

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

**Université de Batna -2-**  
**Faculté de Technologie**  
**Département d'Électronique**



## **THÈSE**

**Présentée pour l'obtention du diplôme de  
DOCTORAT en SCIENCES**

**Spécialité : Électronique**

**Option: *Micro-ondes pour Télécommunications***

**Par**

**BENTAHAR TAREK**

**Thème**

---

**Approche de déroulement de phase éliminant l'effet de  
propagation d'erreur due aux sauts de phase par  
l'interférogramme SAR**

---

Soutenue le 12/01/2017

Devant le jury :

Dr. BENSLAMA Malek	Prof.	Université Constantine 1	Président
Dr. BENATIA Djamel	Prof.	Université Batna 2	Rapporteur
Dr. FORTAKI Tarek	Prof.	Université Batna 2	Examineur
Dr. BENABDELKADER Souad	M.C.A.	Université Batna 2	Examineur
Dr. CHAABI A/Hafid	Prof.	Université Constantine 1	Examineur
Dr. KHADROUCHE Djamel	M.C.A.	Université M'Sila	Examineur

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# Dédicaces

Je dédie ce travail à : tous qu'ils me sont chers, mes parents, mes frères, mes sœurs, ma femme et tous mes amis.

# Remerciement

Je tiens premièrement à remercier notre seigneur ``Allah`` qui nous a adopté de la merveilleuse faculté de raisonnement.

Je remercie aussi profondément mon encadreur Pr Dj Benatia durant les projets de magister et de doctorat pour ses aides, ses encouragements et ses précieux conseils.

Je remercie tous les membres de jury, le président Pr BENSLAMA Malek, Pr FORTAKI Tarek, Dr BENABDELKADER Souad, Pr CHAABI A-Hafid et Dr. KHADROUCHE Djamel d'avoir accepté l'évaluation de notre thèse.

Je remercie également tous les enseignants de l'université de Batna en générale et ceux de département d'électronique-télécommunications en particulier qui ont activement contribué le long de ma formation.

Sans oublier les membres de département de génie électrique et Labget à Tébessa.

# Résumé

Les systèmes d'imagerie interférométriques (inSAR) présentent une grande faculté de fonctionnement dans toutes les conditions contrairement aux systèmes d'imagerie optique qui dépendent totalement d'illumination solaire. Comparativement au SAR singulier (une prise de vue), l'inSAR est le seul système capable de fournir une proportionnalité correcte entre l'altitude d'un point imagé et la phase interférométrique reçue et par conséquent de générer une présentation 3D de la surface topographique communément appelée le modèle numérique du terrain.

Mais l'information de la phase est mesurée modulo  $2\pi$  ou roulée en  $2\pi$ , alors pour connaître l'altitude réelle, un processus inverse nommé déroulement de phase doit être appelé. Plusieurs algorithmes de déroulement ont été proposés dont l'efficacité dépend principalement du taux de résidus et de leurs distributions dans l'interférogramme. Donc l'étape de filtrage est sans doute inévitable car un l'interférogramme n'est jamais sans-bruits.

Dans cette thèse une approche complète et fiable sera proposée, elle vise à améliorer les deux procédures :

- Le filtrage d'interférogramme afin de minimiser le taux de résidus.
- Le déroulement de phase afin de reconstruire convenablement la surface topographique à partir de l'interférogramme en éliminant l'effet de propagation des résidus restants.

Mots-clés : inSAR, MNT, reconstruction 3D de surface, filtrage d'interférogramme, déroulement de phase, résidus et propagation d'erreurs.

# Abstarct

Interferometric imaging systems (InSAR) have a great ability to operating in all conditions contrary to optical imaging systems which are totally dependent on solar illumination. Comparatively with the single antenna SAR , the InSAR is the only system able to provide a proper proportionality between the altitude of an imaged point, and the interferometric phase received, with which a 3D presentation of the topographic surface can be obtained, this presentation is commonly known as the digital terrain model.

But the information of the phase is measured modulo  $2\pi$  (wrapped into  $2\pi$  ). So to determine the real altitude, a reverse process called phase unwrapping is to be performed. Several phase unwrapping algorithms have been proposed where their efficiency depend mainly on the level of residue and the its distribution in the interferogram. So the filtering step is probably inevitable because an interferogram is never without-noise.

In this thesis a complete and reliable approach will be proposed, it aims to enhance the both process :

- De-noising the interferogram to minimize the residues rate.
- Unwrapping the interferogram without spreading effect due to the remaining residues.

Keywords : inSAR, DEM, 3D reconstruction surface, interferogram filtering, phase unwrapping, residues and error spreading.

## ملخص

نظم التصوير التداخلي لديها قدرة كبيرة على العمل في جميع الظروف عكس على أنظمة التصوير البصرية التي تعتمد كلياً على الإضاءة الشمسية. كمقارنة و مع النظام الاحادي النظام التداخلي هو الوحيد القادر على تقديم التناسب الصحيح بين ارتفاع نقطة المصورة، وزاوية الإشارة، بهذه الطريقة يمكن الحصول على تمثيل طبوغرافي المعروفة باسم نموذج التضاريس الرقمي. ولكن معلومات الزاوية يقاس في مجال 2 بي , ولتحديد الارتفاع الحقيقي نحتاج الى عملية عكسية. وقد اقترحت عدة خوارزميات لهذه العملية حيث كفاءتها تعتمد أساساً على مستوى الضجيج ونوزيعه في الصورة. لذلك فإن خطوة تصفية لا مفر منها لأن من المستحيل الحصول على صورة تداخلية من دون ضجيج.

في هذه الأطروحة سيتم اقتراح طريقة كاملة وموثوق بها، تهدف إلى تحسين العمليتين:

- تقليل الضجيج في الصورة تداخلية
- الحصول على الارتفاعات الحقيقية بدون انتشار الضجيج

كلمات بحث: نظم التصوير التداخلي, نموذج التضاريس الرقمي, تصفية الصورة تداخلية, انتشار الضجيج

# Liste des figures

Figure I.1 : Différence entre SAR et inSAR, (a) SAR, (b) inSAR .....	5
Figure I.2 : L'ouverture rayonnante rectangulaire .....	5
Figure I.3 : Notion d'illumination en azimute et en distance. ....	7
Figure I.4 La durée d'impulsion et la résolution distale. ....	8
Figure I.5 : Les défauts de projection parabolique de l'onde radar .....	9
Figure I.6 : Images SAR, (a) image d'amplitude, (b) image de phase. ....	12
Figure I.7 : L'altitude de point imagé et la différence de trajet.....	13
Figure I.8 : La différence d'altitude et la différence de la distance radiale. ....	14
Figure I.9 : Images inSAR .....	15
Figure I.10 : Les angles d'incidence et la décorrélation spatiale.....	16
Figure I.11 : Exemple d'image inSAR de Vatnajökull ERS-1/2 ( <i>tandem data</i> ) ESA, (a) image d'amplitude, (b) interférogramme, (c) image de cohérence. ....	19
Figure II.1 : (a) interférogramme avec bruits additifs, (b) les pixels bruités, (c) les résidus détectés, (d) les franges et les résidus .....	23
Figure II.2. Détection de résidu par le gradient roulé (zone 2x2).....	24
Figure II.3 la relation entre l'écart-type de Bamler et Hartl, nombre d'observation et la cohérence .....	29
Figure II.4. 3 parmi 9 sous masques de filtre de Nagao.....	34
Figure II.5. Les 16 masques directionnels de <i>Lee</i> .....	38
Figure II.6. Les 4 masques directionnels de <i>Wang et al</i> ( <i>Lee</i> modifié) .....	39
Figure II.7. L'allure la fonction vortex (arctan bidimensionnelle) .....	40
Figure II.8 la compensation par la fonction de dispersion .....	41
Figure III.1 : Problème non-unicité de déroulement selon le parcours suivi et le point de départ .....	44
Figure III.2 : Traitement unidimensionnel pour une section de la surface, condition d'Itoh satisfaite ....	47
Figure III.3 : Traitement unidimensionnel pour une section de la surface, violation de la condition d'Itoh.....	48
Figure III.4 : Les deux modes simples de la méthode d'ajustement.....	49
Figure III.5 : Les deux images générées pour des sauts de phase situés entre 50-60/40-45 .....	49
Figure III.6 : Les deux images générées pour des sauts de phase situés entre 35-40/90-100 .....	50
Figure III.7 : Le déroulement avec résidus et les lignes distordues. (a) l'interférogramme, (b) la méthode de gradient basique, (c) la méthode d'ajustement.....	50

Figure III.8 : Test d'algorithme de déroulement Goldstein pour un interférogramme pics à franges fermées. (a) l'interférogramme, (b) l'image de phase déroulée, (c) la mappe des résidus, (d) la mappe de branches.....	.53
Figure III.9 : Test d'algorithme de déroulement Goldstein pour un interférogramme ondes à franges ouvertes.(a) l'interférogramme, (b) l'image de phase déroulée, (c) la mappe des résidus, (d) la mappe de branches.....	.54
Figure III.10 : Test d'algorithme de déroulement Goldstein pour une partie d'un interférogramme réel d'ERS-1. (a) l'interférogramme, (b) l'image de phase déroulée, (c) la mappe des résidus, (d) la mappe de branches.....	.55
Figure III.11 : (a) l'image de phase original avec discontinuités raides, (b) l'interférogramme correspondant .....	.57
Figure III.12 : (a) la mappe de pseudo-corrélation, (b) la mappe de guide obtenue par la détection des bords.....	.58
Figure III.13 : (a) la mappe des branches guidée par la pseudo-corrélation, (b) la mappes des branches de Goldstein, (c) l'image de phase déroulée après le placement de branches par GPC, (d) l'image de phase déroulée après le placement de branches de Goldstein. ....	.59
Figure III.14 : Comparaison entre la mappe des branches de Goldstein et AD. (a) Goldstein, (b) AD.....	.60
Figure III.15 : Test d'algorithme de déroulement de Flynn pour un interférogramme pics à franges fermées. (a) l'interférogramme, (b) l'image de phase déroulée, (c) la mappe de qualité PDV.....	.63
Figure III.16 : Test d'algorithme de déroulement de Flynn pour un interférogramme ondes à franges ouvertes.(a) l'interférogramme, (b) l'image de phase déroulée, (c) la mappe de qualité PDV..	.64
Figure III.17 : Test d'algorithme de déroulement de Flynn pour une partie d'un interférogramme réel d'ERS-1. (a) l'interférogramme, (b) l'image de phase déroulée, (c) la mappe de qualité PDV .....	.65
Figure III.18 : Les prédictions des directions pour le pixel à croître et ses voisins .....	.66
Figure IV. 1 : La mappe de qualité par gradient (image1). (a) l,interférogramme. (b) $\Delta x$ . (c) $\Delta y$ . (d) $ \vec{\nabla}f $ . (e) $ \vec{\nabla}f _{L1}$ . (f) le gradient binaire .....	.74
Figure IV. 2 : La mappe de qualité par gradient (image2). (a) l,interférogramme. (b) $\Delta x$ . (c) $\Delta y$ . (d) $ \vec{\nabla}f $ . (e) $ \vec{\nabla}f _{L1}$ . (f) le gradient binaire.....	.75
Figure IV.3 : La mappe de qualité par PDV. (a). PDV 3x3. (b) PDV 5x5.....	.76
Figure IV.4 : La mappe de qualité par PDV 2V2H. (a). PDV. (b) PDV classifiée .....	.76

Figure IV.5 : La mappe de qualité par PC 3x3. (a). pour un interférogramme sans résidus. (b) pour un interférogramme avec résidus.....	.77
Figure IV.6 : Test avec image de pics. (a) interférogramme bruité, (b) la mappe des résidus avant le filtrage, (c) la mappe PDV.....	.79
Figure IV.7 : Test avec image d'ondes. (a) interférogramme bruité, (b) la mappe des résidus avant le filtrage, (c) la mappe PDV.....	.79
Figure IV.8 : Filtrage par PDV-PAD. (a) mappe des résidus après filtrage (pics). (b) image de phase déroulée (pics). (c) mappe des résidus après filtrage (ondes). (d) image de phase déroulée (ondes).....	.80
Figure VI.9 : Filtrage par le morphologique adapté. (a) mappe des résidus après filtrage (pics). (b) image de phase déroulée (pics). (c) mappe des résidus après filtrage (ondes). (d) image de phase déroulée (ondes). .....	.80
Figure IV.10 : Filtrage par le médian modifié. (a) mappe des résidus après filtrage (pics). (b) image de phase déroulée (pics). (c) mappe des résidus après filtrage (ondes). (d) image de phase déroulée (ondes). .....	.81
Figure IV.11 : performances de déroulement proposé en termes de la surface de la région distordues ..	82
Figure IV.12 : exemple d'une distance diagonale de séparant deux résidus non masqués de signe inverse .....	82
Figure IV.13 : performances de déroulement proposé en termes de RMSE. ....	83
Figure IV.14 : Les réponses des filtres PADPDV, AM et MM en taux des résidus pour l'image de pics. ....	.85
Figure IV.15 : Les réponses des filtres PADPDV, AM et MM en taux des résidus pour l'image d'ondes. ....	.86
Figure IV.16 : performances de la méthode proposée en termes de MSD (image de pics). ....	.87
Figure IV.17 performances de la méthode proposée en termes de MSD (image d'ondes). ....	.88
Figure IV.18 : (a) Un interférogramme réel 1 sans filtrage. (b) la mappe des résidus. ....	.89
Figure IV.19. (a) : Un interférogramme réel 2 sans filtrage. (b) la mappe des résidus. ....	.89
Figure IV.20 : Résultats de filtrage d'interférogramme 1. (a) PDV-PAD, (b) MA ,(c) MM. ....	.90
Figure IV.21 : Résultats de filtrage d'interférogramme 2. (a) PDV-PAD, (b) MA ,(c) MM.....	.90
Figure IV.22 : Réduction des résidus résultant sur une partie d'int1. (a) avant filtrage. (b) après filtrage .....	.91
Figure IV.23 : Déroulement de « int1 » par l'algorithme de Goldstein, (a) la mappe de branches, (b) la phase déroulée. ....	.93

Figure IV.24 : Déroulement de « int1 » par l’algorithme de Flynn, (a) la mappe de qualité PDV, (b) la phase déroulée. ....	.93
Figure IV.25 : Déroulement de « int2 » par l’algorithme de Goldstein, (a) la mappe de branches, (b) la phase déroulée .....	.94
Figure IV.26 : Déroulement de « int2 » par l’algorithme de Flynn, (a) la mappe de qualité PDV, (b) la phase déroulée .....	.94
Figure IV.27 performance de la méthode proposée en termes de la région masquée par les branches pour l’int1. ....	.95
Figure IV.28 performance de la méthode proposée en termes de la région masquée par les branches pour l’int2 .....	.96

# Liste des tableaux

Tableau I.1 : Les bandes de fréquences SAR et inSAR.....	6
Tableau I.2 : Quelques satellites SAR .....	7
Tableau II.1 les paramètres de filtre Goldstein et celui modifié.....	29
Tableau II.2 résultats de filtrage morphologique adapté, médian modifié et mode en termes de taux de réduction des résidus.....	35
Tableau II.3 résultats de filtrage Moyenneur complexe basique, Moyenneur pivoté et Médian Pivoté en termes de taux des résidus, variance de phase avant et après déroulement .....	37
Tableau IV.1 : Taux de résidus avant et après le filtrage PDV-PAD, MA et MM.....	84
Tableau IV.2 : MSD (rad) de l'image de phase déroulée sans et avec filtrage PDV-PAD, MA et MM .....	87
Tableau IV.3 : résultats de filtrage PDV-PAD, MA, MM en termes de taux de réduction pour les interférogrammes réels.....	91
Tableau IV.4 : Temps d'exécution de filtrage et de déroulement de Goldstein pour l'int1 .....	92
Tableau IV.5 : Temps d'exécution de filtrage et de déroulement de Goldstein pour l'int2.....	92

## **Travaux liés au sujet de la thèses**

### **Publications:**

- T. Bentahar, D. Benatia, M. Boulila , "De-noising interferogram in SAR using variance and absolute deviation functions", World Journal Of Engineering, Vol. 13, No 2, pp. 169-176, ( 2016).
- T. Bentahar, D. Benatia and M. Boulila, "2D Phase Unwrapping Algorithm for Phase Image using Adjustment Method", J. Automation & Systems Engineering Vol 4, No 3, pp 154-164, (Sep 2010).

### **Communications:**

- T. Bentahar, D. Benatia, M. Boulila. "comparative study of the adjustment phase unwrapping for inSAR image". Conference Paper, Proceeding ICSTA-10, 19 Déc 2010. (Monastir, Tunisie).
- T. Bentahar, D. Benatia, M. Boulila. " Reconstruction 3D of the phase image by an adjustment algorithm of phase unwrapping ". Conference Paper, Proceeding ICAI- 09 16 Nov 2009. ( CUBBA, Algérie).
- T. Bentahar, D. Benatia, M. Boulila. "2D phase unwrapping algorithm for phase image using adjustment method". Conference Paper, Proceeding ICEEDT-09 01 Nov 2009. (Sousse, Tunisie).
- T. Bentahar, D. Benatia, M. Boulila. "1D phase unwrapping algorithm for phase image using adjustment method".Conference Paper, Proceeding ICEEDT-09. 31 Oct 2009. (Sousse, Tunisie).

### **Thème de magister :**

"Modélisation d'un radar interférométrique à déroulement de phase et correction des distorsions", présenté le 04-02-2008 à l'université de Batna.

# Table des matières

Introduction générale .....	1
-----------------------------	---

## Chapitre I : Généralité sur le système d'imagerie inSAR

I-1 introduction .....	4
I-2 c'est quoi le système inSAR.....	4
I.2.1 L'antenne radar .....	5
I.2.2 Bandes de fréquences .....	6
I.2.3 Quelques satellites SAR et inSAR .....	6
I.3 Principe de SAR.....	7
I.3.1 la résolution.....	7
I.3.2 les défauts de projection .....	9
I.3.3 le signal et les images SAR.....	10
I.4 Principe de l'inSAR .....	12
I.5 Signal de corrélation et les images inSAR .....	15
I.5.1 Décorrélacion spatiale .....	16
I.5.2 Décorrélacion temporelle .....	17
I.5.3 les images inSAR .....	17
I.6 conclusion .....	20

## Chapitre II : Étude, analyse et comparaison de différentes méthodes de filtrage d'interférogramme

II-1 introduction .....	21
II-2 L'entité de bruit de phase dans l'interférogramme.....	22
II-3 Quelques méthodes de filtrage sur le plan fréquentiel .....	25
II.3.1 Les filtres fréquentiels basiques.....	25
II.3.1.1 Les filtres passe-bas sélectifs .....	26
II.3.1.2 Le filtre passe-bas Butterworth.....	26
II.3.2 Filtres fréquentiels performants .....	27
II.3.2.1 Filtre de Goldstein .....	27
II.3.2.2 Filtre de Baran (Goldstein modifié) .....	28

II.3.2.3	Filtre Goldstein amélioré basé sur la technique de vrai-voisinage adaptatif .....	30
II.3.2.4	Filtre Autre amélioration de filtre de Goldstein .....	31
II.3.2.5	Filtre fenêtré avec un seuil .....	32
II-4	Quelques méthodes de filtrage sur le plan spatial .....	32
II.4.1	Les filtres spatiaux basiques .....	32
II.4.1.1	Le filtre moyenneur.....	33
II.4.1.2	Le filtre médian .....	33
II.4.1.3	Le filtre gaussien .....	33
II.4.1.4	Le filtre de Nagao .....	33
II.4.2	Les filtres spatiaux améliorés .....	34
II.4.2.1	Filtre médian modifié.....	34
II.4.2.2	Filtre morphologique adapté.....	34
II.4.2.3	Filtre mode .....	35
II.4.2.4	Filtre moyenneur pivoté .....	36
II.4.2.5	Filtre médian pivoté .....	36
II.4.2.6	Filtre de Lee amélioré .....	37
II.4.2.7	Autre améliorations du filtre Lee .....	39
II.4.2.8	Filtrage par des fonctions de distribution rotationnelle .....	40
II-5	conclusion .....	42

## Chapitre III : Étude, analyse et comparaison de différentes méthodes de déroulement de phase

III-1	introduction.....	43
III-2	C'est quoi le déroulement de phase ? .....	44
III.2.1	formulations.....	44
III.2.2	la condition d'Itoh.....	45
III-3	déroulement par ajustement.....	46
III.3.1	traitement 1D .....	46
III.3.2	traitement 2D .....	48
III-4	autre approche de déroulement .....	51
III.4.1	Les méthodes de <i>Branch-cut</i> .....	51

III.4.1.1 La méthode de Goldstein .....	51
III.4.1.2 Méthode <i>Branch-Cut</i> guidée par la fonction pseudo corrélation .....	56
III.4.1.3 Méthode <i>Branch-Cut</i> d'appariement par distance .....	59
III.4.2 Les méthodes de qualité guidée et la croissance de la région.....	60
III.4.2.1 La méthode de Flynn .....	61
III.4.2.2 La méthode de Wei Xu (prédiction de la direction de déroulement).....	66
III.4.2.3 La méthode de quantification de la qualité .....	68
III.4.3 Les méthodes de norme de minimisation .....	69
III.4.3.1 les normes $L^p$ .....	69
III.4.3.2 la norme $L^2$ .....	70
III.4.3.3 la norme $L$ .....	71
III.4.3.4 les normes de petite valeur de $p$ .....	71
III-5 conclusion .....	71

## Chapitre VI : L'approche de filtrage et de déroulement de phase pour l'interférogramme SAR

VI-1 introduction .....	72
VI-2 problématique.....	72
VI-3 Étude succincte sur les fonctions générant la mappe de qualité.....	73
VI.3.1 la cohérence.....	73
VI.3.2 gradient .....	73
VI.3.3 la variance de la phase dérivative .....	75
VI.3.4 la pseudo-corrélation .....	77
VI-4 la méthode de filtrage et déroulement proposées .....	77
VI-5 résultats et discussions .....	78
VI.5.1 interférogrammes simulés .....	78
VI.5.2 interférogrammes réels.....	89
VI-6 conclusion .....	97
Conclusion générale .....	98
Bibliographie.....	100

# Introduction générale

Depuis plusieurs décennies l'homme a porté un grand intérêt à l'imagerie de surface de la terre dans le but de collecter les informations topographiques telle que l'allure des reliefs ou de surveiller tout changement due à un phénomène de source humaine ou naturelle tels que l'impact de mouvement séismique et tectonique, les éruptions volcaniques, l'effet de changement climatique (température) et le gisement [1-3]. Ces différentes applications ont vu un substantiel avancement à l'avènement des systèmes d'imagerie radar en générale et inSAR (*Interferometric Synthetic Aperture Radar*) (Radar interférométrique à ouverture synthétique) en particulier [3-12] car ils peuvent fonctionner le jour et la nuit et dans toutes les conditions météorologiques grâce à la possession de leurs propres sources d'illumination qui est l'onde Électromagnétique (EM) contrairement aux systèmes d'imagerie optique qui dépendent totalement au rayonnement solaire et à la clarté du milieu de propagation dans lequel la présence des nuages, brouillard, précipitation ou tout autres particules nuisent à l'acquisition correctes des images.

Le système inSAR est le seul système capable d'exploiter l'information de phase incluse dans le signal et de générer les modèles numériques du terrain (*Digital Elevation Model DEM*) interprétant les altitudes des points imagés en proportionnalité avec la phase interférométriques, mais cette phase mesurée est modulo  $2\pi$  ou autrement dit elle est roulée ; ce qui rend l'information d'altitude limitée par une altitude d'ambiguïté permettant de former des franges dans les images de phase interférométriques (nommées interférogrammes), alors pour avoir les altitudes réelles des points imagés nous devons passer de la phase modulo  $2\pi$  (Roulée/*Wrapped*) à la phase réelle (déroulée/*Unwrapped*) par un processus appelé déroulement de phase [13- 15]. La réussite de déroulement de phase dépend de bruits dans l'interférogramme communément appelés les résidus. Si l'interférogramme est sans résidus ; ce qui est carrément impossible en réalité ; le déroulement n'est qu'une simple intégration des gradients roulés. Mais avec les résidus le déroulement devient une tâche difficile voire même impossible pour un certain seuil à cause de la propagation d'erreurs lors de l'opération de déroulement en formant des lignes distordues le long des parcours d'intégration choisis dans l'image. Donc une approche fiable de traitement pour limiter ou éliminer l'effet propagatif des résidus nous oblige de perfectionner le filtrage d'interfrégramme et le déroulement de phase pour qu'ils soient adaptatifs aux problèmes pouvant être rencontrés.

Pour cela, notre thèse porte sur quatre chapitres. Dans le premier chapitre, nous allons préparer le terrain en donnant certaines notions de base sur le système d'imagerie inSAR, les bandes de fréquences utilisées, le fonctionnement, caractéristiques et les différentes images générées. Ce chapitre permettra également de résumer les mécanismes de génération et les caractéristiques des interférogrammes dédiés aux topographies du terrain.

Le deuxième chapitre est consacré au filtrage d'interférogramme afin de dé-bruiter les résidus. A l'instar du domaine de traitement d'image, le filtrage de l'interférogramme inSAR peut se faire sur le plan fréquentiel (aspect spectral) ; mais dans ce cas il est purement global sauf pour certains algorithmes multi-grille ou fenêtré ; ou sur le plan spatial et dans ce cas le filtrage pourrait être local et plus adaptatif. Dans ce chapitre une étude et comparaison sur des différents algorithmes de filtrage seront données et des améliorations seront effectuées que ce soit sur le plan fréquentiel [16-35] ou spatial [36-46]. Cet état de l'art va permettre de bien comprendre les différents mécanismes possibles pour dé-bruiter un interférogramme et de constater que seulement quelques algorithmes de filtrage appliqués dans le traitement d'image sont convenables pour ce type particulier d'image inSAR vue l'entité spécifique de bruit dont la discontinuité de phase et le résidu se diffèrent.

Le troisième chapitre fait l'objet d'un état de l'art sur les différents algorithmes de déroulement [47-78], plusieurs approches de déroulement adaptées à la présence des résidus ont été proposées, elles se divisent en deux catégories principales : suivi de parcours (*Path Following*) et norme de minimisation (*Minimum Norm*).

La catégorie PF se divise elle-même en deux sous-classes : rupture des branches (*Branch Cut*) [51-59] et guidée par la qualité-croissance des régions (*Quality Guided- region Growing*) [60-66]. Le traitement PF se caractérise par des techniques locales et il déroule les phases les unes après les autres en suivant un parcours statique prédéterminé ou dynamique adaptatif à localisation des résidus (des branches ou des grappes). Tandis que la catégorie MN [67-76] se caractérise par un traitement global dont toutes les phases sont impliquées à la fois dans le calcul de la solution, nous nous trouvons dans ce cas face à l'utilisation des méthodes numériques pour résoudre le problème. Dans ce chapitre nous allons entamer cette étude par l'utilité de déroulement avec ses formulations de base, dans la deuxième section une description mathématique détaillée de déroulement sera présentée et par cette description une méthode d'ajustement sera ainsi déduite [48]. En suite la dernière section consiste à un état de l'art sur des méthodes de déroulement largement utilisées dans les deux catégories, cependant une tendance vers les approches PF sera adoptée.

Dans le dernier chapitre une approche de l'élimination de l'effet des résidus sera présentée. Elle consiste à proposer un filtrage basé sur deux fonctions statistiques [77], la première est la variance de la phase dérivative (PDV) servant à sélectionner le centre de filtre et la seconde est la déviation absolue de la phase servant à assigner une phase estimée de chaque pixel sélectionné par la fonction PDV. Ainsi une méthode de déroulement hybride sera proposée dans laquelle nous adoptons la rupture de branches (*Branch-Cut*) comme catégorie, l'appariement par distance comme procédure de connexion et la méthode d'ajustement [48] comme procédure d'inondation (*Flood-Fill*). L'amélioration par la méthode d'ajustement peut être également combinée avec l'algorithme de Flynn dans sa procédure d'inondation. Les critères de comparaison choisis pour notre analyse sont aussi diversifiés : le taux des résidus, le temps d'exécution, la netteté des franges et l'écart quadratique moyen (*Mean Square Deviation MSD*) et la racine de l'erreur quadratique moyenne (*Root Mean Square Error RMSE*).

A la fin de cette thèse, nous retrouvons la conclusion générale ainsi que les perspectives.

# Chapitre I

## Généralité sur le système d'imagerie inSAR

### I.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons préparer le terrain en donnant certaines notions de base sur le système d'imagerie inSAR, les bandes de fréquences utilisées, le fonctionnement, caractéristiques et les différentes images générées. L'avantage de ce système comparativement à celui optique est sa capacité de fonctionner le jour et la nuit et dans toutes les conditions météorologiques car il possède sa propre source d'illumination qui est l'onde EM. Les domaines d'application d'un tel système est très vaste telles que : la météorologie, changement des surfaces, suivi le mouvement des terrains, la fonte des glaciers et les inlandsis, activités et éruptions volcaniques et la topographie [1-3]. Cette dernière consiste le point d'intérêt de notre travail, la topographie est obtenue par le processus de génération de modèle numérique du terrain (*DEM Digital Earth Model*) en exploitant les images de phases de l'inSAR communément nommées les interférogrammes. Donc ce chapitre permettra de résumer les mécanismes de génération et les caractéristiques des interférogrammes dédiés aux topographies du terrain.

### I.2 C'est quoi le système inSAR

Nous pouvons dire que le système inSAR est chaque méthode employant deux signaux complexes issus de deux images SAR [4]. En effet le système inSAR se diffère du SAR par une double acquisition de signaux collectés par une seule antenne et multi-passe ou par deux antennes et mono-passe, dont le premier est utilisé pour détecter les changements (dé-corrélation temporelle) et le second est pour les informations topographiques. Alors le système inSAR est principalement constitué d'une ou de deux antennes séparée par une ligne de base (*base-line*), elles sont spatiaux-portés ou aéroportées. Le signal capté est due à la corrélation entre les deux signaux de deux antennes, l'un d'eux est dit maître et l'autre est esclave. Par l'antenne SAR la seule information exploitable est l'amplitude car la phase est inutile et n'a pas de relation avec l'altitude de point imagé, ce qui le rend un système générant uniquement les images d'amplitude. Par contre le système inSAR ; plus l'amplitude ; peut fournir une information de phase liée à l'altitude de point imagé grâce l'interférence entre les deux signaux réfléchis.

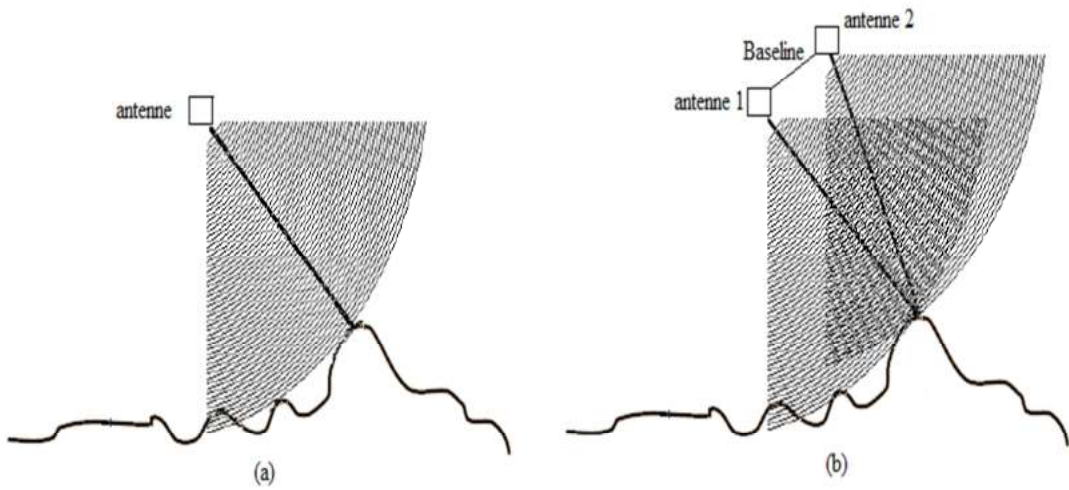


Figure I.1 : Différence entre SAR et inSAR, (a) SAR, (b) inSAR

### I.2.1 L'antenne radar

Un conducteur parcouru par un courant électrique alternatif produit un champ électromagnétique qui rayonne dans l'espace environnant, pour une bonne directivité le champ EM se met à propager dans un guide d'onde. Puis se termine à rayonner via une ouverture généralement rectangulaire pour les systèmes inSAR.

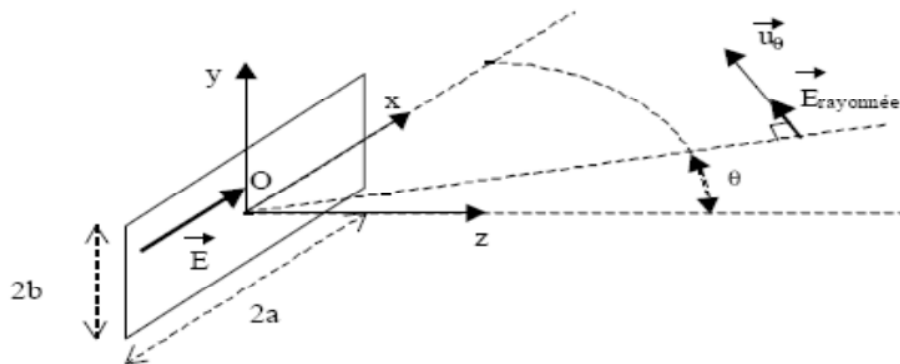


Figure I.2 : L'ouverture rayonnante rectangulaire.

Le champ max est obtenu par l'angle  $\theta=0$ , la forme d'illumination au sol (une section de diagramme de rayonnement) est elliptique.

### I.2.2 Bandes de fréquences

Le tableau I.1 ci-dessous montre les noms, les bandes de fréquences, les longueurs d'onde et leurs domaines d'application.

Le nom de la bande	Les fréquences	Les longueurs d'onde	utilisations
P	<400Mhz	<1m	Pénétration, humidité du sol, la biomasse.
L	1-2 Ghz	15-30 cm	Végétation, déformation
S	2-4 GHz	7.5-15 cm	Végétation, déformation
C	4-8 Ghz	3.75-7.5 cm	Agriculture, déformation, topographie
X	8-12 Ghz	2.5-3.75 cm	Topographie haute résolution
Ku	12-18 Ghz	1.67-2.5 cm	Les océans les larges surface d'eau
Ka	24-40Ghz	0.75-1.11 cm	Glace et neige
Mm	40-300 Ghz	0.75-1 cm	Glace et neige

Tableau I.1 : Les bandes de fréquences SAR et inSAR. [3]

### I.2.3 Quelques satellites SAR et inSAR

Le tableau I.2 : Ci-dessous montre quelques satellites spécifiques.

Nom	Société propriétaire	Longueur d'onde	Date d'opération
US Seasat	National Aeronautics and Space Administration (NASA)	Bande-L k = 23.5 cm	Juin-octobre 1978
European Remote-sensing Satellite 1 (ERS-1)	European Space Agency (ESA)	Bande -C k = 5.66 cm	1991–2000
Japanese Earth Resources Satellite 1 (JERS-1)	Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)	Bande- L k = 23.5 cm	1992–1998
European Remote-sensing Satellite 2 (ERS-2)	European Space Agency (ESA)	Bande- C k = 5.66 cm	1995–2011
Canadian Radar Satellite 1 (Radarsat-1)	Canadian Space Agency (CSA)	Bande- C k = 5.66 cm	1995–2013

European Environmental Satellite (Envisat)	European Space Agency (ESA)	Bande- C k = 5.63 cm	2002–2012
Japanese Advanced Land Observing Satellite (ALOS)	Japanese Aerospace Exploration Agency (JAXA)	bande -L k = 23.6 cm	2006–2012
Canadian Radar Satellite 2 (Radarsat-2)	Canadian Space Agency (CSA)	Bande- C k = 5.55 cm	2007–présent
TerraSAR-X	German Aerospace Center (DLR)	bande -X k = 3.1 cm	2007–présent
COSMO-SkyMed constellation	Italian Space Agency (ASI)	Bande- X k = 3.1 cm	2007- présent
TerraSAR Add-on for Digital Elevation Measurements (TanDEM-X)	German Aerospace Center (DLR)	Bande- X k = 3.1 cm	2010- présent

Tableau I.2 : Quelques satellites SAR [5].

### I.3 Principe de SAR

#### I.3.1 la résolution

Les anciens radars d'imagerie à vision latérale (SLAR) basés sur une antenne à ouverture réelle envoient des impulsions avec basses fréquences; ici il ne s'agit pas la longueur d'onde ni la durée d'impulsion mais il s'agit le temps séparant deux impulsions; lors de la réception de l'écho et la retransmission de deuxième impulsion le porteur pourrait déjà être endors de la cellule illuminée précédente (pas de chevauchement), avec les systèmes SAR certaines améliorations ont pu être obtenues au niveau de la résolution en introduisant la technique de l'antenne virtuelle synthétique c.-à-d. une antenne composée de plusieurs cellules synthétisées due à la haute fréquence des impulsions.

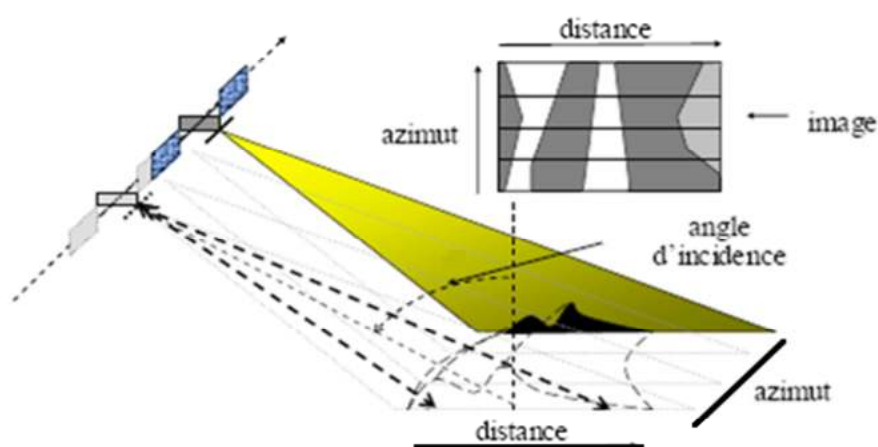


Figure I.3 : Notion d'illumination en azimute et en distance.

Ceci porte une bonne amélioration de la résolution en azimute car il y a une augmentation virtuelle de la taille d'antenne, tandis que la résolution en distance reste dépendante de la durée de l'impulsion.

La résolution en distance

La résolution en distance peut être définie comme la distance la plus courte pour laquelle deux cibles ponctuelles produisent deux échos non-chevauchés. La figure I.4 montre qu'une impulsion de durée  $\tau$  donne une résolution distale :

$$Rd = \frac{c\tau}{2} \tag{I.1}$$

Avec  $c$  est la célérité.

Donc une bonne (fine) résolution distale exige une impulsion très brève, ce qui présente une contrainte technologique et économique. Pour surmonter ce problème il existe en traitement de signal une technique dite compression d'impulsion (*Chirp pulse Compression*) qui consiste à transmettre longue impulsion, puis compresser tous les échos [6].

La véritable résolution distale au sol n'est qu'une projection selon l'angle d'incidence de faisceau  $\theta$ , l'équation I.1 devient :

$$Rd_{sol} = \frac{c\tau}{2 \sin(\theta)} \tag{I.2}$$

Autre approximation est proposée dans [6-8] en développant la formule de telle façon qu'elle soit en fonction de la bande passante de l'impulsion  $B$ .

$$Rd'_{sol} = \frac{c}{2 B \sin(\theta)} \tag{I.3}$$

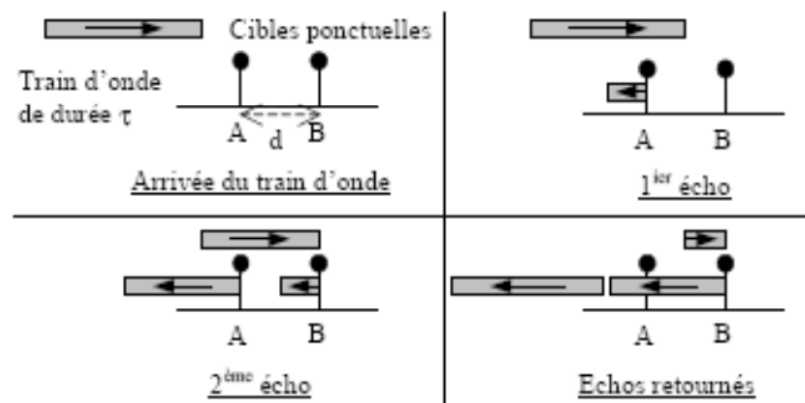


Figure I.4 La durée d'impulsion et la résolution distale.

La résolution en azimuth

La résolution azimuthale dépend principalement de dimension d'antenne ou son ouverture rayonnante [9], elle peut être définie comme :

$$Ra = \frac{\lambda r}{D} \quad (I.4)$$

Où  $\lambda$  est la longueur d'onde,  $r$  la distance entre l'antenne et le point imagé et  $D$  est l'ouverture d'antenne [7,8]. Cette expression de  $Ra$  veut dire que; pour une longueur d'onde et distance  $r$  données; nous pouvons avoir une bonne (fine) résolution azimuthale avec antenne de grande ouverture (dimension), par exemple pour une  $Ra$  désirée de 10 m, et une distance typique de porteur de 800 km tel que le satellite ERS-1/2 qui fonctionne dans la bande C de  $\lambda=5.66$  cm (voir lestableaux I.1 et 2) nous devons avoir une ouverture  $D=448$ m, une telle dimension était auparavant impossible de se placer sur aucun satellite SLAR. Avec le SAR nous pouvons surmonter la limitation de dimension réelle d'antenne en la remplaçant par une autre virtuelle synthétique, cette technique a été introduite la première fois pour des applications militaires par Carl Wiley en 1951 (Goodyear Aircraft Corporation).

**I.3.2 les défauts de projection**

La projection parabolique de l'onde EM sur un relief peut causer des défauts dues à la courbure et à l'inclinaison des quelques points imagés comme il est montré dans la figure I.5 ci-dessous, ce phénomène est l'une des sources de bruits dans les images SAR.

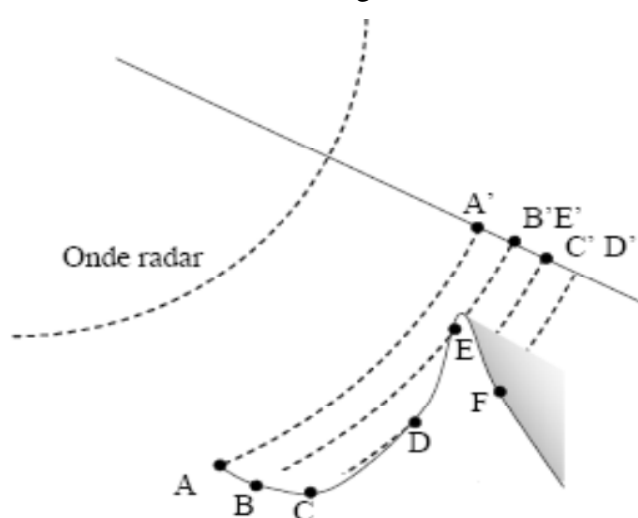


Figure I.5 : Les défauts de projection parabolique de l'onde radar.

Zones de compression ou zones d'accumulation

C'est le cas des points B et E où leurs échos se font simultanément car ils se situent sur la même distance par rapport à l'antenne, alors B' et E' se voient accumulés. Ces points se traduisent dans l'image par des pixels de forte brillance (blanc).

Zones d'inversion

C'est le cas du point E par rapport aux C et D où l'écho de E se reçoit le premier avant ceux de C et D, il constitue un cas extrême de zone de compression, ce défaut provient principalement des points de forte pente situant au sommet du relief.

Zones d'ombre

C'est le cas de point F où il y aura aucun écho car ce point se situe dans l'ombre, ce défaut est similaire aux systèmes d'imagerie optique sauf que l'ombre de SAR provient de l'onde EM alors que celui de système optique dépend de la position du soleil et aussi la présence des nuages. Ces points se traduisent dans l'image par des pixels noirs.

### **I.3.3 le signal et les images SAR**

Le signal collecté pour une cellule de résolution est complexe possédant une amplitude par laquelle nous obtiendrons l'image d'amplitude SAR et une phase qui est inutile pour générer une image ce qui n'est pas le cas de l'inSAR où les deux informations peuvent être exploitées afin d'avoir deux types d'image.

Dans les images d'amplitude la valeur de chaque pixel dépend des caractéristiques de réflectivité ou de la rétrodiffusion du point imagé et aussi l'orientation de la surface cellule. Pourtant l'information d'amplitude est directement exploitable et techniquement facile à extraire mais malheureusement elle fonction de nombreux paramètres de rétrodiffusion et géométriques ce qui rend l'interpolation une opération complexe ou dans certain cas basée sur des méthodes empiriques pour modéliser les valeurs par un niveau de brillance pondéré et ensuite une série des corrections seront aussi nécessaires [6, 10].

Parmi ces paramètres nous en trouvons :

- Absorption par la cible.
- Diffusion par la cible selon un facteur dit la radiométrie.
- Réflexion dans des directions autres que celle de l'antenne.
- Le facteur d'inclinaison.
- Le facteur d'orientation.

L'image de phase SAR est inutile car elle ne donne pas une information sur la brillance et elle est composée de plusieurs phases ce qui rend l'image comme une distribution aléatoire et sans aucun sens (voir la figure I.6.b)

$$\varphi = \varphi_{\text{trajet}} + \varphi_{\text{atmosphérique}} + \varphi_{\text{rétrodiffusion}} + \varphi_{\text{instrumentale}} + \varphi_{\text{bruit}} \quad (\text{I.5})$$

- La phase de trajet est le déphasage lié à la distance parcouru par l'onde.
- La phase météorologique est un second déphasage de trajet par des conditions atmosphériques particulières (dû à l'interaction de l'onde avec les particules météorologiques).
- La phase de rétrodiffusion est le déphasage introduit au moment d'interaction onde-surface.
- La phase instrumentale est celle produite par le système électronique d'émission et de réception (temps de réponse des filtres, amplificateurs...).
- Un bruit de phase dû au procédés d'acquisition (numérisation, dérives fréquentielles de la porteuse,...).

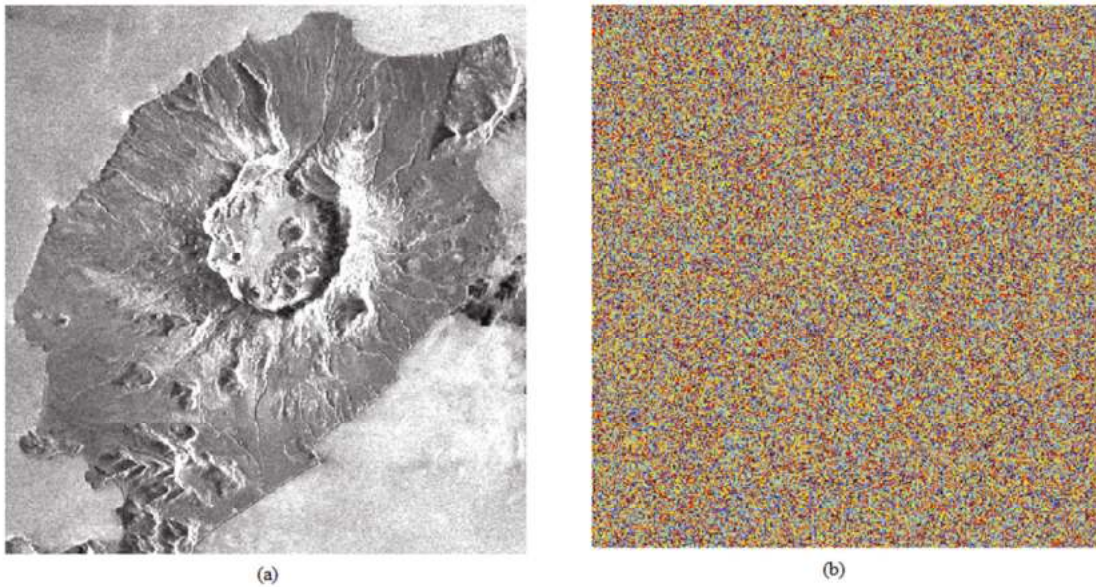


Figure I.6 : Images SAR, (a) image d'amplitude, (b) image de phase. ([www.gps.alaska.edu](http://www.gps.alaska.edu) GEOS 655 TectonicGeodesy, Jeff Freymueller)

#### I.4 Principe de l'inSAR

L'inSAR se diffère de SAR par une double acquisition de signal par deux antennes pour le mode mono-passe ou deux acquisitions par même antenne pour le mode multi-passe. La figure I.7 présente un système inSAR mono-passe comporte deux antennes séparé par une ligne de base (*base-line*)  $B_x$ , une dite maîtresse et l'autre dite esclave. Le but de tel système est d'analyser les différences de phases entre les deux signaux captés, cette analyse permet d'ajouter un appui à l'information d'amplitude qui reste la même en SAR ou inSAR.

Il est clair que la différence de phase  $\Delta\varphi$  due à la différence de trajet  $\Delta r$  entre les deux signaux est :

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r \quad (\text{I. 6})$$

D'autre part, géométriquement nous avons :

$$h = H - r \cos \left[ \arcsin \left( \frac{\Delta r}{B_x} \right) \right] \quad (\text{I. 7})$$

D'après les équations I.6 et 7 nous pouvons directement déduire :

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi B_x}{\lambda} \sin \left( \arccos \left( \frac{H - h}{r} \right) \right) \quad (\text{I. 8})$$

L'équation I.8 est la proportionnalité entre l'altitude de point imagé  $h$  et la différence de phase de trajet de deux signaux  $\Delta\varphi$  qui sera dorénavant nommée la phase interférométrique  $\phi$  car elle est due de l'interférence entre deux signaux corrélés.

Donc cette technique d'interférométrie permet d'avoir une relation directe entre l'altitude est la phase interférométrique mesurée par la corrélation (voir paragraphe I.5) et cette phase mesurée ne dépend que de la différence de trajet dont toutes les autres phases de l'équation I.5 seront éliminées par soustraction à part le bruit parce que les deux signaux captés se propagerait dans les mêmes conditions.

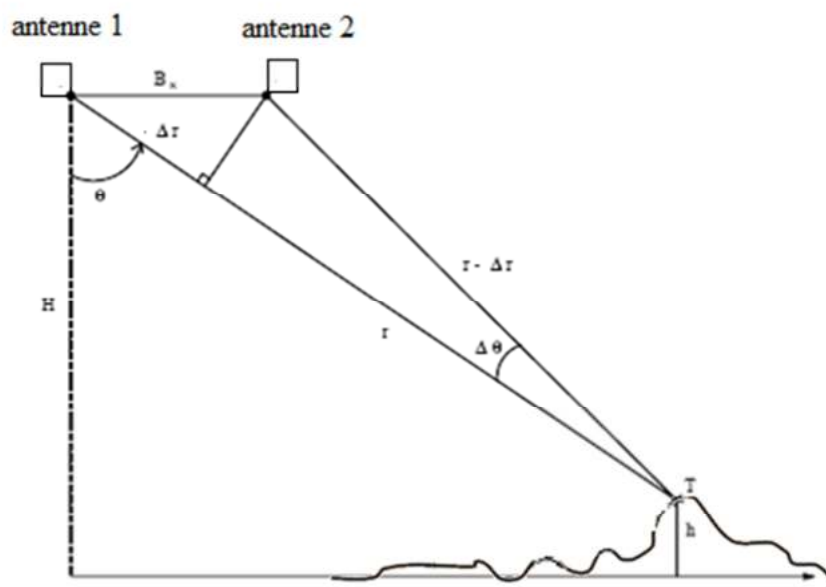


Figure I.7 : L'altitude de point imagé et la différence de trajet.

Malheureusement la phase mesurée est modulo  $2\pi$  et par conséquent l'altitude est roulée à une hauteur proportionnelle à  $2\pi$  dite l'altitude d'ambiguïté  $h_a$  qui est définie comme une différence d'altitude donnant une différence de phase interférométrique égale  $2\pi$  et cela correspond à une différence de trajet de  $\lambda/2$ . À ce stade nous avons élaboré deux notions de différence de phase, la première est la différence de phase de trajet entre les deux signaux corrélés  $\Delta\varphi$  proportionnelle au  $\Delta r$  pour un point, la seconde est la différence de phase interférométrique entre deux points  $\Delta\phi = \Delta(\Delta\varphi)$  proportionnelle à la différence de distance radiale  $d$  de l'antenne maîtresse (figure I.8).

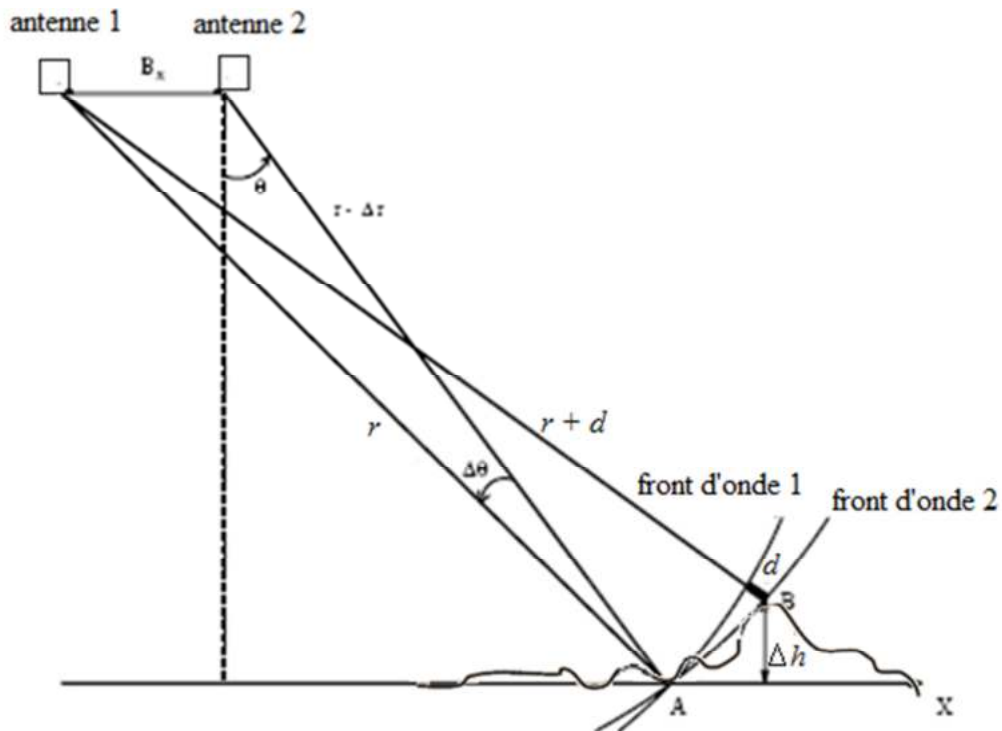


Figure I.8 : La différence d'altitude et la différence de la distance radiale.  
 La figure I.8 simplifie l'analyse de différence d'altitude  $\Delta h$  entre deux points A et B en fonction de la distance radiale  $d$  et par conséquent en fonction de la phase interférométrique.

$$\Delta h = \frac{d r \tan \theta}{B_x} \quad (\text{I. 9})$$

Nous pouvons également définir l'altitude d'ambiguïté comme :

$$h_a = \frac{\lambda r \tan \theta}{2B_x} \quad (\text{I. 10})$$

Cette notion d'amplitude d'ambiguïté se manifeste comme limite des franges dans l'image de phase interférométriques communément appelée interférogramme, alors le nombre de franges augmente proportionnellement avec la fréquence et la ligne de base (*base-line*), et inversement proportionnelle avec la hauteur de l'orbite (altitude du porteur).

Exemple : ERS-1,  $\lambda=5.66$  cm,  $r = 800$ km,  $\theta=23$ ,  $B_x = 1300$ m ce qui donne une  $h_a = 7.2$ m

Nous pouvons aussi définir une autre limite concernant la taille de la cellule de résolution (taille de pixel) où la distance radiale  $dc$  critique ne doit pas la dépasser, cette  $dc$  critique se traduit par une altitude dite de superposition  $h_s$  qui induit à une déformation à l'échelle de la taille de la cellule de résolution  $Rd$  (équation I.1,2).

$$h_s = \frac{Rd r \tan \theta}{B_x} \quad (\text{I. 11})$$

La figure I.9 montre un exemple de l'image d'amplitude, les images de phase singulière et l'interférogramme générés par l'inSAR.

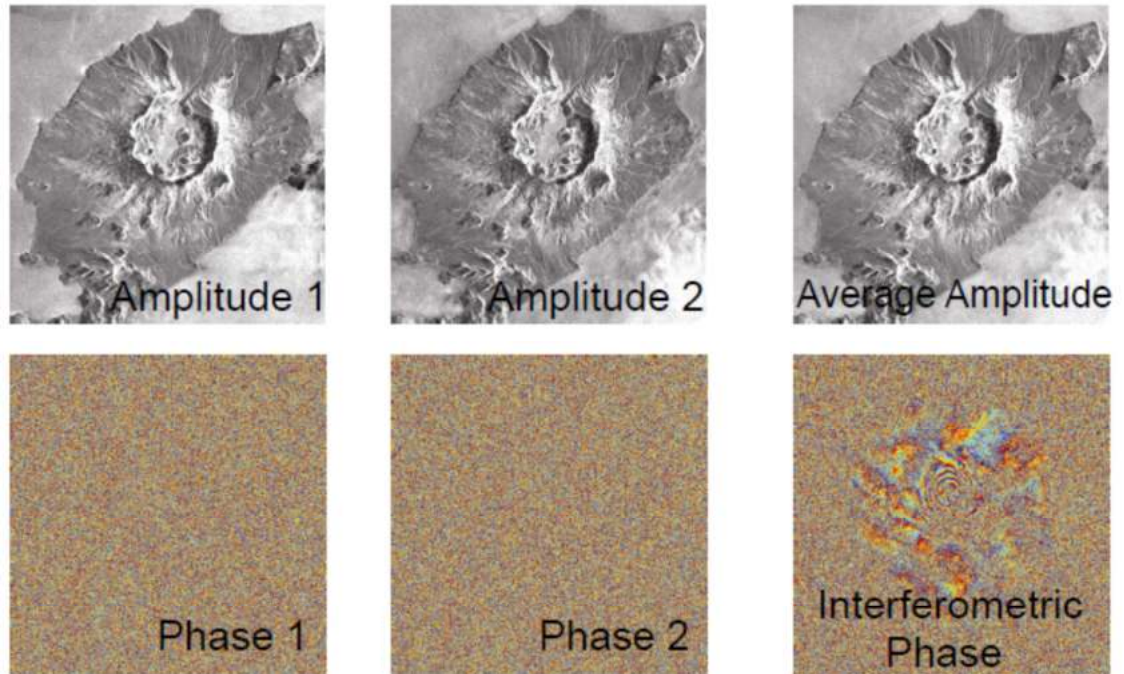


Figure I.9 : Images inSAR . ([www.gps.alaska.edu](http://www.gps.alaska.edu) GEOS 655 TectonicGeodesy, Jeff Freymueller)

### I.5 Signal de corrélation et les images inSAR

Les deux signaux captés par les antennes sont ensuite combinés par le produit de corrélation qui est une multiplication entre le signal de l'antenne maîtresse  $S_1$  et le conjugué de l'autre  $S_2^*$  d'où vient l'élimination des phases communes. En traitement de signal le produit de corrélation entre deux signaux est mentionné par :

$$P_{\text{corrélation}} = \langle S_1 \cdot S_2^* \rangle \quad (\text{I. 12})$$

La stabilité de prise de l'image est évaluée par un coefficient dit de corrélation de système  $\rho_{\text{système}}$  par lequel nous pouvons juger que le signal au niveau de la cellule de résolution originale est corrélé ou dé-corrélé.

$$\rho_{\text{système}} = \frac{\langle S_1 \cdot S_2^* \rangle}{\sqrt{\langle S_1 \cdot S_1^* \rangle \langle S_2 \cdot S_2^* \rangle}} \quad (\text{I. 13})$$

Le coefficient de corrélation réel n'est pas seulement de système mais il est accompagné par deux termes de décorrélations spatiale  $\rho_{\text{spatiale}}$  et temporelle  $\rho_{\text{temporelle}}$ .

$$\rho_{\text{totale}} = \rho_{\text{système}} \rho_{\text{spatiale}} \rho_{\text{temporelle}} \quad (\text{I. 14})$$

Une valeur 1 de ce coefficient indique une forte corrélation (max), et 0 indique une décorrélation totale (min).

### I.5.1 Décorrélation spatiale

La ligne de base séparant les deux antennes est la source de ce phénomène parce que la décorrélation spatiale est due à l'observation sous deux angles d'incidence différents de la même cellule de résolution [11] :

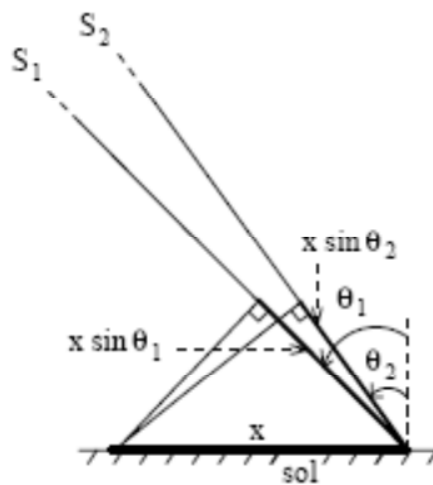


Figure I.10 : Les angles d'incidence et la décorrélation spatiale.

Le coefficient de décorrélation spatial vaut [11] :

$$\rho_{spatiale} = 1 - \frac{2rd \Delta\theta \cos(\theta_2)}{\lambda} \quad (I.15)$$

Avec  $\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2$

Il est évident que :  $r_2 \Delta\theta = Bx \cos \theta_2$  avec  $r_2$  est la distance qui sépare le point de l'antenne esclave 2 ( $r - \Delta r$  dans la figure I.7 et 8).

Alors l'équation I.15 en fonction de la ligne de base Bx est:

$$\rho_{spatiale} = 1 - \frac{2rd Bx (\cos(\theta/2))^2}{\lambda r_2} \quad (I.16)$$

### I.5.2 Décorrélation temporelle

L'observation d'une région dans deux temps différents est la source de ce phénomène, la décorrélation temporelle se résulte de changement de l'état de la surface entre les deux observations ce qui le rend propre au mode multi-passe. Pour les applications de détection de changements et de mouvement telles que : le gisement, le suivi de déplacement et la fonte des glaciers, les éruptions volcaniques et les activités sismiques, la décorrélation temporelle est très utile et elle présente le seul critère de détection. Mais pour le MNT les informations d'altitude doivent être inchangées entre les deux observations c'est pour cela que le mode mono-passe lui est approprié.

Zebker [12] a estimé que ces changements à l'intérieure d'une cellule de résolution est une fonction de probabilité gaussienne possédant un écart-type horizontal  $\sigma_h$  et vertical  $\sigma_v$ .

Le coefficient de décorrélation temporelle vaut:

$$\rho_{temporelle} = \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{4\pi}{\lambda} \right)^2 ((\sigma_h \sin\theta)^2 + (\sigma_v \cos\theta)^2) \right] \quad (I.17)$$

Avec  $\theta$  est l'angle d'incidence de l'antenne maîtresse.

### I.5.3 les images inSAR

En interférométrie, pour générer les différentes images inSAR un autre coefficient complexe  $\gamma$  déduit du coefficient de corrélation  $\rho$  est utilisé. Il consiste à faire la moyenne (sous échantillonnage) d'un ensemble des pixels (cellules de résolution originale) dans une fenêtre, il est comme une sorte de passage de haute résolution à basse résolution dans le but de pré-filtrer les bruits, minimiser la taille immense des images et faire une correction géométrique (recalage) de la dé-corrélation spatiale.

$$\gamma(i', j') = \frac{\sum_{ij}^{MN} S_1(i, j) S_2^*(i, j)}{\sqrt{\sum_{ij}^{MN} S_1(i, j) S_1^*(i, j) \cdot \sum_{ij}^{MN} S_2(i, j) S_2^*(i, j)}} \quad (I.18)$$

Avec :  $(i',j')$  les indices des pixels de la nouvelle résolution,  $(i,j)$  ceux de la résolution originale,  $(M,N)$  dimension de l'image.

Trois types d'images pouvant être générées :

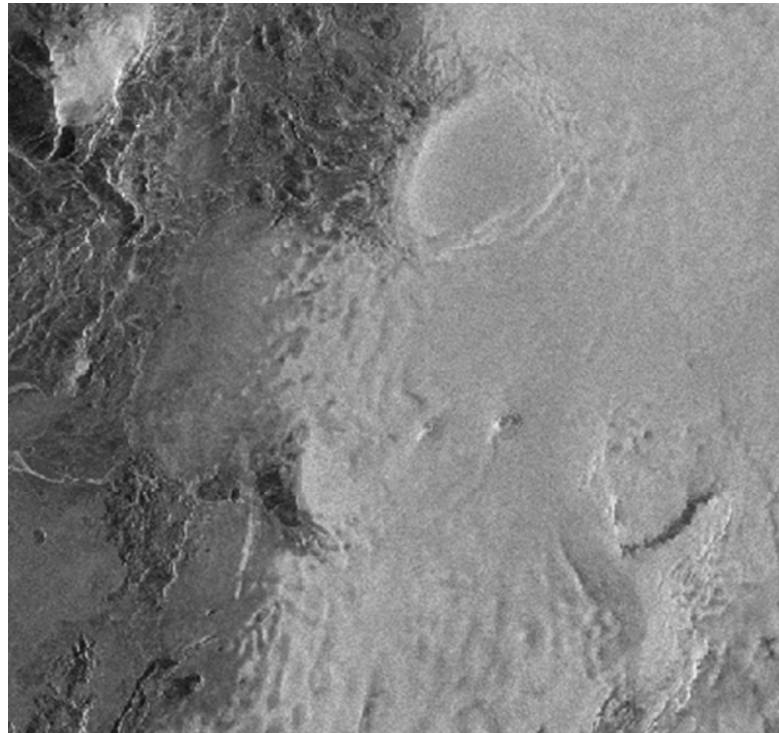
- L'image d'amplitude : qui est la simple moyenne de la fenêtre de basse résolution

$$A(i',j') = \frac{1}{MN} \left| \sum_{ij} S_1(i,j) S_2^*(i,j) \right| \quad (I.19)$$

Elle se diffère de celle de SAR seulement par le moyennage, c'est pour cela qu'il est mentionné dans la figure I.9 « *average amplitude* ».

- L'image de phase interférométrique (interférogramme) : qui est la phase de  $\gamma(i',j')$ .
- L'image de cohérence : qui est le module de  $\gamma(i',j')$ , elle est considérée comme une image indiquant la qualité de mesure et largement utilisée pour le filtrage ou le déroulement de phase.

Les figures I.11 (a, b, c) montrent des exemples réels sur les différentes images inSAR d'ERS-1/2 (*tandem data*) fournies par ESA, il s'agit d'une région de Vatnajökull Islande, dimension 376 x 400 pixels, prise le 31 décembre 1995 sur l'orbite 23315.



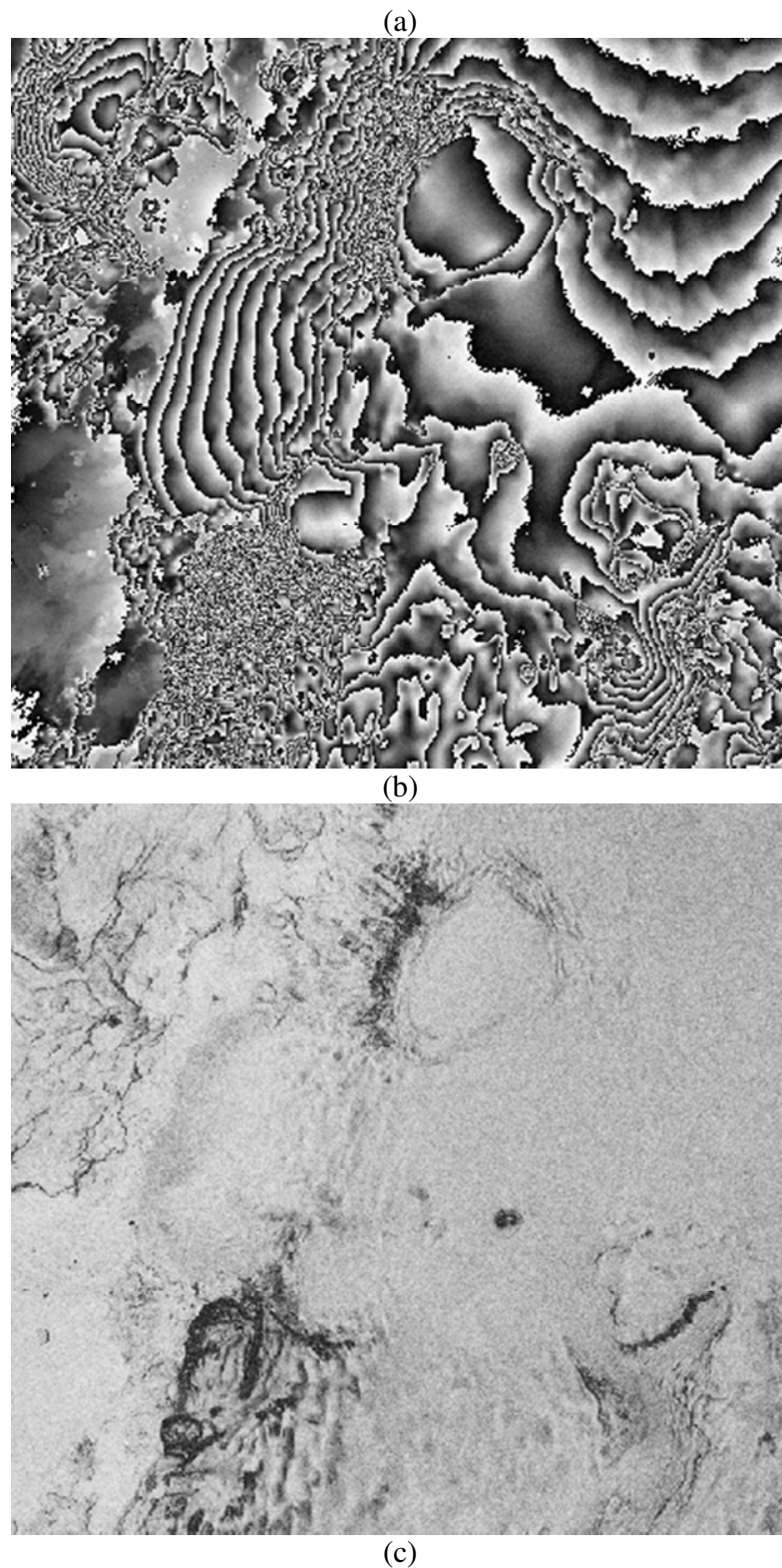


Figure I.11 : Exemple d'image inSAR de Vatnajökull ERS-1/2 (*tandem data*) ESA, (a) image d'amplitude, (b) interférogramme, (c) image de cohérence.

## **I.6 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons essayé de donner une brève étude pour comprendre le principe et les composants essentiels des systèmes d'imagerie radar destinés aux applications topographiques du terrain, ce qui permet d'avoir une idée générale sur les différents types d'images pouvant être générées par un tel système et leurs caractéristiques.

Notamment pour les images de phase interférométriques (interférogrammes), cette étude est considérée comme un Background suffisant avant d'entamer le filtrage et le déroulement qui constituent le but de notre travail et qui font l'objet des prochains chapitres.

# Chapitre II

## Étude, analyse et comparaison de différentes méthodes de filtrage d'interférogramme

### II.1 Introduction

À fin de générer un modèle numérique du terrain (*Digital Elevation Model*) de bonne qualité visuelle il est recommandé d'exploiter uniquement l'information de phase qui se trouve dans le signal interférométrique complexe issu du système d'imagerie radar (*inSAR*) car l'image d'amplitude); pourtant elle est directement exploitable; contient un taux élevé de bruits (*speckles*) et celle de phase (l'interférogramme) possède moins de bruits (résidus), mais elle n'est pas directement exploitable vue que cette information est mesurée modulo  $2\pi$  ou communément appelée : l'image de phase roulé (*wrapped phase*) .

L'exploitation complète de l'interférogramme nécessite une opération inverse qui est le déroulement de phase (*Phase Unwrapping*). La réussite de cette opération dépend principalement de taux des résidus, plus qu'il y en a beaucoup plus que le déroulement devient difficile voire même impossible pour un certain seuil et cela peut donner une fausse estimation d'élévation. Donc il est inévitable de dé-bruiter (filtrer) l'interférogramme avant le déroulement de phase.

À l'instar de domaine de traitement d'image le filtrage de l'interférogramme *inSAR* peut se faire sur le plan fréquentiel (aspect spectral); mais dans ce cas il est purement global sauf pour certains algorithmes multi-grille ou fenêtré; ou sur le plan spatial et dans ce cas le filtrage pourrait être local et plus adaptatif.

Dans ce chapitre une étude, analyse et comparaison sur des différents algorithmes de filtrage basiques et améliorés seront expliqués que ce soit sur le plan fréquentiel ou spatial. Cet état de l'art va permettre de bien comprendre les différents mécanismes possibles pour dé-bruiter un interférogramme et de constater que pas tous les algorithmes de filtrage appliqués dans le traitement d'image en générale sont convenables pour ce type particulier d'image *inSAR* vue l'entité spécifique de bruit dont la discontinuité de phase et le résidu se diffèrent.

## II-2 L'entité de bruit de phase dans l'interférogramme

Les bruits dans les interférogammes constituent des sauts de phase ou tout simplement des discontinuités dues aux zones d'ombre, zones d'inversion, sous échantillonnage (la condition d'Itoh) [13-15] ou erreur d'acquisition (rupture) dans ce cas les points imagés correspondants seront interprétés par des pixels noirs (min). Et dues aussi aux erreurs d'acquisition de type impulsion (bruit impulsionnel) dans ce cas les points imagés s'interprèteront par des pixels blancs (max), c'est pour cela que nous le trouvons dans la plus part des littératures sous le nom de bruit sel et poivre.

La phase roulée (mesurée) se caractérise par un modèle de bruit additif [16,17], contrairement à l'image d'amplitude où le bruit est multiplicatif. Alors les deux phases (mesurée avec bruits  $\psi_b$  et celle originale sans bruits  $\psi_{sb}$ ) sont tout simplement liées telles que :

$$\psi_b = \psi_{sb} + b \quad (\text{II. 1})$$

Avec  $b$  est le bruit additif aléatoire de valeur moyenne zéro et son écart type  $\sigma$  est fonction de de nombre de vue et la cohérence.  $\psi_{sb}$  et  $b$  sont supposés des variables indépendantes. La caractéristique principale de bruit additif est que sa variance est indépendante de sa moyenne.

L'influence de bruit apparait lors d'application de procédure de déroulement de phase de conventionnelle où une simple intégration de gradient le long d'un chemin est appliquée (*Path intégartion*) [13-15], avec telle méthode des lignes de distorsion se forment selon le sens d'intégration (voir chapitre III). Pas tous les pixels bruités génèrent les lignes distordues mais seulement ceux qui se trouvent dans des régions critiques telles que les zones de forte variation (rugueuses ou accidentées) ou les franges (les contours correspondants aux bornes de modulo  $2\pi$ ), ces pixels bruités générant les lignes distordues sont appelés les résidus dans le monde d'imagerie inSAR.

La figure II.1.a ci-dessous montre un exemple d'un interférogramme simulé sous Matlab (*peacks* 100x100 pixels) avec un bruit additif artefact aléatoire (fig II.1.b), après avoir effectué la procédure de détection; dont les détails sont expliqués en bas, il est claire que les résidus (figII.1.c) correspondent aux zones de franges (contours) et de fortes variations (figII.1.d), nous remarquons aussi que pas tous les pixels bruités apparaissent en tant que résidus. À noter que la figure II.1.d représente une superposition des résidus sur une mappe éclaircissant les franges d'interférogramme, pour générer cette mappe nous utilisons l'une des fonctions de détection de franges telles que : le gradient, la variance dérivative ou un simple filtre passe-haut dans le domaine fréquentiel, pour notre cas nous avons choisi la variance car elle estime la consistance d'un pixel selon un nombre de

directions supérieure comparativement au gradient. Toute les valeurs de variance sont positives alors le « padding » se fait en *négativant* les résidus.

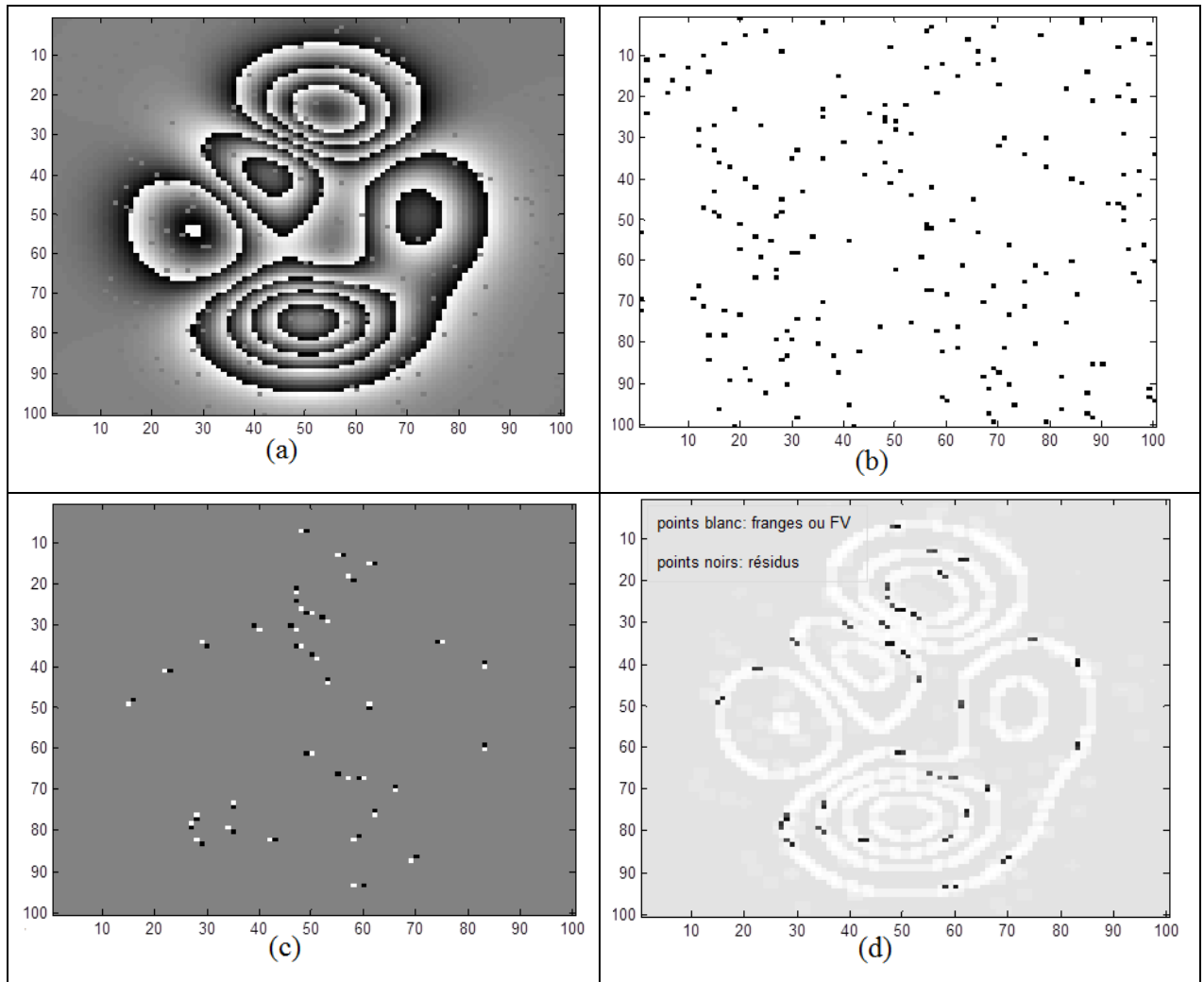


Figure II.1 : (a) interférogramme avec bruits additifs, (b) les pixels bruités, (c) les résidus détectés, (d) les franges et les résidus

La procédure de détection des résidus dans l'interférogramme est basée sur une boucle de gradient, autrement dit la somme des différences roulées des phases roulées dans un sens communément antihoraire de quatre pixels adjacents [18-20]

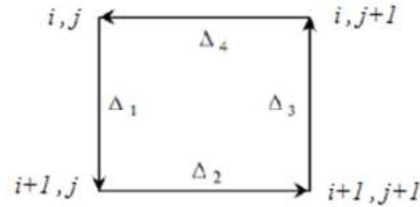


Figure II.2 : Détection de résidu par le gradient roulé (zone 2x2).

Où

$$\begin{aligned}
 \Delta_1 &= w(\phi_{i+1,j} - \phi_{i,j}) \\
 \Delta_2 &= w(\phi_{i+1,j+1} - \phi_{i+1,j}) \\
 \Delta_3 &= w(\phi_{i,j+1} - \phi_{i+1,j+1}) \\
 \Delta_4 &= w(\phi_{i,j} - \phi_{i,j+1})
 \end{aligned} \tag{II. 2}$$

En calculant la somme des gradients :

$$R = \frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^4 \Delta_i \tag{II. 3}$$

Nous aurons trois possibilités :

$$R = \begin{cases} 0 \\ +1 \\ -1 \end{cases} \tag{II. 4}$$

Selon ces trois valeurs de R la zone 2x2 est considérée consistante ou saine quand R=0, ailleurs (R= ± 1) elle est considérée inconsistante et ces 4 pixels présentent un point de singularité, dans la plus part des méthodes de dé-bruitage le pixel haut-gauche (i,j) sera marqué avec ±1, en effet la mappe des résidus (nommée aussi la mappe des points de singularité) n'est pas binaire et elle contient des pixels à 0, +1 et -1. La figure II.1.c représente une mappe des résidus dont les couleurs grise, blanche et noir correspondent respectivement R= (0,1,-1).

Avec ce mode de marquage; pourtant il optimise le temps de traitement à 1/4, la vrai phase bruitée n'est pas précisément localisée parce que le marquage du pixel haut-gauche ne veut pas dire que ce pixel est la source de la ligne distordue, mais elle peut être l'un de la zone 2x2. ce mode permet de minimiser le temps d'exécution en évitant la répétition de la même procédure de filtrage 4 fois dans une seule zone 2x2 mais en termes de taux de bruit ce marquage direct n'est pas toujours efficace et certains résidus peuvent persister.

### II-3 Quelques méthodes de filtrage sur le plan fréquentiel

Certaines méthodes de filtrage fréquentiel appliquées dans le domaine de traitement d'image en générale peuvent également être implémentées pour les interférogrammes, cependant des contraintes techniques nous empêchent de les utiliser pour les régions de taux de bruit élevé, de bruit non équidistribué, de faible cohérence ou le problème d'estimation de la fréquence de coupure.

Le passage de plan spatial au plan fréquentiel permet de donner une vision alternative de l'interférogramme et l'analyse basée sur la proportionnalité point d'espace-phase devient dépendante de changement ou la variation de phase à l'échelle globale, ainsi que la caractérisation du filtre par sa réponse impulsionnelle devient une caractérisation selon sa fonction de transfert.

La transformée de Fourier discrète bidimensionnelle est :

$$F(u, v) = \sum_0^{M-1} \sum_0^{N-1} f(x, y) e^{-2j\pi(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N})}$$

$$f(x, y) = \frac{1}{MN} \sum_0^{M-1} \sum_0^{N-1} F(u, v) e^{2j\pi(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N})}$$
(II. 5)

La lenteur de cette transformée vient principalement de nombre immense d'itérations  $M^2N^2$  notamment pour les images de grande taille, pour minimiser ce nombre d'itération et par conséquent minimiser le temps de traitement *James Cooley* et *John Tukey* ont proposé de remplacer  $M = 2^k$  et  $N=2^l$  ainsi le nombre d'itération par  $MN \log(MN)$ , c'est la transformée de Fourier rapide (*Fast Fourier Transforme* FFT).

#### II-3-1 Les filtres fréquentiels basiques

Les filtres conventionnels de base utilisés dans le traitement d'image de contraste; telles que les images optiques et de multimédia, ne sont pas toujours efficaces pour les interférogrammes inSAR car ils traitent l'interfrégramme comme une image globale et leur efficacité décroît avec la croissance de nombre de résidus, néanmoins certaines améliorations comme la technique multi-grille ou fenêtrage pondérée peuvent les rendre plus en moins applicables dans le domaine inSAR.

Parmi ces filtres basiques nous en trouvons : filtre passe-bas sélectif (idéal) et passe-bas Butterworth. Nous n'allons pas citer les filtres passe-haut car ils sont utilisés pour détecter les franges (contours) ou les zones de forte variation mais pas pour le filtrage, cependant une simple vision inverse suffisante pour comprendre leurs fonctionnements.

Les filtres fréquentiels basiques sont introduits la première fois pour analyser les franges dans l'interférométrie par *Takeda et al* [21], puis par *Macy et al* [22] pour analyser les interférogrammes holographiques.

### II-3-1-1 Les filtres passe-bas sélectifs

Ce sont des filtres qui laissent passer les basses fréquences, donc ils réalisent une sorte d'opération de lissage (*smoothing*), selon l'allure de la fonction de transfert nous pouvons catégoriser les filtres passe-bas sélectifs en : Fonction circulaire, rectangulaire uniforme et rectangulaire adapté. Dans les filtres circulaires ces fréquences de coupure tracent un cercle, donc elles sont égales dans toutes les directions et gardent même distance au centre, ce filtre est purement standard et aucune considération de sens (vertical ou horizontal), de franges ou de taux des résidus n'est prise en compte. Dans les filtres rectangulaire uniforme deux fréquences de coupure peuvent être définies une en vertical et l'autre en horizontal selon la tendance de spectre de l'interférogramme dans le cas où ce dernier a une forme presque elliptique, ce filtre est un peu plus performant que le premier mais il possède des lacunes par exemple : il est symétrique alors que le spectre ne l'est pas. Une petite amélioration peut être portée afin d'éviter le problème d'asymétrie, c'est le filtre rectangulaire adapté dont elles se sont définies 8 fréquences de coupure, 4 verticales et 4 horizontales, pourtant avec ce filtre le dé-bruitage est amélioré relativement aux deux premiers mais son utilisation reste restreinte à cause de problème de la détermination des fréquences de coupure qui est banale et basée soit sur le 20 ou 10 dB par rapport à l'amplitude max (celle de la fréquence fondamentale), soit sur les méthodes empiriques (une série de tests).

### II-3-1-2 Le filtre passe-bas Butterworth

Ce filtre; proposé par l'ingénieur britannique *Stephen Butterworth* (1930); est linéaire et possède un gain constant que possible dans la bande passante, le filtrage des harmoniques se fait par atténuation bien étudiée. Dans ce filtre plusieurs ordres décrivant ses caractéristiques sont mis ce qui fait varier les pentes tout en conservant l'allure courbée du filtre.

Sa fonction de transfert 2D est :

$$H(u, v) = \frac{1}{1 + \left(\frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{f_c}\right)^{2n}} \quad (\text{II. 6})$$

Où  $f_c$  est la fréquence de coupure et  $n$  est l'ordre du filtre.

Les caractéristiques principales de ce filtre par rapport à celui sélectif sont :

- Filtrage par atténuations variables des harmoniques, plus nous nous éloignons d'origine plus les harmoniques sont fortement atténuées.
- plus l'ordre est grand plus les harmoniques hautes fréquences sont fortement atténuées.
- La fréquence de coupure peut être à 0.5 (-3dB).
- Il préserve mieux les franges.

Une petite amélioration peut être apportée, elle consiste de supposer le spectre d'interférogramme comme une superposition des lignes verticales ou horizontales (ou même les deux afin de choisir le meilleur résultat), d'appliquer séparément le filtre unidimensionnel (FFT 1D) en sélectionnant adéquatement l'ordre et finalement restituer le spectre. Cette méthode est plus efficace que le filtre 2D pour la réduction des résidus mais son inconvénient majeur est le temps de traitement qui est très long.

### II-3-2 Filtres fréquentiels performants

En réalité les franges de spectre d'interférogramme ne sont pas stationnaires et possédant un taux variable, en plus la distribution des résidus n'est pas uniforme (taux de résidus variable aussi d'une région à autre), ce qui rend l'application des filtres basiques inefficace. En pratique où la non-stationnarité règne les interférogrammes complexes les filtres fréquentiels doivent être améliorés et adaptés à ce type d'application. Dans cette partie nous allons expliquer quelques filtres fréquentiels améliorés largement utilisés en imagerie inSAR.

#### II-3-2-1 Filtre de Goldstein

L'idée de *Goldstein* [23] est de diviser l'interférogramme en plusieurs régions (pièces) rectangulaires chevauchées car les taux de franges et de résidus sont variables sur l'interférogramme, puis un spectre de puissance de forme gaussienne  $Z(u,v)$  sera appliqué indépendamment pour chaque région, c'est un lissage d'intensité par FFT 2D.

$$Z(u, v) = e^{-\left(\frac{u^2 - 2uv + v^2}{\frac{\sigma_u^2 - \sigma_u \sigma_v + \sigma_v^2}{2(1-\rho^2)}}\right)} \quad (\text{II. 7})$$

Où  $\rho$  est la distance entre l'antenne maîtresse et l'élévation imagée, et  $\sigma_u$  ou  $\sigma_v$  sont respectivement la largeur de bande de coordonnées fréquentielles  $u$  et  $v$

La fonction de transfert du filtre s'exprime en puissance d'un paramètre  $\alpha$  et  $Z(u, v)$  soit :

$$H(u, v) = |Z(u, v)|^\alpha \quad (\text{II. 8})$$

Si  $\alpha = 0$  aucun filtrage n'est appliqué, si  $\alpha = 1$  un grand lissage est appliqué. Les valeurs utiles de ce paramètre sont dans l'intervalle  $[0.2 \quad 1]$ . Les interférogrammes avec très basse corrélation bénéficient d'une large région de filtrage et une valeur élevée de  $\alpha$ . Les régions sont chevauchées afin d'atténuer les discontinuités aux bornes, dans la littérature de *Goldstein et al* [23] le chevauchement choisi est 75% pour les deux directions.

La résolution spatiale du filtre s'adapte à la variation locale de la phase de telle façon que les régions de lisses phases soient bien filtrées, tandis que les régions de forte variance (fortes variations) seront légèrement filtrées.

L'inconvénient de ce filtre est que la réduction des résidus n'améliore ou n restaure pas le signal utile, le choix de  $\alpha$  est arbitraire et cela a une influence directe sur les performances du filtre.

### II-3-2-2 Filtre de Baran (Goldstein modifié)

*Baran et al* a proposé dans [24] de modifier le filtre de Goldstein en faisant le paramètre  $\alpha$  dépendant de la cohérence de telle sorte que les régions incohérentes soient plus filtrées que celles cohérentes, et cela permet de minimiser les pertes de signal utile quand nous réduisons le bruit.

L'information de cohérence  $\gamma$  est conjointement fournie avec l'interférogramme (voire chapitre I). *Bamler et Hartl* [25] ont défini un écart-type de bruit de la phase basé sur la cohérence et le nombre d'observation.

$$ET_{\phi, L}^2 = \frac{\pi^2}{3} - \pi \arcsin(|\gamma|) + \arcsin^2(|\gamma|) - \frac{L_{i2}(|\gamma|^2)}{2} \quad (\text{II. 9})$$

Où  $L_{i2}$  est le di logarithme d'Euler :

$$L_{i2}(|\gamma|^2) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{|\gamma|^{2k}}{k^2} \quad (\text{II. 10})$$

La figure II.3 ci-dessous montre que cet écart-type décroît avec la croissance de nombre d'observation et la cohérence.

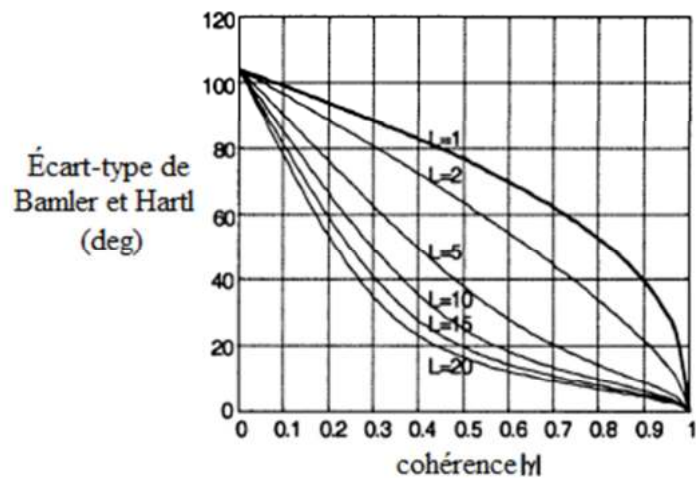


Figure II.3 : la relation entre l'écart-type de Bamler et Hartl, nombre d'observation et la cohérence. À partir de l'équation II.9 la cohérence peut être considérée comme une mesure directe de bruit interférométrique. Donc elle peut être utilisée pour modifier le filtre de Goldstein tel que :

$$H(u, v) = |Z(u, v)|^{1-\bar{\gamma}} \quad (\text{II. 11})$$

Le paramètre  $\alpha$  est remplacé par  $1 - \bar{\gamma}$  où  $\bar{\gamma}$  est la valeur moyenne de la cohérence calculée sur la région effective (pièce moins le chevauchement), cette approche assure que  $\bar{\gamma}$  ne soit pas affecté par la cohérence dans les chevauchements.

Pour l'analyse et la comparaison, les paramètres de filtre Goldstein et celui modifié sont configurés tel qu'il est montré dans le tableau II.1 ci-dessous. Ce choix est basé sur un compromis entre le temps d'exécution et la minimisation des effets des bornes au niveau de chevauchement.

Le filtre	Dimension de La région	Le chevauchement	Le paramètre
Goldstein	32x32	14	$\alpha = 0.9$
Goldstein modifié	32x32	14	$1 - \bar{\gamma}$

Tableau II.1 : les paramètres de filtre Goldstein et celui modifié

La taille du chevauchement maximum est décrite comme la moitié de la région moins un soit 15 pour des régions 32x32, dans [24] 14 a été prise. Le paramètre  $\alpha = 0.9$  tandis que  $1 - \bar{\gamma}$  est automatique et sans aucune intervention de l'utilisateur.

Malgré les capacités de filtre de Goldstein (et sa modification de Baran) de réduire la plus part des résidus dans les interférogrammes, mais leurs performances de préserver les fronts entre les différentes formes et textures sont aussi limitées. Les fronts ou les bornes de différentes texture présente une forte variation telle que les frange de modulo  $2\pi$  mais ils sont dus aux variations de la

nature des points imagés par exemple entre une zone rocheuse, celle couverte de végétation, les surfaces d'eau ou de glace. L'estimation de  $\alpha$  est arbitraire pour tout l'interférogramme et de  $\gamma$  est basée sur la moyenne des cohérences pour tous les pixels de même pièce (sauf les chevauchés), et cela peut induire à une perte des fines détails notamment aux bornes des pièces.

### II-3-2-3 Filtre Goldstein amélioré basé sur la technique de vrai-voisinage adaptatif

Afin de remédier aux inconvénients des filtres *Goldstein* et *Baran*, *R.Song et al* ont récemment proposé dans [26] de les améliorer en partant du fait qu'il peut exister des différentes formes et textures dans la même pièce de filtre spécialement le long des franges et de bornes de différentes textures (inhomogènes), et par conséquent l'estimation de  $\alpha$  ou de  $1 - \bar{\gamma}$  basée sur tous les pixels de la région (pièce) peut être inexacte et cela résulte des bornes flous dans l'interférogramme filtré. L'idée de *R.Song et al* est de filtrer chaque pixel dans une pièce de filtre ajustée. Dans cette pièce ajustée des pixels de vrai-voisinage adaptatif (VVA) maintiennent les valeurs de phase originales tandis que les pixels de fond seront remplacés par la moyenne des pixels de VVA. Puis FFT2D est appliquée pour chaque pièce de même manière que les deux filtres précédents sauf que le paramètre  $\alpha$  du filtre prendra en considération seulement la cohérence des pixels des zones homogènes (VVA).

Comme étapes à suivre :

- 1- *Générer une matrice hybride G de l'amplitude A et de cohérence C* : cette matrice est le produit Hadamard de A et C (produit élément par élément qui nécessite des matrices de même dimensions),  $G = A * C$ .
- 2- *Estimation de pixel initial (valeur de graine)* : le médian marginal dans une fenêtre (généralement 3x3) de G est pris comme une valeur de graine  $g(m,n)$  (pixel initial) [27].
- 3- *Croissance de la région (region growing)* [28] : pour cette graine non appartenant aux bords il existe 8 voisins  $g(k,l)$ , ces voisins sont inspectés et acceptés dans la région VVA s'ils satisfont la condition de seuil suivante :

$$|g(k,l) - g(m,n)| \leq S_1$$

Avec

$$S_1 = \frac{ET_G}{\bar{G}|g(m,n)|}$$

Où  $ET_G$  et  $\bar{G}$  sont respectivement l'écart-type et la valeur moyenne de la matrice G

Nous remarquons que le seuil est locale et dépendant de chaque graine  $g(m,n)$  ce qui donne un appui à l'aspect adaptatif de filtre.

Puis les voisins des pixels dernièrement inclus dans la VVA sont aussi inspectés pour prochaine croissance et ainsi de suite.

Le processus s'arrête s'il n'aura aucun voisin satisfaisant la condition de seuil ou la région atteint une dimension prédéfinie.

Tous les pixels qui ne sont pas retenus dans la région VVA seront mis parmi les pixels du fond

- 4- *Ré-estimation de la valeur de graine et la réinspection du fond* : dans cette étape la moyenne des pixels déjà inclus  $\bar{g}(m, n)$  est utilisée pour une ré-estimation de la valeur de la graine, cela peut donner plus de fiabilité d'estimation sans-bruit que possible. Puis tous les pixels du fond  $g(k', l')$  sont ré-inspectés et retenus dans la VVA s'il satisfait la condition :

$$\begin{aligned} |g(k', l') - \bar{g}(m, n)| &\leq S_2 \\ S_2 &= 2S_1 \end{aligned} \quad (\text{II. 12})$$

- 5- *Filtrage de l'interférogramme par cohérence dans la VVA* : tous les pixels correspondant au VVA gardent les valeurs de phase originale tandis que les pixels de fond prennent la valeur moyenne des phases de VVA. À ce stade, que les phases correspondant au VVA sont significatives dans le filtrage.

Finalement nous appliquons le filtre par FFT 2D dont la fonction de transfert est :

$$H(u, v) = |Z(u, v)|^{1-\bar{\gamma}_{VVA}} \quad (\text{II. 13})$$

Donc le paramètre de filtre ne dépend plus de la valeur moyenne des toutes les cohérences de la pièce mais uniquement de celles des vrai-voisins de la graine (région homogène VVA).

#### II-3-2-4 Autre amélioration de filtre de Goldstein

*Z.Suo et al* [29] ont récemment proposé des améliorations substantielles sur trois paramètres de filtre de Goldstein : la dimension de la pièce, l'échantillonnage et le paramètre  $\alpha$ , qui sont inchangés dans le filtre de Goldstein.

Dans ce nouveau filtre :

- La dimension de la pièce est adaptée à la cohérence de la région, exactement le pixel central, donc plusieurs dimensions sont possibles pour un interférogramme.
- Pour éliminer l'effet topographique de terrain des franges peuvent être ajoutés indépendamment dans chaque pièce, cette technique est appelée compensation de la fréquence de frange.
- Le paramètre  $\alpha$  est remplacé par  $1 - \gamma^2$ .

### II-3-2-5 Filtre fenêtré avec un seuil

Il s'agit d'un filtre dont la fonction gaussienne de lissage est fenêtrée plus, la fonction de transfert est sans exposant supplémentaire et aucune division en pièces n'est prise en considération, donc moins de temps d'exécution. *K.Qian et al* ont décrit dans une série de publications bien détaillées [30-34] pour un tel filtre FFT fenêtré avec un seuil permet de définir arbitrairement les fréquences de coupure et ne pas continuer à atténuer les harmoniques indésirables autrement dit fenêtré plus adaptative [30,31] que ce soit pour les interférogrammes optiques ou inSAR [32]. Cette fenêtré peut ainsi avoir un seuil non arbitraire, celui est prédéterminé en basant sur des données et paramètres déjà fournis dans l'interférogramme [33]. Le filtre proposé est capable de préserver les fortes pentes aux bords de différentes formes incluses dans l'interférogramme [34,35].

## II-4 Quelques méthodes de filtrage sur le plan spatial

Le filtrage spatial d'interférogramme permet de donner un aspect plus local de traitement en bénéficiant d'une exploitation directe de théorème de détections des résidus sur les 4 pixels douteux. Nous avons vu que les résidus aient une relation entre le bruit et les zones de franges, fortes variations et les bords de différentes textures, donc des améliorations sont ainsi possibles si nous utilisons ses propriétés.

Quelques méthodes de filtrage spatial basiques seront citées, puis un état de l'art sur quelques méthodes améliorées. L'application des filtres basiques pour les interférogrammes inSAR n'est pas vraiment basique au sens absolu, il est quand même adaptatif car il s'applique localement au niveau des régions détectées comme résidus et pas pour tout l'interférogramme.

### II-4-1 Les filtres spatiaux basiques

Ce sont des filtres conventionnels largement utilisés dans le traitement d'image, en inerférogarmmes ils sont locaux à fin de garder les détails de la topographie accidentée. Nous en trouvons principalement : les filtres non-adaptatifs (selon autres critères comme la taille et la *directionnalité* de masque) tels que le moyennneur, le médian et le gaussien. Les filtres adaptatifs tels que filtre de *Nagao*.

#### II-4-1-1 Le filtre moyennneur

Il était proposé la première fois pour les images niveau de gris par Tomita et Tsuji en 1977. Il s'agit de remplacer un pixel central  $\phi(m,n)$  d'un masque carré  $k \times k$  par la moyenne des pixels entourant  $\hat{\phi}(m, n) = \frac{\sum \phi(i,j)}{k^2-1}$  si nous excluons le pixel central, ou  $\hat{\phi}(m, n) = \frac{\sum \phi(i,j)}{k^2}$ . Avec  $i,j$  sont des indices rangées dans le masque. Autre type de filtre moyennneur était proposé par Haralick, R. M. et al en 1992. Il s'agit d'un filtre moyennneur KNN (K Nearest Neighbors), c.-à-d. au lieu de remplacer le pixel central par la moyenne de tous les pixels se trouvant dans un masque  $k \times k$  il prend uniquement les  $K$  valeurs les plus proches à celle du centre, si  $K=k^2-1$  ça revient au simple filtre moyennneur.

#### II-4-1-2 Le filtre médian

Il était proposé la première fois pour les images de niveau de gris par Huang, T en 1979. Il s'agit de remplacer la valeur de pixel central par celle médiane des pixels entourant dans un masque carré après le triage.

#### II-4-1-3 Le filtre gaussien

Dans le filtre gaussien nous utilisons la fonction gaussienne:

$$\hat{\phi}(m, n) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\left(\frac{\Delta i^2 + \Delta j^2}{2\sigma^2}\right)} \quad (\text{II. 14})$$

Avec  $\sigma$  est un paramètre d'expansion de filtre,  $\Delta i^2$  et  $\Delta j^2$  sont respectivement la distance (en pixels) verticale et horizontale entre le centre et les limites du filtre car mathématiquement la fonction gaussienne s'étend vers l'infinie.

#### II-4-1-4 Le filtre de Nagao

Il était proposé par *M. Nagao et al* en 1979, il s'agit de définir dans le masque  $k \times k$  9 sous masques simili comme une barre rotationnelle avec un pas  $45^\circ$  soit 8 directions, dont pour chaque direction les pixels dans *le champ de vision* à  $45^\circ$  seront sélectionnés, le 9<sup>ième</sup> sous masque est le central  $(k-1) \times (k-1)$ . Puis la valeur de pixel de centre sera remplacée par la moyenne de sous masque

possédant la petite variance. La figure II.4 montre 3 parmi 9 sous masques pour un filtre à 5x5. Les restes sont à déduire par la symétrie par rapport au centre et aux axes.

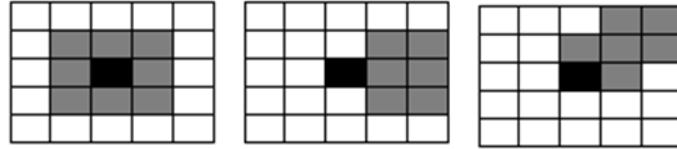


Figure II.4 : 3 parmi 9 sous masques de filtre de Nagao

#### II-4-2 Les filtres spatiaux améliorés

Il existe plusieurs méthodes de filtrage spatial pour les interférogammes inSAR, ce domaine de traitement était et est encore un point d'intérêt de plusieurs travaux de recherche. Dans cette partie nous allons en expliquer quelques-unes qui consistent les plus fréquemment publiées. Quand nous disons une amélioration, les paramètres participants peuvent être : la taille de masque (au lieu fixe, il est variable), masques chevauchés, sous masque directionnels, diviser l'interférogramme en plusieurs régions, hybridation des méthodes...etc.

À noter que les filtres qui seront présentés peuvent être implémentés sur le plan de phase ou sur le plan complexe c.-à-d. pour le signal complexe dont l'interférogramme se déduit directement par l'angle de signal complexe.

##### II-4-2-1 Filtre médian modifié

Le filtre médian basique (expliqué précédemment) est un filtre classique, il trie toutes les valeurs  $\phi_{i,j}$  dans un masque et il prend la médiane comme une valeur de centre (phase filtrée)

$$\hat{\Phi}_{m,n} = f_{\text{médian}}(\phi_{m,n}) = \text{médian} \{ \phi_{i,j} \} \quad (\text{II. 15})$$

L'amélioration contribué dans [36] consiste à modifier la sélection d'un simple médian par un autre basé sur la somme modulo  $2\pi$  avec la phase centrale infiltrée.

$$\hat{\Phi}_{m,n} = f_{\text{médian modifié}}(\phi_{m,n}) = \phi_{m,n} + \text{médian} \{ \phi_{i,j} + \phi_{m,n} \} \quad (\text{II. 16})$$

##### II-4-2-2 Filtre morphologique adapté

Ce filtre est basé sur le concept de la morphologie mathématique [37-39]. Dans la littérature [36] ces propriétés sont utilisées pour concevoir un filtre morphologique adapté basé sur deux fonctions de morphologie principales : la dilation  $\delta$  (nommée aussi expansion) et l'érosion  $\varepsilon$  (nommée aussi contraction), elles sont définies telles que :

$$\begin{aligned}\delta(\phi_{m,n}) &= \phi_{m,n} + \max\{\phi_{i,j} + \phi_{m,n}\} \\ \varepsilon(\phi_{m,n}) &= \phi_{m,n} + \min\{\phi_{i,j} + \phi_{m,n}\}\end{aligned}\quad (\text{II. 17})$$

Où + est la somme modulo  $2\pi$ .

À partir de ces deux fonctions le filtre morphologique adapté est défini comme des opérations successives de dilation-érosion.

$$\hat{\Phi}_{m,n} = f_{\text{morphologique adapté}}(\phi_{m,n}) = \varepsilon\left(\delta\left(\delta\left(\varepsilon(\phi_{m,n})\right)\right)\right)\quad (\text{II. 18})$$

### II-4-2-3 Filtre mode

Dans la même littérature il s'est mentionné un troisième filtre basé sur l'histogramme, c'est le filtre mode. Il est convenable car il considère le caractère périodique de la phase et par conséquent le nombre de classe résultant de la division d'intervalle est très limité, contrairement pour un histogramme de données non-périodiques.

$$\hat{\Phi}_{m,n} = f_{\text{mode}}(\phi_{m,n}) = \text{mode}\{\phi_{i,j}\}\quad (\text{II. 19})$$

C'est quoi la fonction mode ? Il s'agit d'une estimation de la phase filtrée par la méthode suivante :

- L'intervalle  $[-\pi, \pi]$  est divisé en plusieurs sous intervalle nommés classes de longueur  $\beta < 2\pi$ .
- Un histogramme local au niveau de masque  $k \times k$  est calculé.
- Le mode est le centre de sous intervalle de plus grand nombre.

L'interférogramme (X-SAR) de test a été fourni par SIR-C mission (bande x) d'Etna –Italie 1994.

Les résultats obtenus en termes de taux de réduction des résidus sont résumés dans le tableau II.2 ci-dessous. Le masque de filtrage est  $3 \times 3$ .

	Morphologique adapté	Médian modifié	mode
Réduction %	45	26	27

tableauII.2 : résultats de filtrage morphologique adapté, médian modifié et mode en termes de taux de réduction des résidus.

#### II-4-2-4 Filtre moyennneur pivoté

Le filtre moyennneur pivoté est un filtre moyennneur complexe modifié. Il prend en considération le caractère périodique de la phase, alors il est spécifique pour interférogramme inSAR ou image optique interférométrique, au contraire de filtre moyennneur basique qui est applicable pour les images de niveau de gris, de contraste, d'amplitude pour SAR....

Ce filtre utilise la somme vectorielle des composants complexes dans le masque comme un vecteur de référence sur lequel nous divisons les arguments des composants complexes et par lequel nous effectuons un décalage tel qu'il est mentionné dans l'équation (II.20) ci-dessous. Quand le masque déplace sur l'interférogramme (produit de convolution dans le domaine spatial), le vecteur somme change aussi selon la nouvelle région. Donc l'algorithme est peu adaptatif relativement au moyennneur complexe de base [40].

Nous nous mettons dans le plan complexe :  $Z(i, j) = |Z(i, j)|e^{j(\phi(i, j))}$

Nous calculons la somme vectorielle des composants complexes  $Z(i, j)$  dans le masque  $k \times k$  correspondant :  $Z_{somme} = \sum Z(i, j)$

Le filtrage moyennneur pivoté consiste à calculer pour un pixel centrale  $(m, n)$  l'expression :

$$\hat{\phi}(m, n) = \frac{1}{k^2} \sum \arg \left( \frac{Z(i, j)}{|Z(i, j)|Z_{somme}} \right) + \arg(Z_{somme}) \quad (II. 20)$$

#### II-4-2-5 Filtre médian pivoté

Il s'agit aussi d'un filtre médian modifié. Vu que deux complexes ne peuvent pas être comparés, alors ce filtre ne peut pas s'appliquer directement aux interférogrammes, il s'implémente uniquement dans le plan complexe [40].

$$\hat{\phi}(m, n) = \text{médian} \left( \arg \left( \frac{Z(i, j)}{|Z(i, j)|Z_{somme}} \right) \right) + \arg(Z_{somme}) \quad (II. 21)$$

Pour comparer les filtres moyennneur et médian pivotés, car ils sont de proches concepts, l'interférogramme de la figure II.1. (a) était un objet de test, il présente un bas taux de franges. Le tableau II.3 résume ces résultats de filtrage dont les critères de comparaison sont le taux des résidus, la variance globale de la phase (PV  $M \times N$ ) roulée et la variance globale après déroulement.

	Sans filtrage	Moyenneur complexe basique	Moyenneur pivoté	Médian pivoté
Taux de résidus	0.82%	0.77%	0.71%	0.68%
PV roulée	6.5215	5.3012	4.7985	4.5520
PV déroulée	45.2387	41.0132	39.2546	38.5842

Tableau II.3 : résultats de filtrage Moyenneur complexe basique, Moyenneur pivoté et Médian Pivoté en termes de taux des résidus, variance de phase avant et après déroulement.

À l'égard de ces critères le médian pivoté jugé mieux que le moyenneur pivoté, tandis que les mauvais résultats; sauf temps d'exécution; sont ceux de moyenneur basique.

**Inconvénients :**

- Application pour les 4 phases adjacentes : C'est vrai que ces trois filtres s'appliquent localement et pas pour tout l'interférogramme, mais une autre ambiguïté apparait et nous nous posons la question où se trouve exactement la phase bruitée pour la considérer comme un centre du filtre
- Ils impliquent la phase infiltrée (jugée comme bruitée) : La phase jugée bruitée c'est la phase de pixel central et donc sa valeur à filtrer (à changer). en effet et notamment pour les filtres médian modifié et morphologique adapté, nous remarquons dans les équations II.39 et 40 que la phase jugée bruitée  $\phi_{m,n}$  est impliquée dans le filtrage et sa valeur y participe.
- Le filtre mode est plus adapté pour des grands masques pour que la distribution des phases dans l'histogramme soit plus adéquate, mais une grande taille de masque diminue la résolution et floue les franges.
- Les filtres moyenneur et médian pivotés exécutent des calculs sur le plan complexe ce qui accroît le temps de filtrage.
- Aucune considération à l'égard de la variation de taux de résidus à travers l'interférogramme.
- le masque est carré et de taille fixe, il reste inchangé pendant le traitement, ce qui diminue les performances spécifiquement pour la direction des franges.

**II-4-2-6 Filtre de Lee amélioré**

*Jong Sen Lee* a publié autant de travaux concernant des améliorations de son propre filtre basé sur des sous masques directionnels afin de préserver les franges. Ce filtre et ces améliorations sont plus adaptés et applicables pour les images l'inSAR d'amplitude et de phase interférométrique (interférogramme).

Pour les interférogrammes caractérisés par grands gradients de phase; tel que le cas de longue ligne de base ou les hautes fréquences (bande X), il est nécessaire d'utiliser des masques directionnels dans le but d'avoir une adaptation de filtrage avec le long des franges. Dans la littérature [41] il s'est proposé un filtre de Lee amélioré qui préserve le gradient et réduit les résidus selon la cohérence locale [42]. Le principe de ce filtre est :

- Le niveau de bruit de la phase varie à travers l'interférogramme. Les régions avec un niveau de bruit élevé doivent être plus filtrées afin de donner un lissage suffisant pour le déroulement de phase. Les régions avec faible niveau de bruit doivent être moins filtrées afin de préserver les détails d'élévation. Tant que l'écart-type de bruit est une fonction de la cohérence (figure II.8), cette dernière peut être utilisée pour un filtrage plus adaptatif.
- Pour les régions de forte pente, le taux de franges est grand. Le masque carré va scanner plus qu'une frange, ce qui détruit les continuités des franges et rend le déroulement plus difficile. Par contre, les masques directionnels (figure II.5) proportionnels aux franges protègent mieux les continuités. Le masque sélectionné parmi 16 doit être aligné le long de frange pour inclure les pixels ayant approximativement la même phase. Ce qui rend le filtrage plus efficace à préserver le motif de frange.

Le filtre de Lee s'implémente pour filtrer les *speckles* (bruits multiplicatifs) dans l'image d'amplitude ou pour les résidus (bruits additif) dans l'image de phase interférométrique, et tant que dans cette étude nous nous intéressons aux interférogrammes nous devons toujours nous référer au modèle de bruit additif (équation II.1).

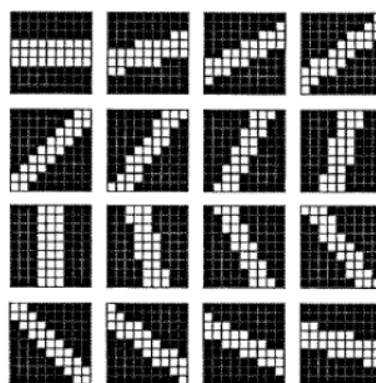


Figure II.5 : Les 16 masques directionnels de Lee

#### II-4-2-7 Autre améliorations du filtre Lee

Dans la littérature [43] *Q.Wang et al* ont proposé une bonne amélioration de filtre *Lee*, cette amélioration vise : premièrement à modifier le modèle de bruit additif en séparant les phases saines appelée la composante principale et les phases résiduels qui ont subie des résidus. Secondement à exploiter le filtrage sur les deux plans, fréquentiel de *Goldstein* pour séparer le spectre de composante principale et celui résiduel, spatial pour appliquer le filtre de *Lee* avec 4 masques directionnels au lieu 16 car l'ampleur de bruit est minimisé en séparant les deux spectres correspondants. En effet le filtre proposé dans [43] est hybride afin de combiner les performances de filtre fréquentiel de *Goldstein* et celui spatial de *Lee*.

En extrayant la composante principale de phase bruitée globale, nous n'aurons pas besoin de 16 masques directionnels pour le filtrage. 4 masques seront largement suffisants car le signal résiduel est presque stationnaire et varie à cause de bruit et la phase résiduelle restante. La figure II.6 montre ces 4 masques de 27 pixels effectifs (blancs).

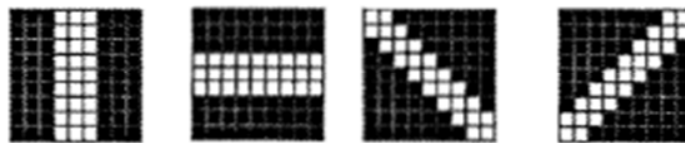


Figure II.6 : Les 4 masques directionnels de *Wang et al* (*Lee* modifié)

#### **Inconvénients**

Le filtre *Lee* amélioré possède cependant quelques inconvénients, il concerne tous les pixels adjacents (comme tous les filtres déjà présentés). Très long en termes du temps d'exécution et de traitement, en effet pour chaque région de 9 x 9 par exemple nous aurons besoin de calculer 16 masques directionnels pour en choisir un. La sélection de masque reste une approximation basée sur la variance locale donc il s'agit d'une estimation de parallélisme frange-masque.

Le filtre de *Wang* présente une amélioration en taux de réduction des résidus, mais pas en terme du temps car il a essayé de minimiser le nombre des masque à 4 ce qui réduit le temps d'exécution d'une part, cependant l'application de filtrage *Goldstein* dans le domaine fréquentiel reprend le temps compensé par réduction de nombre de masques.

#### II-4-2-8 Filtrage par des fonctions de distribution rotationnelle

Autres méthodes de dé-bruitage sont aussi applicables pour l'interférogramme inSAR, il s'agit d'une autre catégorie si nous pouvons le dire, ce sont des filtrages basés sur des fonctions de distributions rotationnelles afin de compenser les composantes rotationnelles d'interférogramme. C'est quoi la composante rotationnelle ? Elle constitue les points de singularité de 4 pixels adjacents détectés comme résidus (voir procédure de détection).

##### *Filtrage par la fonction vortex de signe inverse*

*Takahiro et al* ont proposé dans [44] un filtre qui supprime les résidus d'interférogramme en superposant sur la phase roulée une fonction de distribution arc tangente, vu que son allure 3D est sous forme d'un vortex elle prend ce nom.

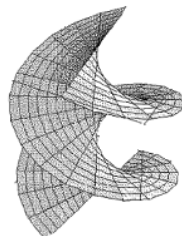


Figure II.7 : L'allure la fonction vortex (arctan bidimensionnelle)

Comme les résidus sont de deux signes  $\pm$ , également la fonction vortex dont son signe sera l'inverse de celui de résidu, d'où vient le nom (vortex de signe inverse).

Le mécanisme est très simple où il y a un point de singularité (4 pixels adjacents)  $(i_s, j_s)$  nous le superposons la fonction :

$$f_{vortex}(i, j) = \mp \arctan\left(\frac{i - i_s}{j - j_s}\right) \quad (\text{II. 22})$$

##### *Filtrage par la fonction dispersion*

Dans les littératures [45,46] il s'est proposé un filtre de même idée que celui précédent, c'est de compenser la composante rotationnelle par une fonction de même entité. La fonction pour un tel but est celle de dispersion des résidus, effet l'application de ce filtre sur un point de singularité induit à une dispersion des résidus sur les 4 directions avec affaiblissement jusqu'à ce que les résidus disparaissent.

À l'instar de filtrage vortex, ce filtre possède deux signes et son application est de rotation inversée selon le signe des résidus.

De même où il y a un point de singularité nous ajoutons une fonction de compensation au point de singularité voisins c.-à-d. sur les 4 phases au-dessus, 4 au-dessous, 4 de droite et 4 de gauche, mais ces point de singularité voisins créés sont de composante rotationnelle de  $\pm 1/4$  et pas  $\pm 1$ , une sorte

de dispersion affaiblie. La figure II.8 suivante donne une vision simplifiée pour un point de singularité positif. Dans le cas du point négatif une rotation inverse est appliquée.

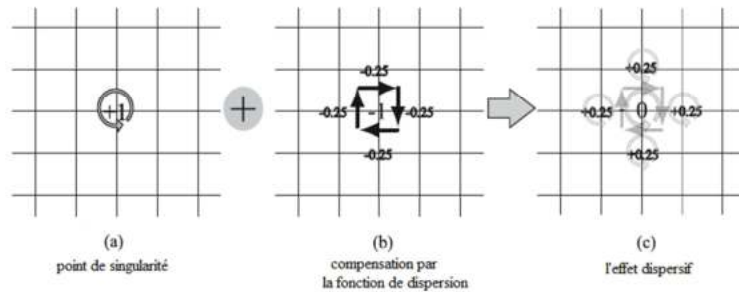


Figure II.8 : la compensation par la fonction de dispersion

**Inconvénients :**

- Application pour toutes les 4 phases adjacentes douteuses (comme presque tous les filtres présentés).
- Ces filtres créent autres résidus autour de point de singularité, et pour les éliminer nous devons ré exécuter l'algorithme et cela au prix du temps de traitement.
- Ils réalisent un lissage, car aucune considération de franges ou des zones de fortes variations n'est prise. Et cela au détriment de la résolution.
- Aucune adaptation de filtrage sur les taux des résidus qui varie à travers l'interférogramme.

## **II-5- Conclusion**

Dans ce chapitre une étude, analyse et comparaison de quelques méthodes de dé-bruitage d'interférogramme inSAR ont été présentées. Nous avons essayé de donner une vision pas trop large mais suffisante pour comprendre le principe, le mode d'implémentation et l'influence de certains filtres largement utilisés dans le domaine d'interférométrie que ce soit sur le plan fréquentiel ou le plan spatial.

Afin de donner une notion bien élaborée, le commencement était par les filtres basiques, qui sont très connus et applicables dans le traitement d'image en général y compris les images de niveau de gris, de contraste (tridimensionnelle RVB), profilométrie 3D, interférométrie optique, IRM et interférogramme de topographie MNT. Puis une focalisation spécifique pour le filtrage d'interférogramme éliminant le bruit additif avec un choix des filtres aussi diversifié que possible dans le but d'englober des différentes idées récemment publiées. Ces méthodes ont été analysées et comparées selon plusieurs critères tels que : nombre des résidus, taux de réduction, la variance de phase, l'écart-type, temps d'exécution et la qualité des interférogrammes basée sur la cohérence, la distorsion et le degré de flou des franges. Au fur et à mesure des inconvénients et des avantages de chacune, on a envisagé d'autres améliorations possibles.

Après le filtrage de l'interférogramme, le déroulement de phase sera une tâche moins compliquée, cette technique comporte une vaste liste des algorithmes et elle fera l'objet du prochain chapitre.

# Chapitre III

## Étude, analyse et comparaison de différentes méthodes de déroulement de phase

### III.1 Introduction

Après le filtrage d'interférogramme, l'étape suivante de la chaîne de traitement d'image inSAR est le déroulement de phase. Cette information est mesurée dans l'intervalle  $(-\pi, \pi]$  due à l'opération de roulement d'où vient le nom la phase roulée (*Wrapped-Phase*), et tant que l'obtention de l'altitude exacte du point imagé est proportionnelle à la phase réelle absolue (voir chapitre I) cette phase doit être reconstruite par une opération inverse non linéaire pour avoir une phase déroulée (*Unwrapped-phase*).

Si l'interférogramme est sans bruits (sans aucun résidu); ce qui est impossible en pratique, le déroulement devient une procédure très facile et plusieurs solutions sont possibles selon le pixel de départ et le parcours d'intégration suivi. Mais avec la présence des résidus l'application directe d'une telle procédure échoue en engendrant des lignes distordues le long du parcours si l'intégration passe via ces résidus. Pour remédier à ce problème plusieurs approches de déroulement adaptées à la présence des résidus ont été proposées, elles se divisent en deux catégories principales : suivi de parcours (*Path-Following*) et norme de minimisation (*Minimum-Norm*).

La catégorie PF se divise elle-même en deux sous-classes : rupture des branches (*Branch-Cut*) et guidée par la qualité -croissance des régions (*Quality-Guided-region-Growing*). Le traitement PF se caractérise par des techniques locales et il déroule les phases une après autre en suivant un parcours statique prédéterminé ou dynamique adaptatif à localisation des résidus (des branche ou des grappes).

Tandis que la catégorie MN se caractérise par un traitement global dont toutes les phases sont impliquées à la fois dans le calcul de la solution, nous nous trouvons dans ce cas face à l'utilisation des méthodes numériques pour résoudre le problème.

Dans ce chapitre nous allons entamer cette étude par l'utilité de déroulement avec ses formulations de base, dans la deuxième section une description mathématique détaillée de déroulement sera présentée, et par cette description une méthode d'ajustement sera ainsi déduite. En suite la dernière

section consiste à un état de l'art sur des méthodes de déroulement largement utilisées dans les deux catégories, cependant une tendance vers les approches PF sera adoptée car le travail personnel en fait partie.

## III.2 C'est quoi le déroulement de phase ?

### III.2.1 formulations

Nous avons vu précédemment que la phase interférométrique obtenue par le système inSAR a une proportionnalité directe avec la hauteur de point imagé, mais seulement la phase réelle qui peut interpréter cette altitude réelle et comme nous savons que la phase est mesurée dans l'intervalle  $[-\pi, +\pi]$  cette altitude sera aussi en ambiguïté. Autrement dit, seulement la valeur principale, qui est définie comme le reste de la phase après la soustraction le maximum de multiple  $2\pi$ , sera détectée. Donc la procédure de déroulement de phase consiste à reconstruire la phase réelle à partir de celle roulée en trouvant le nombre de cycle exacte à ajouter.

$$\psi_{i,j} = w(\phi_{i,j}) = \phi_{i,j} + 2k\pi \quad (\text{III. 1})$$

Avec

$$w(\phi_{i,j}) = \text{mod}\{\pi + \phi_{i,j}, 2\pi\} - \pi \quad (\text{III. 2})$$

Et  $k \in \mathbb{Z}$

Cette opération est non-linéaire et elle possède les propriétés suivantes :

$$\begin{aligned} f &= w^{-1}wf \\ wf &= ww^{-1}f \\ w^{-1}f &= w^{-1}ww^{-1}f \\ \sin(f) &= \sin(wf) \end{aligned}$$

Le déroulement de phase est un problème, s'il n'y a pas d'autres informations supplémentaires telle que une altitude et coordonnées exactes de point de départ. En effet, il existe une infinité possibilité correspondant aux images de phase déroulée pour une seule image roulée. Cette lacune d'unicité d'image déroulée est montrée dans l'exemple ci-dessous.

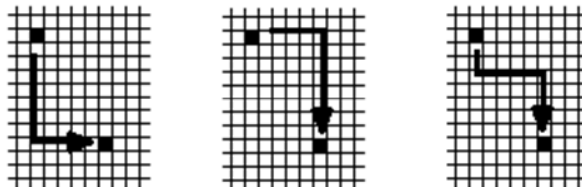


Figure III.1 : Problème non-unicité de déroulement selon le parcours suivi et le point de départ

La figure III.1 montre un exemple de déroulement pour une petite portion d'image roulée où nous remarquons que nous pouvons trouver plusieurs solutions possibles de déroulement selon le pixel de départ et les parcours empruntés.

La formule qui permet de calculer la phase déroulée  $\Psi_i$  à partir de l'intégration de gradient roulé discret accumulé de la phase roulée  $\phi_n$  unidimensionnelle est

$$\Psi_i = \phi_1 + \sum_{n=1}^{i-1} w(\Delta\phi_n) \quad (\text{III. 3})$$

Où  $\Delta\phi_n$  est le gradient discret roulé de la phase roulée. il s'écrit :

$$\Delta\phi_n = w(\phi_{n+1} - \phi_n) \quad (\text{III. 4})$$

Pour le traitement bidimensionnel la phase déroulée peut facilement être calculée par l'intégration de gradient accumulé bidimensionnelle suivant :

$$\Psi_{i,j} = \phi_{1,1} + \sum_{n=1}^{i-1} w(\Delta_1\phi_{n,1}) + \sum_{m=1}^{j-1} w(\Delta_2\phi_{i,m}) \quad (\text{III. 5})$$

Avec  $\Delta_1\phi_{n,1} = w(\phi_{n+1,1} - \phi_{n,1})$  est le gradient vertical et  $\Delta_2\phi_{i,m} = w(\phi_{i,m+1} - \phi_{i,m})$  est le gradient horizontal. Alors les solutions possibles de  $\Psi_{i,j}$  dépendent de pixel de départ  $\phi_{1,1}$ ; qui peut être différent de (1,1), et le parcours suivi par l'intégration.

Dans le cas de présence de bruits (résidus) l'application de ce cumule des gradients roulés engendre des lignes distordues le long de parcours (chemin) d'intégration choisi, ce que nous appelons une dépendance de parcours (*Path-depending*). Avant d'entamer les algorithmes de déroulement résolvant le problème de dépendance de parcours nous essayons de donner une description mathématique avec une petite amélioration visant à minimiser légèrement les zones distordues ou évitées lors de déroulement.

### III.2.2 La condition d'Itoh

Pour que le déroulement soit correctement exécuté sans aucune confusion entre les discontinuités dues aux franges (discontinuités de l'opération modulo  $2\pi$ ) et les discontinuités de mauvais échantillonnage une condition très d'importante est adoptée par toutes les méthodes de déroulement, elle consiste à exiger que toutes les variations en valeur absolue entre deux pixels adjacents sont inférieures à  $\pi$ . Elle est communément appelée la condition d'Itoh [47].

Nous considérons le cas unidimensionnel d'une ligne d'image de phase réelle ou déroulée.

$$\Delta\Psi_i = \Psi_i - \Psi_{i-1} \quad (\text{III. 6})$$

La condition d'Ito est :

$$|\Delta\Psi_i| \leq \pi \quad (\text{III.7})$$

Et à partir de III.6 il est évident que :

$$\sum_{i=1}^N \Delta\Psi_i = \Psi_N - \Psi_0 \quad (\text{III.8})$$

À partir de l'équation III.1 nous avons :

$$\Delta w(\Psi_i) = \Psi_i - \Psi_{i-1} - 2\pi(k_i - k_{i-1}) \quad (\text{III.9})$$

nous appliquons l'opérateur  $w()$  :

$$\underbrace{w[\Delta w(\Psi_i)]}_a = \Delta\Psi_i - \underbrace{2\pi(k_i - k_{i-1}) - 2\pi k}_b \quad (\text{III.10})$$

Où  $k_i, k_{i-1}$   $k$  représentent un multiple propre de  $2\pi$  alors :

$$w[\Delta w(\Psi_i)] = \Delta\Psi_i \quad (\text{III.11})$$

Ce qui confirme l'équation III.3 et sa généralisation III.5.

### III.3 Déroulement par ajustement

Dans cette partie nous allons présenter ce qui est nécessaire d'une approche de déroulement de phase améliorée dite d'ajustement au niveau de franges [48] basée sur des études menées dans [49,50].

#### III.3.1 traitement 1D

Le déroulement est l'attribution de nombre de cycle propre  $k(x_i)$

$$k(x_i) = \begin{cases} \sum_{\alpha=1}^i k_{\alpha}(x_{\alpha}); & 1 < i \leq N \\ 0; & i = 1 \end{cases} \quad (\text{III.12})$$

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

$$k_i(x_i) = \begin{cases} 0 & , |\varphi_m(x_i) - \varphi_m(x_{i-1})| \leq \pi \\ 1 & , |\varphi_m(x_i) - \varphi_m(x_{i-1})| > \pi \text{ et } \varphi_m(x_{i-1}) > \varphi_m(x_i) \\ -1 & , |\varphi_m(x_i) - \varphi_m(x_{i-1})| > \pi \text{ et } \varphi_m(x_{i-1}) < \varphi_m(x_i) \end{cases} \quad (\text{III.13})$$

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

La figure ci-dessous montre un exemple d'un traitement 1DA qui représente une section d'interférogramme pour un vecteur de 128 pixels :

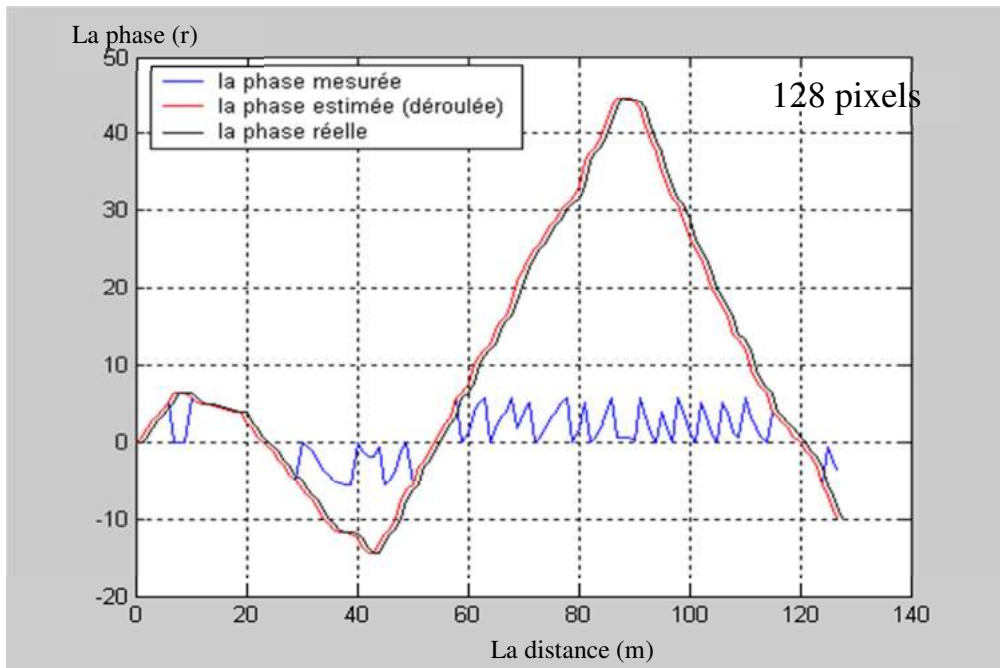


Figure. III.2 : Traitement unidimensionnel pour une section de la surface, condition d'Itoh satisfaite

D'après la figure III.2 qui représente une ligne ou colonne d'image, nous remarquons que la courbe de la phase déroulée est proche de celle réelle parce que toutes les variations entre les pixels sont inférieures ou égales à  $\pi$ , la principale condition de faisabilité de déroulement de phase est satisfaite. Par contre celles de la figure III.3 ne sont pas identiques où un décalage se crée à partir de pixel encerclé parce que la variation de phase au niveau de ce pixel dépasse  $\pi$ .

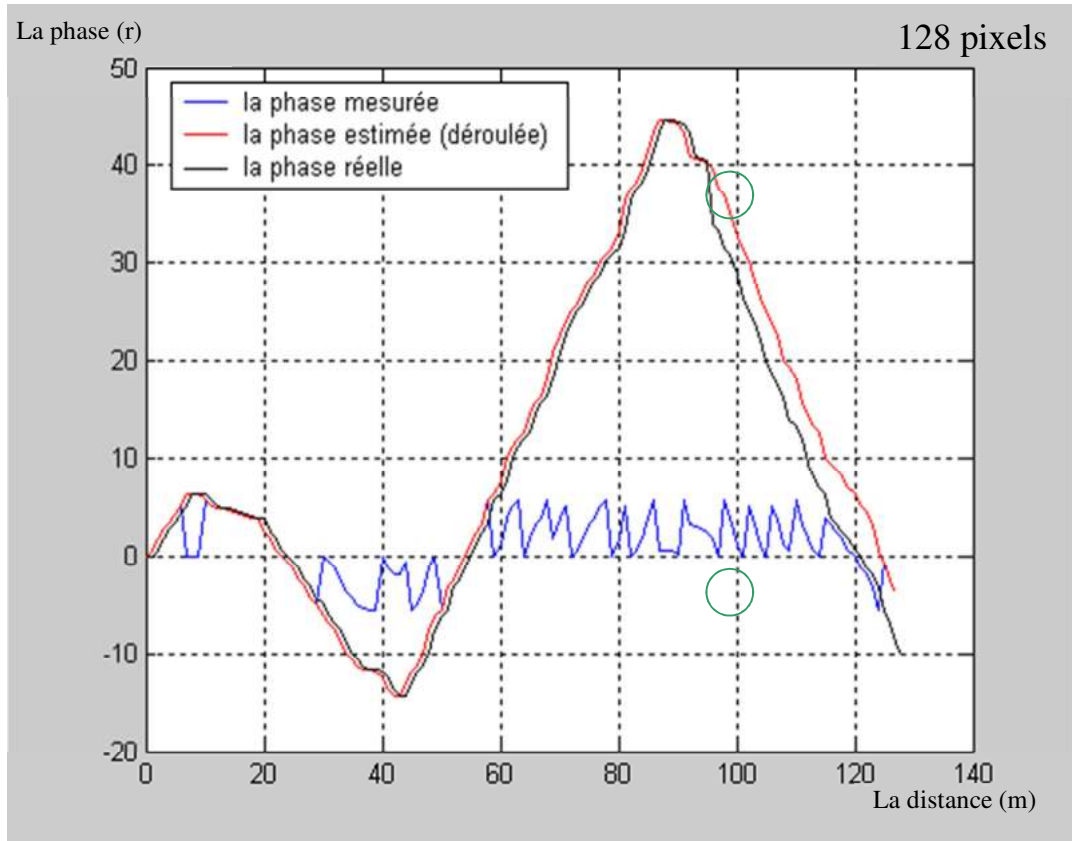


Figure. III.3 : Traitement unidimensionnel pour une section de la surface, violation de la condition d'Itoh

### III.3.2 traitement 2D

La matrice d'attribution des nombres de cycle est :

$$k(x_i, y_j) = \begin{cases} \sum_{\alpha=1}^i k_{\alpha}^c(x_{\alpha}, y_j) + \sum_{\beta=1}^j k_{\beta}^l(x_i, y_{\beta}); & 1 < i \leq N \text{ et } 1 < j \leq M \\ 0; & i = 1 \text{ et } j = 1 \end{cases} \quad (\text{III.14})$$

Où :

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

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

Cette description mathématique nous donne une explication plus détaillée que les équations III.3,4 et 5, et son application donne une sorte d'ajustement inter-pixels. Selon ces ajustements deux modes de parcours simples sont possibles. Les figures III.4, 5 et 6 ci-dessous montrent ce propos.

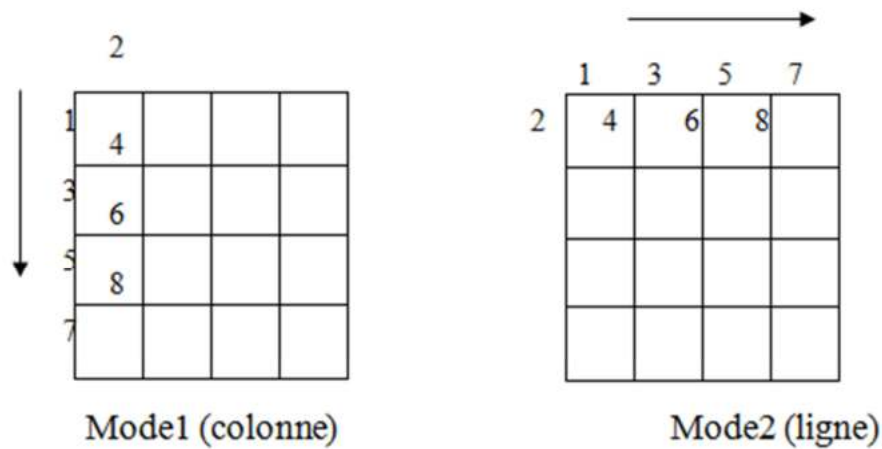


Figure III.4 : Les deux modes simples de la méthode d'ajustement

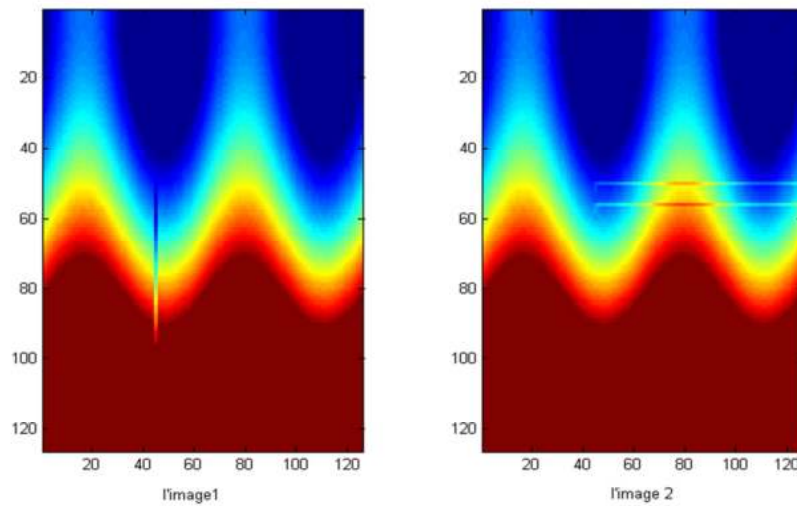


Figure III.5 : Les deux images générées pour des sauts de phase situés entre

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

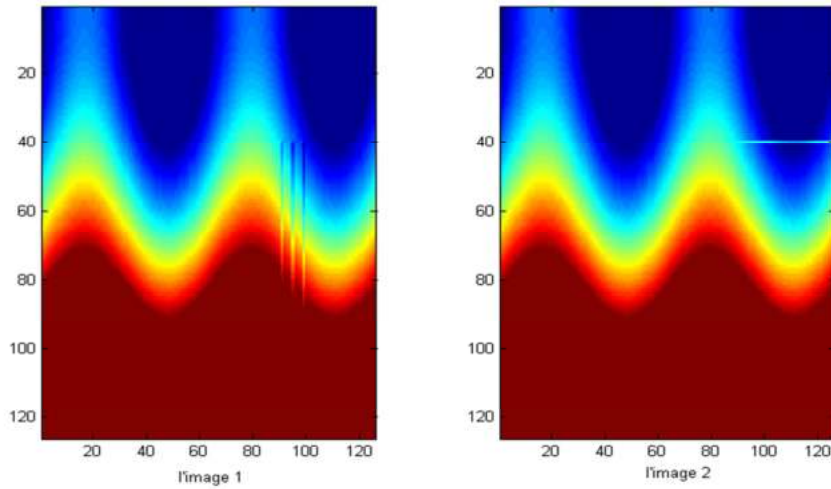


Figure III.6 : Les deux images générées pour des sauts de phase situés entre

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

Pour un interférogramme sans bruits l'application de la méthode basique de gradient (l'équation III.5) ou la méthode d'ajustement (l'équation III.14) sont similaires et donnent des images de phases déroulées proches. Mais avec bruits les lignes distordues avec la méthode d'ajustement sont légèrement moins larges.

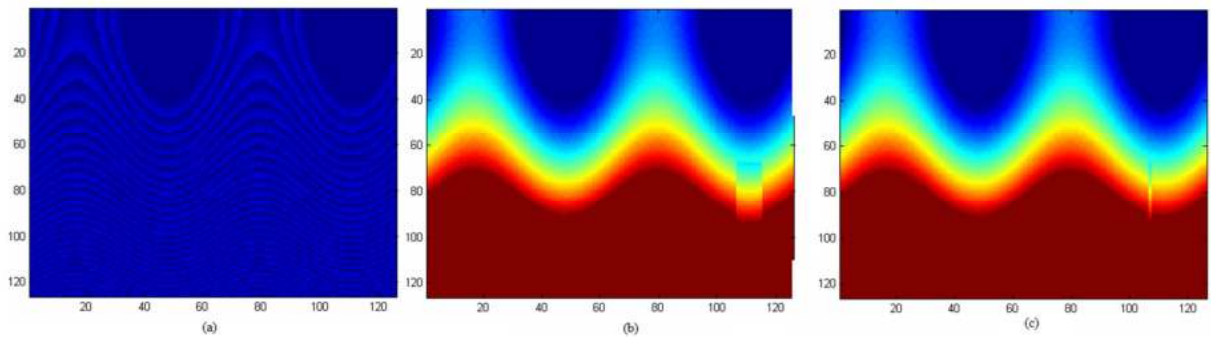


Figure III.7 : Le déroulement avec résidus et les lignes distordues. (a) l'interférogramme, (b) la méthode de gradient basique, (c) la méthode d'ajustement.

### III.4 autres approches de déroulement

Il y a deux catégories pour le déroulement: suivi de parcours (*path-following*) et les normes de minimisation (*Minimum-Norm*). Dans cette partie nous essayerons d'expliquer les algorithmes les plus connus et répandus, cet état de l'art permettra de simplifier les différentes procédures et se focaliser directement sur l'application sans oublier de citer les avantages et les inconvénients de chaque catégorie et algorithme afin de donner une analyse assez complète que possible.

#### III.4.1 Les méthodes de *Branch-cut*

Ces méthodes appartiennent à la catégorie de suivi de parcours (*Path-following*). Elle était proposée pour la première fois par *Goldstein* [51], elle est considérée parmi les algorithmes de référence pour la comparaison et la validation d'autres méthodes améliorées. Son principe est basé sur l'établissement des branches entre les résidus de signes opposé dans le but d'interdire l'intégration traversant ces branches d'où vient le nom *branch-Cut* [51-53].

##### III.4.1.1 La méthode de Goldstein

L'exécution de l'algorithme se déroule comme suit :

1. Générer la mappe des résidus (voir chapitre II).
2. Connecter les résidus de différents signes suivant la distance la plus courte par des branches qui servent comme des barrières interdisant le parcours d'intégration de les traverser, de telle sorte qu'aucun résidu net ne peut être encerclé et aucune propagation d'erreur ne peut être engendrée. Mais certaines erreurs locales (régions distordues sans déroulement) peuvent se produire. Bien sûr les pixels des extrémités de chaque branche sont de signe opposé donc cette branche représente la discontinuité de phase. Le but est de choisir les branches de telle manière de minimiser la longueur totale des branches et par conséquent minimiser les discontinuités et les régions restées sans déroulement.

Quand le taux des résidus est faible la localisation des branches optimums est très simple. Mais quand la densité des résidus est élevée la performance de sélectionner les bonnes branches se diminue. Alors pour les régions les plus bruitées il apparait que le seul moyen de minimiser la longueur totale des branches est d'essayer toutes les combinaisons  $n(n-1)/2$  ce qui induit à un temps de traitement si lourd.

*Goldstein* a proposé l'algorithme de connexion des résidus tel que :

- a) Un masque 3 x 3 scanne les voisins de chaque résidu. Dans ce masque les résidus voisins sont inspectés et connectés aux résidus central en formant une branche, la branche formée se marque soit balancée (non chargée) ou non balancée (signe +/- )
  - b) Incrémentation de masque par 2 et le même algorithme se répète à partir de résidu de départ. On s'arrête s'il y a aucun résidu hors les grappes de branches et toutes les branches sont balancées.
  - c) S'il y a des résidus restant ou des grappes non balancées nous pouvons les connecter au plus proche bord.
  - d) Quand les résidus sont très denses toute la région sera isolée et marquée balancée.
3. Finalement l'intégration des gradients s'exécute en évitant toutes les branches et les régions isolées, cette étape est appelée (*Flood-Fill*) c.-à-d. un remplissage simulé par un écoulement inondant.

Les figures ci-dessous montrent ce propos, l'algorithme a été testé sur deux interférogrammes simulés (figures III.8-9.a) et un autre réel constitue une partie d'interférogramme fournie par d'ERS-1 (figure III.10.a). Le premier présente un faible taux de franges fermées, le deuxième un grand taux de franges ouvertes et le troisième présente une donnée inSAR réelle de grand taux de résidus. Les figures III.8-10.b montrent les images de phase déroulée par l'algorithme de *Branch-Cut*, les figures III.8-10.c et III.8-10.d présentent respectivement les mappes de résidus et celles de branches correspondants.

Nous remarquons que les images déroulées contiennent des régions isolées où aucune procédure d'intégration de gradient n'est effectuée, ces régions sont de densité élevée de résidus. Donc la clé d'amélioration de la méthode de *Branch-Cut* est de minimiser ces régions.

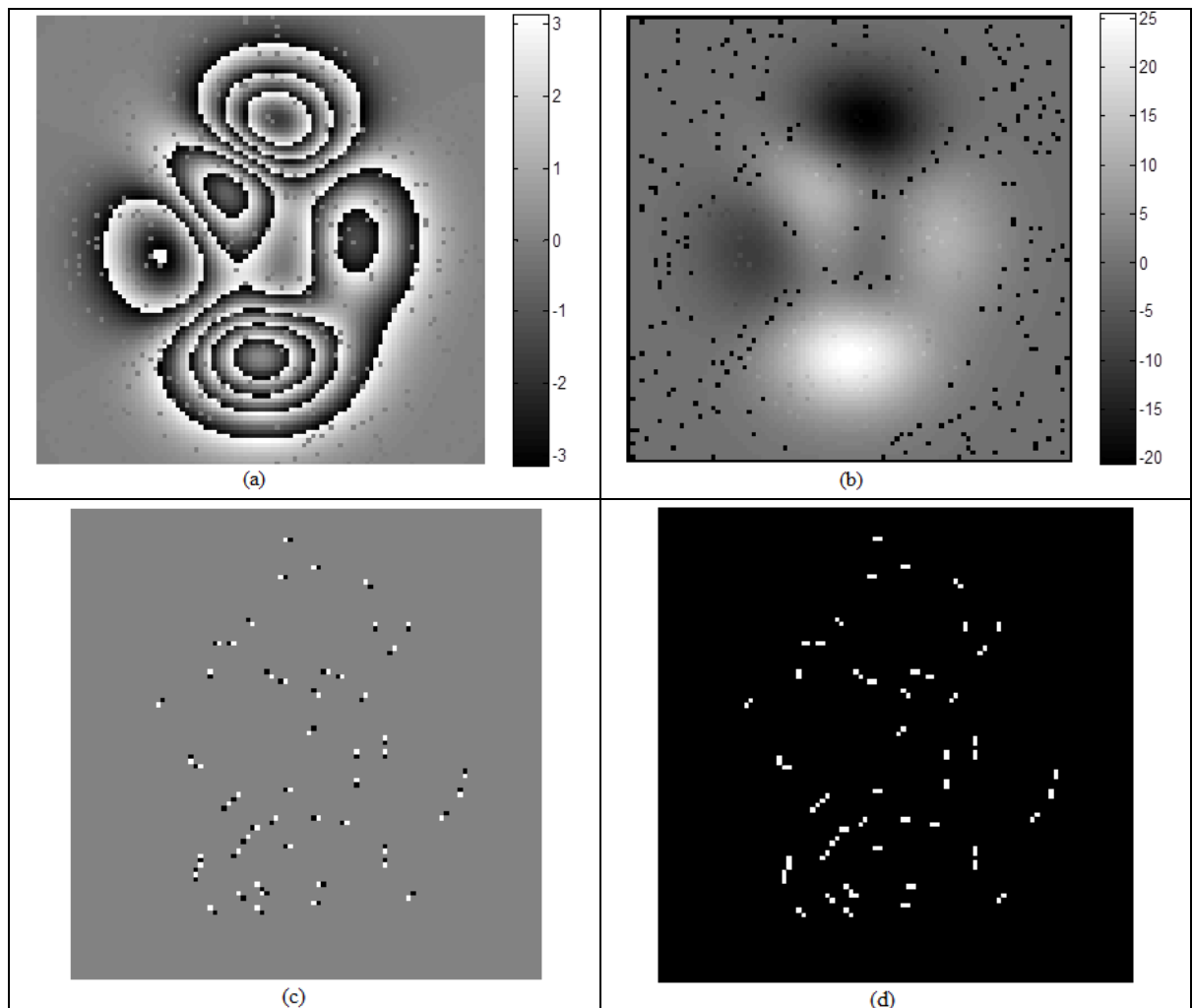


Figure III.8 : Test d'algorithme de déroulement Goldstein pour un interférogramme pics à franges fermées. (a) l'interférogramme, (b) l'image de phase déroulée, (c) la mappe des résidus, (d) la mappe de branches

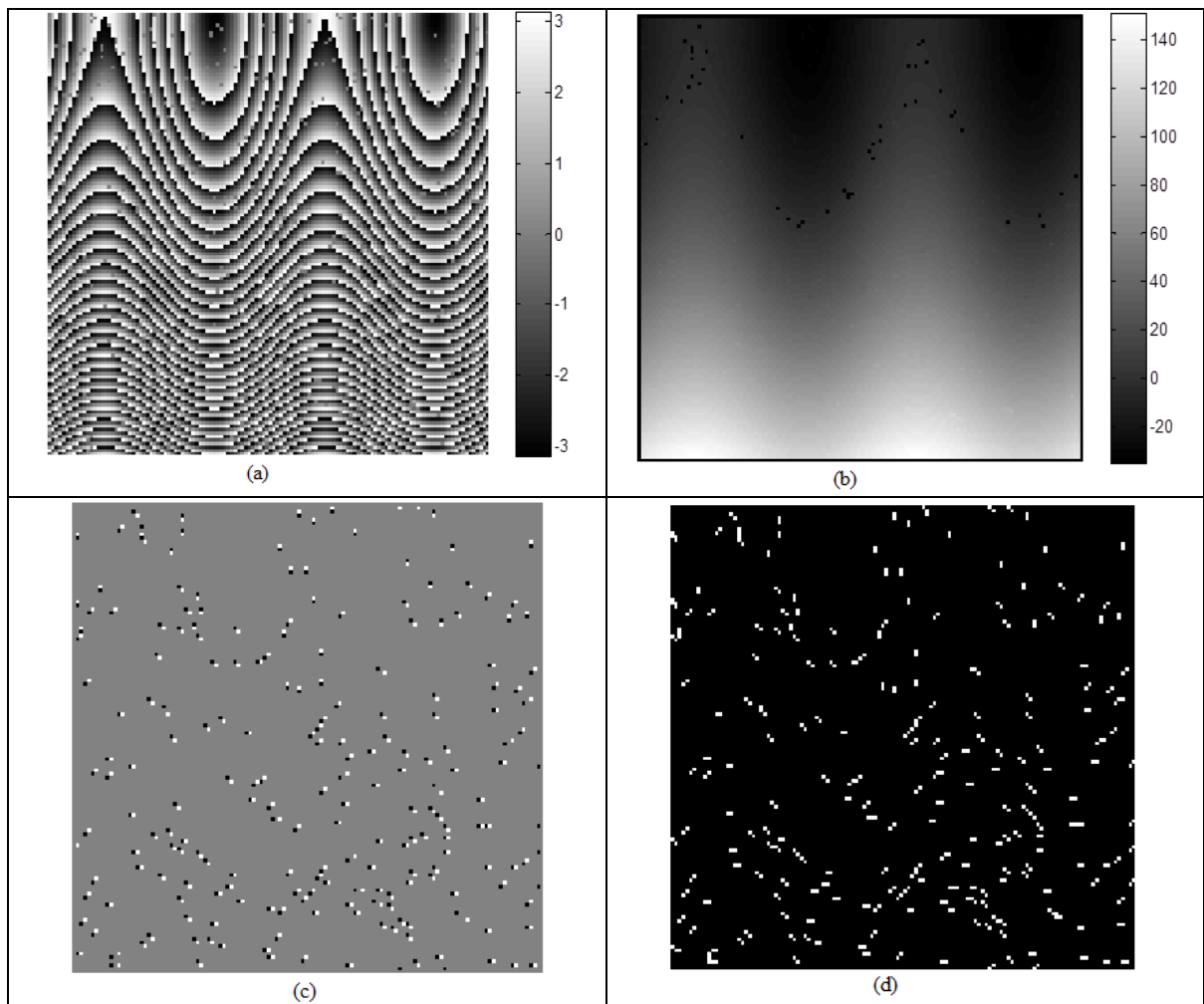


Figure III.9 : Test d'algorithme de déroulement Goldstein pour un interférogramme ondes à franges ouvertes.(a) l'interférogramme, (b) l'image de phase déroulée, (c) la mappe des résidus, (d) la mappe de branches

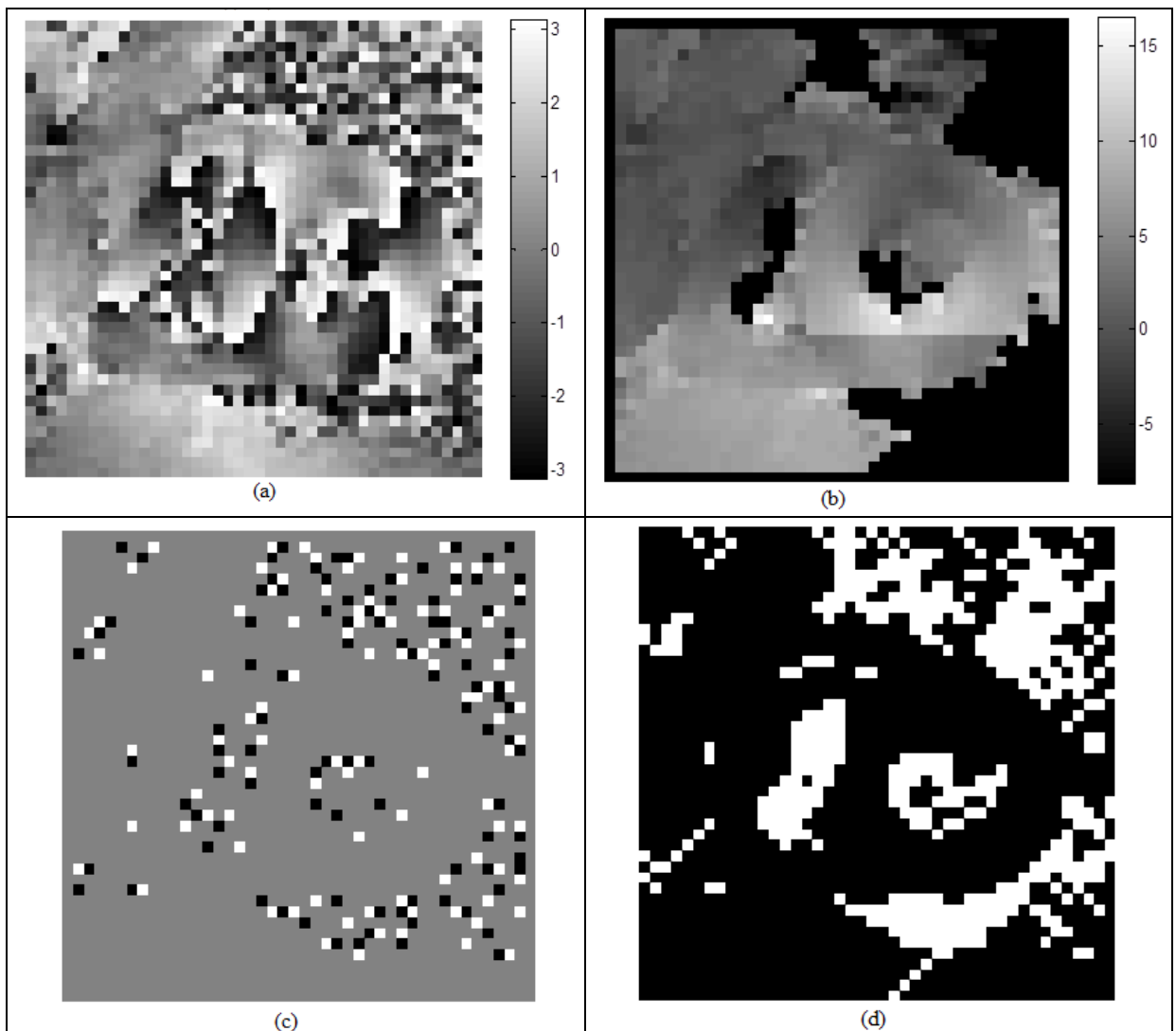


Figure III.10 : Test d'algorithme de déroulement Goldstein pour une partie d'un interférogramme réel d'ERS-1. (a) l'interférogramme, (b) l'image de phase déroulée, (c) la mappe des résidus, (d) la mappe de branches

L'algorithme de *Branch-Cut* de *Goldstein* est rapide et généralement satisfaisant mais ses lacunes sont :

- Région isolées dans les grappes formées par l'agglomération des branches.
- La procédure de connexion des résidus (créations des branches) se fait pixel par pixel et aucun processus de recherche globale n'est appliqué pour former des grappes optimums dont la longueur totale des branches est minimisée.

Autres améliorations de l'algorithme ont été proposées, elles incluent une étape d'optimisation; soit après la formation des grappes soit après celle des branches; permettant d'inter-changer les résidus entre les grappes afin de réduire la longueur totale des connexions. Parmi ces méthodes nous en trouvons [54-56].

#### III.4.1.2 Méthode *Branch-Cut* guidée par la fonction pseudo corrélation

Dans la littérature [57] il s'est proposé une nouvelle méthode améliorant le processus de placement des branches afin de minimiser la longueur totale et de relier les discontinuités de phase effectives.

La mappe de qualité utilisée est la pseudo-corrélation de la phase roulée, elle est définie telle que :

$$PC(m, n) = \frac{\sqrt{(\sum \cos \phi(i, j))^2 + (\sum \sin \phi(i, j))^2}}{k^2} \quad (\text{III. 15})$$

Où la valeur  $PC(m, n)$  juge la qualité de la phase  $\phi(m, n)$  avec les voisins  $k \times k$ , L'algorithme se déroule comme suit :

- 1) Générer la mappe des résidus.
- 2) Définir un seuil la longueur max de branche placée dans cette étape. Les résidus de signe inverse séparés par une distance inférieur au seuil seront marqués. Ces résidus marqués seront balancés et placés comme une branche. Puis nous les élevons de la mappe des résidus. Le choix de seuil est empirique et selon l'estimation de manipulateur par exemple dans [57] le seuil 3 a été choisi.
- 3) Générer la mappe de pseudo-corrélation décrite dans l'équation III.15. Puis générer la mappe de guide par la procédure de détection des bords [58] à partir de la mappe de pseudo-corrélation.
- 4) Placer les résidus qui se trouvent sur un bord de la mappe de guide en cherchant les résidus de signe inverse le long du bord. Si aucun résidu inverse n'est trouvé sur le bord, rechercher un résidu inverse autour de chaque extrémité de bord. Arrêter de chercher dans cette direction lorsque nous rencontrons un résidu de même signe.

- 5) Pour les résidus restant non-balancés placer les branches selon l'algorithme de *Goldstein*. Et enfin fusionner toutes les branches.

L'efficacité de cet algorithme se manifeste et apparait différente de celle de Goldstein lorsque nous avons des discontinués raides dans l'interférogramme. Dans l'exemple de la figure ci-dessous nous avons une image de phase originale avec des discontinuités raides artefacts sous forme d'un carré (figure III.11. a), son interférogarmme correspondant est illustré dans la figure III.11.b. La détection de ces discontinuités est visible sur la figure III.12.a-b en utilisant la mappe de pseudo-corrélation et la celle de guide déduite par la procédure de détection des bords.

La différence entre l'algorithme de Goldstein de celui guidée par la pseudo-corrélation se réside au niveau de longueur des branches et leur densité dans l'image (figures III.13.a-b) et par conséquent minimiser les régions distordues lors de déroulement de phase (figures III.13.c-d).

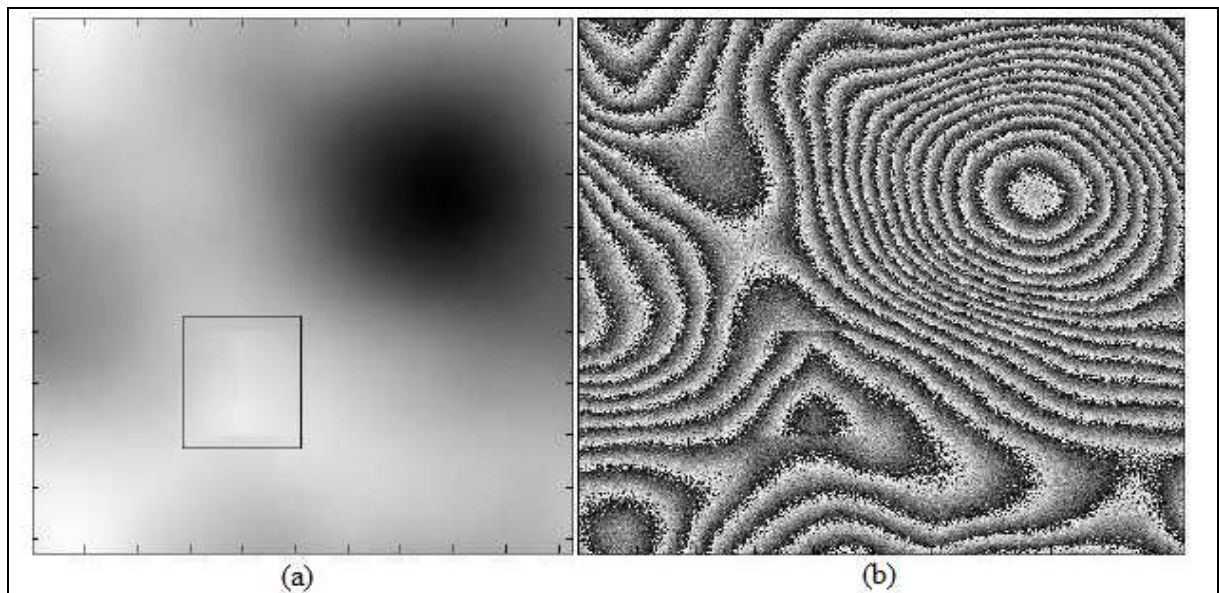


Figure III.11 : (a) l'image de phase originale avec discontinuités raides, (b) l'interférogramme correspondant [57]

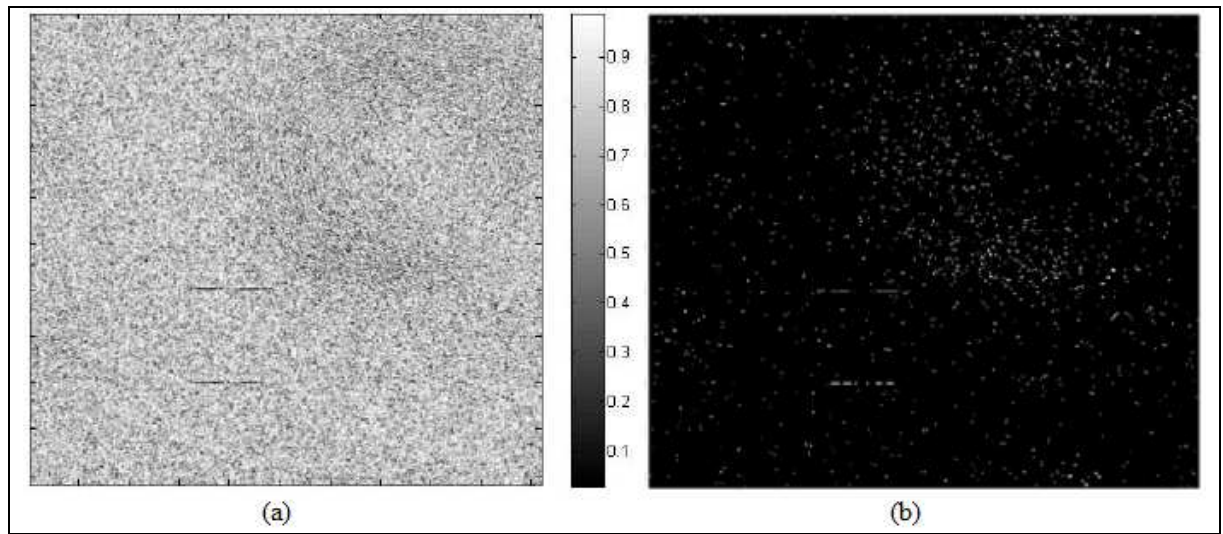
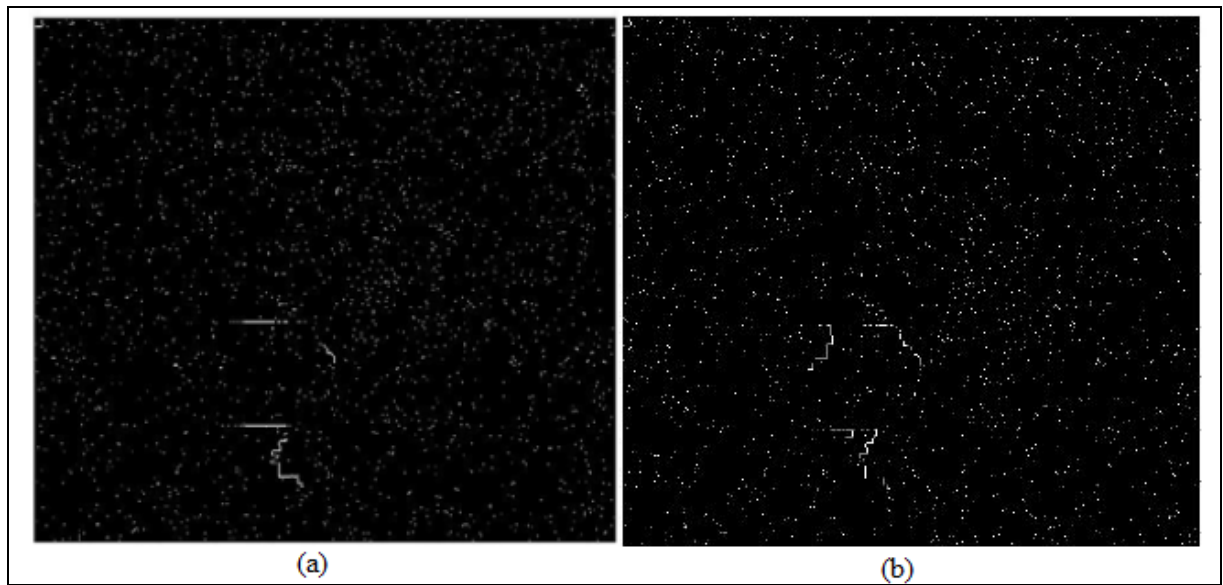


Figure III.12 : (a) la mappe de pseudo-corrélation, (b) la mappe de guide obtenue par la détection des bords.



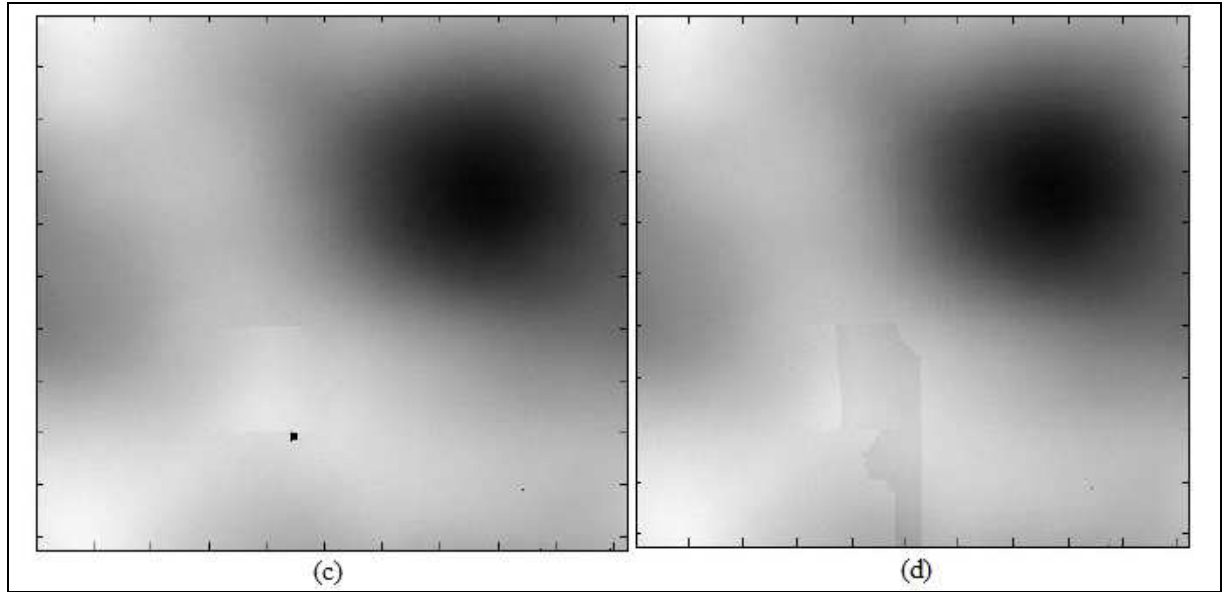


Figure III.13 : (a) la mappe des branches guidée par la pseudo-corrélation, (b) la mappe des branches de Goldstein, (c) l'image de phase déroulée après le placement de branches par GPC, (d) l'image de phase déroulée après le placement de branches de Goldstein.

#### III.4.1.3 Méthode *Branch-Cut* d'appariement par distance

Dans [59] une autre méthode placement des branches a été proposée, cet algorithme est basé sur l'agrégation des coordonnées pour chaque résidu positif (ou négatif) toujours dans le but de trouver un résidu inverse le plus proche tout en cherchant à avoir une longueur totale minimum que possible. La méthode d'appariement par distance (AD) place ses branches selon une vision globale de tous les résidus pour éviter de créer des zones isolées par des régions non-chargée massives. Ainsi tous les résidus restant non balancés peuvent être connectés aux bords de l'interférogramme. L'algorithme AD se déroule comme suit :

- 1) Générer la mappe des résidus, déterminer séparément les coordonnées des résidus positifs et négatifs (une sorte de deux matrices séparées et superposées).
- 2) Calculer les distances entre les résidus avec restriction c.-à-d. pas  $n(n-1)/2$  possibilités. Le paramètre distance (noté ici *dis*) se calcule par :

$$dis = \sqrt{(i_- - i_+)^2 + (j_- - j_+)^2} \quad (\text{III. 16})$$

Ou; pour des raisons d'éviter les fractions décimales, par :

$$dis = \max(|i_- - i_+|, |j_- - j_+|) \quad (\text{III. 17})$$

- 3) Initialiser le paramètre *dis* à 1 et connecter les résidus satisfaisants cette distance.
- 4) Incrémenter *dis* et répéter la procédure.
- 5) Connecter les résidus restés non balancés au bord.

La figure III.14 montre la différence entre le placement des branches par la méthode de Goldstein et AD. Nous remarquons que la méthode de Goldstein forme des branches agglomérées et plus massives avec des plus des régions isolées.

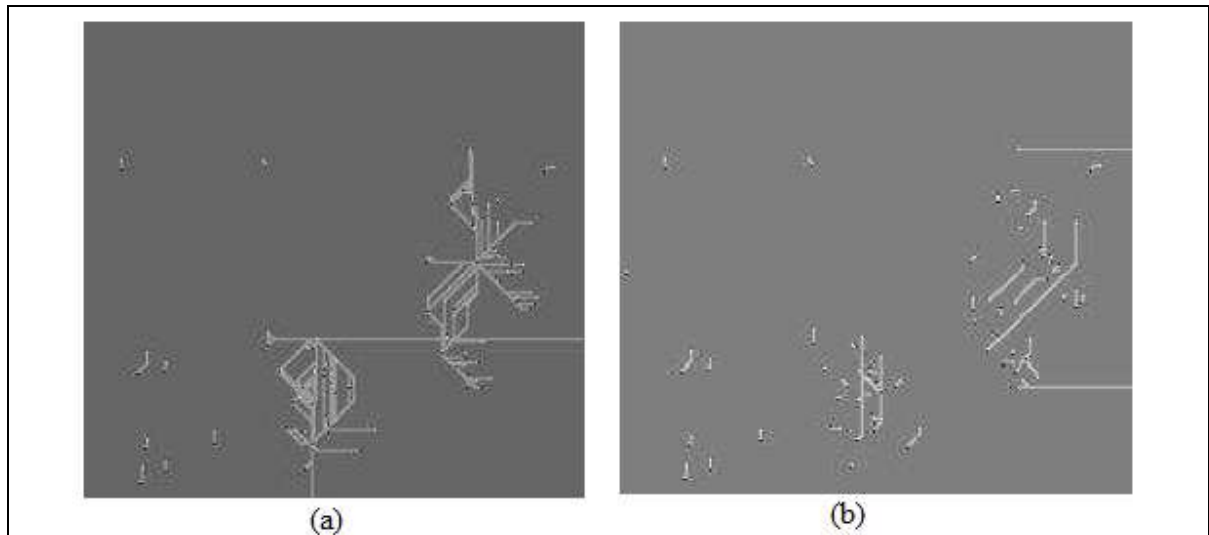


Figure III.14 : Comparaison entre la carte des branches de Goldstein et AD.  
(a) Goldstein, (b) AD [59]

### III.4.2 Les méthodes de qualité guidée et la croissance de la région

Le déroulement de phase par la qualité guidée est une approche qui appartient à la catégorie (*Path - Following*), elle est essentiellement basée sur la génération d'une carte de qualité d'interférogramme à partir de celle de cohérence originale (amplitude de corrélation) issue conjointement de processus d'imagerie inSAR ou à partir d'une autre déduite de l'interférogramme telle que la variance ou la pseudo corrélation dans le cas où l'image de cohérence n'est pas disponible [60-63].

Le processus d'obtention de la carte de qualité est communément appelé (*region-growing*) en le simulant à une croissance d'une région cultivée. L'image de qualité peut être utilisée comme une carte guidant le filtrage d'interférogramme, cette méthode est déjà expliquée dans le chapitre II (technique de vrai-voisinage adaptative), ou une carte servant à guider le déroulement de phase et dans ce cas nous nous trouvons face à deux possibilités d'utilisation :

- Une carte de qualité définissant les grappes et les régions isolées résultant des branches qui contiennent des pixels de mauvaise qualité à ne pas dérouler [64].
- Une carte de qualité définissant les régions saines et consistantes qui contiennent des pixels de bonne qualité à dérouler [61, 63, 65, 66].

Autrement dit le processus de (*region-growing*) consiste tout simplement à diviser l'interférogramme en deux zones : bonne et mauvaise selon un ou plusieurs seuils.

#### III.4.2.1 La méthode de Flynn

*Flynn* a proposé pour la première fois d'utiliser une mappe de qualité [64] pour couvrir les régions de grappe non-chargées (équivalentes aux branches de *Goldstein*) par un masque, le masque qui couvre ces régions de mauvaise qualité devrait être de petite surface que possible pour garder les détails d'information de phase dans l'interférogramme et cela faisable uniquement si le taux des résidus n'est pas trop grand.

Cette méthode se déroule avec conception contraire à celle de *Roth* et ses variantes améliorées, au lieu de faire croître la zone de déroulement à travers les pixels de bonne qualité elle fait croître le masque à travers les mauvais pixels en commençant à partir des résidus. Elle poursuit les résidus de chaque composante connectée au masque (le masque comporte plusieurs composantes et chaque composante doit comporter des résidus de signe balancé). Elle termine quand toutes les composantes soient balancées. Puis le déroulement de phase s'exécute par le processus (*Flood-Fill*) en évitant tous les pixels de masque.

L'algorithme se déroule comme suit :

- 1- Générer la mappe des résidus et celle de qualité d'interférogramme (cohérence, pseudo-corrélation ou la variance) avec sa fenêtre minimum 3x3.
- 2- Tous les pixels résidus et ses voisins qui l'entourent se déclarent initialement comme graines pour le processus de (*Region-Growing*) et se mettent dans le masque initial.
- 3- Chercher parmi les voisins des pixels graines (sauf les résidus) ceux qui ont une qualité inférieure à un seuil prédéterminé pour les ajouter au masque.
- 4- Le seuil sera incrémenté quand la croissance devient impossible. Comment se trouver dans cette situation ? si aucun pixel n'est ajouté et certains résidus ne sont pas dans les composantes balancées (restent dans la zone de déroulement).  
À noter que le seuil initial et la fenêtre de la mappe de qualité sont les seuls paramètres ajustables dans l'algorithme.
- 5- Le processus se termine quand toutes les composantes de masque soient balancées et aucun résidu ne se trouve hors le masque.

Pour le test les mêmes interférogrammes utilisés dans l'algorithme de *Goldsetin* ont été pris, il s'agit d'un interférogramme simulé aux franges fermées (figure III.15.a), un autre aux franges ouvertes (figure III.16.a) et une partie d'interférogramme réel ERS-1 (figure III.17.a). Les figures

III.15-17.b présentent respectivement les images de phase déroulée par la méthode de *Flynn* pour chaque interférogramme. Tandis que les figures III.15-17.c montrent les mappes de qualité correspondantes, la fonction de qualité que nous avons utilisé pour ce test est la variance dérivative de la phase (PDV)

Nous remarquons que l'algorithme de *Flynn* a pu dérouler les zones qui auraient été isolées par l'algorithme de *Goldsetin*.

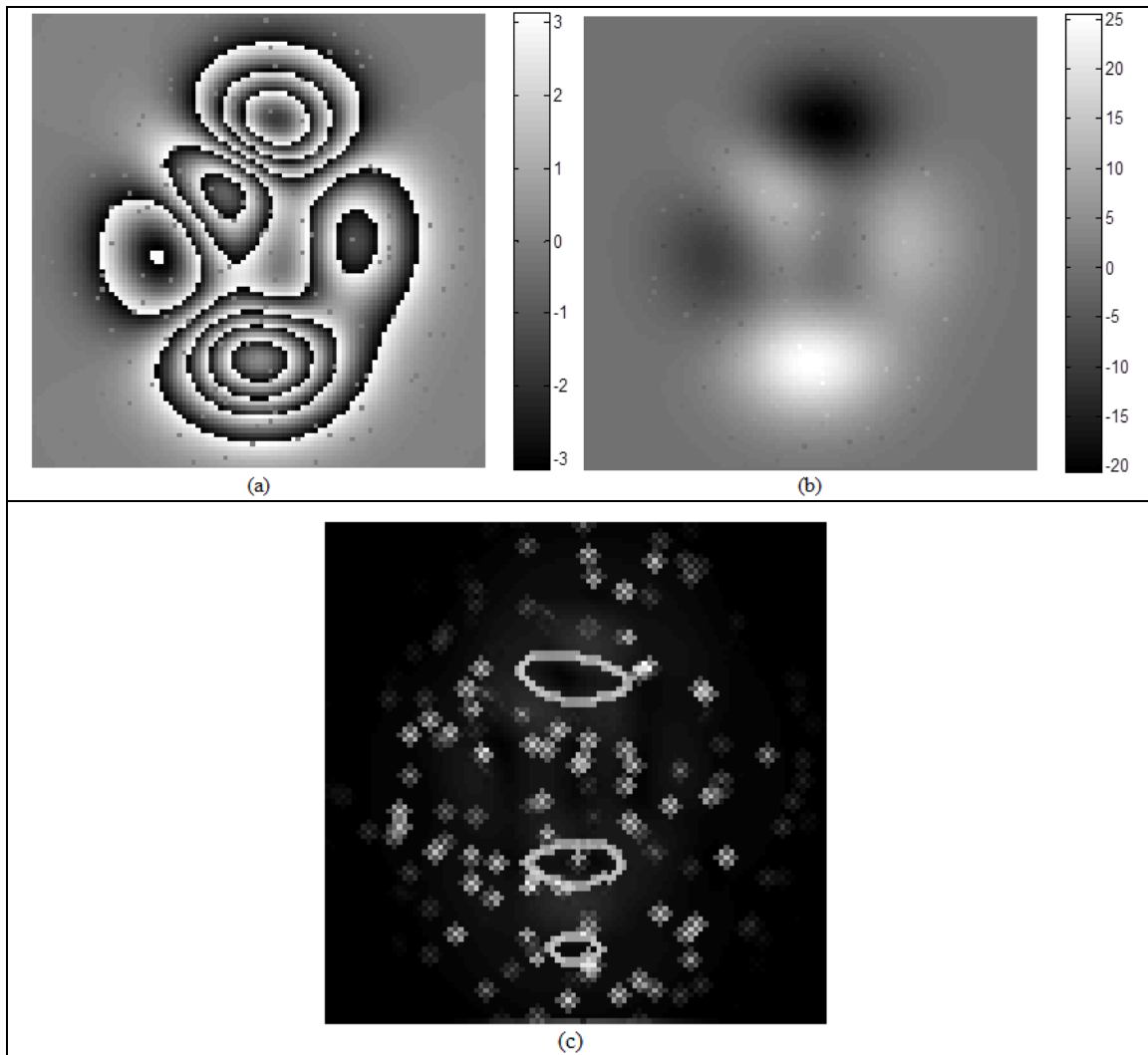


Figure III.15 : Test d'algorithme de déroulement de Flynn pour un interférogramme pics à franges fermées. (a) l'interférogramme, (b) l'image de phase déroulée, (c) la mappe de qualité PDV

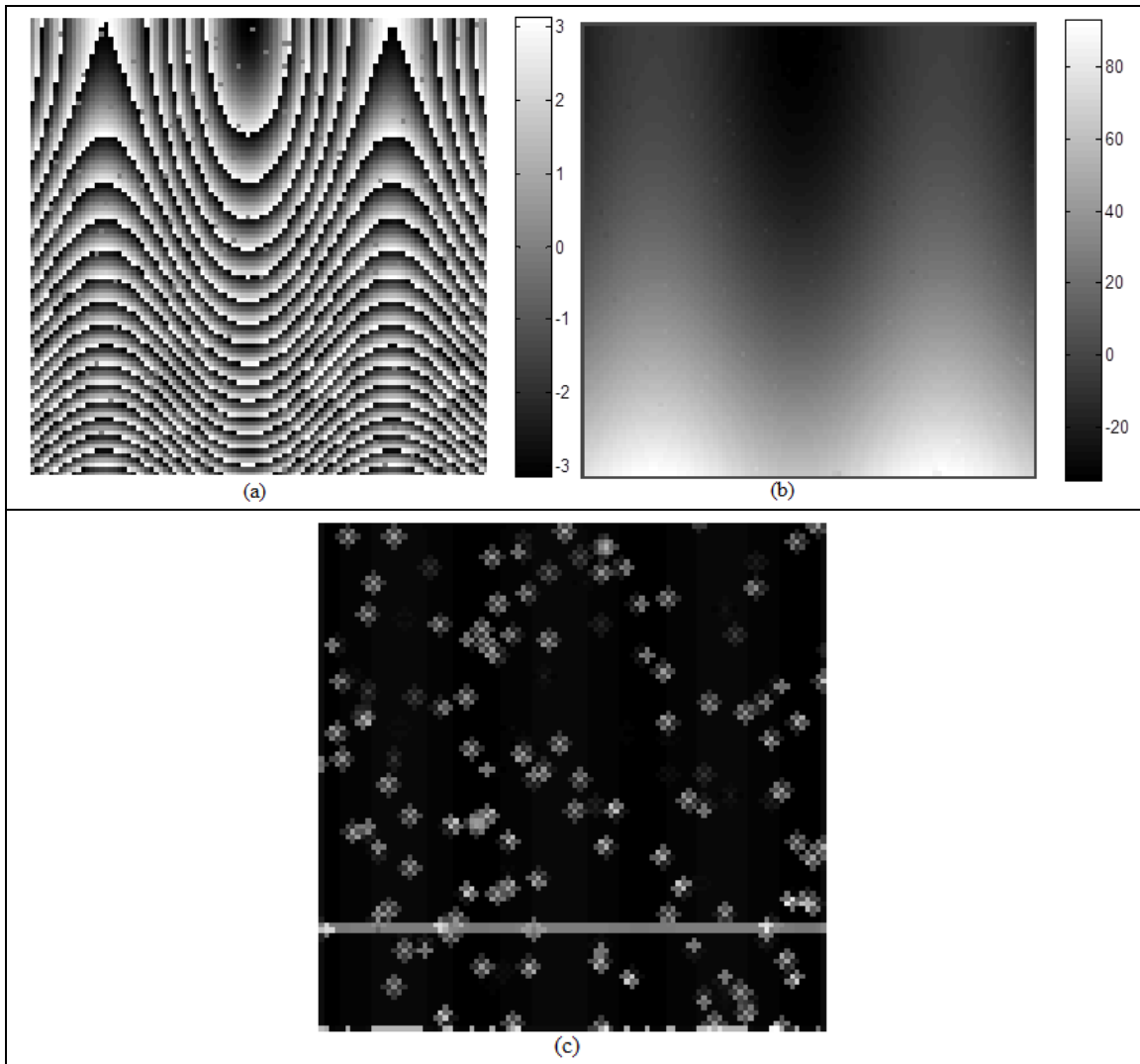


Figure III.16 : Test d'algorithme de déroulement de Flynn pour un interférogramme ondes à franges ouvertes.(a) l'interférogramme, (b) l'image de phase déroulée, (c) la mappe de qualité PDV

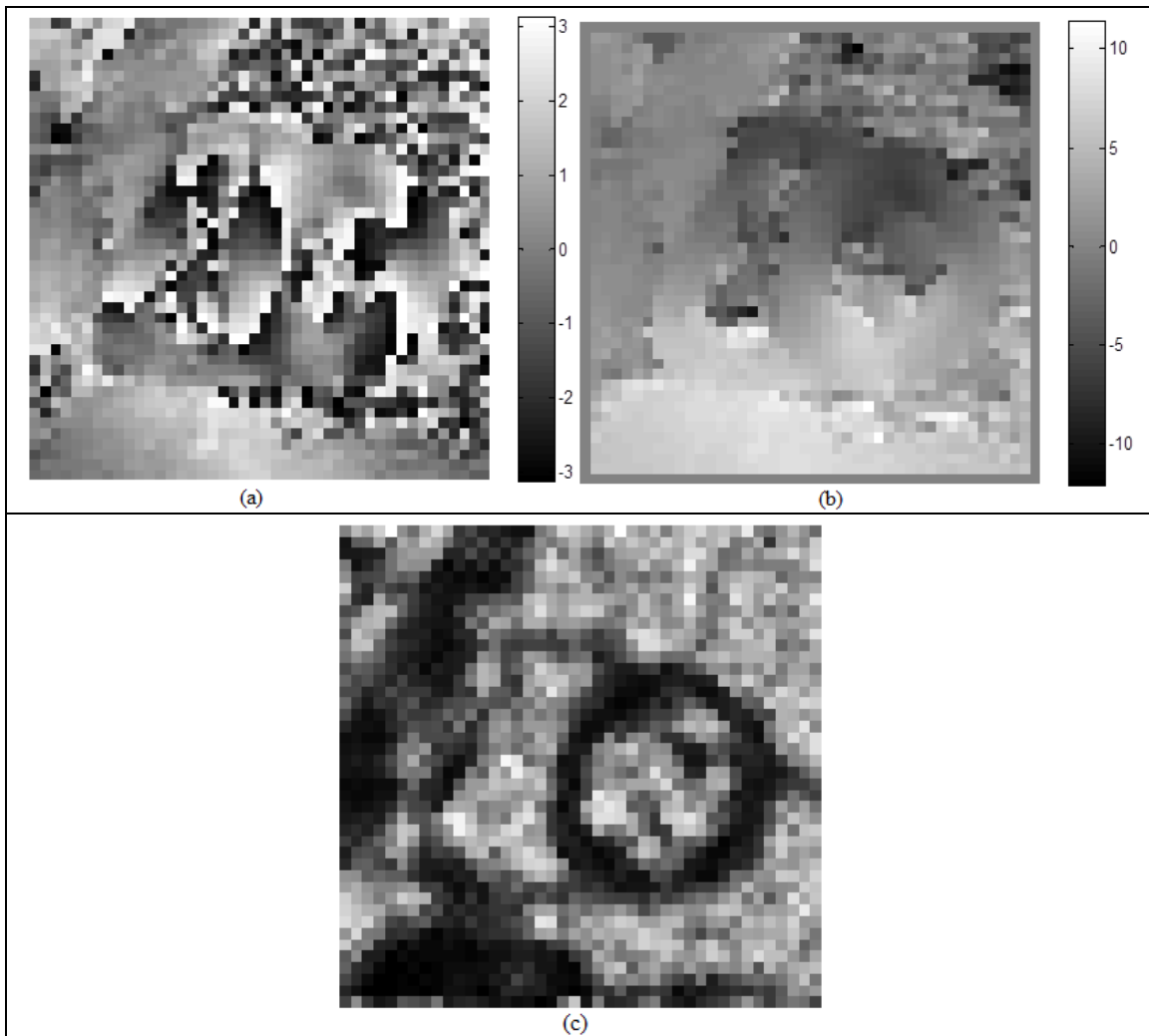


Figure III.17 : Test d'algorithme de déroulement de Flynn pour une partie d'un interférogramme réel d'ERS-1. (a) l'interférogramme, (b) l'image de phase déroulée, (c) la mappe de qualité PDV

### III.4.2.2 La méthode de Wei Xu (prédiction de la direction de déroulement)

Wei Xu et al [66] ont proposé une autre méthode de déroulement basée également sur le processus (*RegionGrowing*), la différence entre cette méthode et celle de *Flynn* est :

- La croissance de la région se fait pour déterminer la zone à dérouler dont les pixels sont de bonne qualité (le contraire pour la méthode de *Flynn*).
- L'information de phase des pixels voisins est utilisée pour prédire la direction pertinente de déroulement de chaque pixels dans la zone saine (dans l'algorithme de *Flynn* aucune considération de l'information de phase ni dans la croissance de masque; à part la variance ou pseudo-corrélation si la cohérence n'est pas disponible, ni dans le déroulement).

L'algorithme se déroule comme suit :

- 1- La graine de départ est choisie dans l'une des régions lisses (non accidentées et non rugueuses), cela permet de faire une croissance le long des parcours contrôlée durant la procédure de déroulement.
- 2- Chaque pixel est déroulé en basant sur des prédictions déduites à partir de ses voisins déjà déroulés.
- 3- Les phases de plusieurs directions sont utilisées pour dérouler chaque pixel, cela limite l'effet de propagation d'erreur.
- 4- La vérification de fiabilité basée sur la consistance des prédictions de phase sera appliquée pour chaque tentative de déroulement afin de valider (ou de refuser) la valeur déroulée proposée.
- 5- La tolérance de fiabilité est graduellement décrétementée dans le but de permettre aux plusieurs pixels que possible d'être déroulés.

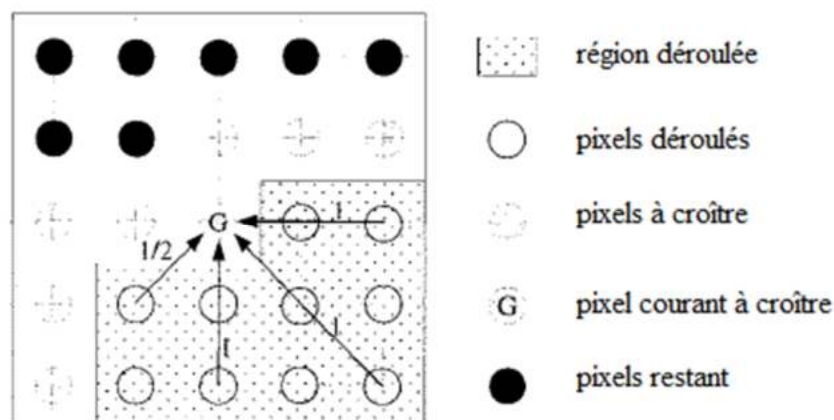


Figure III.18 : Les prédictions des directions pour le pixel à croître et ses voisins [66]

Le déroulement de pixel à croître utilise la prédiction de phase dans une fenêtre 5 x 5 centrée sur ce pixel. Considérant les 8 voisins directs de pixel courant à croître, soit N ceux déroulés parmi ces voisins, généralement N > 1 sauf pour le pixel graine. Pour avoir un déroulement plus fiable la prédiction de la phase peut être déduite à partir chacun de N voisins déroulés, ces prédictions sont calculées le long de toutes les directions possible comme il est montré dans la figure III.28, dans l'exemple de la figure ci-dessus nous avons 4 directions. La prédiction notée  $\phi_k^p$  est formée de  $k^{ième}$  voisin déroulé, elle est soit linéaire soit prédiction constante selon le nombre des pixels déjà déroulés le long de la direction :

- Si deux pixels déroulés sont disponibles le long d'une direction, une linéaire forme est utilisée  $\phi_k^p = 2\phi[k] - \phi[k']$  avec  $k'$  présente le prochain pixel déroulé dans la même direction
- Si non la prédiction est tout simplement la valeur de phase de  $k$ ,  $\phi_k^p = \phi[k]$

Puis la prédiction composite  $\phi^p$  se calcule par la moyenne pondérée de N prédictions individuelle :

$$\phi^p = \frac{(\sum_{k=1}^N w_k \phi_k^p)}{(\sum_{k=1}^N w_k)} \quad (III. 18)$$

Avec  $w_k$  est un paramètre égal à 1 pour le premier cas car il est plus fiable, et égale à 0.5 pour le second tel qu'il est aussi montré dans la figure III.18. Cette prédiction de la phase est ensuite utilisée pour tentative de dérouler correctement le pixel à croître, la valeur proposée  $\phi_u = \phi_w + 2\pi m$  avec  $\phi_w$  est la phase roulée de pixel à croître et  $m$  est le nombre d'ambiguïté calculé tel que :

$$m = nint\left(\frac{\phi^p - \phi_w}{2\pi}\right) \quad (III. 19)$$

Où  $nint(x)$  est l'entier le plus proche (*nearest-integer*), exemple  $nint(5.1)=5$ ,  $nint(-4.8)=-5$

A propos de la fiabilité de déroulement, plusieurs paramètres statistiques peuvent être utilisés tels que : la moyenne des déviations, la différence entre la phase déroulé du pixel et sa prédiction composite, la cohérence ou la variance. Cette mesure de fiabilité permet de valider ou de refuser la tentative de déroulement par la prédiction des différentes directions.

- Utilisant la moyenne des déviations :

$$F_p = \frac{(\sum_{k=1}^N w_k |\phi_k^p - \phi^p|)}{(\sum_{k=1}^N w_k)} \quad (III. 20)$$

Le test de fiabilité est valide si :  $F_p < un\ Seuil$

Le seuil peut se décrémente avec un pas varie de  $\pi/4$  jusqu'à  $2\pi$  dans des itérations successives pour que le déroulement couvre le maximum de l'inréférogramme.

- Utilisant la différence entre la phase déroulée la prédiction composite :

$$F_p = |\phi_u - \phi^p| \quad (\text{III. 21})$$

De même la validité a lieu si  $F_p < un\ Seuil$ , qui se décrémente avec un pas varie de  $\pi/4$  à  $\pi$ .

- Utilisant la cohérence : mais dans ce cas la condition à vérifier est  $F_p > un\ Seuil$  et le pas de seuil varie de 0 à 1.
- Utilisant la variance :  $F_p > un\ Seuil$  et le pas de seuil varie de 0 à 2.

Cette méthode est très fiable, elle combine entre le déroulement et une sorte d'interprétation pour les zones qui auraient pu être isolées ou distordues en appliquant les méthodes précédentes (*Goldstein et Flynn*), mais très longue à exécuter.

### III.4.2.3 La méthode de quantification de la qualité

Dans la littérature [63] une méthode de déroulement hybride a été proposée, il s'agit d'une approche basée sur le même processus de croissance de la région avec des niveaux de qualité préalablement déterminés dont chaque région sera déroulée indépendamment, puis une opération de lissage entre les différentes régions sera appliquée en minimisant la moyenne carrée des phases par la méthode des éléments finies. Dans cette méthode la qualité de pixel non seulement utilisée pour le *Region-Growing* mais aussi de quantifier et diviser l'interférogramme en plusieurs régions qualifiée par un niveau de qualité.

Les étapes à suivre :

- 1- Générer la mappe de qualité. Exemple la cohérence  $\rho$
- 2- Quantification et division de l'interfrégramme :

Tout d'abord nous définissons N-1 seuils dans un ordre décroissant  $S_1 > S_2 > \dots > S_{N-1}$

Nous divisons l'interférogramme en régions selon N niveaux de qualité

$$Q(m, n) \begin{cases} 1 & |\rho| > S_1 \\ \dots \\ k & S_{k-1} \geq |\rho| > S_k \\ \dots \\ N & S_{N-1} \geq |\rho| \end{cases} \quad (\text{III. 22})$$

- 3- Dans chaque région de niveau 1 un pixel graine est sélectionné, un déroulement de phase individuelle est exécuté par le processus RG précédent (conventionnel de *Flynn* ou celui de *Wei*), puis la plus large région sera définie comme région principale M1.

4- Pour  $i=2$  à  $N-1$

- Appliquer le RG dans la région niveau  $i$  adjacente à la principale  $M_{i-1}$ .
- Renommer les régions de niveau  $i$  par  $i+1$ .
- Ajuster les valeurs des pixels dans quelques régions de niveau 1 rencontrées par la région principale afin de les insérer dans cette dernière et former une région principale  $M_i$ .

Fin

5- Lisser les valeurs dans les régions de niveau  $N$  par la méthode des éléments finis qui consiste à minimiser :  $\min L(\phi) = \min \|\Delta\phi\|^2$  où  $\Delta\phi$  représente le gradient de la phase déroulée. Ajuster les valeurs des pixels dans les régions niveau 1 laissées pour les connecter à la région principale  $M_N$ .

Cette méthode est performante mais elle présente trop d'ajustements ce qui est pénible en terme du temps de traitement.

### III.4.3 Les méthodes de norme de minimisation

Dans la partie précédente nous avons présenté un état de l'art sur les méthodes de déroulement de la catégorie : suivi de parcours (*path-following*) les plus connues et utilisées comme références. Maintenant nous allons entamer la seconde catégorie : normes de minimisation (*Minimum-Norm*). Il s'agit d'autres approches qui reposent sur un concept complètement différent basées sur des minimisations des fonctions. Alors que les méthodes PF possèdent une vision locale, celle de MN possède une vision globale de déroulement en traitant le problème avec des procédures d'optimisation qui impliquent tout l'interférogramme à la fois.

#### III.4.3.1 les normes $L^p$

Les méthodes MN essaient de trouver la solution de l'image de phase absolue (déroulée)  $\psi$  pour laquelle la norme  $L^p$  de la différence (horizontale et verticale) entre la dérivée de la phase déroulée et la dérivée de la phase roulée est minimisée, car comme nous avons précédemment expliqué le gradient de phase roulée et déroulée devrait être inchangé pour le cas sans erreur.

Ce type des méthodes cherchent des images de phase déroulée dont la dérivée locale correspond à la dérivée de la phase roulée. Cette minimisation a pour le but de trouver la solution  $\hat{f}$  qui peut être exprimé en générale par :

$$\hat{f} = \operatorname{argmin} E(f) \quad (\text{III.23})$$

*Argmin* veut dire argument de minimisation,  $E(f)$  est la norme  $L^p$  utilisée pour la minimisation qui est :

$$E(f) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N-1} |\Delta^h \phi_{i,j} - \Delta^h \Psi_{i,j}|^p + \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^N |\Delta^v \phi_{i,j} - \Delta^v \Psi_{i,j}|^p, \quad p \geq 0 \quad (\text{III.24})$$

Avec :

$$\begin{aligned} \Delta^h \phi_{i,j} &= \phi_{i,j+1} - \phi_{i,j}, \Delta^v \phi_{i,j} = \phi_{i+1,j} - \phi_{i,j} \\ \Delta^h \Psi_{i,j} &= w(\Psi_{i,j+1} - \Psi_{i,j}), \Delta^v \Psi_{i,j} = w(\Psi_{i+1,j} - \Psi_{i,j}) \end{aligned}$$

Donc la solution  $\hat{f}$  conduit à une fonction  $f$  qui est la phase déroulée possible ( $\psi$ ), en plus la différence entre les termes  $\phi$  et  $\psi$  est l'entier  $k$ , alors autre manière est aussi possible en appliquant les différences sans rouler la phase  $\psi$ .

Nous pouvons aussi pondérer cette approche, si nous disposons une mappe de qualité  $Q$  en dérivant également cette mappe horizontalement et verticalement  $Q^h$  et  $Q^v$  [67].

Alors l'équation III.24 peut s'écrire :

$$E(f) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N-1} q_{i,j}^h |\Delta^h \phi_{i,j} - \Delta^h \Psi_{i,j}|^p + \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^N q_{i,j}^v |\Delta^v \phi_{i,j} - \Delta^v \Psi_{i,j}|^p, \quad p \geq 0 \quad (\text{III.25})$$

La mappe de qualité peut être divisée par un seuil et par conséquent elle devient binaire, donc dans les régions bruitées avec les résidus le paramètre  $q_{i,j}$  vaut 0. Et les bonnes régions se pondèrent par 1. Ces expressions (III.24 et 25) montrent l'aspect global de cette approche le fait que toutes les phases observées sont utilisées pour calculer la solution. Les différentes valeurs de  $p$  conduisent aux différentes variantes de cette approche. Généralement les valeurs  $p \leq 2$  sont utilisées et souvent citées dans les littératures.

### III.4.3.2 la norme $L^2$

Avec  $p=2$  nous avons le problème de moindre carré, dans ce cas nous remarquons que la minimisation, même pour le carré, est une minimisation discrète qui très demandée par les propositions récentes pourtant la majorité des algorithmes sont des solutions approximatives, l'un des inconvénients de la norme  $L^2$  est qu'elle essaie de lisser les discontinuités à moins qu'elle est employées avec pondération binaire.

*Fried* et *Hudgin* étaient les premiers à proposer le déroulement (avec pré-filtrage) en utilisant l'approximation moindre carrée [68,69]. Puis plusieurs algorithmes ont été publiés, parmi eux ceux qui relaxent la procédure de calcul de  $Z$  à  $R$  vue que la nature discrète du problème est plus complexe. Dans le domaine continu le problème est équivalent à résoudre équation différentielle

partielle de Poisson [13]. Et cela peut être résolu en utilisant FFT ou DCT [70,71], puis revenir au domaine discret [15, 60, 61]. Une solution exacte pour la méthode de moindre carrée a été développée dans la littérature [72] en utilisant techniques de programmation réseau, et dans [73] en utilisant le max flux –min discontinuité.

#### III.4.3.3 La norme $L^1$

La norme  $L^1$  est mieux que  $L^2$  en termes de préservation des franges car  $L^2$  lisse les discontinuités. Cette méthode a été proposée par Flynn [67], Costantini [74,75] en utilisant la technique de programmation réseau et [60] en utilisant max-flux dans la norme  $L^2$  et PDV comme une mappe de qualité.

#### III.4.3.4 les normes de petite valeur de $p$

Avec  $0 \leq p < 1$  l'abilité de préserver les discontinuités est mieux améliorée, mais une complexité à n'est pas écarté pour ce genre de norme. En particulier  $L^0$  qui est très complexe mais en contre partie très désirable en pratique [76].

### III.5 Conclusion

Dans ce chapitre une présentation de problème de déroulement de phase, formulations pertinentes, un état de l'art sur quelques méthodes référentielles, analyse et comparaison ont été élaborés. Ce qui a permis de faire une analyse suffisante pour comprendre les mécanismes de chaque approche avec les avantages et les inconvénients.

D'après cette étude menée nous pouvons constater que les approches PF fournissent des bonnes qualités d'image de phase par rapport aux approches MN par ce que le déroulement par MN n'est qu'une estimation globale. En revanche les approches PF sont lentes et prennent plus de temps.

En comparant les méthodes BC (avec ses variantes) et QG nous pouvons constater que les méthodes BC sont plus rapide relativement aux QG mais leur inconvénient major est les régions isolées de grappe laissées sans déroulement ce qui n'est pas le cas pour les méthodes QG où toutes les régions sont déroulées en fonctions de la qualité locale. Néanmoins une hybridation entre les différentes méthodes est toujours possible afin de combiner les avantages et en sortir avec un compromis.

# Chapitre IV

## L'approche de filtrage et de déroulement de phase pour l'interférogramme SAR

### IV.1 introduction

D'après les études menées dans les chapitres précédents notamment le filtrage spatial et le déroulement de suivi de parcours, ainsi la grande utilité de la mappe de qualité, certaines améliorations et hybridations peuvent être introduites afin d'avoir une approche plus efficace vis-à-vis les bruits et la propagation d'erreur concernant à la fois le filtrage et le déroulement.

Dans ce chapitre une approche de l'élimination de l'effet des résidus sera présentée. Elle consiste à proposer un filtrage basé sur deux fonctions statistiques, la première est la variance de la phase dérivative (PDV) servant à sélectionner le centre de filtre et la seconde est la déviation absolue de la phase servant à assigner une phase estimée de chaque pixel sélectionné par la fonction PDV. Ainsi une méthode de déroulement hybride sera proposée dans laquelle nous adoptons la rupture de branches (*Branch-Cut*) comme catégorie, l'appariement par distance comme procédure de connexion et la méthode d'ajustement comme procédure d'inondation (*Flood-Fill*). L'amélioration par la méthode d'ajustement peut être également combinée avec l'algorithme de Flynn dans sa procédure d'inondation.

### IV.2 Problématique

Nous avons constaté que l'étape de filtrage d'interférogramme est inévitable et elle doit précéder toute procédure de déroulement quel que soit la catégorie et l'algorithme à implémenter car la plupart des méthodes défont si le taux des résidus est important.

Toutes les méthodes étudiées dans le chapitre II sont basées sur la procédure de détection des résidus issue des équations II.2.4 dont tous les 4 pixels adjacents forment un point de singularité et jugés comme résidus mais la vraie phase bruitée n'est pas localisée par ce que le marquage du pixel haut-gauche ne veut pas dire qu'il est la source de discontinuité mais il peut être l'un des autres adjacents. Donc l'application directe de n'importe quel filtre où le centre est juxtaposé sur le pixel marqué n'est pas toujours efficace et les résidus peuvent persister. En plus l'application des techniques de vortex [44] ou dispersion [45,46] pour tous les 4 adjacents prend plus du temps et

dégrade la résolution en créant autres résidus entourant qui doivent être supprimés par la réexécution de même algorithme. Autrement dit le vrai problème n'est pas le choix de filtre mais la bonne localisation de pixels bruités où le centre de filtre s'applique.

Suites aux caractéristiques des fonctions statistiques générant les mappes de qualité ces dernières; qui sont utilisée dans le déroulement, peuvent être utiles pour la bonne sélection des pixels bruités destinés au filtrage.

### IV.3 Étude succincte sur les fonctions générant la mappe de qualité

Ce sont des fonctions bidimensionnelles permettant de générer des mappes qui classifient la qualité d'interférogramme. Leurs indications de qualité est orienté pixels c.-à-d elles jugent la qualité de chaque pixel selon ces voisins dans une fenêtre. Elles peuvent être de valeurs discrètes ou binaire si le critère de qualité est segmenté par un seuil.

#### IV.3.1 La cohérence

La cohérence est une image déduite systématiquement de technique d'imagerie inSAR (voir chapitre I), elle représente le module de signal de corrélation entre les deux signaux interférés.

#### IV.3.2 Le gradient

Le gradient est un estimateur de variation, il calcule les pentes d'un pixel dans les deux directions verticale et horizontale (ou diagonales tel que le modèle Sobel et n directions tel que le modèle Robinson). Il est utilisé pour détecter les contours et par conséquent il peut être utilisé comme une mappe de qualité dans le système inSAR car les contours dans les interférogrammes sont les franges de modulo  $2\pi$  et les zones de fortes variations et les discontinuités causant les résidus sont celles qui s'y trouvent.

Le vecteur de gradient  $\vec{\nabla}f$  se calcule :

$$\vec{\nabla}f = \begin{cases} \frac{df(x,y)}{dx} \\ \frac{df(x,y)}{dy} \end{cases} \quad (IV.1)$$

$$\text{Son module : } |\vec{\nabla}f| = \sqrt{\left(\frac{df(x,y)}{dx}\right)^2 + \left(\frac{df(x,y)}{dy}\right)^2} \quad (IV.2)$$

$$\text{Sa phase : } \theta = \arctan\left(\frac{\frac{df(x,y)}{dy}}{\frac{df(x,y)}{dx}}\right) \quad (IV.3)$$

L'image de gradient est générée en calculant le vecteur dans le domaine discret :

$$\vec{\nabla}f = \begin{cases} \Delta^x = f(i, j) - f(i - 1, j) \\ \Delta^y = f(i, j) - f(i, j - 1) \end{cases} \quad (\text{IV. 4})$$

Autre image de module de gradient peut être utilisée pour des raisons de simplifications de calcul dans la norme  $L^1$  :

$$|\vec{\nabla}f| = \left| \frac{df(x, y)}{dx} \right| + \left| \frac{df(x, y)}{dy} \right| \quad (\text{IV. 5})$$

Les figures VI.1 et 2 montrent deux interférogrammes avec leurs images de gradient correspondant, L'image de gradient peut se présenter sous forme binaire en segmentant l'intervalle par un seuil, ce qui est montré dans la figure VI.1.f et 2.f.

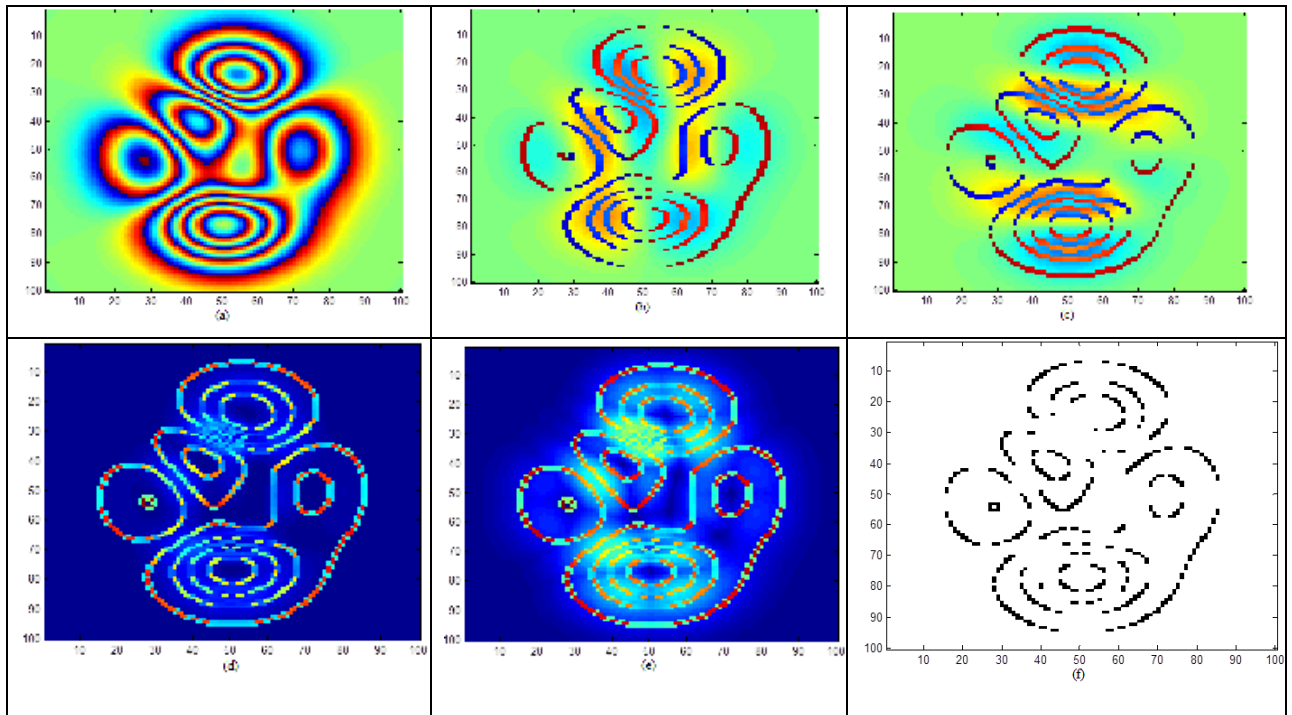


Figure IV. 1 : La mappe de qualité par gradient (image1). (a) l'interférogramme. (b)  $\Delta^x$ . (c)  $\Delta^y$ . (d)  $|\vec{\nabla}f|$ . (e)  $|\vec{\nabla}f|_{L^1}$ . (f) le gradient binaire.

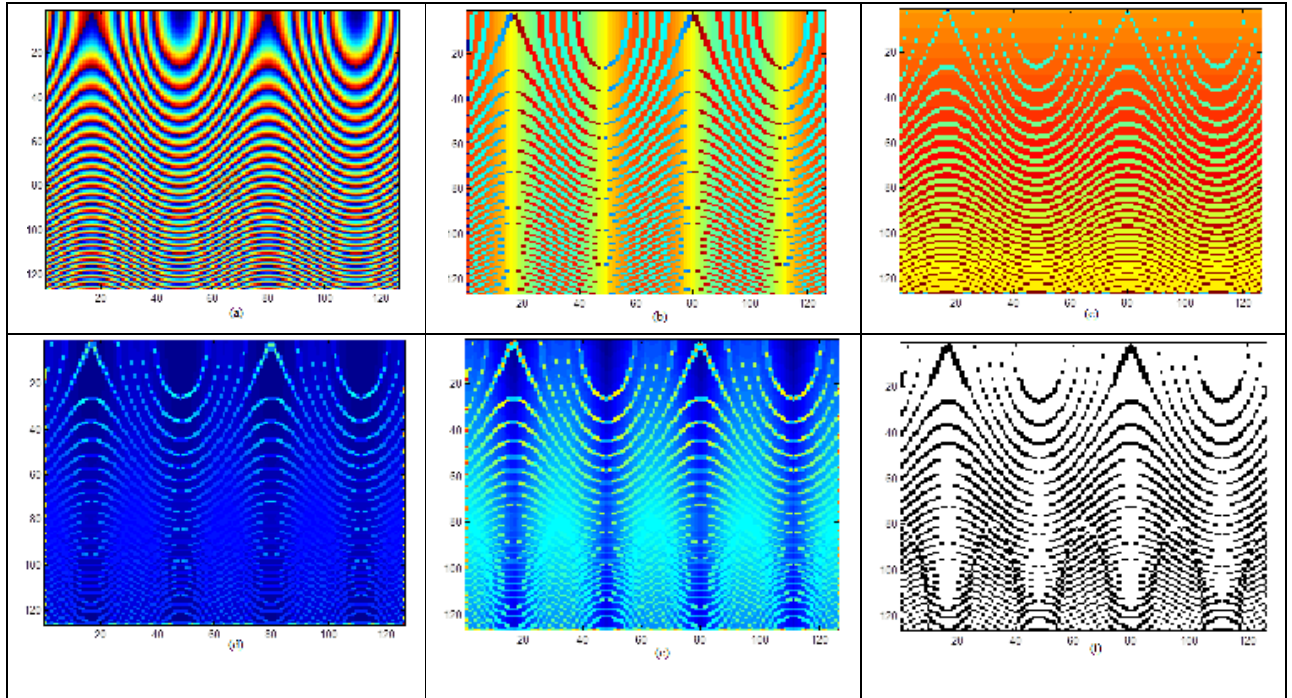


Figure IV. 2 : La mappe de qualité par gradient (image2). (a) l'interférogramme. (b)  $\Delta^x$ . (c)  $\Delta^y$ . (d)  $|\vec{\nabla}f|$ . (e)  $|\vec{\nabla}f|_{L1}$ . (f) le gradient binaire.

### IV.3.3 la variance de la phase dérivative

La PDV se calcule par :

$$PDV_{mn} = \frac{\sqrt{\sum(\Delta_{i,j}^x - \overline{\Delta_{m,n}^x})^2} + \sqrt{\sum(\Delta_{i,j}^y - \overline{\Delta_{m,n}^y})^2}}{k^2} \quad (IV. 6)$$

Où  $PDV_{mn}$  est la variance de pixel central  $(m,n)$ ,  $i$  et  $j$  sont les indices dans la fenêtre  $k \times k$ ,  $\Delta_{i,j}^x$  et  $\Delta_{i,j}^y$  sont respectivement tous les gradients verticaux et horizontaux de la phase roulée à l'intérieure de la fenêtre et  $\overline{\Delta_{m,n}^x}$ ,  $\overline{\Delta_{m,n}^y}$  sont respectivement leurs moyennes.

La figure VI.3 montre la mappe de PDV pour les fenêtres  $3 \times 3$  et  $5 \times 5$  de même interférogramme précédent avec bruits (image de pics aux franges fermées).

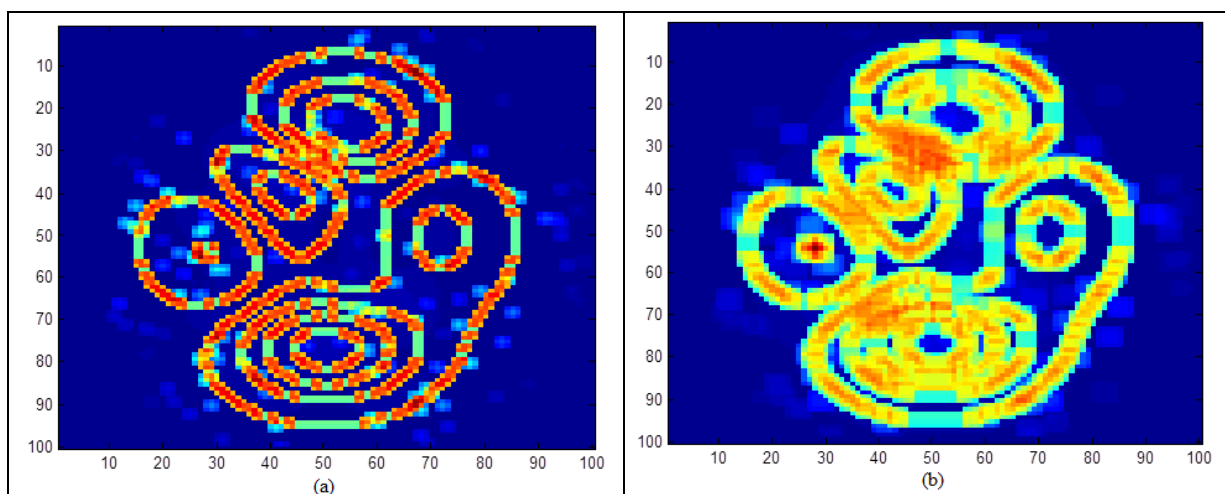


Figure IV.3 : La mappe de qualité par PDV. (a). PDV 3x3. (b) PDV 5x5.

Autre forme simplifiée et efficace est aussi possible en prenant deux gradients verticaux et deux horizontaux dans la fenêtre 3x3. Cette mappe permet de minimiser le temps de calcul et mieux éclaircir les franges. La figure VI.4 montre ce propos, (a) présente la mappe PDV 2V 2H et (b) sa classification selon deux niveaux : pixels de bonne qualité (zones foncées) et ceux de mauvaise qualité (zones claires), cette dernière a déjà été citée dans le déroulement de phase de Flynn (chapitre III).

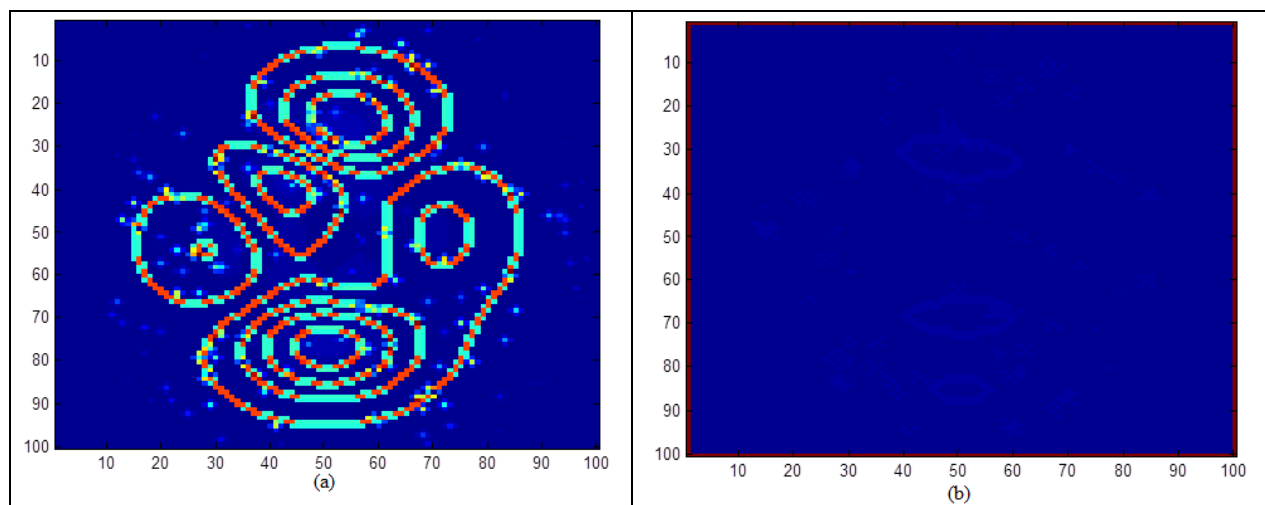


Figure IV.4 : La mappe de qualité par PDV 2V2H. (a). PDV. (b) PDV classifiée.

### IV.3.4 la pseudo-corrélation

C'est une mappe plus proche à celle de cohérence, par laquelle les contours ne sont pas bien détectées mais elle donne une classification de qualité en grandes zones et dans ce cas une interpolation en fonction d'homogénéité doit s'introduire pour la classification, elle est très simple et satisfaisante en termes de juger la qualité des pixels.

La pseudo-corrélation, notée ici PC, se calcule par :

$$PC(m, n) = \frac{\sqrt{(\sum \cos \phi(i, j))^2 + (\sum \sin \phi(i, j))^2}}{k^2} \quad (IV. 7)$$

La figure VI.5 montre la mappe de pseudo-corrélation de fenêtre 3x3 pour le même interférogramme sans et avec résidus.

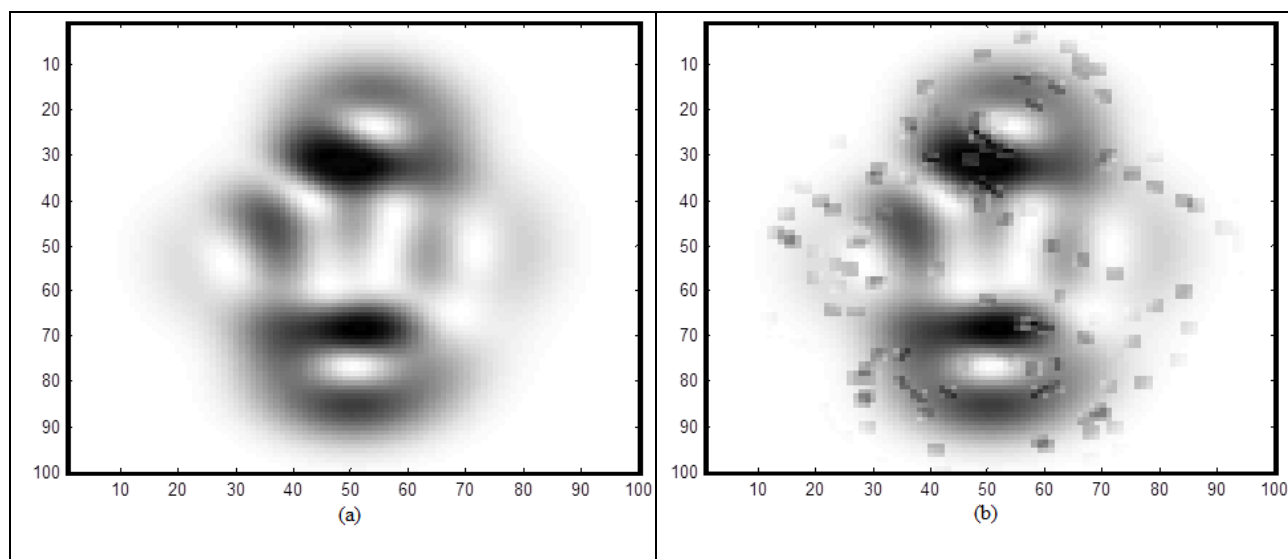


Figure IV.5 : La mappe de qualité par PC 3x3. (a). pour un interférogramme sans résidus. (b) pour un interférogramme avec résidus.

### IV.4 La méthode de filtrage et déroulement proposées

Le dé-bruitage d'interférogramme in SAR proposé dans ce travail se déroule en 3 étapes principales [77] :

- a- Générer la mappe des résidus de la même manière que toutes les méthodes précédentes sauf que le marquage ne concerne pas seulement le pixel haut-gauche mais tous les 4 adjacents suite à l'hypothèse mentionnée ci-dessus.
- b- Générer la mappe PDV dans une fenêtre 3x3 (elle peut aussi être PDV2V2H), cette fonction permet de sélectionner les pixels mauvais, autrement dit sélectionner parmi les 4 adjacents la phase jugée comme source d'erreur.

La fonction PDV est connue comme une fiable mappe de qualité en particulier quand la mappe de cohérence n'est pas disponible [60]. Cette fonction éclaircit les pixels de mauvaise qualité, donc dans chaque fenêtre 4x4 des pixels adjacents nous sélectionnons la phase bruitée  $\phi_{m,n}$  où la valeur PDV(m,n) est max.

- c- Appliquer le filtre local seulement sur les pixels sélectionnés et jugés mauvais par la fonction PDV. Le filtre local est basé sur la fonction de déviation absolue de la phase dans la fenêtre 3x3 (notée PAD) dont le centre est  $\phi_{m,n}$ :

$$PAD_{i,j} = |\phi_{i,j} - \overline{\phi_{m,n}}| \quad (VI.8)$$

Avec  $\phi_{i,j}$  sont les phases roulées dans la fenêtre et  $\overline{\phi_{m,n}}$  leur moyenne locale.

La phase estimée pour  $\hat{\phi}_{i,j}$  pour le pixel central (m, n) correspond à la minimisation de la fonction PAD ou  $f(\phi_{m,n}) = \hat{\phi}_{i,j}$  quand  $PAD_{i,j}$  est minimum.

Dans le but de combiner les avantages, le déroulement de phase dans ce chapitre consiste à une méthode hybride, dans laquelle nous adoptons la rupture de branches (*Branch-Cut*) comme catégorie (*Goldstein*), l'appariement par distance comme procédure de connexion et la méthode d'ajustement [48] comme procédure d'inondation (*Flood-Fill*). Ou la méthode de qualité guidée de Flynn comme catégorie et la méthode d'ajustement comme procédure d'inondation (*Flood-Fill*).

## IV.5 Résultats et discussions

### IV.5.1 Interférogrammes simulés

Pour la comparaison d'efficacité de filtrage nous avons choisis deux filtres spatiaux largement utilisés : Morphologique adapté et Médian modifié. Et pour le déroulement nous avons choisi la méthode de Goldstein dont l'inondation est par simple intégration. Les critères sont : la qualité d'image, la surface de la région distordue, le carré de l'erreur quadratique moyenne (Root Mean Square Error RMSE), le taux de réduction des résidus, et l'écart quadratique moyen (Mean Square Deviation MSD), les régions masquées par les branches et le temps de computation.

RMSE est l'erreur entre l'image originale et celle déroulée, donc un algorithme de minimum RMSE est meilleur:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i,j=1,1}^{MN} (\psi_{i,j} - \psi_{i,j}^0)^2}{MN}} \quad (IV.9)$$

MSD est l'un des critères fiables pour le test, il est utilisé pour comparer la déviation de la phase entre l'image déroulée et celle original afin de valider l'efficacité d'une méthode au profil d'une autre [78].

$$MSD = \sqrt{\frac{1}{M \cdot N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \left( \psi - \frac{1}{M \cdot N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (\psi - \psi_o) \right)^2} \quad (IV. 10)$$

Avec  $\psi_o$  est la phase originale et  $\psi$  est la phase déroulée. Alors l'algorithme avec minimum MSD est meilleur.

Les interférogrammes simulés choisis sont:

- Image de pics 100x100 pixels avec faible taux de franges fermées (figure VI.6.a).
- Image d'ondes 126x126 pixels avec taux élevé de franges ouvertes (figure VI.7.a).

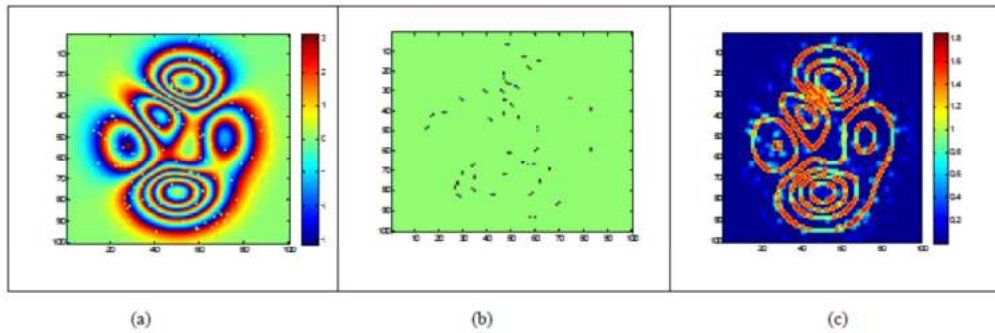


Figure IV.6 : Test avec image de pics. (a) interférogramme bruité, (b) la mappe des résidus avant le filtrage, (c) la mappe PDV.

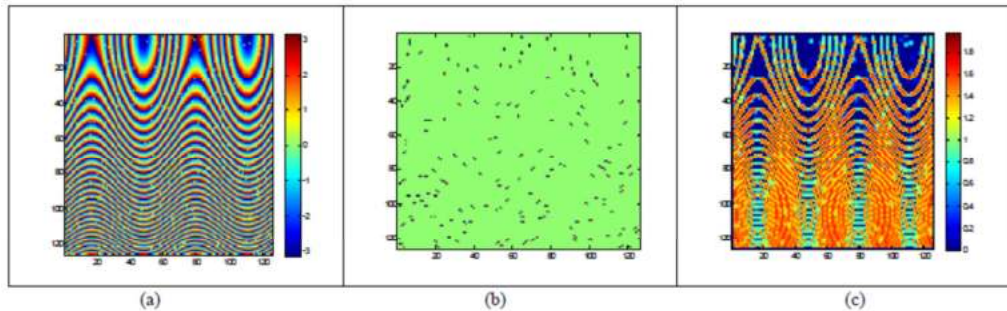


Figure IV.7 : Test avec image d'ondes. (a) interférogramme bruité, (b) la mappe des résidus avant le filtrage, (c) la mappe PDV.

Malgré que les bruits (les discontinuités) soient générés par le même processus aléatoire et avec même densité mais le nombre des résidus dans l'image de pics (figure VI.6.b) est plus petit que l'image d'ondes (figure VI.7.b) par ce que l'interférogramme de l'image de pics possède moins de franges que celui d'ondes, donc les filtres basés le lissage, moyenne, dilation ou érosion peuvent donner des résultats non satisfaisants en termes de réduction des résidus si le nombre de franges est important.

Les figures VI.6.c et VI.7.c montrent que la fonction PDV est apte à éclaircir clairement les franges dont les valeurs sont entre 1 et 1.8 (voir la barre des couleurs dans la figure), par conséquent le filtre proposé utilisant cette fonction comme un guide de qualité peut donner des bons résultats dans l'ordre d'éviter le lissage des franges avec temps minimisé relativement aux masques directionnels, il peut estimer les pixels mauvais parmi chaque 4 adjacents, puis le centre de filtre PAD minimisé est seulement ces pixels sélectionnés.

Les résultats qualitatifs sont montrés dans les figures ci-dessous.

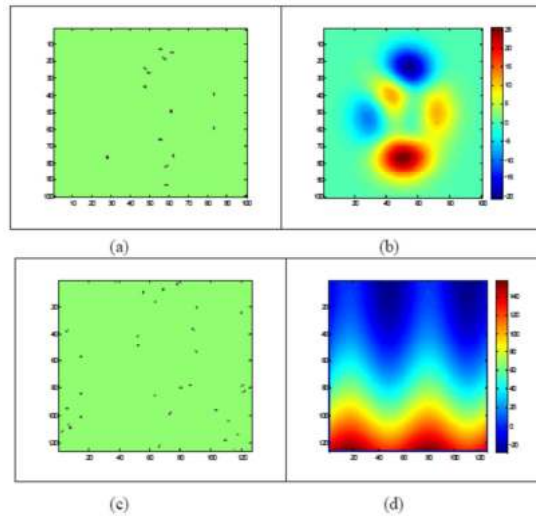


Figure IV.8 : Filtrage par PDV-PAD. (a) mappe des résidus après filtrage (pics). (b) image de phase déroulée (pics). (c) mappe des résidus après filtrage (ondes). (d) image de phase déroulée (ondes).

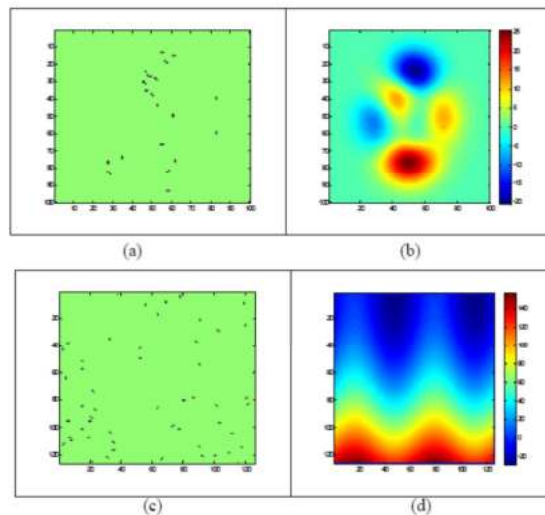


Figure VI.9 : Filtrage par le morphologique adapté. (a) mappe des résidus après filtrage (pics). (b) image de phase déroulée (pics). (c) mappe des résidus après filtrage (ondes). (d) image de phase déroulée (ondes).

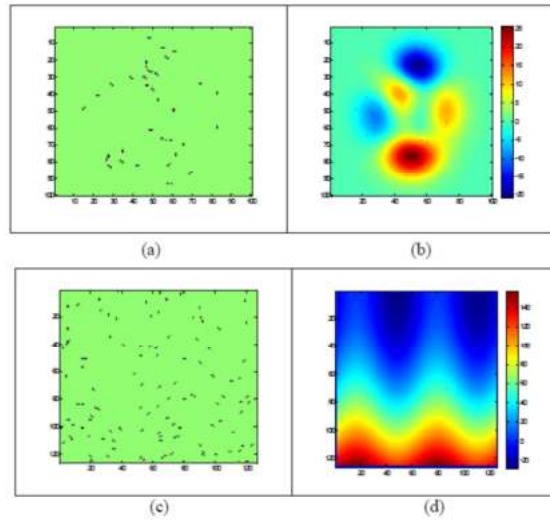


Figure IV.10 : Filtrage par le médian modifié. (a) mappe des résidus après filtrage (pics). (b) image de phase déroulée (pics). (c) mappe des résidus après filtrage (ondes). (d) image de phase déroulée (ondes).

### Performances en termes des régions distordues

La courbe IV.11 montre les performances de la méthode d'ajustement proposée et celle de simple intégration en termes de la surface de la région distordue (nombre de pixels correspondent aux discontinuités). Pour ce but nous avons omis volontairement deux résidus de signe inverse hors les branches (hors masque), ces pixels se trouvent en position diagonale au centre d'interférogramme et séparés graduellement par une distance, donc cette courbe est donc en fonction de distance séparant deux résidus non masqués, la figure IV.12 montre un exemple d'une distance diagonale de 3 pixels.

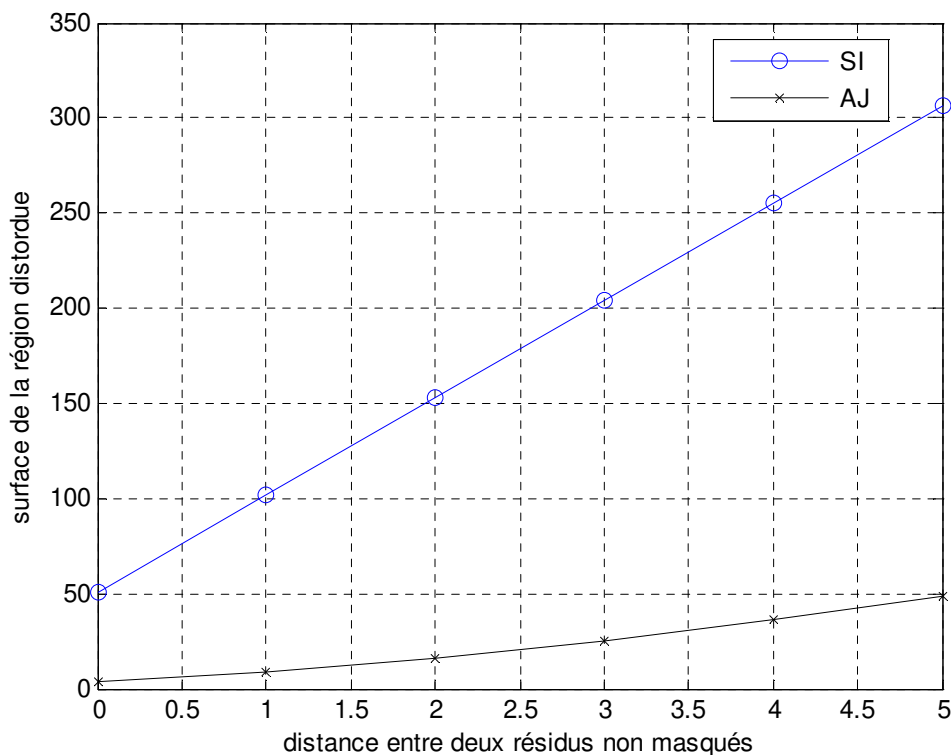


Figure IV.11 performances de déroulement proposé en termes de la surface de la région distordues. SI=simple intégration, AJ=ajustement.

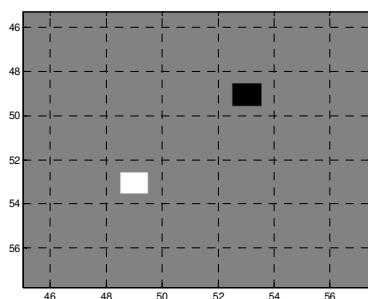


Figure IV.12 exemple d'une distance diagonale de séparation de deux résidus non masqués de signe inverse.

D'après cette courbe la surface de la région distordue après le déroulement est très petite par la méthode d'ajustement relativement à la méthode de simple intégration. Effectivement à l'égard de la moyenne de toutes les distances testées est seulement 23.1667 pour la méthode proposée contre 178.5 pour la méthode SI, soit une différence moyenne de 155.33 pixels.

### Performances en termes de RMSE

La courbe IV.13 évalue les performances en termes de RMSE (le carré de l'erreur quadratique moyenne) entre la phase déroulé par la méthode AJ /SI et l'image originale pour les mêmes distances que la courbe IV.11.

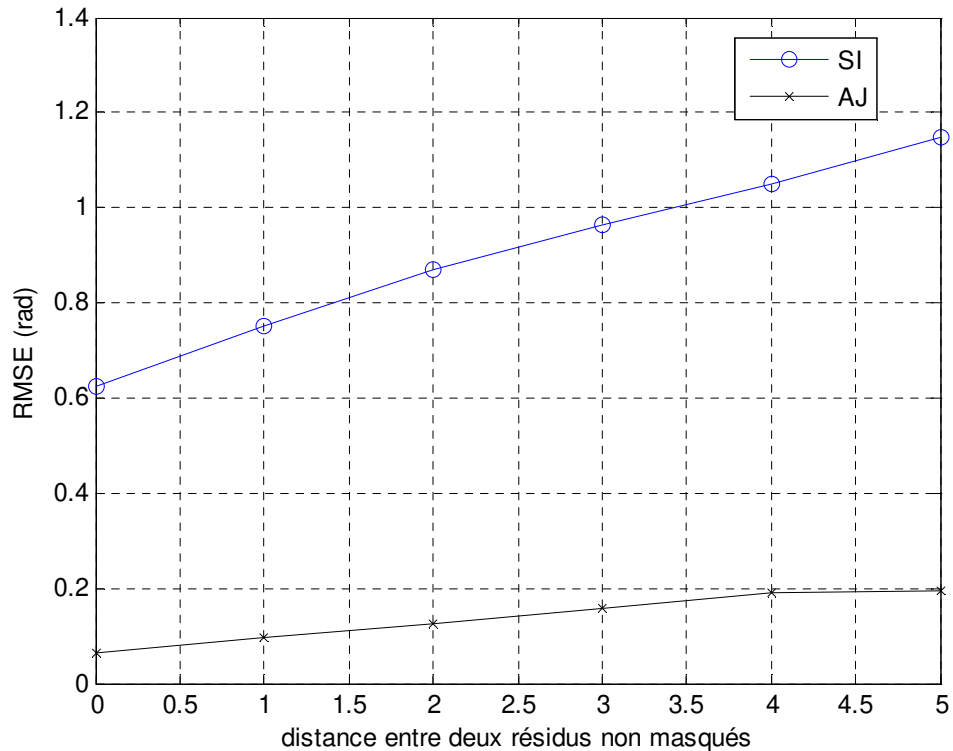


Figure IV.13 performances de déroulement proposé en termes de RMSE.

Moyenne SI = 0.9020, moyenne AJ = 0.1374, soit une différence moyenne de 0.7646 rad

De même, le déroulement proposé présente des petites valeurs de RMSE pour toutes les distances choisies. En moyenne, SI = 0.9020, AJ = 0.1374, soit une différence de 0.7646 rad. Ce qui confirme la limitation de propagation d'erreur en appliquant la méthode d'ajustement en cas des résidus mal masqués par la procédure de connexion des branches.

### Performances en termes de taux de réduction des résidus

Le tableau IV.1 ci-dessous résume les résultats selon le critère de taux de résidus pour un cas.

	Avantfiltrage	Filtre PDV-PAD	Filtre MA	Filtre MM
Image de pics	0.82%	0.28%	0.40%	0.68%
Image d'ondes	2.07%	0.37%	0.64%	1.37%

Tableau IV.1 : Taux de résidus avant et après le filtrage PDV-PAD, MA et MM

Avec le filtrage PDV-PAD nous avons obtenu des meilleurs taux de résidus pour les deux images tandis que les mauvais sont pour le filtrage médian modifié MM, car les filtres MA et MM sélectionnent les pixels haut-gauche comme un centre de masque et ces pixels subissent les opérateurs de dilatation-érosion successives dans le filtrage MA, et subissent la valeur médiane modifiée peu importe sa variation par rapport au pixel central dans le filtrage MM (voir chapitre II, filtrage spatial), alors que le vrai pixel bruyant peut être l'un des quatre voisins, autrement dit changer inutilement la valeur de phase d'un pixel sain et garder le bruyant ce qui permet aux résidus de persister ou même créer d'autres.

En outre, le filtre MA affecte directement les franges à cause des opérateurs dilatation-érosion successives comme nous l'avons précédemment expliqué, plus l'interférogramme contient beaucoup de franges plus la différence entre l'efficacité de PDV-PAD et MA est grande. En effet, pour l'image de pics avec quelques franges le filtre PDV-PAD a réduit les résidus de 0,82 à 0,28 = 0,54% et le filtre MA de 0,82 à 0,40 = 0,42% (soit une différence de 0,12%), pour l'image d'ondes avec nombreuses franges le filtre PDV-PAD a réduit les résidus de 2,07 à 0,37 = 1,7% et le filtre MA de 2,07 à 0,64 = 1,43% (soit une différence de 0,27%).

Similairement, le filtre PDV-PAD est plus efficace que filtrer MM avec l'augmentation du nombre de franges, cette différence de l'efficacité est de 0,4% pour l'image de pics et de 1% pour l'image d'ondes.

Les figures VI.14 et VI.15 montrent les réponses en taux de réduction des trois filtres en fonction de nombre des résidus avant le filtrage pour les images de pics et d'ondes respectivement. Nous rappelons que le processus de génération de bruits est aléatoire, à chaque étape une matrice de

bruits (points de discontinuités) est ajoutée et quelques-uns de ces points engendrent les résidus selon la localité sur les franges et sur les zones de fortes variations, ce qui explique la non-uniformité de pas de nombre des résidus avant le filtrage.

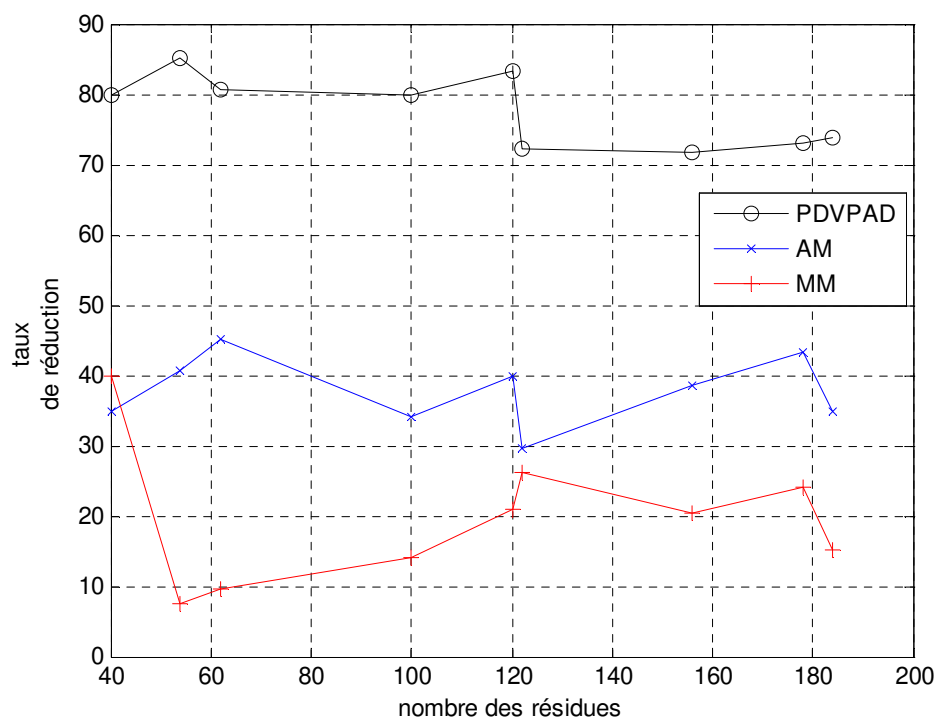


Figure IV.14 : Les réponses des filtres PADPDV, AM et MM en taux des résidus pour l'image de pics.

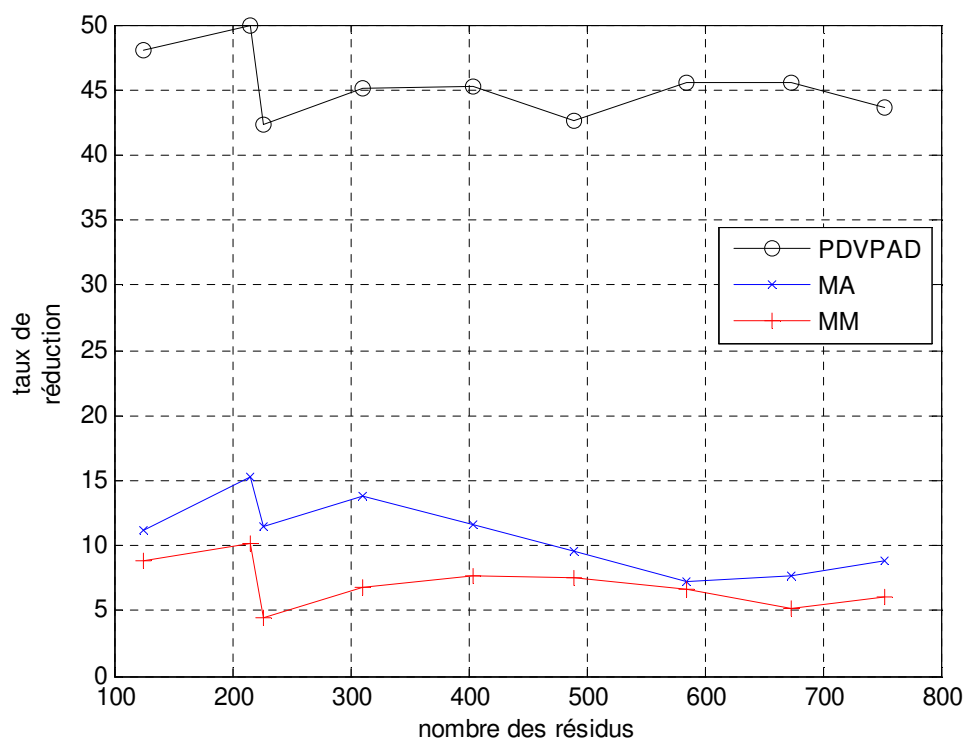


Figure IV.15 : Les réponses des filtres PADPDV, AM et MM en taux des résidus pour l'image d'ondes.

Selon ces deux séries de test sur les mêmes interférogrammes (pics et ondes) les performances de filtre PDVPAD sont largement loin que les filtres AM et MM, dont les moyennes de réductions sont respectivement : 77.77%, 37.87 % et 19.77 % pour l'image de pics. 45.34 % , 10.75 % et 7.03 % pour l'image d'ondes.

### Performances en termes de MSD

Après l'étape de filtrage nous appliquons la procédure de déroulement mentionnée ci-dessus. Les images obtenues sont présentés dans les figures VI.8.9.10 (b et d). Comme une seconde comparaison quantitative avec le critère MSD les meilleurs résultats sont également obtenus par le filtre PDV-PAD qui possède le minimum MSD, suivi de filtre MA puis MM. Le tableau VI.2 ci-dessous résume ces résultats en fonction de leurs MSDs pour un seul cas.

	Sans filtrage	PDV-PAD	MA	MM
Image de pics	6.0406	6.0358	6.0362	6.0389
Imaged'ondes	60.7034	60.6983	60.6998	60.7018

Tableau IV.2 : MSD (rad) de l'image de phase déroulée sans et avec filtrage PDV-PAD, MA et MM.

Les courbes IV.16 et 17 montrent les résultats de test généralisé pour plusieurs nombre de résidus.

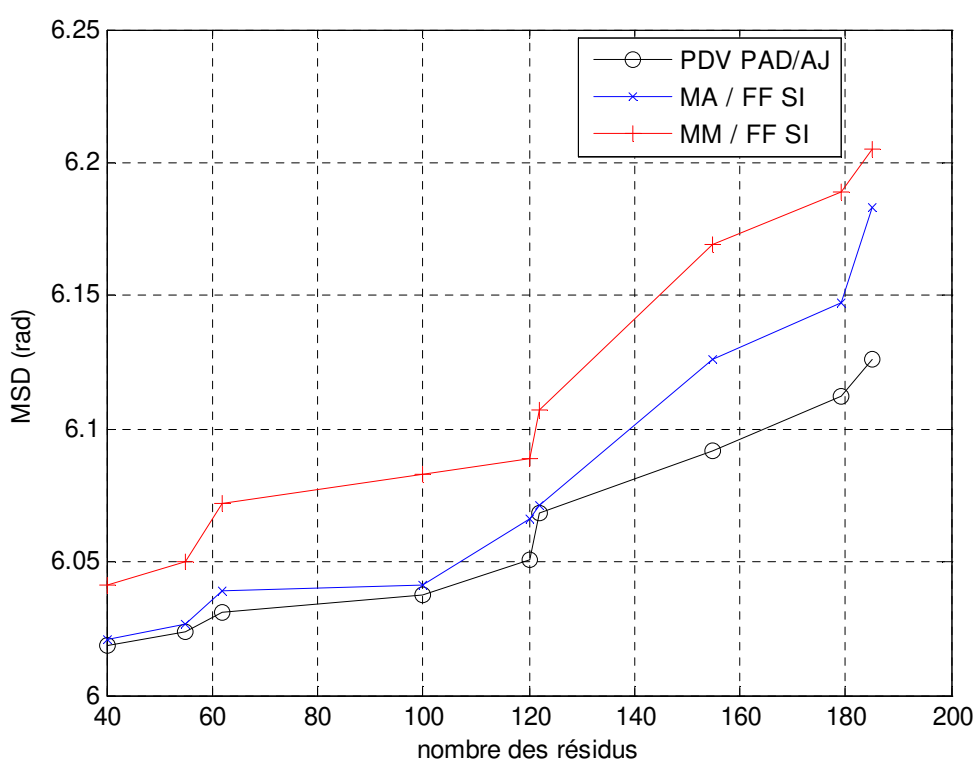


Figure IV.16 performances de la méthode proposée en termes de MSD (image de pics).

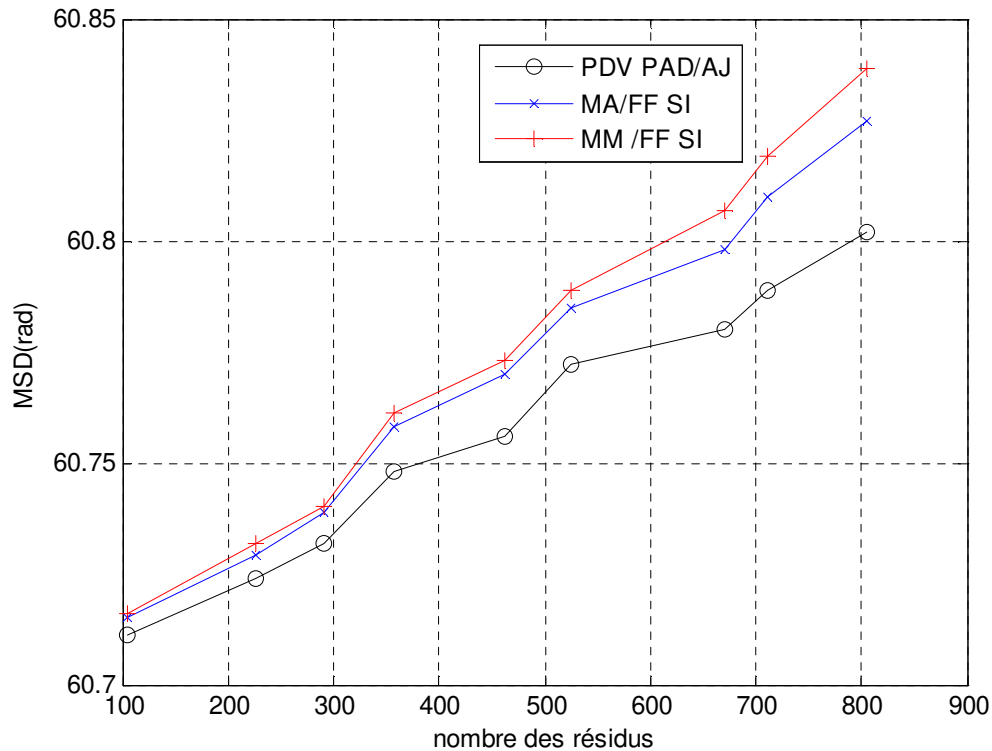


Figure IV.17 performances de la méthode proposée en termes de MSD (image d'ondes). PDV-PAD/AJ = l'approche proposée : filtrage par PDV-PAD et déroulement (inondation) par Ajustement.

MA/SI = filtrage par Morphologique adapté et déroulement (inondation) par simple intégration.

MM/SI = filtrage par Médian modifié et déroulement (inondation) par simple intégration.

Nous remarquons que l'approche proposée présente toujours un MSD minimum quels que soit le nombre de résidus et quels que soit le type et le taux de franges (ici image de pic présente un faible taux des franges fermées et celle d'onde un taux élevé des franges ouvertes).

Pour notre exemple les moyennes sont respectivement : PDV-PAD/AJ=6.0623, MA/SI=6.08, MM /SI=6.117, PDV-PAD/AJ=60.7571, MA/SI= 60.7701, MM /SI= 60.7751, pour pics et ondes.

### IV.5.2 Interférogrammes réels

Pour les interférogrammes réels nous avons choisi deux images fournies par l'ERS-1(ESA): la première (notifiée dans cette partie comme int1) s'agit d'une région de Sardaigne 512 x 512, prise le 2 Aout 1991 sur l'orbite 241 avec 126 m d'une ligne de base perpendiculaire. La seconde (notifiée dans cette partie comme int2) s'agit de Vatnajökull Islande 376 x 400, prise le 31 décembre 1995 sur l'orbite 23315.

Les figures VI.18-19.a montrent les deux interférogrammes int1 et int2 sans filtrage, et les figures VI.18-19.b montrent leurs maps des résidus correspondantes.

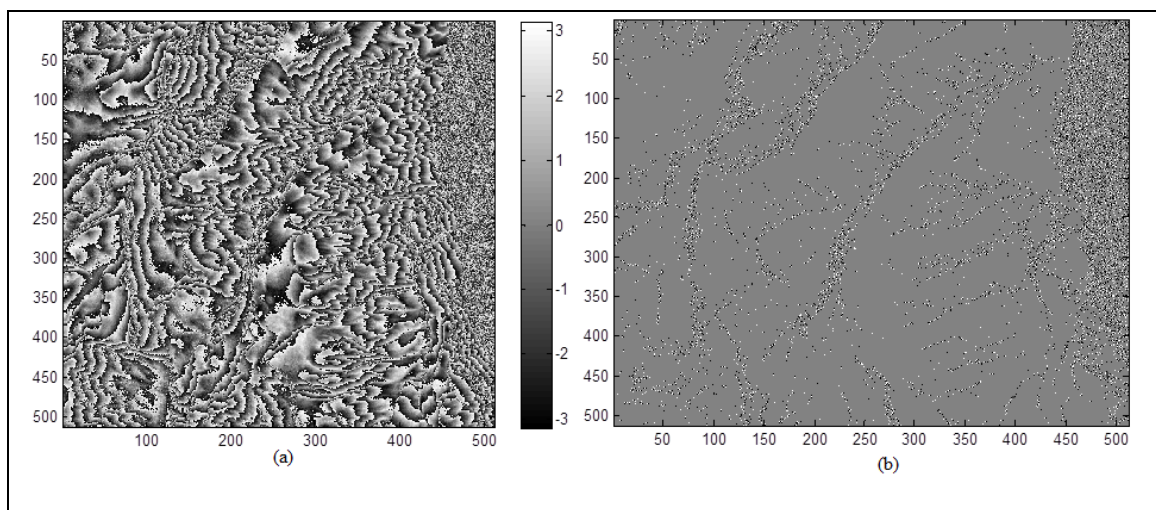


Figure IV.18 : (a) Un interférogramme réel 1 sans filtrage. (b) la mappe des résidus.

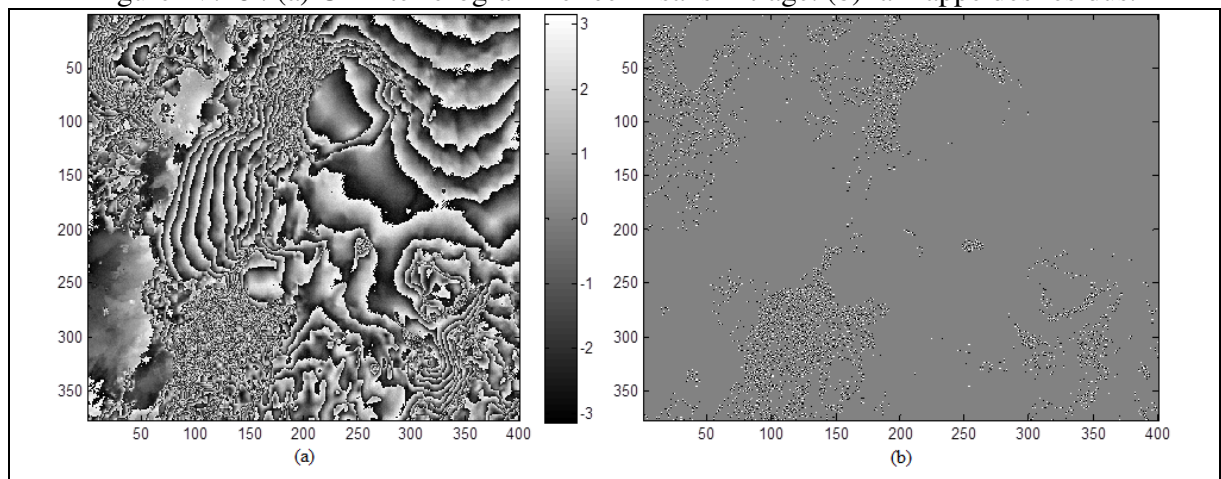


Figure IV.19. (a) : Un interférogramme réel 2 sans filtrage. (b) la mappe des résidus.

Les figures IV.20-21.a.b.c montrent respectivement les mappes des résidus après les filtrages PDV-PAD, MA et MM pour les deux images int1 et int2.

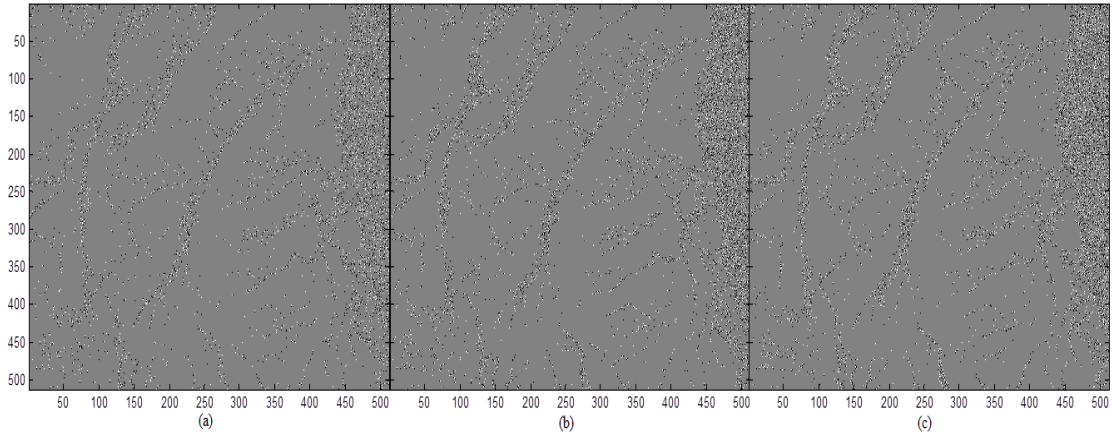


Figure IV.20 : Résultats de filtrage d'interférogramme 1. (a) PDV-PAD, (b) MA ,(c) MM.

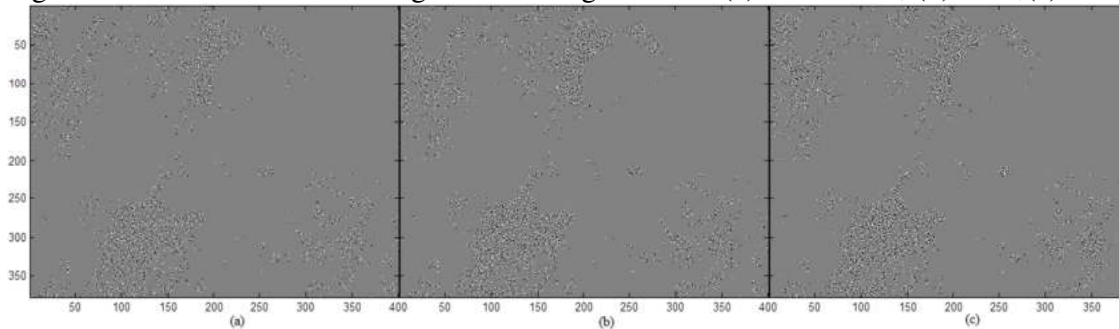


Figure IV.21 : Résultats de filtrage d'interférogramme 2. (a) PDV-PAD, (b) MA ,(c) MM

Il est clair que la densité des résidus après le filtrage PDV-PAD est minimisée comparativement aux filtres MA et MM. Afin d'illustrer plus visiblement l'ampleur de la réduction des résidus après le filtrage proposé un agrandissement d'une partie des mappes de résidus parmi les plus bruitées (lignes 450-470, colonnes 480-500) est présentée dans la figure VI.22 ci-dessous.

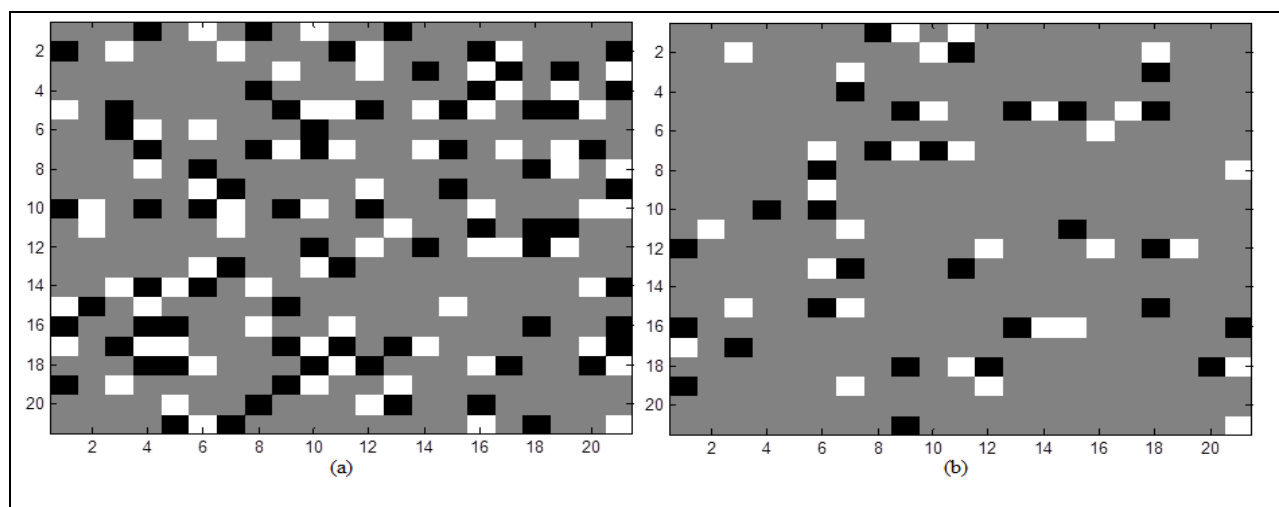


Figure IV.22 : Réduction des résidus résultant sur une partie d'int1. (a) avant filtrage. (b) après filtrage.

Le tableau VI.3 résume quantitativement les résultats de filtrage en termes de taux de réduction.

		Avant filtrage	PDV-PAD	MA	MM
Int1	Nombre des résidus	17894	10699	13202	14048
	Taux de réduction	0%	40.21%	26.22%	21.49%
Int2	Nombre des résidus	6304	4202	5295	5303
	Taux de réduction	0%	33.34%	16.01%	15.88%

Tableau IV.3 : résultats de filtrage PDV-PAD, MA, MM en termes de taux de réduction pour les interférogrammes réels.

Dans le but d'affirmer l'utilité de filtrage en général et l'efficacité de PDV-PAD en particulier vis-à-vis le déroulement de phase nous appliquons; après les 3 filtrages; le déroulement de Goldstein avec la méthode d'ajustement comme une procédure rapide d'inondation (*Flood fill*), et nous les comparons avec le déroulement sans filtrage.

Les tableaux IV.4 et 5 résument ces résultats en termes de temps d'exécution en appliquant l'algorithme de *Goldstein* pour les deux interférogrammes.

	Sans filtrage	PDV-PAD	MA	MM
Temps de filtrage (s)	-	4.256	1.440	1.775
Temps de connexion des branches (s)	46	30	36	38
Temps d'inondation (s)	72.8	77.395	57.037	75.967
Temps total (s)	-	111.651	112.477	115.742

Tableau IV.4 : Temps d'exécution de filtrage et de déroulement de Goldstein pour l'int1.

	Sans filtrage	PDV-PAD	MA	MM
Temps de filtrage (s)	-	1.081	0.526	0.658
Temps de connexion des branches (s)	12	9	11	12
Temps d'inondation (s)	44.139	45.123	44.543	44.815
Temps total (s)	-	55.204	56.069	57.473

Tableau IV.5 : Temps d'exécution de filtrage et de déroulement de Goldstein pour l'int2.

Nous remarquons que le temps d'exécution consacré au filtrage PDV-PAD est plus grand au profil des filtres MA et MM suite aux calculs de la mappe de qualité de la variance. Mais cette lacune est compensée par la minimisation considérable du temps de déroulement de phase peu importe l'algorithme à exécuter.

Le temps de déroulement de Flynn est plus grand que celui de Goldstein; qui est autour 2374 seconde pour le premier int1 et 781 pour int2; car la méthode de Flynn exploite la mappe de qualité, et le calcul de cette mappe prend plus du temps. Mais la qualité de la phase déroulée est hautement améliorée et ne contient aucune région isolée laissée sans déroulement ce qui n'est pas le cas pour l'algorithme de Goldstein (voir les figures IV.23 -26).

Pour des raisons de multitude des figures qui seraient illustrées nous allons montrer dans les figures ci-dessous les images de déroulement par les deux méthodes (Goldstein et Flynn combinées avec la méthode d'ajustement) mais seulement pour le filtre PDV-PAD.

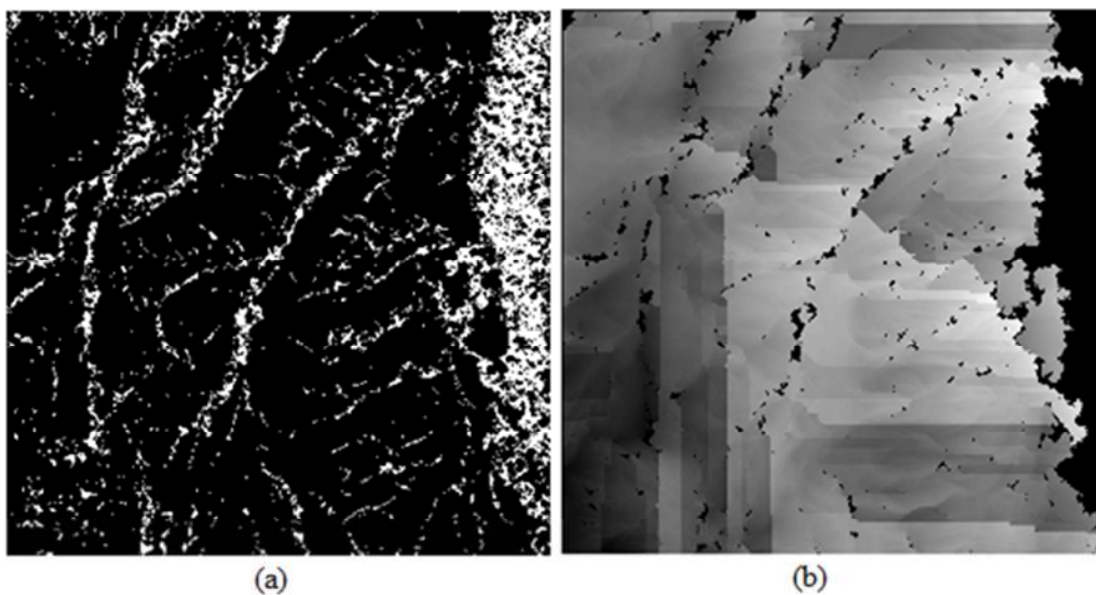


Figure IV.23 : Déroulement de « int1 » par l'algorithme de Goldstein, (a) la mappe de branches, (b) la phase déroulée.

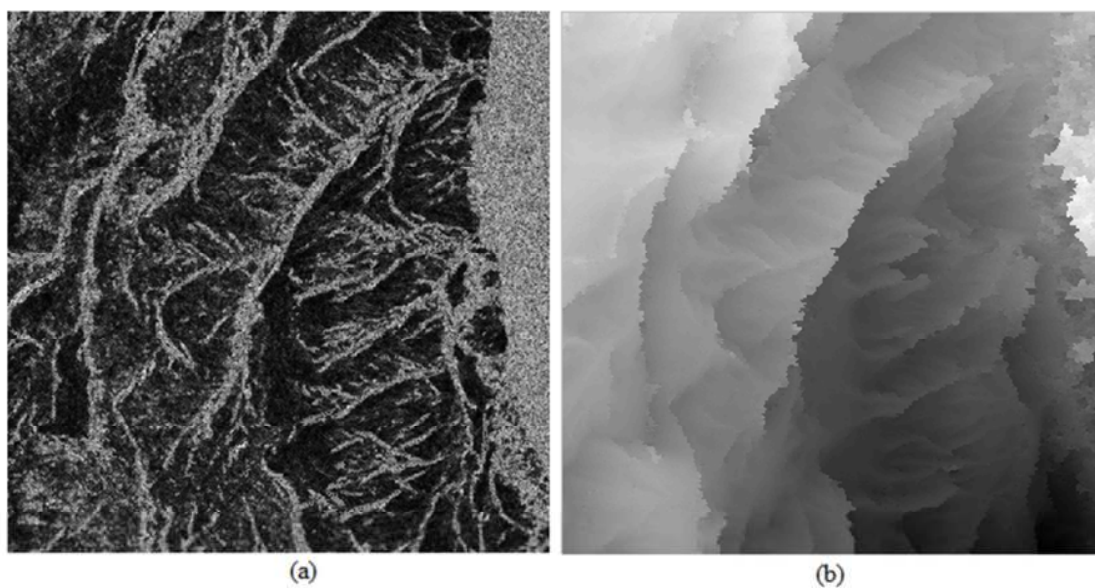


Figure IV.24 : Déroulement de « int1 » par l'algorithme de Flynn, (a) la mappe de qualité PDV, (b) la phase déroulée.

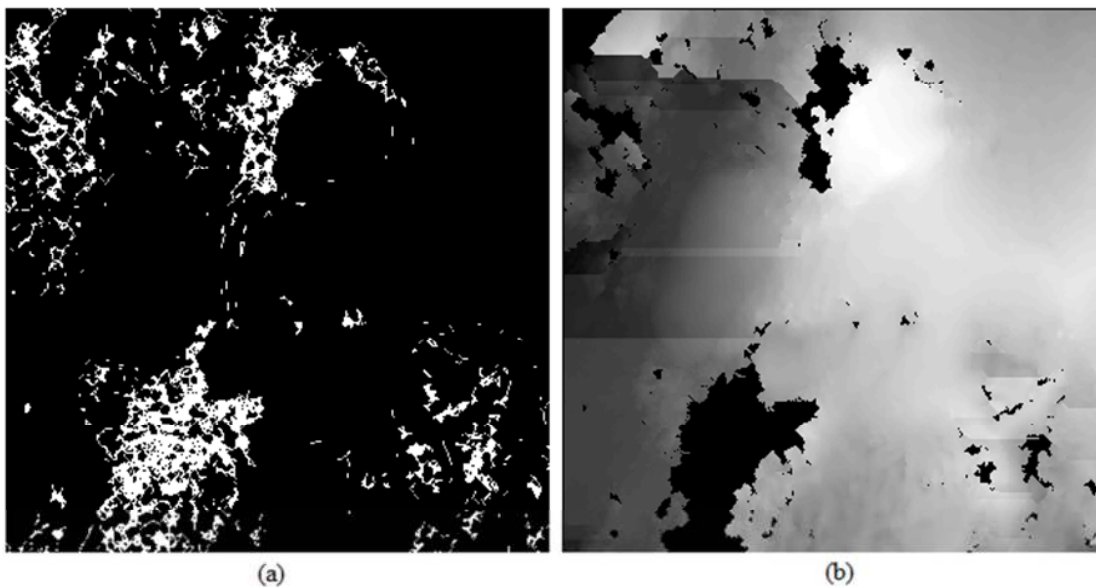


Figure IV.25 : Déroulement de « int2 » par l'algorithme de Goldstein, (a) la mappe de branches, (b) la phase déroulée.

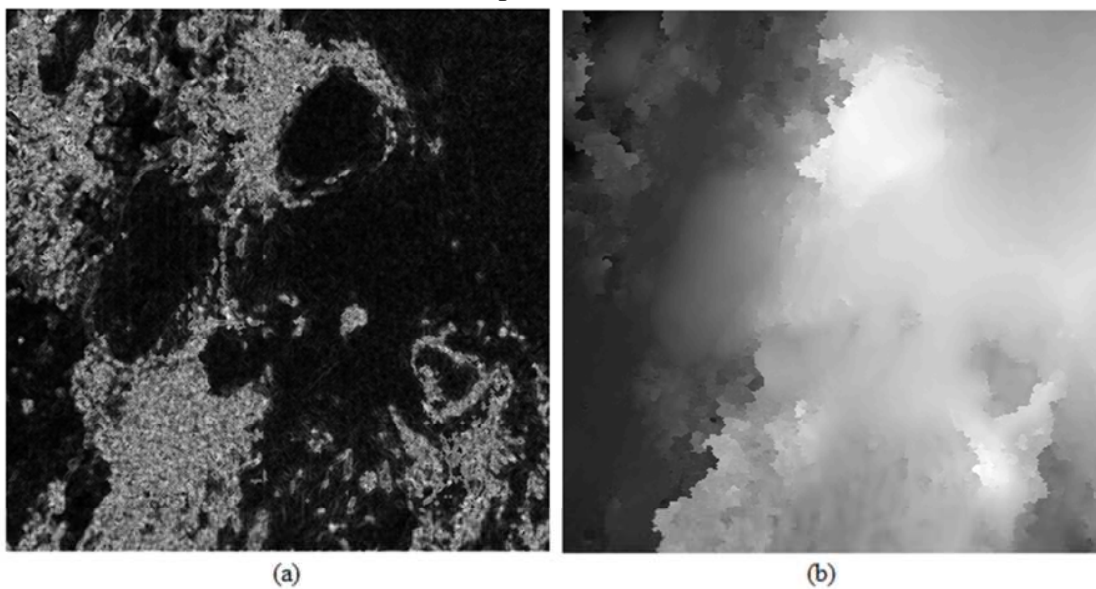


Figure IV.26 : Déroulement de « int2 » par l'algorithme de Flynn, (a) la mappe de qualité PDV, (b) la phase déroulée.

Afin d'évaluer les performances de l'approche proposée en termes de la région masquée par les branches en fonction de dimension de l'interférogramme et le nombre des résidus contenus nous prenons plusieurs dimensions de même interférogramme à l'aide d'une fenêtre de dimension variable ( $50^2, 100^2, 150^2, 200^2, 250^2, 300^2, 350^2$ ), commençant du centre vers les bords. Les nombres des résidus correspondant sont respectivement (18, 129, 394, 1133, 2511, 4083, 5420)

Les courbes de figure IV.27 et 28 résume cette comparaison entre l'approche proposée (PDVPAD/AJ) et la méthode MA/BC Goldstein.

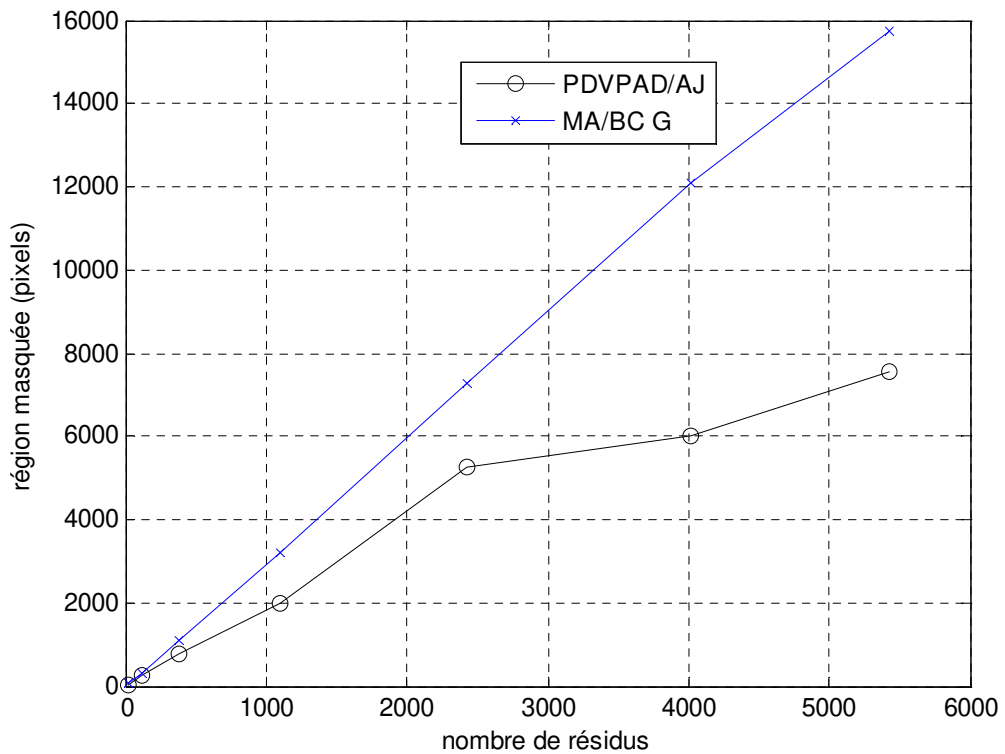


Figure IV.27 performance de la méthode proposée en termes de la région masquée par les branches pour l'int1.

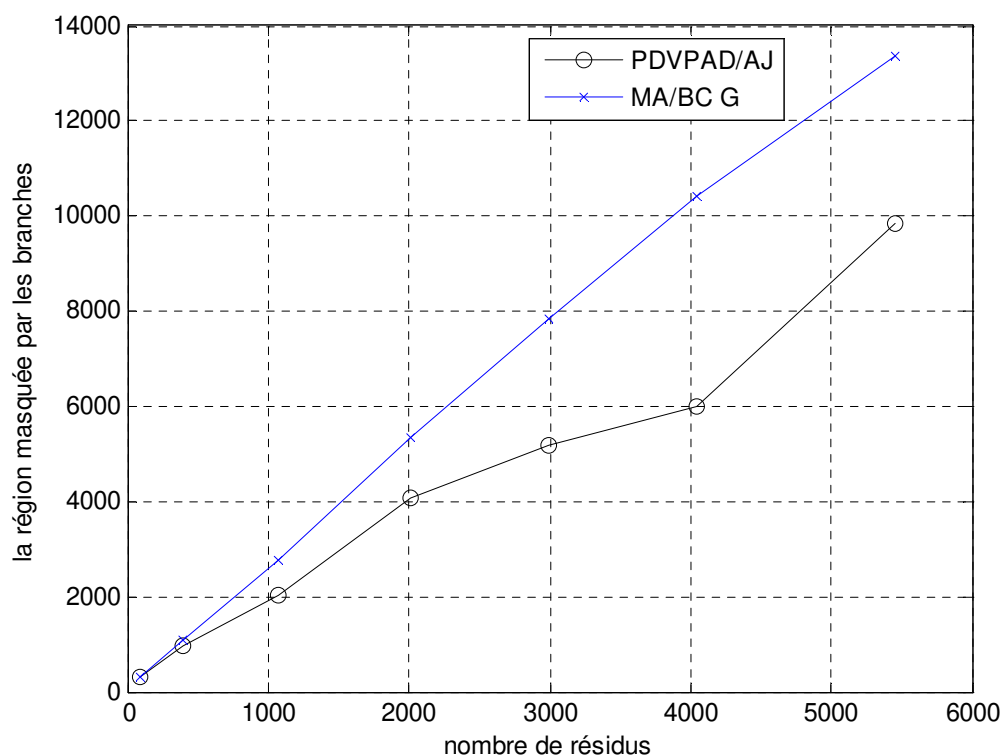


Figure IV.28 performance de la méthode proposée en termes de la région masquée par les branches pour l'int2.

*Remarque :*

- Le critère de comparaison MSD et RMSE après le déroulement de phase ne peuvent pas être utilisés pour les interférogrammes réels, car l'image de phase originale sans bruits (référentielle) n'est pas disponible.
- Durant toute cette étude même les chapitre II et III, les résultats obtenus; notamment les temps d'exécution; sont issus d'un processeur I3-2.13 GHz.

## IV.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons proposé une approche complète de traitement d'interférogramme in SAR sur le plan pré-filtrage et le plan de déroulement, son efficacité était prouvée contre les résidus et leurs propagations dont le test a été réalisé sur des interférogrammes simulés et réels avec différents types de motifs et de franges tels que : franges fermées, ouvertes, non-homogènes et accidentées, plus la non-uniformité de la distribution des résidus afin de donner une crédibilité à l'algorithme proposé.

Le pré-filtrage proposé est basé sur deux fonctions statistiques, la première est la PDV vu qu'elle est un bon estimateur largement utilisé pour la génération de la carte de qualité dans l'algorithme de déroulement de phase d'où vient l'idée de l'utiliser aussi comme un estimateur pour la sélection de centre du filtre appliqué. La seconde n'est un simple filtre de l'écart-type qui peut être remplacé par un autre filtre spatial.

Tandis que la contribution dans le déroulement de phase s'est faite au niveau de procédure d'inondation (Flood Fill) qui est utilisée dans les deux catégories : suivi de parcours ou qualité guidée, dont nous en avons choisi la méthode de Goldstein et celle de Flynn pour la validation des résultats.

Cette approche était testée sur des interférogrammes simulés et réels, et comparée avec d'autres approches de filtrage et de déroulement dont les critères de comparaison étaient : la qualité d'image, la surface de la région distordue, le carré de l'erreur quadratique moyenne (Root Mean Square Error RMSE), le taux de réduction des résidus, et l'écart quadratique moyen (Mean Square Deviation MSD), les régions masquées par les branches et le temps de computation.

# Conclusion générale

Dans cette thèse nous avons mené une étude détaillée sur toute la chaîne de traitement des systèmes d'imagerie radar en commençant par les composants essentiels au fonctionnement, mécanismes d'acquisition, la génération de différents types d'images, le filtrage, le déroulement de phase et la génération de modèle numérique du terrain. Pour cela, nous avons commencé tout d'abord par un aperçu sur le principe et les composants des systèmes d'imagerie en générale et les systèmes inSAR en particulier. Différentes images peuvent être générées par un tel système telles que les images d'amplitude, l'interférogramme et l'image de cohérence comme une carte de qualité qui guide le filtrage et le déroulement. Les caractéristiques déduites de ces images ont permis de préparer le terrain pour le but substantiel de notre travail qui est le filtrage et le déroulement.

Pour le filtrage une étude, analyse et comparaison de quelques méthodes de dé-bruitage d'interférogramme inSAR ont été présentées. Nous avons essayé de donner une vision suffisante pour comprendre le principe, le mode d'implémentation et l'influence de certains filtres largement utilisés dans le domaine d'interférométrie que ce soit sur le plan fréquentiel ou le plan spatial. Afin de donner une notion bien élaborée nous avons commencé par les filtres basiques, qui sont très connus et applicables dans le traitement d'image en général. Puis nous avons focalisé notre étude sur le filtrage d'interférogramme éliminant le bruit additif dans un état de l'art aussi diversifié que possible dans le but d'englober des différentes idées récemment publiées. Ces méthodes ont été analysées et comparées selon plusieurs critères tels que : nombre des résidus, taux de réduction, la variance de phase, l'écart-type, temps d'exécution et la netteté des franges d'interférogrammes et la distorsion.

Pour le déroulement, nous avons en premier temps mis une présentation de problème de déroulement de phase avec ces formulations pertinentes sous forme d'une description mathématique bien détaillée, puis une étude, analyse et comparaison sur quelques méthodes référentielles ont ainsi été élaborées. Un état de l'art a également été présenté avec les avantages et les inconvénients de chaque algorithme. D'après cette étude, nous pouvons constater que les approches PF fournissent des bonnes qualités d'image de phase par rapport aux approches MN parce que le déroulement par MN n'est qu'une estimation globale. En revanche les approches PF sont lentes et prennent plus de temps.

En comparant les méthodes BC (avec ses variantes) et QG nous pouvons constater que les méthodes BC sont plus rapide relativement aux QG mais leur inconvénient major est les régions isolées de

grappe laissées sans déroulement ; ce qui n'est pas le cas pour les méthodes QG où toutes les régions sont déroulées en fonctions de la qualité locale. Néanmoins une hybridation entre les différentes méthodes est toujours possible afin de combiner les avantages et en sortir avec un compromis.

Nous finalisons cette thèse par une contribution sur le plan filtrage et déroulement dont l'efficacité a été prouvée contre les résidus et leurs propagations sur des interférogrammes simulés et réels de différents motifs des franges; fermées, ouvertes, non-homogènes et accidentées, plus la non-uniformité de la distribution des résidus.

Le filtrage proposé est basé sur deux fonctions statistiques, la première est la PDV vu qu'elle est considérée comme un bon estimateur largement utilisé pour la génération de la carte de qualité dans l'algorithme de déroulement de phase d'où vient l'idée de l'utiliser aussi comme un estimateur pour la sélection de centre du filtre appliqué. La seconde n'est qu'un simple filtre de l'écart-type qui peut être remplacé par un autre filtre spatial.

Tandis que la contribution dans le déroulement de phase se fait au niveau de la procédure d'inondation (Flood Fill) qui est utilisée dans les deux catégories, suivi de parcours ou qualité guidée, de ce fait nous avons choisi la méthode de Goldstein et celle de Flynn pour la validation des résultats.

Cette approche était testée sur des interférogrammes simulés et réels, et comparée avec d'autre approche de filtrage et de déroulement dont les critères de comparaison étaient : la qualité d'image, la surface de la région distordue, le carré de l'erreur quadratique moyenne (Root Mean Square Error RMSE), le taux de réduction des résidus, et l'écart quadratique moyen (Mean Square Deviation MSD), les régions masquées par les branches et le temps de computation.

Comme perspective l'approche de filtrage peut être améliorée en introduisant d'autres techniques telles que les masques directionnels afin de mieux protéger les franges et augmenter le taux de réduction ou exploiter parallèlement le domaine fréquentiel. L'approche de déroulement peut aussi être améliorée en introduisant une méthode d'ajustement sans connexion des branches ou avec hybridation entre les deux catégories autrement dit un déroulement hybride et adaptatif selon la nature, l'état et la distribution des résidus pour chaque région. Une vision plus large, utilise les images d'amplitude conjointement avec celle de cohérence afin de générer une carte de qualité plus fiable qui servira à guider le filtrage et le déroulement.

## Bibliographie

- [1] Keith Raney, "Radar, Altimeters", Encyclopedia of Remote Sensing Springer, Vol. 88, No. 3. pp. 525-532, 2015.
- [2] P. A. Rosen, S. Hensley, I.R. Joughin, F. Li, S. N. Madsen, E. Rodriguez, and R. M. Goldstein, "Synthetic Aperture Radar Interferometry", IEEE proceeding, Vol. 88, No 3. pp. 333-382, 2000.
- [3] Bruce Chapman and Ronald G. Blom, "Chapter 10 Synthetic Aperture Radar, Technology, Past and Future Applications to Archaeology", Mapping Archaeological Landscapes from Space, Springer Briefs in Archaeology, DOI 10.1007/978-1-4614-6074-9\_10, 2013.
- [4] R. Bamler and P. Hartl, "Topical Review-Synthetic aperture radar interferometry". Inverse Problems, Volume 14, Issue 4, pp. R1-R54, 1998.
- [5] Z. Lu and D. Dzurisin, "Introduction to Interferometric Synthetic Aperture Radar", InSAR Imaging of Aleutian Volcanoes, Springer Praxis Books, DOI: 10.1007/978-3-642-00348-6\_1, 2014).
- [6] S. Dupont M. Berthod, " interférométrie radar et déroulement de phase", INRIA rapport de recherche N 2344, programme 4- robotique, image et vision, Projet Pastis, 1994.
- [7] G. Franceschetti and R. Lanari. "Synthetic Aperture Radar Processing". CRC Press, 1999.
- [8] M. Soumekh. "Synthetic Aperture Radar Signal Processing with MATLAB algorithms". Wiley-Interscience, 1999.
- [9] R. Chatterjee. "Antenna Theory and Practice". New Age International Pvt Ltd, New York, 2004.
- [10] T. Bayer, R. winter, G. Schreier, "Terrain influences in SAR backscatter and attempts to their correction ", IEEE transaction on geoscience and remote sensing. Vol. 29 N 3, pp 451-462, 1991.
- [11] E. Rodriguez: "Theory and design of interferometry SAR", IEE Proceedings F - Radar and Signal Processing, Vol. 139 N 2, pp. 147 – 159, 1992.
- [12] H. Zeber: "Decorrelation interferometric Radar echoes", IEEE transaction on geoscience and remotesensing, Vol. 30 N 5, pp. 950-959, 1992.
- [13] D.C. Ghiglia and M. D. Pritt, "Twodimensional phase unwrapping: Theory, algorithms and software," Wiley, New York: p. 483, 1998.
- [14] W. Dukhopelnikova, "methods of phase unwrapping for SAR interferometry", IEEE, MSMW'04 Symposium Proceedings. Kharkov, Ukraine, June 21-26, 2004.
- [15] N. Egidi and P. Maponi, "A comparative study of twofast phase unwrapping algorithms", Applied Mathematics and Computation, Elsevier Vol. 148, pp. 599–629, 2004.
- [16] J-S. Lee, Konstantinos P. Papathanassiou, L. Ainsworth, R. Grunes, and A. Reigber, "A New Technique for Noise Filtering of SAR Interferometric Phase Images", IEEE Transactions on Geoscience And Remote Sensing, Vol. 36, No 5, pp. 1456–1465, 1998.
- [17] J.-S. Lee, T. L. Ainsworth, M. R. Grunes, and R. M. Goldstein, "Noise filtering interferometric SAR images," in Proc. SPIE European Symp., Rome, Italy, vol. 2315, pp. 735-742, 1994.
- [18] H.A. Zebker, R.M. Goldstein, "Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar observations", Journal of Geophysical Research, Vol. 91, pp. 4993–4999, 1986.
- [19] R.M. Goldstein, H.A. Zebker and C.L. Werner, "Satellite radar interferometry: two dimensional phase unwrapping", Radio Science vol. 23, pp. 713–720, 1988.
- [20] P. Maponi, F. Zirilli, "A class of global optimization problems as models of the phase unwrapping problem", Journal of Global Optimization, Vol. 21, pp. 289–316, 2001.

- [21] Takeda M, Ina H and Kobayashi S, "Fourier-transform method of fringe pattern analysis for Computer based tomography and interferometry". *J Opt Soc Am*, vol72, pp 156-160, 1981.
- [22] Macy WM. " Hologram analysis using 2-D Fourier-transform". *ApplOpt*, vol 22, pp 1653-1660. 1983.
- [23] R. M. Goldstein and C. L. Werner, " Radar interferogram filtering for geophysical applications ", *Geophysical Research Lettres*, VOL 25, No 21, pp 4035-4038, Nov 1998.
- [24] I. Baran, M. P. Stewart, B. M. Kampes, Z. Perski, and P. Lilly, "A Modification to the Goldstein Radar Interferogram Filter", *IEEE Transactions on Geoscience And RemoteSensing*, Vol 41, N. 9,pp 2114-2118 , Sep 2003.
- [25] R. Bamler and P. Hartl, "Synthetic aperture radar interferometry," *Inv. Prob.*,vol. 14, R1–R54, 1998.
- [26] R.Song, H. Guo, G.Liu, Z. Perski, H. Yue, C. Han, and J. Fan, "Improved Goldstein SAR Interferogram Filter Based on Adaptive-Neighborhood Technique", *IEEE Transactions on Geoscience And Remote Sensing*, Vol 12, No 1, pp 140-144, Jan 2015.
- [27] G. Vasile, E. Trouve, M. Ciuc, and V. Buzuloiu, "General Adaptive neighborhood technique for improving synthetic aperture radar interferometric coherence estimation," *J. Opt. Soc. Amer.*, vol. 21, No. 8, pp. 1455–1464, Aug 2004.
- [28] M. Ciuc, E. Trouve, P. Bolon, and V. Buzuloiu, "Amplitude-driven coherence filtering in complex interferograms," in *Proc. IEEE Int. Geosci.Remote Sens. Symp*, vol. 6, pp. 3453–3455. Jun. 2002.
- [29] Z. Suo, J. Zhang, M. Li, Q. Zhang, and C. Fang, "Improved InSAR Phase Noise Filter in Frequency Domain", *IEEE Transactions on Geoscience And Remote Sensing*, Vol 54, N 2, pp 1185-1195, Feb. 2016 .
- [30] K. Qian, S.HockSoon, A. Asundi, "A simple phase unwrapping approach based on filtering by window Fourier transform", *Optics& Laser Technology Elsevier* vol 37 pp 458–462. (2005).
- [31] K. Qian, "Two-dimensional windowed Fourier transform for fringe pattern analysis: Principles, applications and implementations", *Optics& Lasers in engineering Elsevier* vol 45 pp 304–317, 2007.
- [32] K. Qian, "Applications of windowed Fourier fringe analysis in optical measurement: A review ", *Optics& Lasers in engineering Elsevier* vol 66 pp 67–73, 2015..
- [33] K. Qian, "A simple phase unwrapping approach based on filtering by windowed Fourier transform: A note on the threshold selection", *Optics& Laser Technology Elsevier* vol 40 pp 1091–1098, 2008.
- [34] K. Qian, "A simple phase unwrapping approach based on filtering by windowed Fourier transform: The phase nearedges", *Optics& Laser Technology, Elsevier* vol 39 pp 1364–1369. 2007.
- [35] Guillemain P, Kronland-Martinet R. "Characterization of acoustic signals through continuous linear time-frequency representations". *Proc IEEEvol* 84, pp 561–585, 1996.
- [36] A.L.B Candeias., J.C Mura., Dutra L.V., Moreira J.R, "Interferogram phase noise reduction using morphological and modified median filters".In *Geoscience and Remote Sensing Symposium, Quantitative Remote Sensing for Science and Applications 10-14 Jul 1995. IEEE* 1, Firenze, pp. 166-168, 1995.
- [37] R. M. Haralick, S. R. Stemmerb and X. Zhuang, "Image analysis using mathematical morphology", *IEEE Pattern Analysis and Machine Intelligence* ,vol 9, No 4, pp. 532-550, Avr 1987.
- [38] R. M. Haralick and L. G. Shapiro, "Computer and robot vision," vol. 1, New York, Addison Wesley, 1991.

- [39] R. C. Gonzalez and R. E. Woods, "Digital image processing". Reading, MA, Addison-Wesley, 1992.
- [40] T.Zhi, L. Jingwen, Z. Yinqing, "Analysis on Noise Reduction Method for Interferometric SAR Image", Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '04. Proceedings. 2004 IEEE International Vol 6, 2004.
- [41] J.S. Lee, K. P. Papathanassiou, T. L. Ainsworth, M. R. Grunes, and A. Reigber, "A New Technique for Noise Filtering of SAR Interferometric Phase Images", IEEE Transactions on Geoscience And Remote Sensing, VOL. 36, No. 5, pp 1456–1465 ,Sep 1998.
- [42] J.-S. Lee, "Digital image enhancement and noise filtering by use of local statistics," IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell., vol. PAMI–2, pp.165–168, Jan 1980.
- [43] Q. Wang, H.Huang, A.Yu, and Z. Dong "An Efficient and Adaptive Approach for Noise Filtering of SAR Interferometric Phase Images", IEEE Transactions on Geoscience And Remote Sensing, VOL. 8, No 6, pp 1140 - 1144, Nov 2011.
- [44] T. Aoki, T. Sotomaru, T. Ozawa, T. Komiyama, Y. Miyamoto, M. Takeda, "TwoDimensional Phase Unwrapping by Direct elimination of rotational vector fields from Phase gradients obtained by heterodyne techniques". Optical Review 5(6), pp 374-379, 1998.
- [45] R. Yamaki and A. Hirose, "Singularity-Spreading Phase Unwrapping", IEEE Transactions on Geoscience And Remote Sensing, VOL. 45, No 10, pp 3240-3251, Oct 2007.
- [46] T. Nishino, R. Yamaki, A. Hirose, "Three-dimensional imaging by using singularity-spreading phase unwrapping method", .Acoustical Imaging, Springer Vol 29,pp 423-429, 2009.
- [47] K. Itoh , "Analysis of the phase unwrapping algorithm", Applied Optics, Vol. 21, No 14, pp 2470-2470, 1982.
- [48] T. Bentahar, D. Benatia and M. Boulila, "2D Phase UnwrappingAlgorithm for Phase Image usingAdjustmentMethod", J. Automation &Systems Engineering Vol 4, No 3, pp 154-164, Sep 2010.
- [49] U. Spagnolini, P. di Milano, "2-D phase unwarping ", Society of Exploration Geophysicists, SEG Annual Meeting, Houston, Vol 2, Texas, Nov 1991.
- [50] C. Lacombe, Kornprobst, P. ; Aubert, G. ; Blanc-Feraud, "A variationalapproach to one dimensional phase unwrapping", 16th IC Pattern Recognition Proceedings. IEEE, Vol 2, 2002.
- [51] R. M. Goldstein, H. A. Zebker, C. L. Werner, "Satellite radar interferometry: two-dimensional phase nwrapping," Radio Science, vol.23, no.4, pp 713-720, July-Aug. 1988.
- [52] W. Nan, and F. Dazheng, "inSAR phase unwrapping algorithm using branch-cut and finite element," ICSP 04 proceeding, IEEE, Sep 2004.
- [53] X. Kai, D. Ning, C. Haihua, Y. Jiancheng; L. Ye, W. Yonghui, "Analysis of the quality values of the residues in branch cut phase unwrapping algorithm", Electronics, Communications and Control (ICECC), proceeding, IEEE, Sep 2011.
- [54] Cusack, R., J. M. Huntley, and H. T. Goldstein, "Improved noise- immune phase unwrapping algorithm", Applied Optics, Vol. 34, No. 5, 781-789, 1995.
- [55] Buckland, J. R., J. M. Huntley, and S. R. E. Turner, "Unwrapping noisy phase maps by use of a minimum cost matching algorithm", Applied Optics, Vol. 34, No. 23, 5100-5108, 1995.
- [56] J. Quiroga, A. Gonzalez-Cano, and E. Bernabeu, "Stable-marriages algorithm for preprocessing phase maps with discontinuity sources", Applied Optics, vol. 34, pp. 5029-5038,10, August 1995.
- [57] X. Feng, W. Jicang, Z. Lei and L. Xiaoling, " A new method about placement of the branchcut in two-dimensional phase unwrapping", Synthetic Aperture Radar APSAR , proceeding IEEE, Nov 2007.

- [58] R.C. Gonzalez and R.E. Woods, "Digital Image Processing" (2nd Edition), Prentice Hall, 2002.
- [59] C. Li and D. Y. Zhu, "A residue-pairing algorithm for InSAR phase unwrapping", Progress in electromagnetics research, vol 95, pp 341-354, 2009.
- [60] Y. Wang, H.F. Huang, M.Q. Wu, "A New Phase Unwrapping Method for Interferograms with Discontinuities ", Radar Conference, Proceeding IEEE, May 2014.
- [61] Y. Zhang, S. Wang, G. Ji, and Z. Dong, "An Improved Quality Guided Phase Unwrapping Method and Its Applications to MRI", Progress in electromagnetics research, vol 145, pp 273-286, 2014.
- [62] S. W. Xiao, F. Pan, F. Wang, L. Cong Liu, "Complex-amplitude-based phase unwrapping method for digital holographic microscopy," Optics and Lasers in Engineering, Vol. 50, No. 3, pp 322-327, Mar 2012.
- [63] F. Da-zheng, W. Nan, L. Baoquan, "A Region-growing Phase Unwrapping Approach Based on Local Frequency Estimation for Interferometric SAR", 8th signal processing conference, Proceeding IEEE, Vol. 4, 2006.
- [64] T. J. Flynn, "Consistent 2-D phase unwrapping guided by a quality map,". IGARSS'96, Proceeding, Lincoln, NE, pp 2057-2059, Mar 1996.
- [65] M. Roth, "Phase Unwrapping for Interferometric SAR by the Least-Error Path", Johns Hopkins University Applied Physics Lab Technical Report, Laurel, Md, vol. 30, 1995.
- [66] W. Xu, and I. Cumming, "A Region-Growing Algorithm for InSAR Phase Unwrapping", IEEE Transactions on Geoscience And Remote Sensing, VOL. 37, No1, pp 124-134, Jan 1999.
- [67] T. Flynn. "Two-dimensional phase unwrapping with minimum weighted discontinuity", Journal of the Optical Society of America A, Vol 14, No 10, pp 2692-2701, 1997.
- [68] D. Fried. "Least-squares fitting a wave-front distortion estimate to an array of phase-difference measurements". Journal of the Optical Society of America, Vol 67, No 3, pp 370-375, 1977.
- [69] R. Hudgin. "Wave-front reconstruction for compensated imaging". Journal of the Optical Society of America, Vol 67, No 3, pp 375-378, 1977.
- [70] W. Shi, Y. Zhu, Y. Yao, "Discussion about the DCT/FFT phase-unwrapping algorithm for interferometric applications", Optik - International Journal for Light and Electron Optics, Vol 121, No 16, pp 1443-1449, Sep 2010.
- [71] D. Ghiglia and L. Romero. "Robust two-dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods". Journal of the Optical Society of America A, Vol 11, pp 107-117, 1994.
- [72] J. Dias and J. Leitao. "The  $Z\pi M$  algorithm for interferometric image reconstruction in SAR/SAS". IEEE Transactions on Image Processing, Vol 11, No 4, pp 408-422, April 2002.
- [73] J. Dias and G. Valadao. "Phase unwrapping via graph cut". IEEE Transactions on Image Processing, Vol 16, No 3, pp 698-709, Mar 2007.
- [74] M. Costantini. "A novel phase unwrapping method based on network programming". IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol 36, No 3, pp 813-821, May 1998.
- [75] M. Costantini and A. Farina. "A fast phase unwrapping algorithm for SAR interferometry". IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol 37, No 1, pp 452-460, Jan 1999.
- [76] C. Chen and H. Zebker. "Network approaches to two-dimensional phase unwrapping: intractability and two new algorithms. " Journal of the Optical Society of America, Vol 17, No 3, pp 401-414, Mar 2000.

- [77] T. Bentahar, D. Benatia, M. Boulila , "De-noising interferogram inSAR using variance and absolute deviation functions", World Journal Of Engineering, Vol. 13, No 2, pp. 169-176, 2016.
- [78] Shi X.J., Zhang Y.H., 2008. "Quantitative Comparison of Phase Unwrapping Algorithms for SAR Interferometry". In Microwave Conference, Asia-Pacific.. IEEE, Macau, pp. 1-4, Déc 2008.