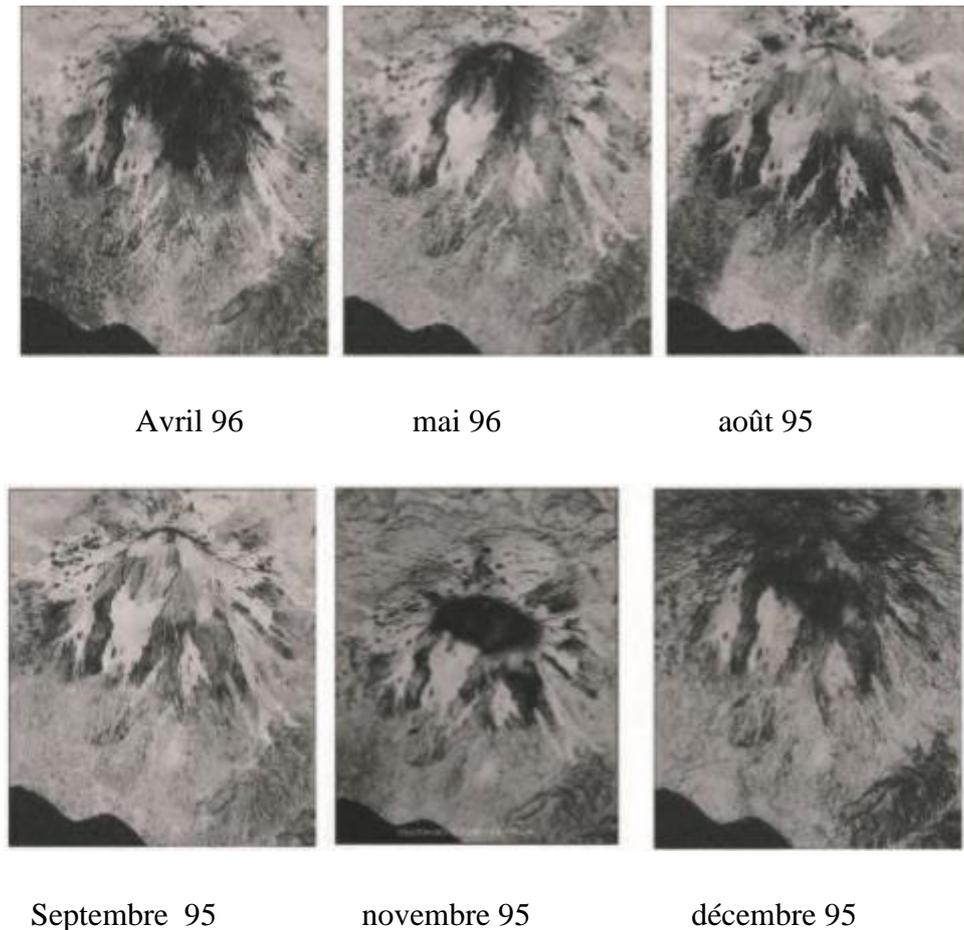


Figure 1.12: Cohérence en tandem de l'Etna à différentes saisons

## 6. Progrès dans le déroulement de la phase

L'un des problèmes les plus difficiles de l'interférométrie est l'extraction des phases absolues des valeurs enveloppées disponibles. En fait, pour estimer la topographie et le mouvement du terrain, nous avons besoin des phases absolues, alors que les données sont des différences de phase entre les deux images, dans leur intervalle principal  $\pm \pi$ . De plus, les phases enveloppées ne sont pas disponibles partout car nous pouvons avoir des pixels sans retour radar significatif. Et puis, même si les phases sont fiables, elles peuvent correspondre à des portions de la topographie sujettes à alias et à escale. Cela implique que, lors de l'utilisation d'une seule paire d'images, l'opération de déroulement de phase peut être soumise à des incertitudes qui ne peuvent être résolues, sauf si nous faisons des hypothèses, généralement statistiques, sur la structure de la topographie sous-jacente, ou si nous utilisons des informations supplémentaires. Dans la section sur le déroulement de phase multi-images, nous verrons que ce problème peut avoir une solution unique si plusieurs paires d'images avec des lignes de base différentes sont combinées. De toute évidence, cette solution n'est

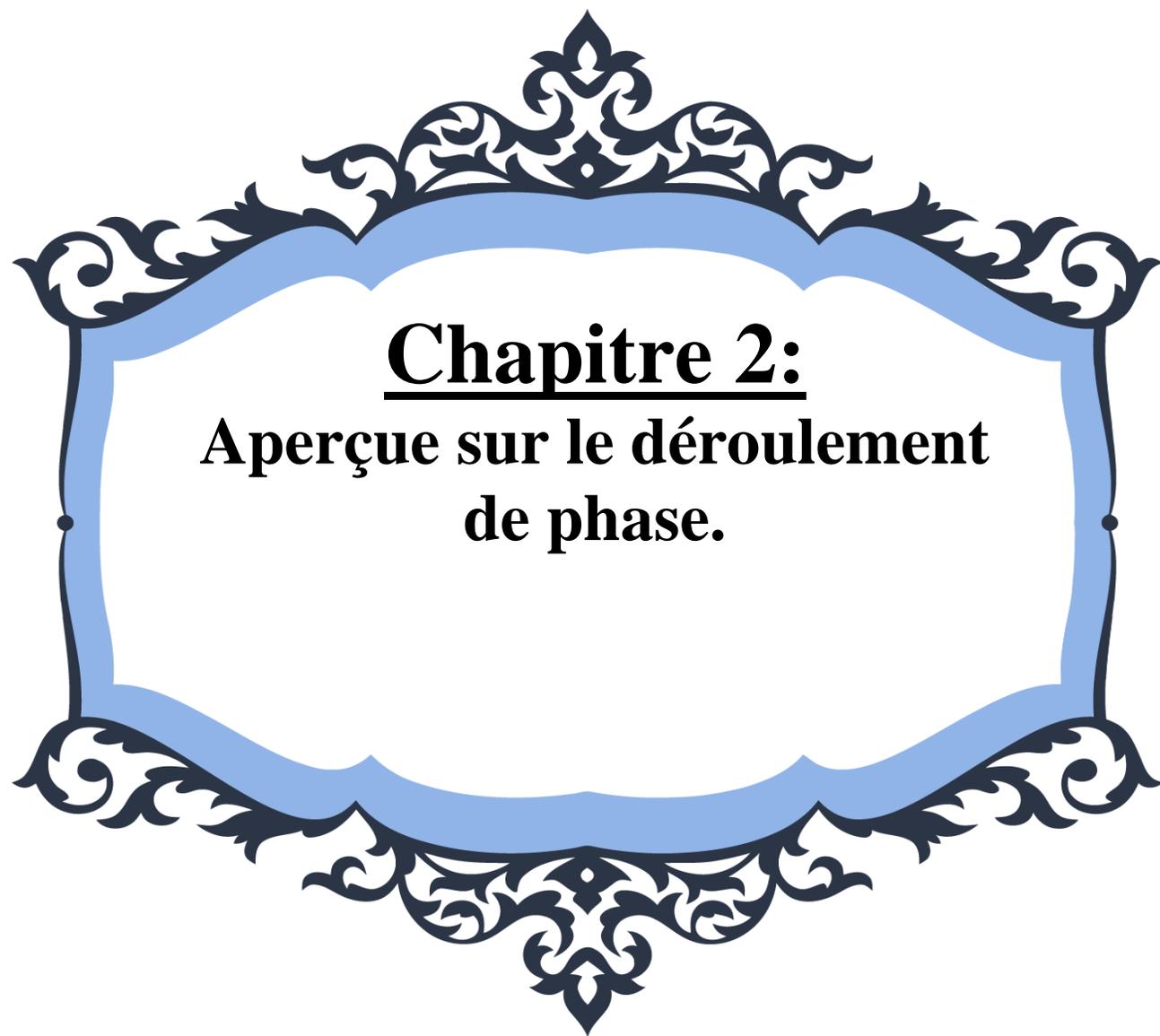
disponible que là où la cible n'a pas changé pendant toute la durée des différentes enquêtes ou si elle est vue simultanément avec plusieurs lignes de base et / ou avec plusieurs fréquences. Ensuite, aucune hypothèse sur la continuité de surface n'est nécessaire et le déroulement peut être effectué pixel par pixel. Dans cette section, nous aborderons le problème du déroulement de phase pour les paires d'images, en commençant par des cas simples (pas ou peu de bruit, pas de repliement) puis en se déplaçant vers des cas plus difficiles. La contribution de la topographie plate est censée avoir déjà été supprimée. Afin de dérouler la phase, nous mesurons d'abord la phase interférométrique pour tous les pixels et faisons une hypothèse initiale que les valeurs mesurées sont fiables. Ensuite, nous ajoutons à chaque valeur de phase de pixel le multiple entier de  $2\pi$  qui est nécessaire pour le déballer. Si nous adaptons ensuite les phases non enveloppées aux hauteurs, nous obtenons la topographie en coordonnées SAR. Toute affectation d'entiers est acceptable, mais la topographie peut alors varier considérablement d'un pixel à l'autre. En d'autres termes, il existe des topographies illimitées qui honorent les données.

## 6.1 Résidus et charges

Pour obtenir une solution unique à partir d'une seule paire d'images, en plus de supposer qu'il n'y a pas de bruit, nous devons en outre supposer que la surface initiale a été échantillonnée sans alias. Les différences de phase réelles entre les points de grille voisins sont alors inférieures à  $\pi$  ou, en termes de topographie, la différence d'altitude entre les points de grille voisins est inférieure à  $h_a/2$ . Cela pourrait être faux dans les régions montagneuses où une escale est présente dans les données SAR résultantes. Nous nous souvenons ici que nous pouvons (et nous devrions, comme nous le verrons dans les sections suivantes) toujours supprimer la topographie déjà connue, pour rendre les données aussi plates que possible. En d'autres termes, nous devrions compenser la pente moyenne locale du terrain en utilisant des informations a priori de la topographie, dérivées, par exemple, de levés à faible résolution. S'il n'y a pas de bruit et pas d'alias, alors il y a une vraie affectation de cycles à additionner aux phases. Les différences entre les phases non enveloppées des pixels voisins auront alors une amplitude inférieure à  $\pi$  et coïncideront avec les différences de phase enveloppées (WPD). Les WPD sont les différences de phase mesurées de deux points de grille voisins (donc dans l'intervalle  $\pm 2\pi$ ) reconditionnés en ajoutant  $\pm 2\pi$  (si nécessaire) afin qu'ils restent dans l'intervalle  $\pm \pi$ . A partir du WPD, nous pouvons, sans bruit ni alias, récupérer les valeurs non encapsulées.

## **7 Conclusion**

Malgré le traitement complexe et les limites pratiques de la technique, les données d'interférométrie SAR à répétition peuvent fournir un outil précieux pour la génération de DEM à faible coût sur une large gamme de surfaces terrestres. Les données ERS Tandem sont toujours affectées par la décorrélation temporelle et les perturbations atmosphériques, mais, chaque fois qu'une approche multi-lignes de base est possible (c'est-à-dire qu'un nombre suffisant d'interférogrammes de la zone peut être généré), les résultats finaux peuvent être fortement améliorés. Les problèmes de déroulement de phase et d'identification de point de rattachement pour un géocodage précis sont toujours des étapes fastidieuses, car ils nécessitent généralement une interaction de l'utilisateur. Avec le temps, les contraintes matérielles (en termes de puissance de calcul et d'exigences de mémoire) deviennent de moins en moins sévères et des algorithmes d'optimisation plus sophistiqués deviennent possibles, malgré le grand nombre de pixels d'image généralement impliqués. Nous nous attendons, dans les prochaines années, à une sorte de «standardisation» de la chaîne de traitement pour la reconstruction InSAR DEM, où les meilleurs algorithmes seront choisis comme outils de référence. Parallèlement, les données SRTM sont disponibles et peuvent être utilisées (au moins pour 80% de la masse terrestre [SRTM]) comme point de départ pour des analyses et des mises à jour plus précises.



**Chapitre 2:**  
**Aperçue sur le déroulement  
de phase.**

## 1- Introduction :

L'interférométrie par radar à synthèse d'ouverture (InSAR) est principalement utilisée dans les applications de télédétection et a créé une nouvelle classe de données radar qui a considérablement évolué au cours des deux dernières décennies. La plupart des applications InSAR (par exemple, la cartographie topographique et la surveillance des déformations) utilisent généralement une technique appelée déroulement de phase (PU). Dans ce chapitre, nous présentons un aperçu des techniques de PU dans le traitement du signal InSAR. Tout d'abord, nous passons en revue les méthodes de PU à base unique (SB) établies, puis nous décrivons les techniques et concepts innovants de PU liés à la PU multi Baseline (MB) et à la PU grande échelle (LS). En outre, nous examinons plusieurs exemples de traitement numérique de ces techniques de PU. Nous espérons que cet examen permettra de fournir des directives aux futurs chercheurs pour améliorer les développements algorithmiques du PU.

## 2 Déroulement de phase à base unique

Le problème PU de SB InSAR est un problème PU 2D, ce qui signifie que l'entrée du problème PU InSAR est une matrice de phase enveloppée 2D, appelée interférogramme aujourd'hui un domaine de recherche mature : les premières recherches sur le SB PU remontent aux années 1970 [1]. La figure 2.3 illustre les statistiques des publications dans les revues et les conférences sur la SB PU (extraites de Web of Science [2]). Comme le montre la figure 2.2, nous pouvons voir que, comme il s'agit d'un sujet de recherche relativement mature,

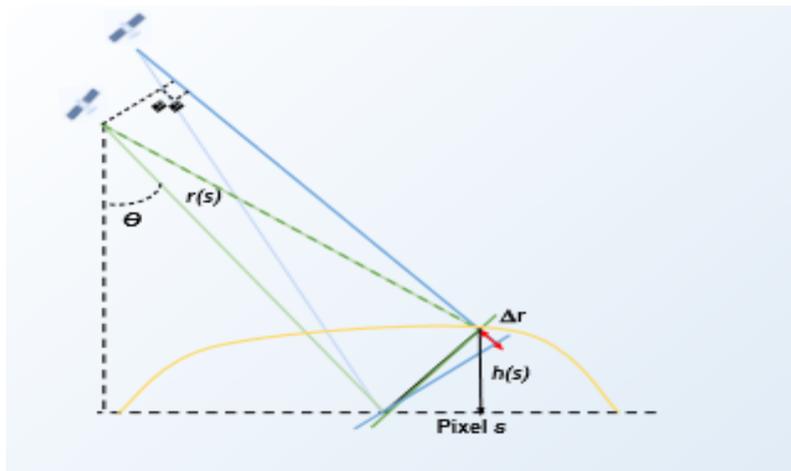
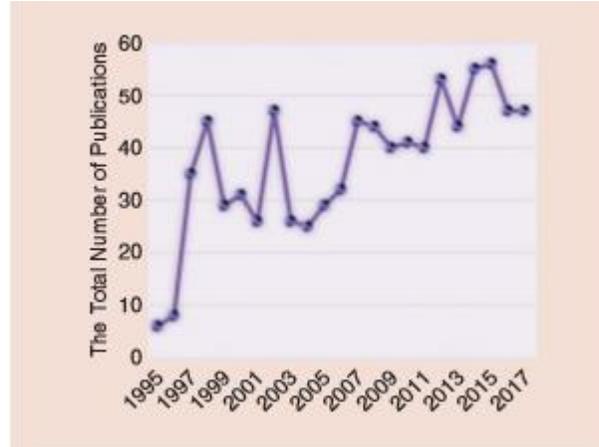


Figure 2.1 Le principe de fonctionnement d' InSAR

Le nombre de publications du SB PU n'a pas connu d'augmentation annuelle significative depuis 2012.



**Figure 2.2** Statistiques des publications SB PU de 1995 à 2017

Comme décrit dans la section précédente, presque tous les algorithmes SB PU utilisent l'hypothèse de continuité de phase pour trouver la solution PU unique. Itoh a d'abord proposé cette hypothèse dans le problème de PU unidimensionnel [3], donc l'hypothèse de continuité de phase est aussi appelée la condition Itoh. La condition Itoh exige que la différence de phase absolue entre deux pixels voisins soit inférieure à  $\pi$  [1]. Le but de la condition Itoh est essentiellement de demander que la zone imagée ait une continuité spatiale, c'est-à-dire que le taux d'échantillonnage des phases enveloppées dans la scène doit être suffisamment élevé. Si la condition d'Itoh peut s'appliquer partout, il n'y aura pas d'ambiguïté dans la différence de phase absolue entre deux pixels voisins, c'est-à-dire que le gradient de phase absolu peut être bien et véritablement estimé.

Le gradient de phase absolu entre pixels voisins peut être obtenu par

$$\Delta_{\Psi}(s, s-1) \begin{cases} \varphi(s) - \varphi(s-1) & |\varphi(s) - \varphi(s-1)| \leq \pi \\ \varphi(s) - \varphi(s-1) - 2\pi & \varphi(s) - \varphi(s-1) > \pi \\ \varphi(s) - \varphi(s-1) + 2\pi & \varphi(s) - \varphi(s-1) < -\pi \end{cases} \quad (2.1)$$

Où  $\Delta_{\Psi}(s, s-1)$  est le gradient de phase absolu estimé entre les pixels voisins  $s$  et le pixel  $s-1$ . La notation  $s$  et  $s-1$  est une description générale de la relation entre pixels voisins. Sur la base des informations relatives au gradient estimé, la phase absolue de chaque pixel peut être obtenue par un simple processus d'intégration avec un point de référence connu.

Habituellement, il existe deux directions de gradient (verticale et horizontale) pour le problème PU SB 2D, c'est-à-dire que le champ de gradient obtenu par (2.1) est le champ 2D. Dans cette condition, le chemin d'intégration pour chaque pixel n'est pas unique. La figure 2.4, par exemple, montre trois trajectoires d'intégration différentes possibles du point étoile au point circulaire. Cependant, la condition Itoh garantit que le champ de gradient obtenu par (2.1) est un champ irrotationnel. En d'autres termes, le résultat de l'intégration sera indépendant de la trajectoire d'intégration. Par conséquent, en théorie, la condition Itoh permet d'obtenir de manière unique et correcte la phase absolue de chaque pixel par un simple processus d'intégration de type flood-fille.

Malheureusement, le bruit du système et les changements ou déformations topographiques brusques entraînent fréquemment l'échec de la condition Itoh dans la réalité. Dans ce cas, il est difficile de garantir l'existence d'une solution PU dont la différence de phase absolue entre chaque deux pixel voisin est exactement égale à celle estimée à partir de (2.1). Dans ce cas, le problème du PU devient difficile. C'est ce qui motive les chercheurs en PU à concevoir et à inventer d'autres méthodes de PU SB. Les méthodes SB PU existantes peuvent être divisées en trois groupes principaux : celles qui suivent le cheminement, celles qui sont basées sur l'optimisation, et des méthodes intégrées de dé bruitage et de déroulement. Avant d'examiner en détail les méthodes classiques de PU SB, nous présentons tout d'abord deux informations auxiliaires largement utilisées (c'est-à-dire la carte de qualité et les résidus) pour le processus de PU.

## Carte de qualité et résidus

### Qualité map

La figure 2.3(a) illustre deux schémas contrastifs clairs, à savoir la frange de phase et la zone bruyante. La frange de phase, qui est indicative des informations sur le terrain, est analogue à une carte en courbes de niveau. La zone bruyante, dans laquelle il n'y a pas d'informations utiles sur la phase enveloppée, pourrait être générée par des facteurs de dé corrélation tels que le changement d'objet au sol ou l'ombre du radar et le chevauchement.

Pour évaluer la qualité de chaque pixel, puis guider et aider les algorithmes du PU, les chercheurs du PU ont proposé la carte de qualité. Habituellement, la valeur du pixel dans la carte de qualité est comprise entre 0 (le pire) et 1 (le meilleur). De nombreuses informations peuvent être utilisées comme carte de qualité [1], [4] – [5], par exemple, la cohérence, la matrice de co-occurrence de niveau de gris et la variance de la dérivée de phase. En plus de ces cartes de qualité, il existe une carte de qualité spéciale, c'est-à-dire un masque, dont la valeur des pixels ne peut être que de 0 ou 1. Le masque aide à marquer les régions réellement bruyantes, qui seront pondérées à zéro ou ignorées pendant le processus de PU. Le masquage des régions bruyantes dans un interférogramme est un bon moyen d'accélérer un algorithme de PU et d'éviter l'effet négatif de la région bruyante sur la précision du PU. Le masque peut être généré en appliquant un seuil à la carte de qualité [1] ou à la densité des résidus (la définition formelle des résidus est introduite dans la sous-section "Résidus") [6].

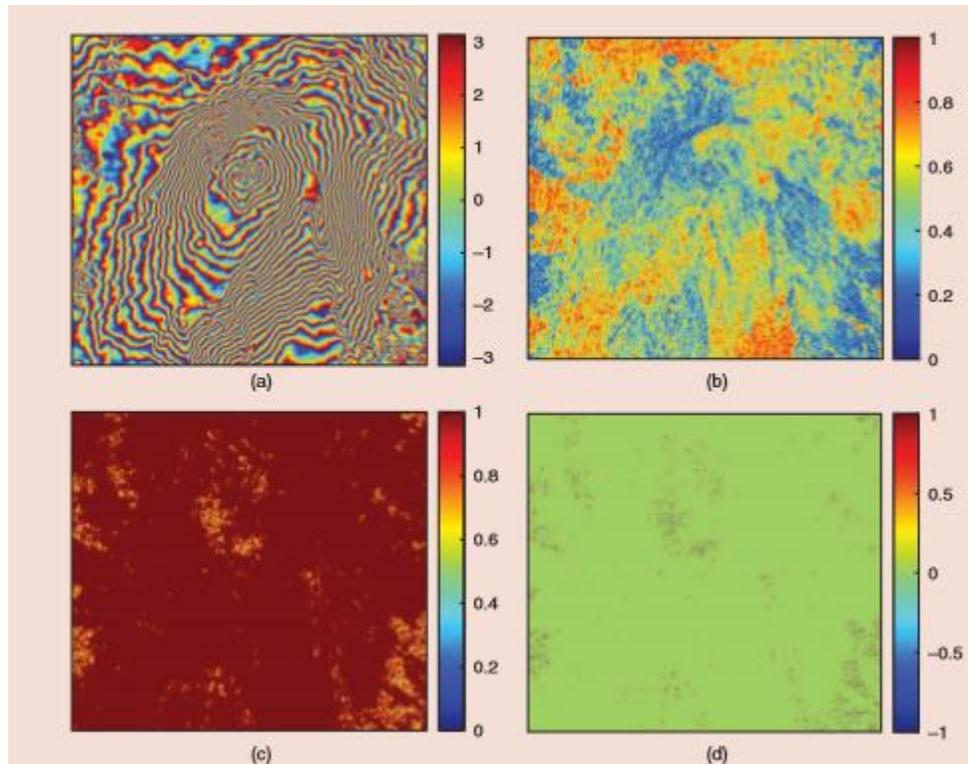
La figure 2.3(b) est la cohérence de la figure 2.3(a), et la figure 2.3(c) est la carte de qualité basée sur la variance de la dérivée de phase de la figure 2.3(a). La variance de la dérivée de phase est définie par

$$\mathcal{V}(p, q) = \frac{\sqrt{\sum(\Delta_{i,j}^x - \bar{\Delta}_{p,q}^x)^2 + \sum(\Delta_{i,j}^y - \bar{\Delta}_{p,q}^y)^2}}{\mathcal{N}^2} \quad (2.2)$$

### Résidu

Comme décrit précédemment, le SB PU peut être résolu par un simple processus d'intégration. Malheureusement, les résultats de la PU dépendent généralement du chemin d'intégration. L'existence d'un

résidu est la raison pour laquelle la phase enveloppée contient généralement cette propriété indésirable qui rend la PU dépendante du chemin. Le résidu [1], [7], [8] est un concept très important dans la PU SB, comme l'indique l'interférogramme d'entrée. En 1987, la notion de l'incohérence des phases a été introduite pour la première fois dans [9]. Plus tard, Goldstein et al. ont d'abord utilisé le terme résidu pour désigner l'incohérence de phase [10]. Le résidu peut être détecté par la valeur d'intégration de boucle des gradients de phase estimés à partir de (2.1) de chaque  $2 \times 2$  pixel voisin. Sur la base de (2.1), nous savons qu'il n'y a que trois options pour cette valeur d'intégration de boucle, c'est-à-dire 0 et  $\pm 2\pi$ . ! Si la valeur d'intégration en boucle correspondante de quatre pixels voisins est  $2\pi$ , elle est appelée résidu positif; si  $-2\pi$ , il est appelé résidu négatif. Le théorème du résidu, qui découle de la fonction complexe, est que l'intégrale à chemin fermé est égale à la somme des polarités des résidus enfermés. Par conséquent, lorsque l'intégrale à chemin fermé est nulle, le résultat de l'intégration sera indépendant du chemin d'intégration. La principale fonction de la contribution du théorème des résidus est qu'il nous donne une et condition nécessaire pour un déroulement cohérent. La figure 2.3(d) montre la répartition des résidus de la figure 2.3(a) (4 790 résidus), où la valeur -1 indique le résidu négatif et la valeur 1 indique le résidu positif.



**Figure 2.3** (a) Un interférogramme réaliste, (b) la cohérence de (a), (c) la variance de la dérivée de phase de (a), et (d) la distribution des résidus de (a).

Dans les sections suivantes, trois groupes de SB PU classiques Les méthodes seront examinées, avec des exemples d'application. Le site des organigrammes de traitement pour ces trois groupes de méthodes SB PU sont résumées dans la figure 2. 5. La figure 5 montre que toutes ces méthodes SB PU reposent sur la condition Itoh pour d'estimer le gradient de phase absolu à travers (2.1). En raison de la limitation de la condition Itoh, les méthodes SB PU préfèrent être utilisées sur les zones ne présentant pas de changements de phase violents.

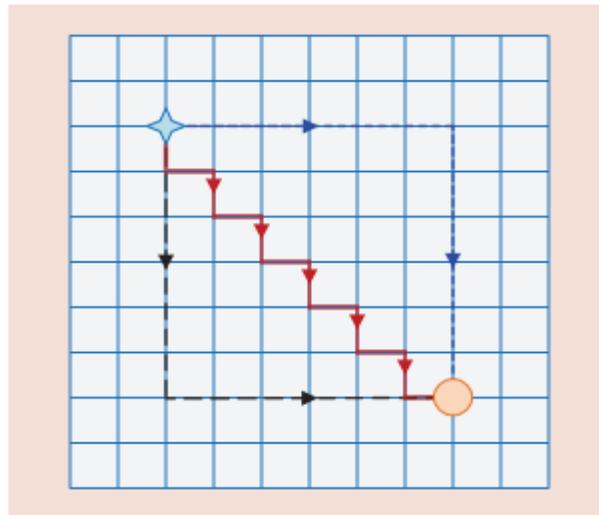


Figure 2.4 Un exemple auxiliaire de différentes voies d'intégration

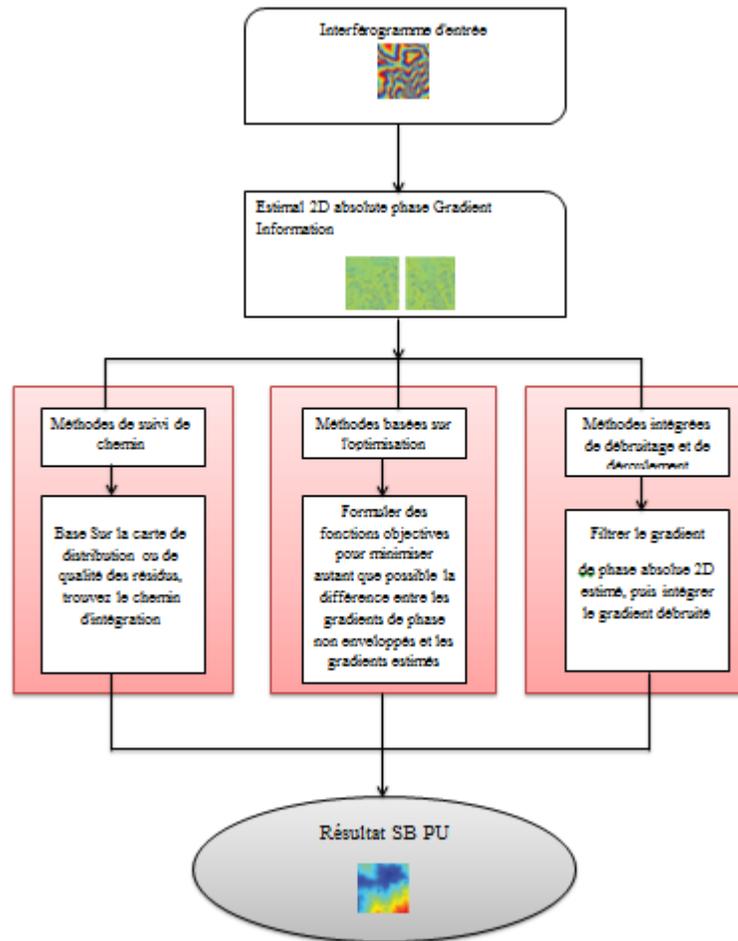


Figure 2.5. Le débit charts de traitement des méthodes SB PU.

### 3 Les méthodes du suivi de cheminement

Le principe de base des méthodes de suivi du cheminement est de choisir le un chemin d'intégration fiable qui permet d'obtenir un résultat PU correct. Dans les méthodes de suivi du parcours, le parcours d'intégration peut être déterminé par la distribution des résidus ou la carte de qualité en général. Les méthodes de suivi du cheminement sont des méthodes  $2\pi$ -true PU.

En d'autres termes, les méthodes de suivi du cheminement peuvent garantir congruence entre les franges d'entrée et les franges de phase réemballées du résultat du PU (la soi-disant congruence marginale, en bref). Pour éviter la propagation de l'erreur de gradient de phase discontinu de la région bruyante à la région de haute qualité d'un intrant l'interférogramme, le point de vue traditionnel de l'UP ne soutient que la condition nécessaire à la crédibilité de l'Union européenne. Résultat de l'UA [1], [11]. Habituellement, les complexités du temps et de l'espace des méthodes de suivi du cheminement sont faibles, et la précision du PU dans les régions de haute qualité des méthodes de suivi des sentiers peuvent être confiance. Dans les sections suivantes, deux types de cheminement classique des méthodes seront introduites.

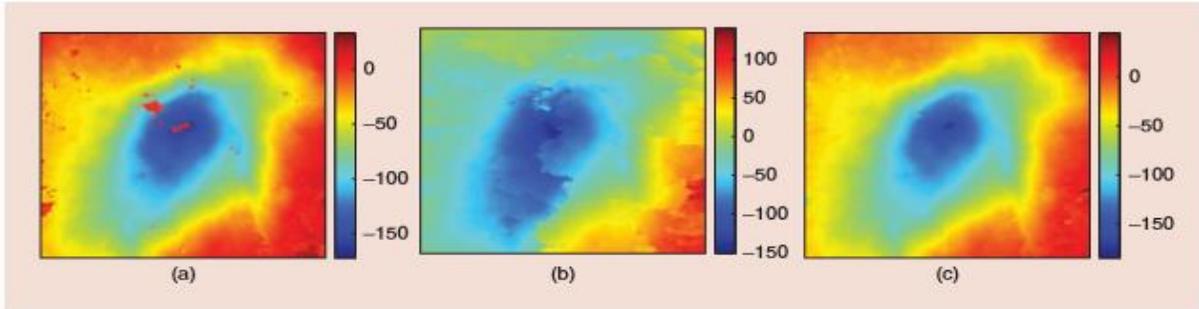
#### 3.1 Les méthodes basées sur la théorie des résidus

Les méthodes fondées sur la théorie des résidus permettent de faire le bilan des résidus en en utilisant la coupe de la branche. Le résultat du PU est indépendant de la d'intégration tant que la voie de l'intégration ne de traverser les branches coupées (BC) [1]. Méthodes basées sur la théorie des résidus peuvent être résumés sous forme de critères de bilan des résidus [10], [12]. L'algorithme de coupe de branches de Goldstein [10] est le plus représentatif des méthodes basées sur la théorie des résidus, reliant les résidus positifs et négatifs voisins de manière à que les résidus sont équilibrés. GAMMA [13] et ISCE [14] Le logiciel de traitement InSAR permet de couper les branches algorithme. Il est intéressant de mentionner que la théorie des graphes La connaissance est également largement utilisée pour construire des coupes de branches. A la méthode PU basée sur l'arbre à portée minimale, par exemple, a été proposées dans [1], [3] et [4]. La figure2. 6 (a) montre le résultat PU de la figure 2.2 (a) obtenu à partir de la branche coupée (BC) de Goldstein.

#### 3.2 Méthodes guidées par la qualité

Les méthodes guidées par la qualité supposent que les pixels à haute sont moins susceptibles de provoquer des erreurs d'UP [1]. Guidé par la qualité les méthodes tentent toujours de faire d'abord le chemin de l'intégration qui visite le pixel de plus haute qualité fourni par la qualité carte. Ainsi, la performance des méthodes guidées par la qualité et dépend fortement de la qualité de la carte utilisée. La figure2. 6(b) montre le résultat de l'UQA de la figure2. 2(a) en utilisant la carte de qualité illustrée à la figure2. 2(b), et La figure2. 6(c) est générée à l'aide de la carte de qualité illustrée dans la figure2. 2(c). En comparant la figure 2.6(b) et (c), on peut clairement voir l'effet des différentes cartes de qualité. Il existe de nombreuses cartes de qualité

méthodes [17] à [18]. La perspective acceptée est que les méthodes guidées par la qualité offrent un compromis efficace entre la durée de fonctionnement et la précision du PU.



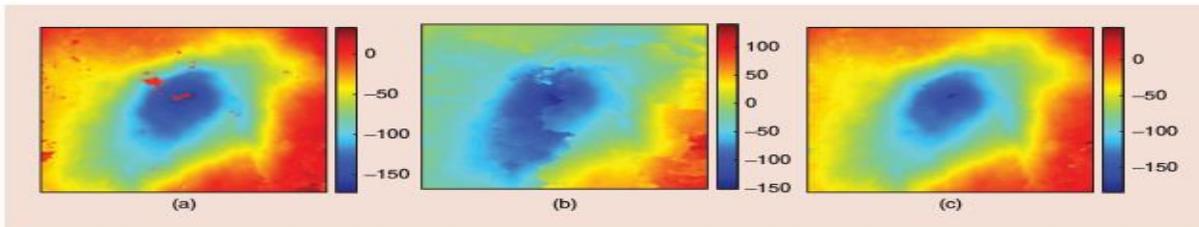
**Figure2 .6.** (a) Résultat PU de la méthode de la coupe en branche. (b) Le résultat PU de la méthode guidée par la qualité en utilisant la carte de qualité présentée à la figure2. 2 (b). (c) Le résultat PU de la méthode guidée par la qualité en utilisant la carte de qualité présentée à la figure2. 2 (c).

### 3.3 Les méthodes basées sur l'optimisation

Les méthodes basées sur l'optimisation utilisent différents objectifs fonctions pour minimiser, autant que possible, la différence entre les gradients de phase non enveloppés et les gradients obtenus par (1) [6], [19] - [20]. La généralisation du modèle mathématique de la méthode PU basée sur l'optimisation est indiquée comme suit :

$$arg \min_{\psi(s)} \sum_{(s,s-1)} f \left( \psi(s) - \psi(s-1) - \hat{\Delta}_{\psi}(s, s-1) \right) \quad (2.3)$$

Où  $\psi(s)$  est la variable de décision et  $f(-)$  est la variable généralisée fonction objective. Généralement, le temps et l'espace Les complexités d'une méthode basée sur l'optimisation habile sont élevés, mais son résultat global en PU est robuste. Dans les sous-sections suivantes, nous examinons deux types d'optimisation représentative des méthodes basées sur les résultats.



**Figure2.7** (a) Résultat PU de la méthode de la coupe en branche. (b) Le résultat PU de la méthode guidée par la qualité en utilisant la carte de qualité présentée à la figure 2.2 (b). (c) Le résultat PU de la méthode guidée par la qualité en utilisant la carte de qualité présentée à la figure 2.2 (c).

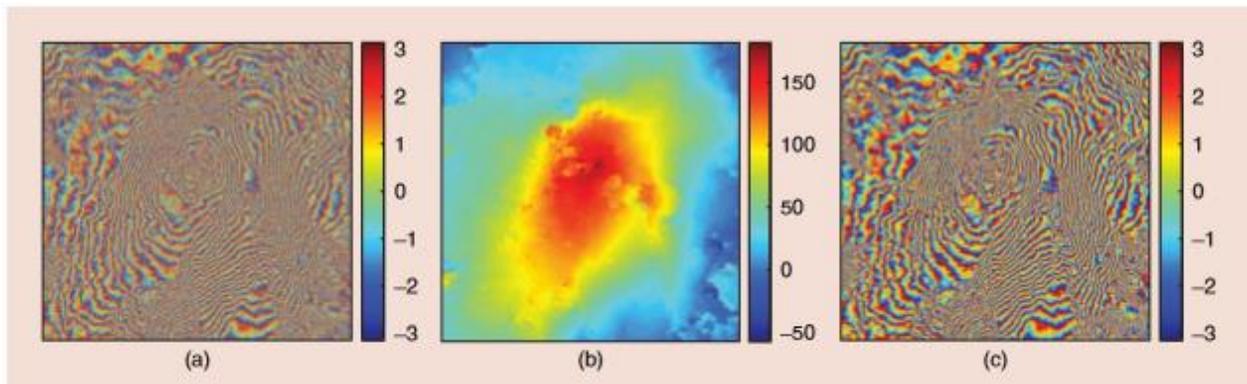
#### 3.3.1 Méthodes basés sur des statistiques

Les méthodes basées sur des statistiques obtiennent le résultat PU en maximisant la probabilité conditionnelle du résultat PU sous la phase enveloppée donnée. La formulation mathématique généralisée des méthodes statistiques est

$$arg. \quad \max_{\psi(s)} \prod g(\psi(s)|\varphi(s)) \quad (2.4)$$

Où  $g(\cdot)$  est la fonction de distribution de probabilité généralisée sur  $\psi(s)$  et  $\varphi(s)$ .

L'avantage significatif de ces méthodes est que la formulation représentée en (4) peut fusionner efficacement de nombreux types d'informations préalables PU, par exemple, l'intensité de l'image SAR ou la cohérence interférogramme. Il convient de mentionner que la méthode SNAPHU proposée dans [21] est l'une des méthodes statistiques les plus représentatives; il utilise un modèle de flux de réseau à coût statistique pour calculer la solution PU la plus probable. Certains logiciels InSAR pratiques (par exemple, ISCE, SNAP [22] et StaMPS [23]) utilisent SNAPHU pour leur étape de traitement PU.



**Figure 2.8.** (a) Un interférogramme non filtré de la figure 2. 2 (a). (b) Le résultat PU de la méthode PU basée sur un filtre de Kalman. (c) Les franges de phase reconditionnées de (b).

### a) Méthodes intégrées denoising et de déroulement

Dans le flux de traitement InSAR traditionnel, le débruitage de phase et le déroulement sont deux étapes distinctes (c'est-à-dire le débruitage d'abord puis le déroulement). Cependant, les chercheurs ont remarqué que ces étapes distinctes introduisent inévitablement des erreurs de traitement supplémentaires car chaque étape a une approximation et une présomption d'algorithme différentes. En améliorant séparément les algorithmes de débruitage et de déroulement, l'étape PU souffrira inévitablement des erreurs d'algorithme de l'étape de débruitage.

Pour surmonter ce problème, ces dernières années, certaines méthodes intégrées de débruitage et de déroulement [11], [24] - [25], dans lesquelles PU fonctionne simultanément avec le filtrage du bruit de phase, ont suscité un intérêt croissant. Les méthodes intégrées de débruitage et de déroulement tentent de récupérer les informations des pixels bruyants. Cependant, à l'heure actuelle, les méthodes intégrées de débruitage et de déroulement ne peuvent pas complètement remplacer le cadre de traitement en cascade traditionnel. Les méthodes de débruitage et de déroulement intégrées préfèrent toujours l'interférogramme d'entrée lorsqu'il est légèrement filtré. De plus, leur temps d'exécution est relativement élevé.

La figure 2.8 (a) est l'interférogramme non filtré de la figure 2.2 (a), la figure 2.8 (b) est le résultat PU de la figure 2.8 (a) obtenu par la méthode PU basée sur un filtre de Kalman [26] - [27], et La figure 2.8 (c) illustre les franges de phase reconditionnées de la figure 2.8 (b). En comparant la figure 2.8 (a) et (c), nous pouvons voir la fonctionnalité de filtrage des méthodes intégrées de débruitage et de déroulement.

#### 4 Examen du déroulement de phase multi Baseline

MB PU est une technique passionnante et croissante dans InSAR. La figure 2.9 illustre les statistiques des publications de revues et de conférences sur le MB PU (de Web of Science). Comme le montre la figure 2.9, les travaux sur le MB PU ont décollé ces dernières années: l'augmentation significative du nombre des chapitres révèle la montée rapide de l'intérêt pour le MB PU. Contrairement au SB PU, le MB PU est bien posé mais pas mal posé. Parce que MB PU peut profiter de la diversité de base pour augmenter de manière significative les intervalles d'ambiguïté des phases interférométriques, il surmonte complètement la limitation de la condition Itoh. Le MB PU n'a pas besoin d'un taux d'échantillonnage spatial élevé, mais il est basé sur des observations répétées avec différents paramètres du système InSAR. Pour simplifier, nous utiliserons un système InSAR à double ligne de base (DB) comme exemple pour introduire le principe du MB PU.

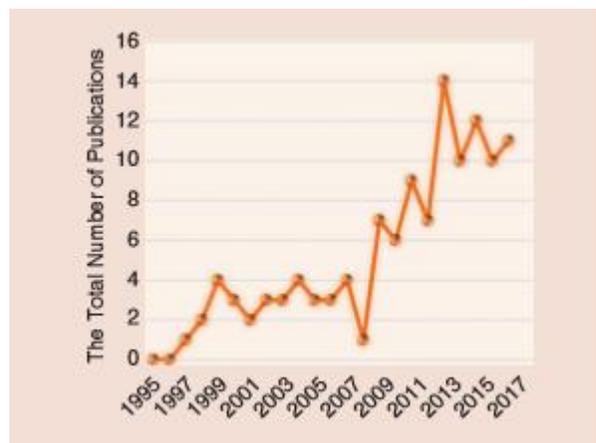


Figure 2.9. Statistiques des publications MB PU de 1995 à 2017.

Contrairement au SB PU, le MB PU est bien posé mais pas mal posé. Parce que MB PU peut profiter de la diversité de base pour augmenter de manière significative les intervalles d'ambiguïté des phases interférométriques, il surmonte complètement la limitation de la condition Itoh. Le MB PU n'a pas besoin d'un taux d'échantillonnage spatial élevé, mais il est basé sur des observations

répétées avec différents paramètres du système InSAR. Pour simplifier, nous utiliserons un système InSAR à double ligne de base (DB) comme exemple pour introduire le principe du MB PU.

$$B_2 \cdot (\varphi_1(s) + 2k_1(s)\pi) = B_1 \cdot (\varphi_2(s) + 2k_2(s)\pi) \text{ (flattened)} \quad (2.5)$$

Où,  $B_i (i=1, 2)$  est la longueur de ligne de base normale du  $i$ ème interférogramme, et  $k_i(s) (i=1, 2)$  et  $\varphi_i(s) (i=1, 2)$  sont le nombre d'ambiguïté et la phase enveloppée du pixel  $s$  dans le  $i$ ème interférogramme, respectivement. Dans (2.5), le terme aplati indique que les phases terre plate des phases enveloppées ont été supprimées. Théoriquement, nous ne pouvons pas résoudre  $k_1(s)$  et  $k_2(s)$  simultanément en utilisant seulement (2.5) (une équation ne peut pas résoudre deux inconnues). Cependant, parce que  $k_1(s)$  et  $k_2(s)$  sont des entiers, si nous le permettons  $C=B_2 \cdot (\varphi_1(s) + 2k_1(s)\pi)$ , alors (5) peut être transformé en

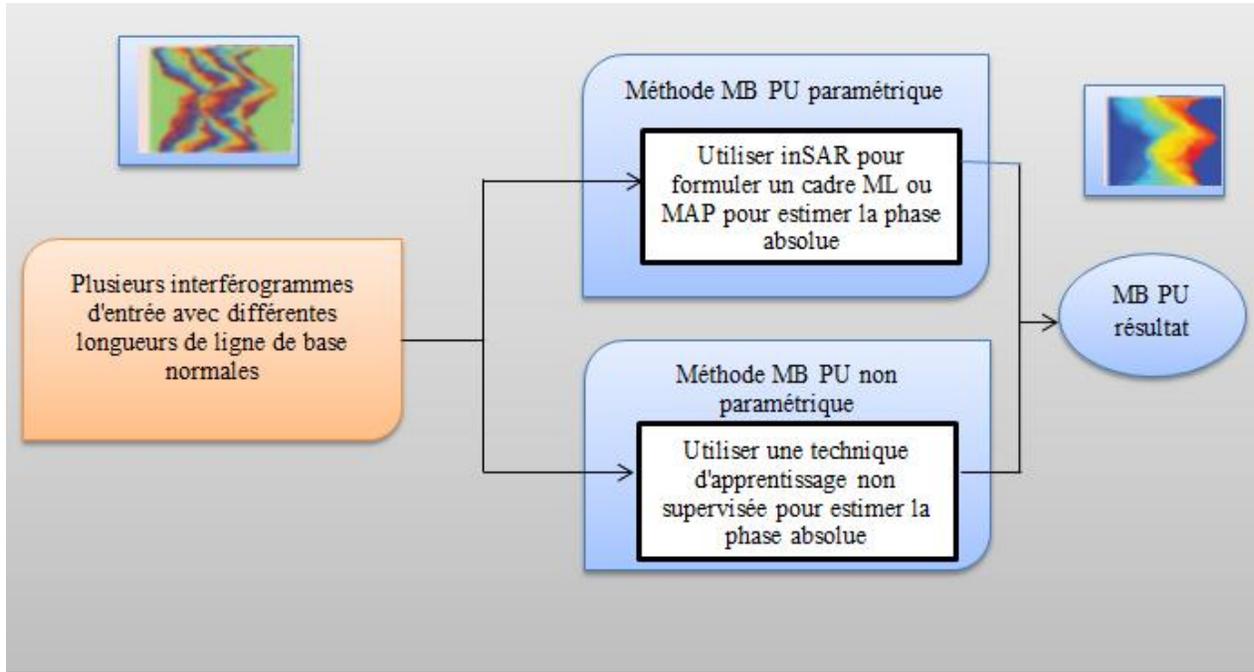
$$\begin{cases} \frac{C}{2\pi} = B_2 \cdot k_1(s) + \frac{B_2 \varphi_1(s)}{2\pi} \\ \frac{C}{2\pi} = B_1 \cdot k_2(s) + \frac{B_1 \varphi_2(s)}{2\pi} \end{cases} \quad (2.6)$$

Dans cette condition,  $B_1$  et  $B_2$  sont de vrais modules, et  $\frac{B_2 \varphi_1(s)}{2\pi}$  et  $\frac{B_1 \varphi_2(s)}{2\pi}$  sont de vrais restes.

S'il y a un facteur de normalisation  $k_1$ , alors il fait  $\Gamma_i = \frac{B_i}{k}$  coprime.

Selon le théorème du reste chinois (CRT), nous savons que  $C/2\pi$  dans (2.6) peut être obtenu uniquement dans l'intervalle de 0 à  $k\Gamma_1\Gamma_2$  [29], [30]. Alors,  $k_i(s) (i=1, 2)$  peut être résolu à partir de (2.6). Nous pouvons voir que certaines combinaisons spéciales de  $B_i (i=1, 2)$  nous permettent de résoudre,  $k_i (i=1, 2)$  en utilisant juste (2.5) [29], [31]. Cependant, le tube cathodique est trop sensible au biais de mesure pour être utilisé directement [31]. Le biais de mesure pourrait être causé par une déformation de surface, un artefact atmosphérique ou un bruit de phase. Pour surmonter ce problème, une variété de méthodes de MB PU sont proposées.

Les méthodes MB PU récentes peuvent être divisées en deux groupes principaux: les méthodes paramétriques et non paramétriques. Les organigrammes de traitement de ces deux groupes de MB PU Les méthodes MB PU récentes peuvent être divisés en deux groupes principaux: les méthodes paramétriques et non paramétriques. Les organigrammes de traitement de ces deux groupes de MB PU, Les méthodes sont résumées dans la figure2. 10.



**Figure 2.10.** Organigrammes de traitement des méthodes MB PU. PDF: fonction de densité de probabilité.

D'après la figure 2. 10, nous pouvons voir que les idées principales de ces deux groupes de méthodes MB PU dérivent toutes deux de l'apprentissage automatique. Les méthodes du premier groupe utilisent la fonction de densité de probabilité InSAR pour formuler un cadre statistique utilisant des critères de maximum de vraisemblance (ML) [32] - [33] ou de maximum a posteriori (MAP) [34] - [35] pour estimer le Résultat PU.

Baseline et al. [35] fournissent un chapitre d'enquête sur les méthodes MB basées sur ML et MAP. Une comparaison de la précision de l'estimation de phase entre les méthodes MB basées sur ML et MAP a été analysée dans [37]. Dans [38], les performances PU de la méthode ML MB ont été évaluées en les comparant aux résultats basés sur un algorithme grossier à fin [39]. L'équation (2.7), présentée dans l'encadré en bas de la page, est une fonction de vraisemblance courante utilisée pour concevoir la méthode MB PU paramétrique. Dans (2.7),  $\gamma_i(s)$  est la valeur de cohérence du pixel  $s$  dans le  $i$ ème interférogramme.

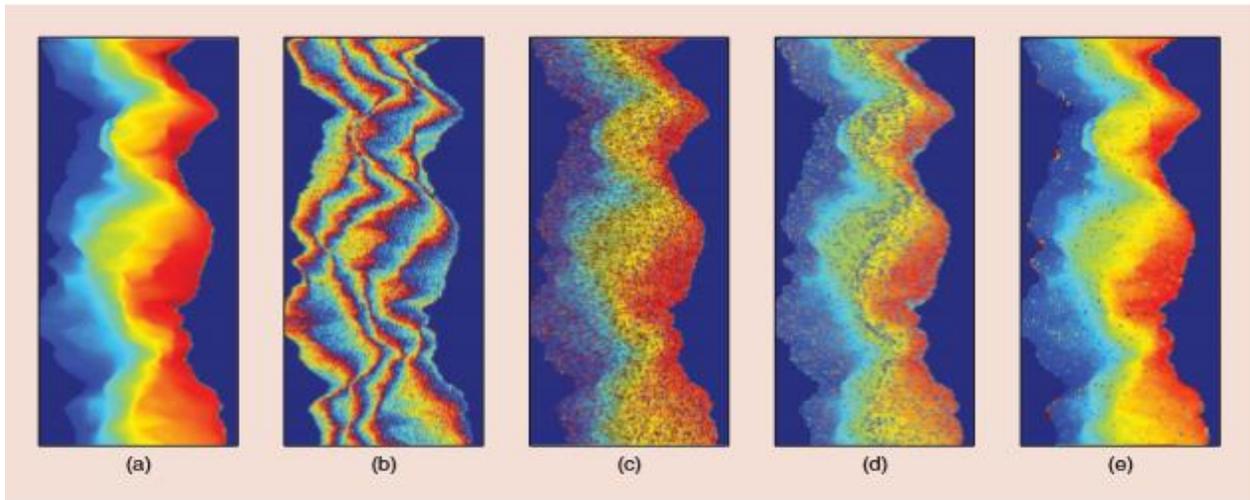
$$\rho(\varphi_i(s)|h(s)) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1 - \gamma_i(s)^2}{1 - \gamma_i(s)^2 \cos^2(\varphi_i(s) - \frac{4\pi B_i}{\lambda r(s) \sin \theta} h(s))} \quad (2.7)$$

$$\cdot x \left( 1 + \frac{\gamma_i(s) \cos(\varphi_i(s) - \frac{4\pi B_i}{\lambda r(s) \sin \theta} h(s)) \cos^{-1}(-\gamma_i(s) \cos(\varphi_i(s) - \frac{4\pi B_i}{\lambda r(s) \sin \theta} h(s)))}{1 - \gamma_i(s)^2 \cos^2(\varphi_i(s) - \frac{4\pi B_i}{\lambda r(s) \sin \theta} h(s))} \right)$$

Les méthodes du deuxième groupe traduisent le problème de l'unité centrale MB en un problème d'apprentissage non supervisé; ensuite, les techniques d'analyse en grappes (CA) peuvent être utilisées pour estimer le résultat PU groupe par groupe [31], [40], [41]. L'idée de la méthode MB non paramétrique est discutée plus loin en détail. Si nous transformons (2.5) en une équation linéaire avec  $k_2(s)$  traitée comme variable dépendante et  $k_1(s)$  comme variable indépendante, nous aurons

$$k_2(s) = \frac{B_2}{B_1} \cdot k_1(s) + \frac{B_2\varphi_1(s) - B_1\varphi_2(s)}{2\pi B_1} \quad (2.8)$$

La pente de (2.8) est une constante (c.-à-d.  $\frac{B_2}{B_1}$ ), donc tous les pixels ayant le même vecteur d'ambiguïté (c.-à-d.  $[k_1(s), k_2(s)]$ ) auront une ordonnée à l'origine identique, c.-à-d.  $\frac{B_2\varphi_1(s) - B_1\varphi_2(s)}{2\pi B_1}$ . En utilisant le motif d'interception, tous les pixels peuvent être regroupés en groupes; ensuite, les vecteurs d'ambiguïté de tous les pixels peuvent être estimés groupe par groupe [31].



**Figure 2.11.** (a) Un profil de référence. (b) Un interférogamme simulé avec la ligne de base la plus longue. (c) Reconstruction obtenue par la méthode ML. (d) Reconstruction obtenue par la méthode CA. (e) Reconstruction obtenue par la méthode MAP [30].

Outre ces méthodes, la méthode de projection et la méthode de combinaison linéaire ont été proposées dans [29]. Les auteurs de [30] ont proposé un algorithme amélioré basé sur un tube cathodique pour améliorer la robustesse au bruit de la méthode CRT traditionnelle. Le critère de programmation de la norme  $L^\infty$  a également été appliqué pour le MB PU dans [42]. La figure 2.11 montre une comparaison entre les résultats PU des algorithmes MB basés sur ML, MAP et CA sur un ensemble de données simulées de base. Les erreurs quadratiques normalisées de la figure 11 (c) - (e) sont respectivement de 2.28, 0.146 et 0.062. Sur la base de la discussion précédente, il peut sembler que les bases mathématiques des PU SB et MB semblent vivre dans deux mondes

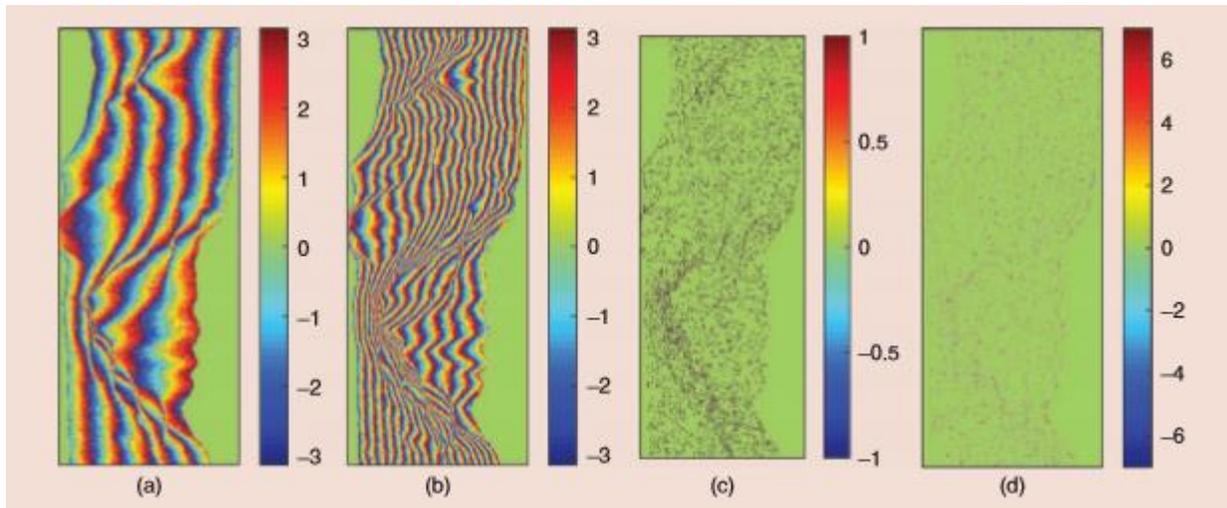
différents. Cependant, il convient de mentionner que la méthode MB PU basée sur la programmation en deux étapes (TSPA) proposée dans [28] établit un lien entre SB et MB PU. Dans la première étape, selon la formulation du CRT, le TSPA estime la différence de nombre d'ambiguïté entre les pixels voisins en utilisant plusieurs interférogrammes avec différentes longueurs de ligne de base normales, c'est-à-dire,

$$B_2 \cdot (\Delta_{\varphi_1}(s, s-1) + 2\Delta_{k_1}(s, s-1)\pi) = 1 \cdot (\Delta_{\varphi_2}(s, s-1) + 2\Delta_{k_2}(s, s-1)\pi) \quad (2.9)$$

Où  $\Delta_{\varphi_1}(s, s-1) = \varphi_1(s) - \varphi_1(s-1)$  ( $i = 1, 2$ ) et  $\Delta_{k_i}(s, s-1) = k_i(s) - k_i(s-1)$  ( $i = 1, 2$ )

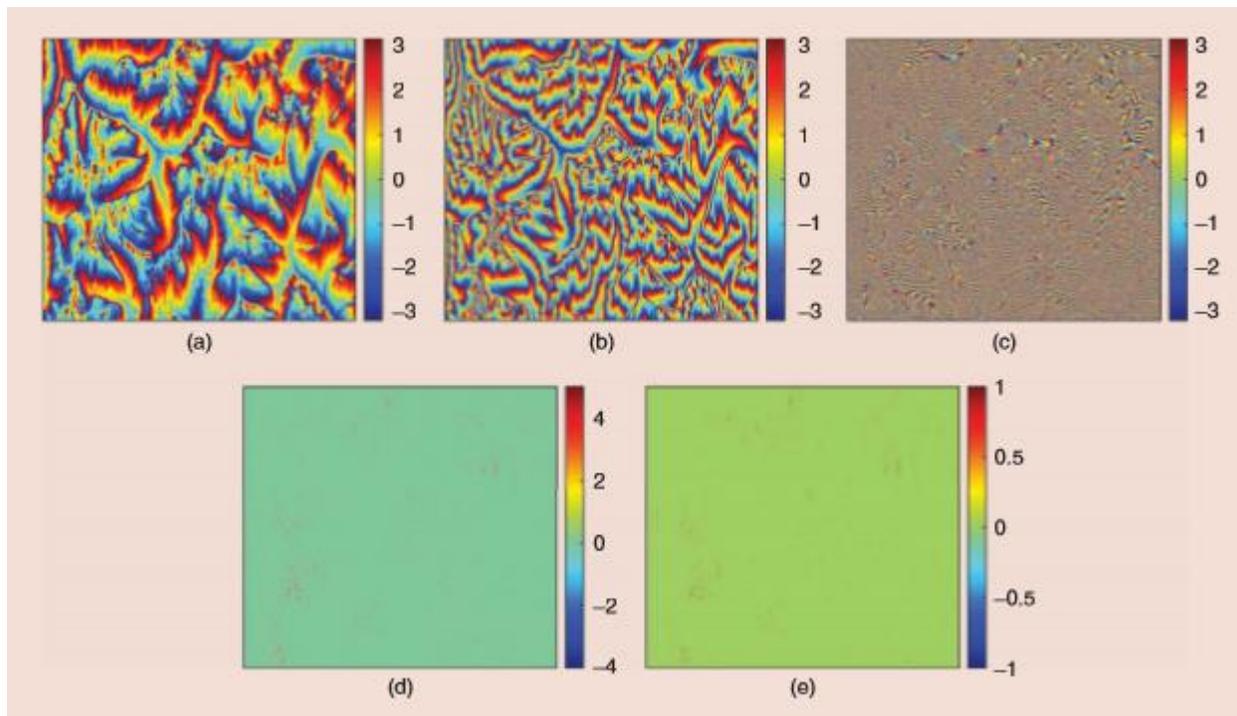
Dans (9), les seules inconnues sont  $\Delta_{k_1}(s, s-1)$  ( $i = 1, 2$ ), qui sont aussi des entiers. Dans cette condition, nous pouvons utiliser la même technique utilisée pour résoudre (2.5) pour résoudre (2.9), car (2.5) à la même condition mathématique que (2.9). Ensuite, nous pouvons calculer les résidus MB (comme décrit, le résidu est la valeur d'intégration de boucle des gradients de tout pixel voisin de  $2 \times 2$ ) en utilisant les solutions de (2.9).

Dans le SB PU, en raison de la contrainte de la condition Itoh, la polarité d'un résidu ne peut être que de  $\pm 2\pi$ . Néanmoins, dans le cas MB, la polarité d'un résidu peut être  $\pm 2\pi$  (n pourrait être n'importe quel entier positif). Dans cette condition (à l'exception de la plage de valeurs de la polarité des résidus), la situation à laquelle nous sommes confrontés est presque identique au problème SB PU. Par conséquent, nous pouvons emprunter certaines connaissances matures du domaine SB PU pour équilibrer les résidus MB. En d'autres termes, TSPA ouvre la porte à la transplantation de la plupart des méthodes SB PU dans le domaine MB. La figure 2.12 montre la différence entre les résidus SB et MB sur un boîtier DB.



**Figure12.** (a) Un interférogamme simulé avec une ligne de base normale courte. (b) Un interférogamme simulé avec une longue ligne de base normale. (c) La distribution des résidus SB de (b). (d) La distribution résiduelle MB de (b) [99].

Les figures 2.12 (a) et (b) sont deux interférogammes avec différentes longueurs de ligne de base normales. Sur la figure 2.12 (c) et (d), la valeur de chaque pixel représente la valeur  $n$  du résidu correspondant. En comparant la figure 2.12 (c) avec (d), nous pouvons voir que la polarité du résidu n'est que de  $\pm 2\pi$  dans la figure 2.12 (c), mais il peut être  $\pm 2n\pi$  dans la figure 2.12 (d). Pour le MB PU, la longueur de ligne de base normale du système InSAR est très importante. Même si nous choisissons la même méthode MB PU, différentes longueurs de base normales du système peuvent entraîner des performances MB PU différentes. Par conséquent, nous devons répondre à deux questions: 1) Quelle est la meilleure combinaison de base pour MB PU? 2) Comment obtenir la meilleure combinaison de base dans un système MB InSAR à répétition? (La longueur de ligne de base normale du MB InSAR à passage unique peut être conçue, mais pas celle de la répétition.)

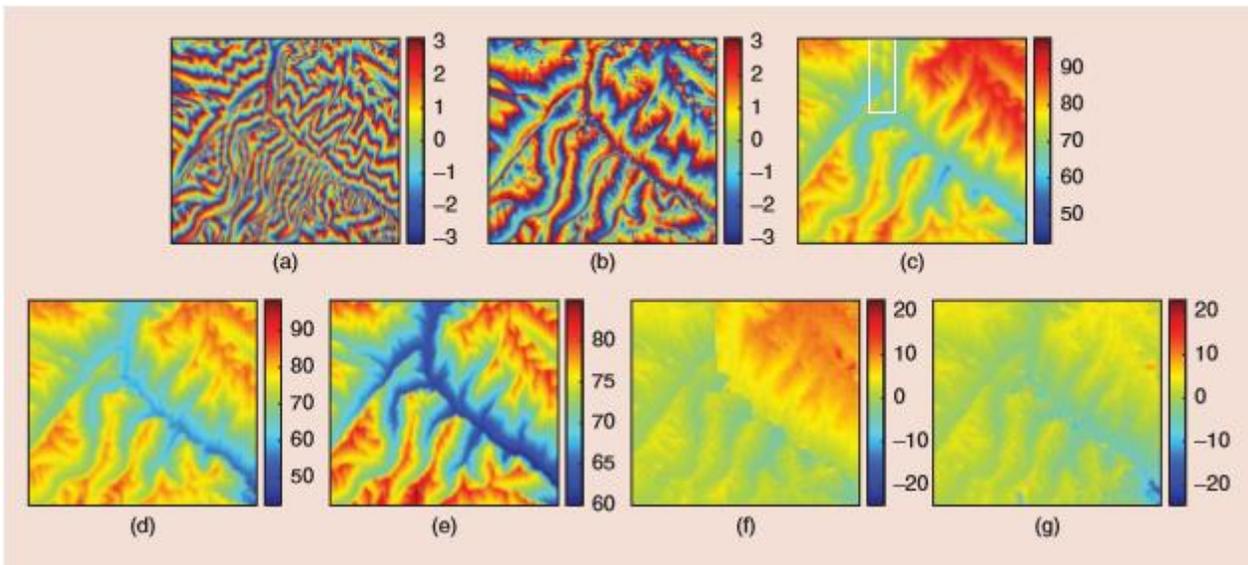


**Figure2. 13.** (a) L'interférogramme ALOS PALSAR 1 avec une ligne de base de 104,07 m. (b) L'interférogramme ALOS PALSAR 2 avec une ligne de base de 192,89 m. (c) L'interférogramme ALOS PALSAR 3 avec une ligne de base de 1 032,4 m. (d) La distribution des résidus de (a) obtenue par TSPA en utilisant (a) et (b). (e) La distribution des résidus de (a) obtenue par TSPA en utilisant (a) et (c) [43].

Les auteurs de [100] ont proposé un critère de conception de référence pour maximiser la tolérance de biais de mesure de toutes les méthodes de MB PU basées sur CRT. En outre, [44] introduit une méthode pour modifier manuellement la longueur de ligne de base normale à l'aide d'un algorithme de compensation de mouvement. La figure 2.13 nous donne un exemple montrant l'effet de différentes longueurs de base normales sur MB PU en utilisant l'ensemble de données ALOS PALSAR de la région montagneuse de l'Himalaya. La figure2. 13 (a) - (c) montre trois interférogrammes ALOS PALSAR avec différentes longueurs de ligne de base normales. La figure 2.13 (d) est la distribution des résidus de la figure2. 13 (a) telle qu'obtenue par TSPA en utilisant les figures 2.13 (a) et (b). Dans la figure2. 13 (d), il y a 64,836 résidus avec une plage de polarité de -4 à 5, et la polarité totale des résidus est de 82,542. La figure2. 13 (e) montre la distribution des résidus de la figure2. 13 (a) obtenue par TSPA en utilisant les figures2. 13 (a) et (c). Dans la figure2. 13 (e), il y a 2 064 résidus avec la plage de polarité de -1 à 1, et la polarité totale des résidus est de 2,064. Il n'est pas difficile de voir l'effet de différentes longueurs de ligne de base normales (généralement, la distribution des résidus plus clairsemée et la plage de polarité plus faible fournissent des résultats plus précis de PU).

La figure 2.14 compare les unités centrales SB et MB à l'aide de l'ensemble de données DB InSAR à passes répétées ALOS PALSAR de la région montagneuse de l'Himalaya. La figure2. 14

(a) et (b) montre deux interférogrammes avec différentes longueurs de ligne de base normales. Nous pouvons voir que les franges de phase de la figure 2.14 (a) sont compliquées et denses; par conséquent, la condition Itoh ne peut pas être satisfaite. La figure 2.14 (c) et (d) illustre les résultats PU de la figure 2.14 (a) obtenus respectivement par SB MCF et TSPA. Nous pouvons voir qu'il y a un saut topographique long, vertical et discontinu marqué par la boîte rectangulaire sur la figure 2.14 (c); c'est un artefact évident. Cependant, la figure 2.14 (d) est transparente. La figure 2.14 (e) est la phase non enveloppée de référence de la figure 2.14 (a) générée par le modèle d'élévation numérique PALSAR. La figure 2.14 (f) montre les erreurs entre les figures 2.14 (c) et (e), avec une erreur quadratique moyenne (mse) de 24,92. Nous pouvons voir que l'erreur PU se propage sur la partie supérieure droite de la figure 2.14 (f). La figure 2.14 (g) montre les erreurs entre la figure 2.14 (d) et (e) avec un mse de 7,34. Parce que la méthode MB PU n'a pas besoin d'obéir à la condition Itoh, le résultat PU montrer dans la figure 2.14 (d) est plus précis et crédible que celui de la figure 2.14 (c).



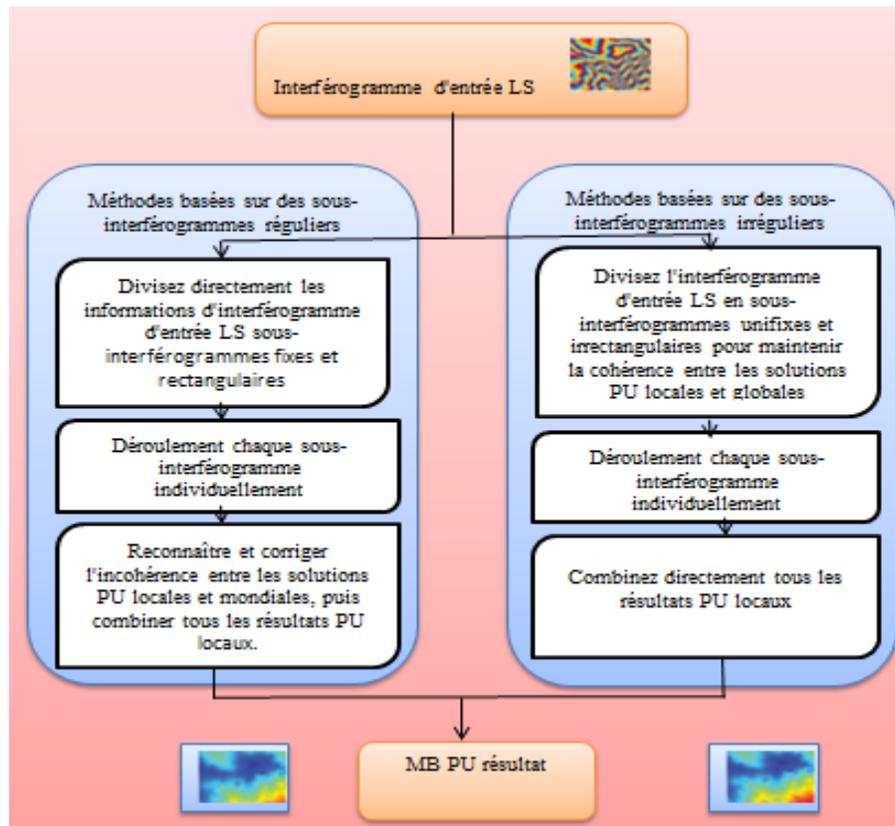
**Figure 2.14.** (a) L'interférogramme ALOS PALSAR avec une longue ligne de base normale. (b) L'interférogramme ALOS PALSAR avec une ligne de base normale courte. (c) La solution PU de (a) obtenue par la méthode SB MCF PU. (d) La solution PU de (a) obtenue par la méthode TSPA MB PU. (e) La phase de référence non emballée de (a). (f) Les erreurs entre (c) et (e). (g) Les erreurs entre (d) et (e).

## 5 Examen du dérapage de phase à grande échelle

Avec l'avancée rapide de la technologie InSAR, les interférogrammes deviennent de plus en plus grands. Par exemple, TerraSAR-X, par ex. (lancé en juin 2007) et son satellite jumeau, TanDEM-X (lancé en juin 2010), fournissent de manière fiable des images SAR à haute résolution avec une résolution spatiale de 1 m [45]. Dans ce cas, une augmentation du volume de données InSAR est inévitable. De plus, plusieurs des dernières technologies InSAR (par exemple multidimensionnelles [46], multitemporelles [47] et MB [31], [36]) nécessitent que l'algorithme PU

soit capable de traiter plusieurs interférogrammes simultanément, ce qui alourdit encore la charge de traitement des étapes PU. Par conséquent, ce volume de données interférométriques de plus en plus important a ouvert de nouvelles possibilités et défis pour PU en termes de consommation de calcul et de mémoire. Si ces nouveaux défis ne sont pas bien gérés, nous pouvons tomber dans une situation riche en données mais pauvre en informations.

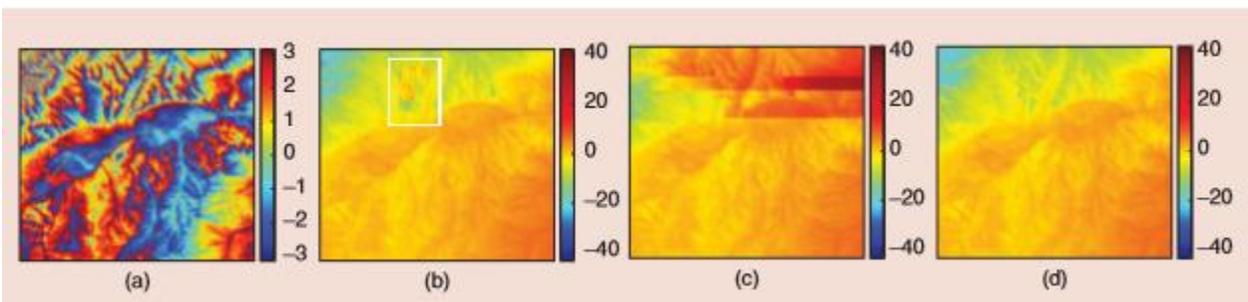
Si l'échelle de l'interférogramme d'entrée dépasse la capacité matérielle de l'ordinateur, un critère de division et de conquête doit être adopté dans le processus PU. En d'autres termes, l'intégralité de l'interférogramme d'entrée doit être divisée en plusieurs sous-interférogrammes plus petits et traitée indépendamment. Les résultats PU de tous les sous-interférogrammes sont ensuite épissés ensemble. Dans cette condition, si le résultat PU de chaque sous-interférogramme n'est pas cohérent avec celui de l'interférogramme d'entrée, le résultat PU présentera des phénomènes de mosaïque (c'est-à-dire des artefacts de mosaïque), ce qui réduira considérablement la précision PU [6].



**Figure2.15.** Organigrammes de traitement des méthodes LS PU

La figure2. 15 résume les organigrammes de traitement de ces deux groupes de méthodes. Il est évident que ces groupes sont tous deux basés sur le cadre de la division et de la conquête. En comparant les méthodes PU à petite et moyenne échelle, les deux nécessitent un calcul

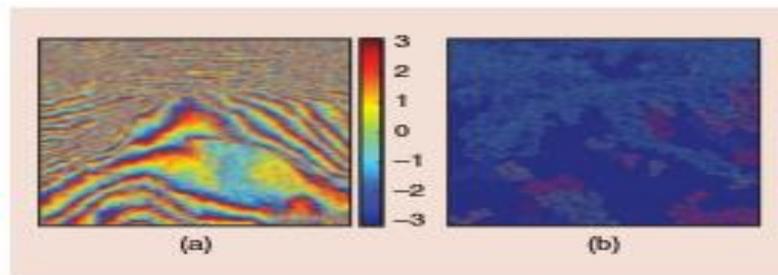
supplémentaire pour garantir la cohérence entre les solutions PU locales et globales. Pour être précis, les méthodes du premier groupe utilisent une stratégie de tuilage simple pour diviser régulièrement l'interférogramme d'entrée en sous-interférogrammes fixes et rectangulaires (la taille de chaque sous-interférogramme est choisie par les utilisateurs de l'algorithme) et dérouler chaque sous-interférogramme individuellement. Ensuite, comme le résultat PU de chaque sous-interférogramme n'est généralement pas cohérent avec celui de l'ensemble de l'interférogramme, une stratégie d'épissage compliquée qui reconnaît et corrige les zones présentant une incohérence entre les solutions PU locales et globales est utilisée pour combiner les résultats PU de tous les sous-interférogrammes. L'étape de pavage des méthodes du premier groupe ne consomme que peu de calcul, mais la charge de calcul de l'étape d'épissage peut être très élevée. Comme exemples de méthodes PU représentatives dans le premier groupe, [48] a utilisé une stratégie basée sur les statistiques pour reconnaître les zones avec incohérence entre les solutions PU locales et globales de la méthode SNAPHU. De plus, en recalculant les informations de branchement d'un réseau simplifié, la solution globale PU LS approximative à la méthode PU norme SB L1 peut être obtenue [49]. De plus, [50] a utilisé une stratégie d'épissage basée sur une technique de recuit simulé pour paralléliser la méthode de branchement de SB Goldstein pour le problème LS PU. Enfin, [13] a utilisé les informations d'un réseau de triangulation pour combiner les résultats PU locaux de la méthode SB MCF PU.



**Figure 2.16.** (a) Les données LS TerraSAR-X InSAR. (b) Le résultat PU de la méthode LS SNAPHU. (c) Le résultat PU de la méthode GAMMA LS MCF. (d) Le résultat PU de la méthode PU rapide pour les interférogrammes LS [6].

Une expérience PU de la méthode LS SNAPHU dans [48] et de la méthode GAMMA LS MCF dans [13] sera utilisée pour mieux expliquer les caractéristiques du premier groupe de méthodes. La figure 2.16 (a) est un interférogramme LS TerraSAR-X ( $18\,000 \times 20\,000$  pixels). La figure 2.16 (b) est le résultat PU de la méthode LS SNAPHU avec l'interférogramme en mosaïque, qui est mise en œuvre par les concepteurs d'algorithmes et dont le temps de fonctionnement est de 27363 s avec une

fréquence d'unité centrale de traitement (CPU) de 3,2 GHz, et la figure 2.16 (c) est celle de la méthode GAMMA LS MCF, dont le temps de fonctionnement est de 3 180 s avec la même fréquence CPU. De la figure 2.16 (b) et (c), nous pouvons clairement voir que le phénomène de mosaïque existe dans les résultats PU: le phénomène de mosaïque de la méthode LS SNAPHU est beaucoup plus faible que celui de la méthode GAMMA LS MCF PU mais est toujours évident et marqué par la boîte rectangulaire sur la figure 2.16 (b). De plus, le temps d'exécution de l'algorithme de LS SNAPHU est relativement long. De cette expérience, nous pourrions conclure que les méthodes du premier groupe ne peuvent parfois pas garantir la cohérence entre les solutions PU locales et globales. Cependant, l'avantage des méthodes du premier groupe est que la taille du sous-interférogramme est un paramètre défini par l'utilisateur, de sorte que les méthodes du premier groupe peuvent facilement contrôler la consommation de mémoire maximale en fonction de l'état du matériel. Les méthodes du deuxième groupe placent leur charge de calcul sur l'étape de pavage. Sur la base des caractéristiques de regroupement de la distribution des résidus ou de la carte de qualité de l'interférogramme d'entrée, ces méthodes utilisent la technique d'analyse de regroupement pour diviser l'interférogramme d'entrée en sous-interférogrammes non fixes et irréguliers et maintenir la cohérence entre les résultats PU locaux et mondiaux. Le théorème d'enveloppe-rareté fourni dans [45] explique théoriquement pourquoi ce type de méthode LS peut garantir la cohérence entre les solutions PU locales et globales.



**Figure 2.17.** (a) Les données InSAR simulées. (b) Le résultat de pavage de (a) obtenu en utilisant la méthode ODLS [20].

La figure 2.17 (b) montre la distribution des résidus de la figure 2.17 (a), avec les différentes couleurs et limites utilisées pour indiquer le résultat de mosaïque obtenu par la méthode ODLS dans [20] (pour afficher clairement le résultat de mosaïque, seuls les sous-interférogrammes avec plus de 100 résidus sont indiqués). Parce que les résidus sont si denses dans la partie supérieure de la figure 2.17 (a), nous pouvons voir que presque toute la partie supérieure est divisée en sous-interférogramme. En résumé, la difficulté de LS PU provient principalement de la taille du problème PU. Si la taille d'un interférogramme dépasse la limitation de la capacité de calcul, nous devons faire

un compromis raisonnable entre l'efficacité temporelle, la précision et la consommation de mémoire. Il vaut la peine de mentionner que les concepts de précision et de résolution de tuilage sont présentés dans [45]. Ce sont les critères quantitatifs utilisés pour évaluer l'efficacité d'une méthode LS PU. Les conseils théoriques de [45] pourraient aider les chercheurs à concevoir de nouvelles méthodes LS PU à l'avenir.

### 1. Les avantages et les limites

Méthode	Avantage	Limite
<b>SB PU</b>	la scène observée a une continuité spatiale	Faible demande sur le nombre d'interférogrammes
<b>MB PU</b>	nécessite suffisamment d'interférogrammes avec des longueurs de référence normales appropriées	la scène observée pourrait impliquer des changements de phase violents
<b>LS PU</b>	Compromis supportable entre précision PU et ressources informatiques	faible demande en ressources informatiques

**Tableau 2.1** les limitations et les avantages des méthodes SB, MB et LS PU.

Le tableau 1 résume les avantages et les limites des méthodes SB, MB et LS PU. Les résultats de la recherche sur les PU semblent passionnants. Cependant, certains domaines de l'UP sont encore relativement jeunes et des progrès rapides sont attendus dans les années à venir. À l'heure actuelle, des défis techniques demeurent.

### 2. Conception d'algorithme sur le déroulement de phase à grande échelle

Par rapport à la recherche PU à petite et moyenne échelle, les réalisations de recherche liées à LS PU ont été assez limitées jusqu'à récemment. En outre, la plupart des techniques existantes LS PU se concentrent uniquement sur SB PU. Dans le cas de LS PU, deux obstacles sont rencontrés :

1) le dilemme entre la vitesse d'exécution et la précision et 2) la limitation de la mémoire informatique. Par conséquent, réduire considérablement la consommation de temps et de mémoire de méthodes mieux établies à petite et moyenne échelle dans les OPA SB et MB peut être une orientation de recherche future.

## 6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté, analysé et discuté les principales techniques de déroulement de phase proposées pour le traitement d'interférogrammes inSAR. Cette étude vise presque toutes les catégories de déroulement et les mécanismes de base de reconstruction inSAR ainsi que quelques méthodes périphériques

utilisées pour l'imagerie optique et magnétique et qui sont également convenable pour l'interférométrie inSAR. Pour donner un aspect plus pratique et crédible, les images utilisées dans l'implémentation sont réelles issues de différentes régions du globe avec différentes caractéristiques. Les recherches dans cet axe révèlent les avantages ainsi que les limites, ce qui rend ce domaine encore motivant et passionnant. Effectivement. Les publications dans «le déroulement de phase inSAR » est à ce jour actif pourtant il est bien mature.



# Chapitre 3

Déroulement hybride

## 1 Introduction

Ce chapitre est principalement dédié à décrire, implémenter, présenter et discuter l'hybridation proposée. La discussion sera sous un aspect comparatif avec les algorithmes constituant notre hybridation soit : l'algorithme des branches coupées (BC) de Goldstein [53] et la qualité guidée (QG) de Prati [54]. Afin de donner plus de crédibilité à la proposition, l'interférogramme de test est issu d'un système inSAR réel : ESA-ERS1 qui présente l'un des systèmes les plus performants et de très bonne résolution.

Comme il est déjà expliqué dans le premier chapitre, le système inSAR est une technique étendue du SAR conventionnel. L'inSAR a la capacité de fonctionner jour et nuit et dans toutes les conditions météorologiques. En outre, la haute précision et être le seul moyen de la cartographie tridimensionnelle des terrains à grande échelle rend ce système largement utilisé. Cependant, réaliser des modèles numériques du terrain n'est pas achevable sans une étape clé dite le déroulement de phase.

Le déroulement de phase (PU) (discuté dans le chapitre 2) est une étape incontournable du traitement du signal InSAR. L'inSAR souffre du problème de zone d'ombre et zone d'inversion (également l'accumulation). En effet, il y a des régions à faible cohérence de grande surface représentée dans l'interférogramme dues aux ces zones, et la phase interférométrique correspondante de ces régions portent la caractéristique d'un bruit. Le processus de déroulement de phase dans ce domaine peut facilement provoquer la propagation d'erreur par l'intégration basique ou le problème des trous (région isolées sans déroulement) à grande surface par les algorithmes immunisés aux résidus, ce qui affecte la précision de l'extraction d'altitude.

À l'heure actuelle, de nombreuses solutions ont été proposées pour le problème de déroulement immunisé. Les principaux algorithmes peuvent être divisés en méthodes d'optimisation globale, méthodes d'exécution intégrale (suivi de parcours) et méthodes de planification de réseau. La méthode basée sur la stratégie des moindres carrés est la méthode de la classe d'optimisation globale la plus représentative. La caractéristique commune de cet algorithme ne tient pas compte du problème des résidus de phase et des pixels à faible qualité [51]. Au lieu de cela, il établit une fonction discrète de Poisson et utilise des méthodes numériques pour résoudre le problème afin d'atteindre la phase réelle [52]. L'efficacité de traitement de cet algorithme est plus élevée si la qualité de l'interférogramme est bonne. Lorsque la qualité de l'interférogramme est faible, il y aura une erreur considérable de

déroutement. L'algorithme de déroulement de suivi de parcours utilise l'intégration point par point pour atteindre la phase réelle de l'image complète. Les principaux algorithmes représentatifs comprennent le BC et QG, et ainsi de suite [53, 54]. La caractéristique commune de cet algorithme fait face à la nécessité d'un déroulement haute précision locale, et il ne considère pas la continuité de la phase globale. Ce type d'algorithme a la forte adaptabilité au bruit de phase et peut limiter la propagation d'erreur globale aussi que possible. Cependant, l'efficacité de traitement de cet algorithme est très faible. En même temps, il possède des phénomènes locaux de diffusion d'erreur et des trous. La stratégie de déroulement basée sur l'algorithme de programmation réseau tient compte de l'efficacité du traitement et de la précision du traitement. L'idée principale de cet algorithme est de réaliser le traitement PU bidimensionnel en minimisant la différence entre la dérivée de la phase roulée et celle de la phase déroulée. Convertir le problème de minimisation en un problème d'optimisation qui résout le flux de coûts minimum augmente considérablement l'efficacité de déroulement [55]. L'algorithme le plus couramment utilisé est l'algorithme de flux de réseau statistiquement consommateur (SNAPHU) [56]. Cet algorithme utilise des informations telles que les valeurs connues de la phase roulée, la force d'image, et la cohérence des interférogrammes pour estimer les fonctions de coût de flux réseau, et utilise des méthodes de fusion de région pour les interférogrammes à grande échelle. L'algorithme proposé est basé sur le tableau dynamique de l'adjacence pour hybrider les deux algorithmes BC et QG. L'algorithme vise à résoudre le problème des trous et la faible efficacité dans les méthodes mentionnées ci-dessus. Il introduit la carte de qualité locale améliorée pour guider l'opération de chemin-intégrale (QG) pour résoudre le problème des trous dans la méthode BC. La table adjacente dynamique (TAD) est proposée pour planifier le chemin d'intégration, ce qui réduit la quantité de données dans la table adjacente et améliore l'efficacité déroulement. TAD sont facilement calculés par la mappe des branches (issue de la mappe des résidus), il est donc considéré comme conversion des indices d'image en une table contenant des paramètres manipulables et dynamiquement mise à jours. Enfin, la justesse et l'efficacité de la méthode proposée sont vérifiées par le traitement des données expérimentales réelles.

## 2 Méthode des branches coupées (BC)

La méthode BC a été proposée la première fois par Goldstein. Les points résiduels connectés à une branche doivent être équilibrés en charge pour assurer que le chemin intégral évite les points résiduels. Le traitement de déroulement BC se déroule comme suit :

### 2.1 Identification des points résiduels :

Pour un interférogramme, les points résiduels et leur distribution peuvent être obtenus par la somme roulée des différences des phases roulées (gradient) dans une boucle 2x2.

### 2.2 Connexion de branche :

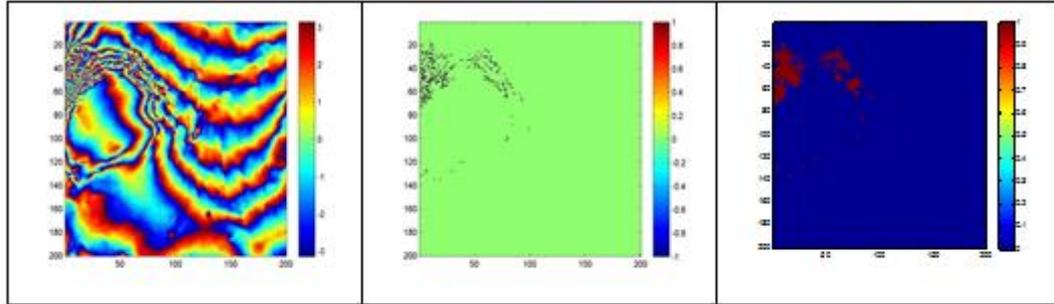
La connexion de la branche peut être effectuée de haut-gauche vers le bas-droit de l'image. Premièrement, une recherche point par point est effectuée dans une certaine zone centrée sur le point résiduel qui se trouve dans la zone haut-gauche. S'il y a un autre point résiduel, il devrait être relié au point central d'origine. En outre, il convient de noter que la branche sera équilibrée si les signes de ces deux points résiduels sont opposés, et la recherche de nouveaux points résiduels se poursuit. Toutefois, si les signes des deux points résiduels sont les mêmes, la branche n'est pas équilibrée, le centre de recherche doit être déplacé à un nouveau point résiduel et la recherche se poursuivra. Si tous les pixels ont été parcourus dans la zone de recherche, mais que la branche n'est toujours pas équilibrée, alors la zone de recherche doit être élargie, et la recherche se poursuivra. En outre, si la zone de recherche a atteint le bord de l'image, alors la branche peut y être connectée pour bloquer le chemin d'intégration.

### 2.3 Opération Path-Integral :

Une fois la connexion de branche est terminée, le traitement suivant n'a besoin que d'éviter les branches, et le traitement de déroulement d'intégration pixel par pixel peut être effectué dans l'image entière.

Selon l'analyse susmentionnée, la méthode BC est basée sur la connexion de branche, et elle peut s'assurer que la région déroulement ne sera pas affectée par les points résiduels et le pixel de mauvaise qualité. Cependant, la méthode BC ignore le déroulement des pixels globaux de haute qualité, et elle a deux limites principales. D'une part, les pixels de haute qualité sur les branches ne peuvent pas être déroulés. Dans le processus de connexion de branche, seuls les problèmes d'équilibrage des points résiduels positifs et négatifs sont pris en compte. Cependant, il est encore possible que les pixels de haute qualité se trouvent dans la zone de connexion des branches, et la méthode BC ignore le processus de déroulement de ce type de pixels. D'autre part, les connexions croisées des branches forment facilement des trous. Dans les zones où les points résiduels sont denses, il est très facile de provoquer la situation que les branches se croisent et se connectent de bout en bout formant des grappes.

Dans ce cas, l'opération de chemin intégrale ne peut pas entrer dans la zone centrale qui est entourée par les branches, autrement dit une zone isolée par la grappe. La figure 3.1 (a) montre un exemple d'un interférogramme réel, (b) la mappe des résidus et (c) la mappe des branches établie par la méthode BC. Où les branches sont établies il y aura des trous ou zones isolées (voir figure3. 6(a)).



**Figur3.1** (a) l'interférogramme (b) la mappe des résidus, (c) la mappe des branches

### 3 Méthode de qualité guidée QG

La méthode de déroulement guidée par une mappe de qualité est premièrement proposée par Parti. Cette méthode utilise les informations extraites de la mappe de cohérence du système inSAR comme référence de la qualité pour guider le processus de déroulement. Le principe de cette méthode est d'utiliser les valeurs qualitatives des pixels pour prioriser le chemin de déroulement dans les zones de haute qualité. Les étapes principales de cette méthode (celle de Parti et pas ses améliorations) sont:

#### 3.1Sélection de la mappe de qualité:

Comme nous avons précédemment expliqué, la mappe de qualité exprime la qualité de la phase interférométrique de chaque pixel. Les mappe de qualité couramment utilisées incluent la cohérence, la carte de densité de points résiduels, la pseudo-corrélation, la PDV etc. Le chemin d'intégration déroulement de phase est entièrement déterminé par cette mappe, la sélection de la mappe de qualité affectera directement l'effet du résultat de déroulement [54].

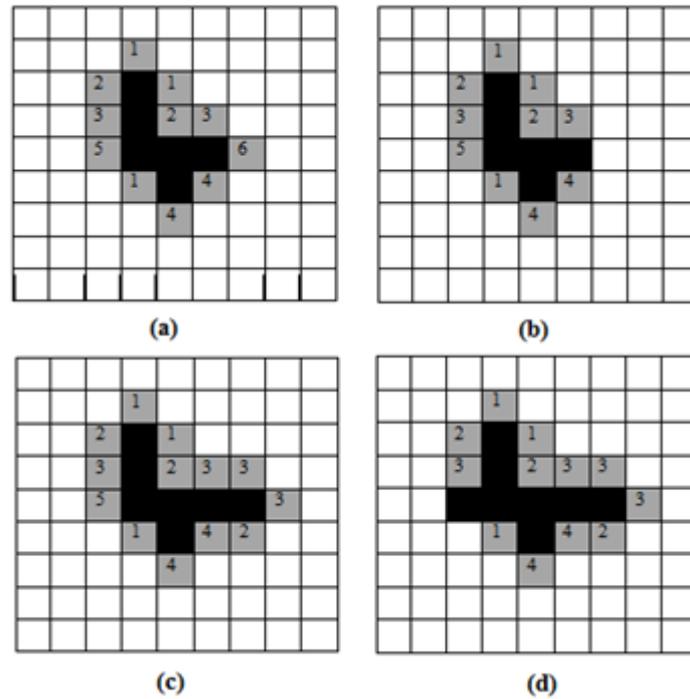
### 3.2 Estimation du gradient de phase:

Si la vraie différence de phase entre deux pixels adjacents est dans l'intervalle  $[-\pi, \pi]$ , alors le vrai gradient de phase entre les pixels peut être obtenu en fonction de la phase de roulement, et la valeur roulée de la phase de l'image entière peut être obtenue par l'opération d'intégration du chemin.

### 3.3 Intégration Guidée par la mappe de qualité:

Le chemin d'intégration de la méthode QG est sélectionné en fonction de la qualité de chaque pixel dans l'interférogramme, et l'erreur est limitée dans les zones de faible qualité. Sous la direction de la mappe de qualité, l'étape clé du traitement de déroulement basée sur l'intégration du chemin est le processus de diffusion à travers les pixels. Cette méthode commence à partir du pixel avec la plus haute qualité, puis ses pixels voisins sont examinés. Ensuite, la phase du pixel est déroulée dans la zone voisine selon la plus haute qualité d'un pixel voisin. Enfin, après le déroulement, le fanion de déroulement est mis à jour, et le processus susmentionné sera répété jusqu'à ce que le déroulement atteigne tous les pixels. Ce traitement est indiqué la figure 3.2.

Comme le montre la Figure 3.2(a), les pixels de la zone sombre (noir) sont déroulés. Les pixels contigus de la zone claire (gris), dont les qualités sont connues, sont représentés par 1 à 6. En outre, il est à noter que plus le nombre est élevé, la qualité est élevée. Dans la figure 3.2(b), le pixel 6 de la plus haute qualité est déroulé et transformé en blocs sombres pour montrer que ce pixel a été déroulé. Comme la figure 3.2(c), et en basant sur le pixel de qualité 6 qui vient d'être déroulé dans la dernière étape, des nouveaux pixels adjacents sont générés, et la qualité de chaque pixel adjacent est également attribuée. Dans la figure 3.2(d), le pixel 5 de la plus haute qualité est déroulé et transformé en blocs sombres pour montrer que ce pixel a été déroulé. Ensuite, les étapes ci-dessus sont répétées jusqu'à ce que tous les pixels soient déroulés.



**Figure 3.2** Opération intégrale de chemin basée sur la mappe de qualité (a) Étape une, (b) Étape deux, (c) Étape trois, (d) Étape quatre

La méthode QG peut assurer que tous les pixels de l'interférogramme sont tous pris en compte et peuvent limiter la propagation de l'erreur de déroulement. Cependant, cette méthode a encore quelques limites dans le traitement réel. D'une part, dans le traitement proprement dit, la mappe de haute qualité est difficile à obtenir, et il existe encore un problème de diffusion d'erreur dans une certaine plage, qui affecte le traitement de l'incapacité des pixels de haute qualité. Il est impossible de bloquer complètement l'erreur de déroulement introduite par les points résiduels ou les points pixels de mauvaise qualité comme la méthode traditionnelle de BC. D'autre part, la méthode QG fait face au problème de multiples détections et recherches pour le même pixel dans l'image entière. Chaque fois qu'un nouveau processus de déroulement de pixels est effectué, le prochain pixel de haute qualité à dérouler doit être déterminé dans l'ensemble de l'image, ce qui entraîne un coût de temps élevé et affectant l'efficacité du déroulement globale.

## 4 Stratégie de déroulement de phase basée sur une table adjacente dynamique

### 4.1 Stratégie de correction des trous de déroulement de phase

Pour résoudre le problème des trous de déroulement causés par la méthode traditionnelle BC dans les régions montagneuses, le concept de guidage local de la méthode QG est introduit pour compléter les trous de déroulement. Le traitement de cette étape est basé sur les résultats de traitement de la méthode BC. Pendant le processus de la méthode BC, chaque pixel dans l'image a un fanion déroulement correspondant (le bit de fanion 1 représente l'achèvement du processus de déroulement, et le bit 0 représente la solution inachevée). Après le traitement de déroulement basé sur la méthode BC, le fanion de déroulement des pixels dans les trous, qui sont couverts par les tangentes de la branche et entourés par les tangentes de la branche croisée. Ensuite, le traitement de déroulement basé sur la mappe de qualité sera effectué. D'après le déroulement de la méthode BC, il a évité l'effet des points résiduels, qui ont été équilibrés et annulés par la connexion des branches. Ainsi, il n'existe aucun problème de propagation de l'erreur de phase dans la zone où la méthode BC a été achevée. Le processus local de déroulement guidé (QG) est de compléter le trou de déroulement, et la clé de celui-ci est toujours la planification de la voie d'intégration sous l'orientation de la mappe de qualité. En conséquence, la sélection de la mappe de qualité est également extrêmement importante. La mappe de qualité sélectionnée dans ce travail est basée à la fois sur le coefficient de cohérence d'image et sur la densité des points résiduels. Le coefficient de cohérence est calculé et estimé en fonction d'une de la corrélation réelle et d'une fenêtre d'échantillonnage, respectivement. Après la détection des résidus, tous les pixels de l'image généreront le fanion correspondant. En outre, il convient de noter que le calcul de la densité du point résiduel peut être calculé en fonction de la fenêtre d'échantillonnage, et la densité des points résiduels peut être écrite comme

$$p_e(x, r) = \frac{Num}{N*L} \quad (3.1)$$

Où  $(x, r)$  est la coordonnées du pixel, H et L sont la taille de la fenêtre d'échantillonnage, et Num est la quantité des points résiduels dans la fenêtre d'échantillonnage. La densité du point résiduel est inversement proportionnelle à sa qualité de phase. En outre, la carte de qualité de phase interférométrique peut être obtenue par l'équation (3.2) en basant sur le coefficient de cohérence d'image et la densité des points résiduels.

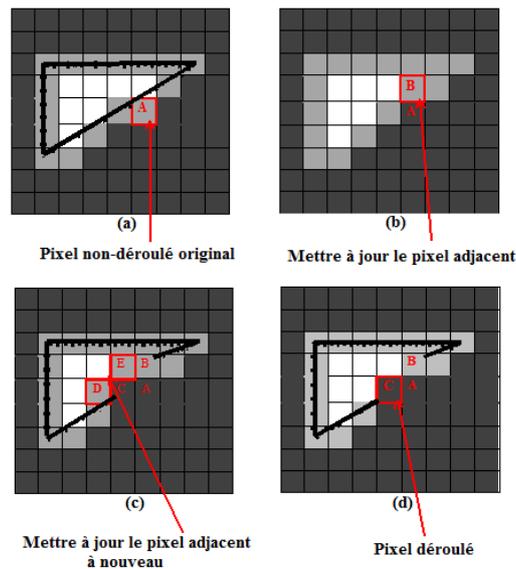
$$Q(x, r) = \frac{P_r(x, r) * P_1 + 1 - P_e(x, r) * P_2}{P_1 + P_2} \quad (3.2)$$

Où P1 et P2 sont des facteurs scalaires pondérés. Ils permettent au QG de se réaliser dans le sens de la croissance régionale [57].

Comme le montre la figure 3.3, la zone grise foncée est la zone où le déroulement est terminé après la méthode BC, et la ligne solide noire est la ligne de la tangente de branche générée par la méthode BC. La zone blanche est la zone vide non-déroulée (isolée), et la zone grise clair est la zone adjacente à la zone non-déroulée. Le point de démêlage initial est choisi comme point de la qualité la plus élevée de la zone adjacente, et à partir de ce point, le déroulement du trou s'exécute point par point selon la méthode de croissance régionale. Dans la figure 3.3(a), le point A est le pixel avec la plus haute qualité adjacent au point déroulé, et ce point est considéré comme le point initial pour le traitement déroulement. Dans Figure 3.3(b), après que le point A est déroulé, le point B devient le nouveau pixel contigu. Dans Fig 3.3(c), le point C est le point de la plus haute qualité, et le point peut être déroulé. Dans Fig 3.3(d), le point C est déroulé, et deux nouveaux points contigus D et E sont générés. Le processus ci-dessus continue de sorte qu'un processus de déroulement peut être réalisé pour tout l'interférogramme sans lisser aucun pixel.

#### 4.2 Planification efficace des trajectoires d'intégration basée sur une table adjacente dynamique

La méthode traditionnelle utilise la forme d'une table adjacente statique (SAT). Avant le traitement PU guidé par la carte de qualité, la détection complète des pixels d'image est effectuée en premier, et tous les points non emballés sont ajoutés à la table pour dérouler le drapeau. La méthode détermine si le point a été déroulé. Pour une grande partie du trou de déroulement, les trous déroulés couvrent un grand nombre de pixels. L'établissement de cette SAT consommera une grande quantité d'espace de stockage, et chaque fois que la détermination du point de déroulement est effectuée, toute la table a besoin d'une détection transversale qui réduit l'efficacité de l'intégration du chemin.



**Figure 3. 3** Stratégie de croissance régionale (a) Première étape, (b) Deuxième étape, (c) Troisième étape, (d) Quatrième étape

## 4.2 Planification efficace des trajectoires d'intégration basée sur une table adjacente dynamique

La méthode traditionnelle utilise la forme d'une table adjacente statique (SAT). Avant le traitement de déroulement guidé, la détection complète des pixels d'image est effectuée en premier, et tous les points déroulés sont ajoutés à la table pour dérouler le fanion. La méthode détermine si le point a été déroulé. Pour une grande partie, les trous déroulés couvrent un grand nombre de pixels. L'établissement de cette SAT consommera une grande quantité d'espace de mémoire, et chaque fois que la détermination du point de déroulement est effectuée, toute la table a besoin d'une détection transversale qui réduit l'efficacité de l'intégration du chemin.

Pour améliorer l'efficacité du déroulement, une méthode de planification des chemins basée sur une table adjacente dynamique (DAT) est proposée. Le processus d'initialisation des données DAT ne fait qu'ajouter les pixels qui sont adjacents au point déroulé et n'ont pas terminé le traitement de déroulement. Une fois qu'un certain pixel est déroulé, il est immédiatement déplacé hors de la table adjacente pour compléter la mise à jour dynamique. Pendant le déroulement de l'image entière, les points de données stockés dans le DAT toujours incluent uniquement les points de données adjacents au point déroulés, et les points ne sont pas déroulés, ce qui réduit considérablement la capacité d'espace de stockage de la table. En outre, puisque les pixels de la table adjacente dynamique sont tous des points

déroulés et sont tous  $y$  adjacents, les fanions adjacents et de déroulement n'ont pas besoin d'être placés dans la table adjacente dynamique, ce qui réduit encore la quantité de données stockées dans le tableau. Le contenu de la table adjacente dynamique est indiqué dans le tableau 3.1.

No	Qualité	Azimut	Range	Edge flag
N	$Q(x, r)$	x	R	1 ~8
1	...	....	...	...
:	:	:	:	:
$N_{max}$	...	...	....	...

**Tableau 3.1** Table adjacente dynamique

Dans le tableau 3.1, le No représente le nombre d'éléments, qui est utilisé pour compter le nombre de pixels qui sont déroulés; la colonne qualité indique la qualité du pixel actuel, elle est déterminée par la mappe utilisée. L'azimut et distance indiquent les coordonnées de du pixel actuel. Le fanion de bord est utilisé pour marquer si le pixel est dans la zone de bord de l'image ou non. Les valeurs du fanion sont de 1 à 8, qui ; respectivement, représentent les côtés haut, bas, gauche et droite de l'interférogramme et des quatre vertices gauche, droite, en bas gauche et droite.

Lors de l'utilisation du DAT pour la planification du chemin d'intégration, le processus de déroulement par la mappe de qualité est indiqué dans Figure 3.4. Dans figure 3.4(a), l'initialisation du DAT est d'abord achevée, tous les pixels adjacents non connectés sont ajoutés à la table, et le point de qualité la plus élevée est choisi comme point initial de déroulement. Dans Figure 3.4(b), après le déroulement des points terminé, de nouveaux points de pixel adjacents seront générés, et les pixels seront déplacés hors de la table adjacente dynamique. En même temps, des points de pixel seront ajoutés pour compléter la mise à jour de la table adjacente dynamique. Dans Figure 3.4(c), le pixel de la plus haute qualité est déterminé à nouveau et déroulé en même temps avec la mise à jour dans la table. Dans la figure 3.4(d), après que le point achève le processus de déroulement, un nouveau point adjacent peut être généré, le point est déplacé hors de la table adjacente dynamique, le point est ajouté, le processus de mise à jour de la table adjacente est complété à nouveau, et l'opération de mise à jour ci-dessus est répétée jusqu'à ce que la table adjacente soit effacée et qu'aucun nouvel élément ne soit ajouté à la table c.-à-d. que tout l'interférogramme est déroulé.

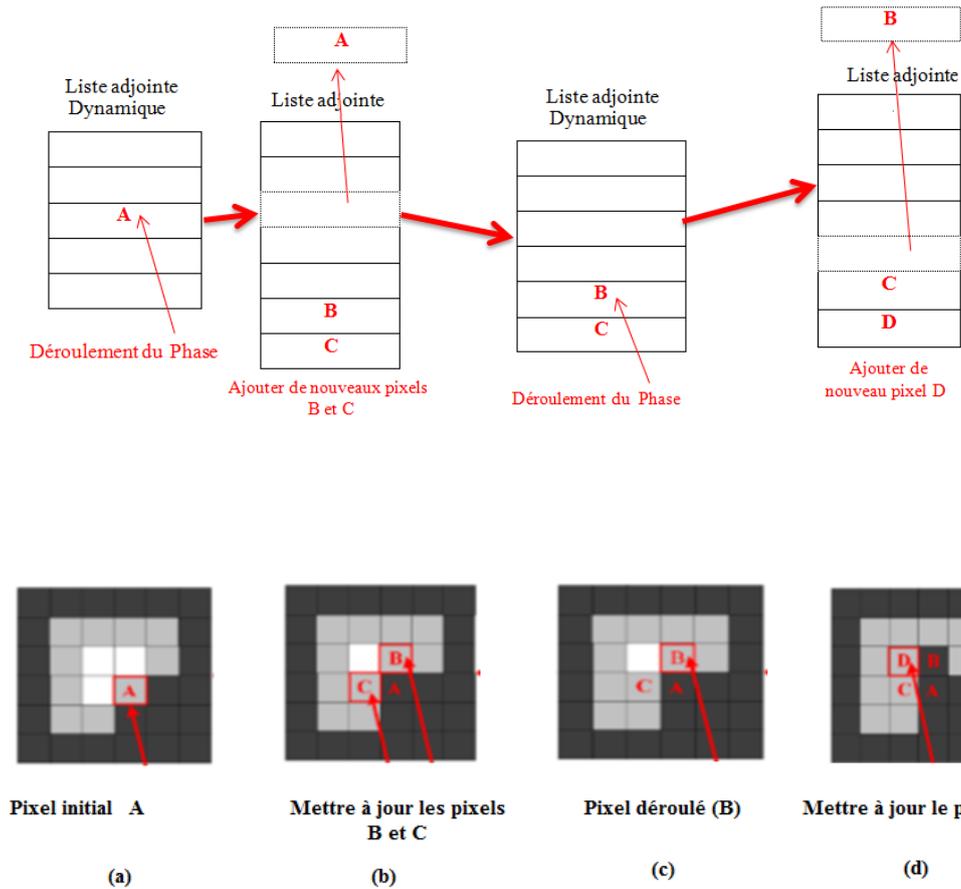


Figure3.4 Stratégie de croissance de la région basée sur le DAT (a) Étape un, (b) Étape deux, (c) Étape trois, (d) Étape quatre

### 5 Résultats et discussions

Pour vérifier l'efficacité de l'algorithme proposé, nous avons choisis un interférogramme réel de la figure3.1. Les paramètres techniques sont indiqués dans le tableau 3.2. La scène imagée est une région montagneuse typique.

Région	Dimension	Orbite	Ligne base	Taux résidus	Sat	Type
Vatnajökull	200*200	23315	126	0.0112	ERS-1	intéférogramme

Tableau 3.2 paramètres techniques de l'interférogramme réel choisis

## **6 Conclusion**

Dans ce chapitre, une recherche sur une nouvelle hybridation pour le déroulement de phase basée sur les limitations de la méthode traditionnelle BC et de la méthode QG est menée. Pour le problème des trous, de la propagation des erreurs et de la faible efficacité de déroulement, nous avons proposé un algorithme hybride entre ces deux pionniers, qui comble les trous de phase et limite la propagation de l'erreur de déroulement. En même temps, la table adjacente dynamique est construite pour réduire la capacité de stockage de matériel utilisé. Ainsi, le chemin du déroulement est optimisé et l'efficacité du est améliorée par le fait de dérouler uniquement les zones des trous et non tout l'interfrogramme. Les résultats obtenus sont satisfaisants en termes de la qualité et le temps du traitement global.

## **Conclusion générale**

Dans ce manuscrit, trois points ont été entamés : étude sur les systèmes SAR en générale et l'inSAR en particulier, études sur le déroulement de phase interférométrique, et la proposition d'une nouvelle hybridation très fiable notamment en temps de traitement. Cette étude nous a permis d'en apprendre davantage sur la télédétection, afin de nous intéresser à la technologie radar qui un élément largement utilisé en télécommunication et de faire une étude d'application dans le domaine du traitement d'images. Nous mentionnons donc que nous avons d'abord présenté une interférométrie radar a ouverture synthétique (inSAR) et que c'était en donnant ses types de plates-formes, modes d'acquisition et son modèle géométrique. En outre, nous avons examiné l'interférométrie, une étape importante et irremplaçable dans l'exploitation des données radar et la production d'interférogrammes à partir desquels l'information géodésique est analysée et interprétée.

Les interférogrammes dans les images sous forme de franges correspondant à la phase de  $2\pi$ , sont inutilisables tels qu'ils sont. Les recherches se multiplient et se jettent sur cet axe pour reconstruire exactement la phase absolue, et cela nous a ensuite conduits à étudier le déroulement de phase avec une large gamme des algorithmes proposés dans ce domaine. Nous avons choisi la méthode des branches coupées et la méthode de la qualité guidée pour en extraire une nouvelle hybridation performante en exactitude et en temps. L'hybridation est basée sur la mappe des branches qui est déjà générée par la méthode des branches coupées et une table adjacente dynamique déduite de la table conventionnelle de a méthodes de la qualité guidée.

Les résultats obtenus sont satisfaisants en termes de la qualité et le temps de traitement. Le test a été mené sur des données inSAR réelles pour donner plus de crédibilité à notre proposition et ajouter un aspect plus pratique à ce travail. Nous espérons que notre travail va permettre de vous donner un appui pour bien comprendre les techniques étudiées et celle proposée et de faire une éventuelle contribution future plus performante.

## References

- [1] D. C. Ghiglia and M. D. Pritt, *Two-Dimensional Phase Unwrapping: Theory, Algorithms, and Software*. New York: Wiley, 1998.
- [2] Web of Science. (2018) .[Online] . Available: <https://webofknowledge.com>
- [3] K. Itoh, "Analysis of the phase unwrapping problem," *Appl. Opt.*, vol. 21, no. 14, p. 2470, 1982.
- [4] Q. Kemao, W. Gao, and H. Wang, "Windowed Fourier-filtered and quality-guided phase-unwrapping algorithm," *Appl. Opt.*, vol. 47, no. 29, pp. 5420–5428, 2008.
- [5] G. Liu, R. Wang, Y. Deng, R. Chen, Y. Shao, and Z. Yuan, "A new quality map for 2-D phase unwrapping based on gray level cooccurrence matrix," *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, vol. 11, no. 2, pp. 444–448, 2014.
- [6] H. Yu, M. Xing, and Z. Bao, "A fast phase unwrapping method for large-scale interferograms," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 51, no. 7, pp. 4240–4248, 2013.
- [7] J. M. Huntley, "Noise-immune phase unwrapping algorithm," *Appl. Opt.*, vol. 28, no. 15, pp. 3268–3270, 1989.
- [8] J. M. Huntley and J. R. Buckland, "Characterization of sources of  $2\pi$  phase discontinuity in speckle interferograms," *J. Opt. Soc. Amer. A, Opt. Image Sci.*, vol. 12, no. 9, pp. 1990–1996, 1995.
- [9] D. C. Ghiglia, G. A. Mastin, and L. A. Romero, "Cellular automata method for phase unwrapping," *J. Opt. Soc. Amer.*, vol. 4, no. 1, pp. 267–280, 1987.
- [10] R. M. Goldstein, H. A. Zebker, and C. L. Werner, "Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping," *Radio Sci.*, vol. 23, no. 4, pp. 713–720, 1988.
- [11] H. Yu, Y. Lan, H. Lee, and N. Cao, "2-D phase unwrapping using minimum infinity-norm," *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, vol. 15, no. 12, pp. 1887–1891, Dec. 2018.
- [12] D. Zheng and F. Da, "A novel algorithm for branch cut phase unwrapping," *Opt. Lasers Eng.*, vol. 49, no. 5, pp. 609–617, 2011.
- [13] GAMMA Remote Sensing AG. (2018). *Interferometric SAR processing: GAMMA remote sensing*. [Online]. Available: <https://www.gamma-rs.ch/>
- [14] WInSAR. (2018). [Online]. Available: <https://winsar.unavco.org/software/isce>
- [15] L. An, Q. S. Xiang, and S. Chavez, "A fast implementation of the minimum spanning tree method for phase unwrapping," *IEEE Trans. Med. Imag.*, vol. 19, no. 8, pp. 805–808, 2000.
- [16] N. H. Ching, D. Rosenfeld, and M. Braun, "Two-dimensional phase unwrapping using a minimum spanning tree algorithm," *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 1, no. 3, pp. 355–365, 1992.
- [17] T. J. Flynn. "Consistent 2-D phase unwrapping guided by a quality map," in *Proc. 1996 Int. Geoscience and Remote Sensing Symp.*, Lincoln, NE, , pp. 2057–2059.
- [18] J. A. Quiroga, A. Gonzalez-Cano, and E. Bernabeu, "Phase-unwrapping algorithm based on an adaptive criterion," *Appl. Opt.*, vol. 34, no. 14, pp. 2560–2563, 1995.
- [19] R. Yamaki and A. Hirose, "Singularity-spreading phase unwrapping," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 45, no. 10, pp. 3240–3251, 2007.
- [20] H. Yu, Z. Li, and Z. Bao, "Residues cluster-based segmentation and outlier-detection method for large-scale phase unwrapping," *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 20, no. 10, pp. 2865–2875, 2011.
- [21] C. W. Chen and H. A. Zebker, "Two-dimensional phase unwrapping with use of statistical models for cost functions in nonlinear optimization," *J. Opt. Soc. Amer. A, Opt. Image Sci.*, vol. 18, no. 2, pp. 338–351, 2001.
- [22] step esa. (2018). [Online]. Available: <http://step.esa.int/main/>

- [23] A. Hooper, D. Bekaert, K. Spaans, and M. Arikan, "Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation," *Tectonophysics*, vol. 514–517, pp. 1–13, Jan. 2012.
- [24] O. Loffeld, H. Nies, S. Knedlik, and W. Yu, "Phase unwrapping for SAR interferometry—A data fusion approach by Kalman filtering," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 46, no. 1, pp. 47–58, 2008.
- [25] R. Chen, W. Yu, R. Wang, G. Liu, and Y. Shao, "Integrated denoising and unwrapping of InSAR phase based on Markov random fields," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 51, no. 8, pp. 4473–4485, 2013.
- [26] X. Xie and Q. Zeng, "Efficient and robust phase unwrapping algorithm based on unscented Kalman filter, the strategy of quantizing paths-guided map, and pixel classification strategy," *Appl. Opt.*, vol. 54, no. 31, pp. 9294–9307, 2015.
- [27] X. Xie and Y. Pi, "Phase noise filtering and phase unwrapping method based on unscented Kalman filter," *J. Syst. Eng. Electron.*, vol. 53, no. 18, pp. 365–372, 2011.
- [28] H. Yu and Y. Lan, "Robust two-dimensional phase unwrapping for multibaseline SAR interferograms: A two-stage programming approach," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 54, no. 9, pp. 5217–5225, 2016.
- [29] W. Xu, E. Chang, L. Kwoh, H. Lim, and W. Cheng. "Phase-unwrapping of SAR interferogram with multi-frequency or multibaseline," in *Proc. IEEE Int. Geosci. and Remote Sens. Symp.*, Pasadena, CA, 1994, pp. 730–732.
- [30] Z. Yuan, Y. Deng, F. Li, R. Wang, G. Liu, and X. Han, "Multichannel InSAR DEM reconstruction through improved closedform robust Chinese remainder theorem," *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, vol. 10, no. 6, pp. 1314–1318, 2013.
- [31] H. Yu, Z. Li, and Z. Bao, "A cluster-analysis-based efficient multibaseline phase-unwrapping algorithm," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 49, no. 1, pp. 478–487, 2011.
- [32] D. C. Ghiglia and D. E. Wahl, "Interferometric synthetic aperture radar terrain elevation mapping from multiple observations," in *Proc. IEEE Digital Signal Process. Workshop*, pages 33–36. Albuquerque, NM, 1994.
- [33] G. Fornaro, A. Pauciuolo, and E. Sansosti, "Phase differencebased multichannel phase unwrapping," *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 14, pp. 960–972, July 2005.
- [34] G. Fornaro, A. Pauciuolo, and E. Sansosti. "Bayesian approach to phase-difference-based phase unwrapping," in *Proc. IEEE 36th Asilomar Conf. Signals, Systems and Computing*, Napoli, Italy, 2002, pp. 1397–1396.
- [35] G. Ferraioli, A. Shabou, F. Tupin, and V. Pascazio, "Multichannel phase unwrapping with graph cuts," *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, vol. 6, no. 3, pp. 562–566, 2009.
- [36] F. Baselice, G. Ferraioli, V. Pascazio, and G. Schirinzi, "Contextual information-based multichannel synthetic aperture radar interferometry: Addressing DEM reconstruction using contextual information," *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 31, no. 4, pp. 59–68, 2014.
- [37] G. Ferraiuolo, F. Meglio, V. Pascazio, and G. Schirinzi, "DEM reconstruction accuracy in multichannel SAR interferometry," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 47, pp. 191–201, Jan. 2009.
- [38] C. Magnard, M. Frioud, D. Small, T. Brehm, and E. Meier, "Analysis of a maximum likelihood phase estimation method for airborne multibaseline SAR interferometry," *IEEE J. Sel. Topics Appl. Earth Observ. and Remote Sens.*, vol. 9, no. 3, pp. 1072–1085, 2016.
- [39] C. Magnard, M. Frioud, D. Small, T. Brehm, and E. Meier, "Processing of MEMPHIS Ka-band multibaseline interferometric SAR data: From raw data to digital surface models," *IEEE J. Sel. Topics Appl. Earth Observ. and Remote Sens.*, vol. 7, no. 7, pp. 2927–2941, 2014.

- [40] H. Liu, M. Xing, and Z. Bao, "A cluster-analysis-based noiserobust phase-unwrapping algorithm for multibaseline interferograms," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 53, no. 1, pp. 494–504, 2015.
- [41] Z. Jiang, J. Wang, Q. Song, and Z. Zhou, "A refined clusteranalysis-based multibaseline phase-unwrapping algorithm," *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, vol. 14, no. 9, pp. 1565–1569, 2017.
- [42] H. Liu, M. Xing, and Z. Bao, "A novel mixed-norm multibaseline phase-unwrapping algorithm based on linear programming," *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, vol. 12, no. 5, pp. 1086–1090, 2015.
- [43] H. Yu, H. Lee, N. Cao, and Y. Lan, "Optimal baseline design for multi-baseline InSAR phase unwrapping," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, to be published.
- [44] N. Cao, H. Yu, and H. Lee, "A multi-baseline InSAR phase unwrapping method using designed optimal baselines obtained by motion compensation algorithm," *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, vol. 15, no. 8, pp. 1219–1223, 2018.
- [45] H. Yu, Y. Lan, J. Xu, D. An, and H. Lee, "Large-scale L0-norm and L1-norm two-dimensional phase unwrapping," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 55, no. 8, pp. 4712–4728, 2017.
- [46] M. Costantini, F. Malvarosa, and F. Minati, "A general formulation for redundant integration of finite differences and phase unwrapping on a sparse multidimensional domain," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 50, no. 3, pp. 758–768, 2012.
- [47] G. Fornaro, A. Pauciuolo, and D. Reale, "A null-space method for the phase unwrapping of multitemporal SAR interferometric stacks," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 49, no. 6, pp. 2323–2334, 2011.
- [48] C. W. Chen and H. A. Zebker, "Phase unwrapping for large SAR interferograms: Statistical segmentation and generalized network models," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 40, no. 8, pp. 1709–1719, 2002.
- [49] K. Zhang, L. Ge, Z. Hu, A. Ng, X. Li, and C. Rizos, "Phase unwrapping for very large interferometric data sets," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 49, no. 10, pp. 4048–4061, 2011.
- [50] Q. Huang, H. Zhou, S. Dong, and S. Xu, "Parallel branch-cut algorithm based on simulated annealing for large-scale phase unwrapping," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 53, no. 7, pp. 3833–3846, 2015.
- [51] Ghiglia, D.G.: 'Robust two-dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods', *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 1994, 11, (11), pp. 107–117
- [52] Zebker, H.A., Lu, Y.: 'Phase unwrapping algorithms for radar interferometry: residue-cut, least-square, and synthesis algorithms', *J. Opt. Soc. Am.*, 1997, 15, (3), pp. 586–598
- [53] Goldstein, R.M., Zebker, H.A., Werner, C.L.: 'Satellite radar interferometry: two-dimensional phase unwrapping', *Radio Sci.*, 1988, 23, (4), pp. 713–720
- [54] Prati, C., Giani, M., Leuratti, N.: 'SAR interferometry: a 2D phase unwrapping technique based on phase and absolute values information'. *Proc. of the 1990 Int. Geoscience and Remote Sensing Symp.*, California, USA, 1990
- [55] Chen, C.W., Zebker, H.A.: 'Two-dimensional phase unwrapping with use of statistical models for cost functions in nonlinear optimization', *J. Opt. Soc. Am.*, 2001, 18, (1), pp. 338–351
- [56] Chen, C.W., Zebker, H.A.: 'Phase unwrapping for large SAR interferograms: statistical segmentation and generalized network models', *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2002, 40, (1), pp. 1709–1719
- [57] Xu, W., Cumming, I.: 'A region-growing algorithm for InSAR phase unwrapping', *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 1999, 37, (1), pp. 124–134

