



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



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

**MEMOIRE**

**DE FIN D'ETUDES POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER EN Réseaux  
et Télécommunications**

**THEME**

***Conception d'une interface graphique pour  
l'analyse et la comparaison entre deux  
algorithmes de déroulement de phase***

***Présente par le binôme:***

***-BOUALLEG Moundji***

***-BOUGUETOF Maher***

***Devant le jury:***

***- BENTAHER Tarek      Président***

***-SAIDI Riad              Encadreur***

***- HOUAM Lotfi          Examineur***

***Année Universitaire 2019 / 2020***

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## *Remerciements*

*Je tiens, tout d'abord, à remercier Dr. Riad Saïdi,  
mon*

*Encadreur dévoué pour bien vouloir diriger et  
encadrer ce*

*Travail, et Dr. Tarek Bentaher, et pour toute l'aide  
nécessaire.*

*Je tiens à remercier sincèrement les membres de jury  
qui me*

*Font le grand honneur d'évaluer ce travail.*

*Et un merci spécial à tous Hamza Atouï et Nadhir  
Nouïoua.*

## Dédicace

*Je dédie ce modeste travail m'ont parentes qui m'ont soutenu et courage durant toute la période de mes études, j'espère qu'ils seront fiers de moi et que dieu les protège :*

*À mes frère Kamel, Adel, Oussama, Mohamed et Outhman.*

*À tous ma famille*

*À tous mes amis les plus proches surtout surtout Khaoula, Kassimou, Aymen, Oumrane, Yassine, Maher, Chaker, Moussa, Hamza, Lahsen, Sami, Halim,.....*

*À tous mes collègues de la promotion 2020.*

## Dédicace

*A ma très chère mère*

*Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier comme il se doit. Ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles.*

*A mon très cher père*

*Tu as toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager. Que ce travail traduit ma gratitude et mon affection.*

# Tables de matières

## Liste des figures

## Liste des tableaux

## Introduction générale 01

### Chapitre I : Généralités sur le système d'imageries SAR et inSAR

#### I.1 Introduction 03

#### I.2 C'est quoi le système de déroulement de phase 03

##### I.2.1 L'antenne radar 03

##### I.2.2 Bandes de fréquences 04

##### I.2.3 Quelques satellites SAR et inSAR 06

#### I.3 Principe de SAR 06

##### I.3.1 la résolution 06

##### I.3.2 les défauts de projection 07

##### I.3.3 le signal et les images SAR 08

#### I.4 Principe de l'inSAR 09

#### I.5 Signal de corrélation et les images inSAR 12

##### I.5.1 Décorrélation spatiale 13

##### I.5.2 Décorrélation temporelle 13

##### I.5.3 les images inSAR 14

#### I.6 Conclusion 15

### Chapitre2 : état de l'art sur quelques méthodes de reconstruction

#### II.1 Introduction 17

#### II.2 le déroulement de phase 17

##### II.2.1 formulations 18

#### II.3 Déroulement par ajustement 19

##### II.3.1 traitement 1D 19

##### II.3.2 traitement 2D 19

II.4 autres approches de déroulement	20
II.4.1 Les méthodes de Branch-cut	20
II.4.1.1 La méthode de Goldstein	20
II.4.2 Les méthodes de qualité guidée et la croissance de la région	23
II.4.2.1 La méthode de Flynn	24
II.4.3 Les méthodes de norme de minimisation	26
II.4.3.1 les normes $L^p$	26
II.5 Conclusion	27

### **Chapitre : III Conception de l'interface graphique**

III.1 Introduction	29
III.2 Interfaces graphiques	29
III.3 Objets graphiques	29
III.3.1 Objet figure	29
III.3.2 Objets Axes	29
III.3.3 Objets GUI	30
III.4 Les deux algorithmes sur des images simulées et réelles étudiées	30
III.4.1 Algorithmes de Flynn	30
III.4.2 Algorithmes de Goldstein	31
III.4.3 Comparaison des deux algorithmes	33
III.4.4 Définition du Types des images étudiées	33
III.4.5 Nature des bruits ajoutent aux images	34
III.5 Interfaces graphiques développées	34
III.5.1 Description de l'interface graphique	36
III.5.2 Présentation des différentes fenêtres de l'interface	36
III 5.3. Structure de l'interface proposée	38
III.5.4 Exemple l'exécution	39
III.5.4 Résultats après exécution premier algorithme	39
III.5.5 Résultats après exécution deuxième algorithme	40

III.6 Analyse comparative des performances	41
III.6.1 Analyse des performances	41
III 6.1.1 La racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	41
III 6.1.2 Rapport crête signal sur bruit (PSNR)	42
III 6.1.3 Indice de similarité structurelle (SSIM)	44
III 6.1.4 Similitude structurale à base de gradient(GSSIM)	45
III 7.le temps d'exécution pour l'étape de déroulement de phase deux algorithmes (BC & QG)	47
III 8. Conclusion	48
<b>Conclusion générale</b>	51
<b>Référence bibliographique</b>	53

## Liste des figures

Figure I.1	Différence entre SAR et inSAR, (a) SAR, (b) inSAR	03
Figure I.2	L'ouverture rayonnante rectangulaire	04
Figure I.3	Notion d'illumination en azimute et en distance	06
Figure I.4	La durée d'impulsion et la résolution distale	07
Figure I.5	Les défauts de projection parabolique de l'onde radar	08
Figure I.6	Images SAR, (a) image d'amplitude, (b) image de phase	09
Figure I.7	L'altitude de point imagé et la différence de trajet	10
Figure I.8	La différence d'altitude et la différence de la distance radiale	11
Figure I.9	Images inSAR	12
Figure I.10	Les angles d'incidence et la décorrélation spatiale	13
Figure I.11	Exemple d'image, (a) image d'amplitude, (b) interférogramme, (c) image de cohérence	15
FigureII.1	(a) Phase roulée (mesurée), (b) Phase déroulée (déduite)	18
Figure II.2	Problème non-unicité de déroulement selon le parcours suivi et le point de départ	19
Figure II.3	Test d'algorithme de déroulement Goldstein pour un interférogramme réel. (a) l'interférogramme, (b) la mappe des résidus, (c) l'image de phase déroulée, (d) la mappe de branches	21
Figure II.4	Test d'algorithme de déroulement Goldstein pour un interférogramme réel. (a) l'interférogramme, (b) la mappe des résidus, (c) l'image de phase déroulée, (d) la mappe de branches	22
Figure II.5	Test d'algorithme de déroulement Goldstein pour un interférogramme réel. (a) l'interférogramme, (b) la mappe des résidus, (c) l'image de phase déroulée, (d) la mappe de branches	22
Figure II.6	Test d'algorithme de déroulement Goldstein pour une image simulée, (a) l'image, (b) la mappe des résidus, (c) l'image de phase déroulée, (d) la mappe de branches	23
Figure II.7	Test d'algorithme de déroulement de Flynn pour un interférogramme réel. (a) l'interférogramme, (b) im phase quality (avec couleur), (c) l'image de phase déroulée(d) im phase quality	25
Figure II.8	Test d'algorithme de déroulement de Flynn pour un interférogramme réel. (a) l'interférogramme, (b) l'image de phase déroulée	25
Figure II.9	Test d'algorithme de déroulement de Flynn pour une image simulée. (a) l'interférogramme, (b) l'image de phase déroulée	26
Figure II.10	Test d'algorithme de déroulement de Flynn pour une image simulée. (a) l'interférogramme, (b) l'image de phase déroulée	26
Figure III.1	affichage de figure sur matlab	29
Figure III.2	Objet axes	29
Figure III.3	Exemple d'une interface graphique	30
Figure III.4	Test d'algorithme de déroulement de Flynn pour un interférogramme réel. (a) l'interférogramme réel (b) im phase qualité (avec couleur), (c) l'image de phase	31

déroulée (d) im phase qualité

Figure III.5	Test d'algorithme de déroulement Goldstein pour une image simulée, (a) l'image simulée, (b) la mappe des résidus, (c) l'image de phase déroulée, (d) la mappe de branches	32
Figure III.6	Les images utilisées pour le déroulement, une image simulée, et (Int1, Int2 et Int3) des interférogrammes réelles	33
Figure III.7	exemple d'une interface	35
Figure III.8	La fenêtre d'une interface graphique	35
Figure III.9	fenêtre principale de GUI	36
Figure III.10	Property Inspector d'un button	37
Figure III.11	Organigramme de l'interface graphique proposée	38
Figure III.12	l'interface graphique principale	39
Figure III.13	Interface graphique représenté le déroulement d'une image simulée avec la méthode de Goldstein(BC)	39
Figure III.14	Interface graphique représenté le déroulement d'interférogramme avec la méthode de Goldstein(BC)	40
Figure III.15	Interface graphique représenté le déroulement d'une image simulée avec la méthode de Flynn(QG)	40
Figure III.16	Interface graphique représenté le déroulement d'interférogramme avec la méthode de Flynn(QG)	41
Figure III.17	Courbe graphique représenté les valeurs (RMSE) d'interférogramme déroulées avec les deux algorithmes (BC & QG)	42
Figure III.18	Courbe graphique représenté les valeurs (PSNR) d'interférogramme déroulées avec les deux algorithmes (BC & QG)	43
Figure III.19	Courbe graphique représenté les valeurs (SSIM) d'interférogramme déroulées avec les deux algorithmes (BC & QG)	45
Figure III.20	Courbe graphique représenté les valeurs (GSSIM) d'interférogramme déroulées avec les deux algorithmes (BC & QG)	46
Figure III.21	Colonnes graphiques représentent le temps d'exécution de les deux algorithmes (BC & QG) pour le déroulement	47

## Liste des tableaux

Tableau 1	Les bandes de fréquences SAR et inSAR	04
Tableau 2	Quelques satellites SAR	05
Tableau 3	les information sur les inerférogrammes utuliseés	34
Tableau 4	valeurs RMSE pour le déroulement des interférogrammes (BC)	41
Tableau 5	valeurs RMSE pour le déroulement des interférogrammes (QG)	42
Tableau 6	valeurs PSNR pour le déroulement des interférogrammes (BC)	43
Tableau 7	valeurs PSNR pour le déroulement des interférogrammes (QG)	43
Tableau 8	valeurs SSIM pour le déroulement des interférogrammes (BC)	44
Tableau 9	valeurs SSIM pour le déroulement des interférogrammes (QG)	44
Tableau 10	valeurs GSSIM pour le déroulement des interférogrammes (BC)	45
Tableau 11	valeurs GSSIM pour le déroulement des interférogrammes (QG)	46
Tableau 12	le temps d'exiction de les deux algorithmes (BC & QG) pour le déroulement	47

## Liste des Acronyme

<b>InSAR</b>	Interferometric SAR
<b>SAR</b>	Synthetic Aperture Radar
<b>EM</b>	Electro magnétique
<b>BC</b>	branches coupées
<b>QG</b>	qualité guidée
<b>MNT</b>	Modèle Numérique de Terrain
<b>RD</b>	la résolution en distance
<b>Ra</b>	la résolution en azin
<b>ERS</b>	Europeanremotesensing
<b>MN</b>	Minimum Norm
<b>PF</b>	Path Flowing
<b>GUI</b>	graphical User Interface
<b>PNG</b>	Portable Network Graphics
<b>RMSE</b>	La racine carrée de l'erreur quadratique moyenne
<b>PSNR</b>	Rapport crête signal sur bruit
<b>SSIM</b>	Indice de similarité structurelle
<b>GSSIM</b>	Similitude structurale à base de gradient

## Résumé :

Le système inSAR peut fonctionner indépendamment de source de la lumière, il est actif par ses propres sources électromagnétiques. La qualité et la résolution est aussi impressionnante ce qui le rend un système imageur majeur comparativement à celui de l'optique. Le système inSAR génère deux types d'images ; d'amplitude (avec sa cohérence) et de phase (interférogramme) ; l'image d'amplitude directement exploitable mais elle contient un taux élevé de bruits, l'interférogramme possède moins de bruits (résidus) comparativement avec l'image d'amplitude mais elle n'est pas directement exploitable, et par conséquent il est impératif de dérouler toutes les phases en évitant ces résidus afin de limiter la propagation d'erreur. Parmi ces algorithmes on trouve principalement rupture des branches (Branch Cut) et la qualité guidée (Guided Quality), chacun possède des avantages et inconvénients vis-à-vis l'autre. Dans notre travail nous devons développer une interface graphique qui va nous permettre de faire une analyse comparative sur les différences entre les deux algorithmes selon plusieurs critères pertinents et utilisant quelques métriques pour évaluations tel que la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE), le rapport crête signal sur bruit (PSNR), l'indice de similarité structurelle (SSIM), et l'indice de Similitude structurelle à base de gradient (GSSIM), ainsi que le temps d'exécution des opérations de déroulement.

**Mots –clés :** Interface graphique, système inSAR, algorithmes de déroulement de phase, SSIM, RMSE, PSNR, GSSIM.

## Abstract:

The inSAR system can operate independently of light source it is activated by its own electromagnetic sources. The quality and resolution is also impressive which makes it a major imaging system compared to that of optics. The inSAR system generates two types of images; amplitude (with its coherence) and phase (interferogram); the amplitude image can be directly exploited but it contains a high rate of noise, the interferogram has less noise (residues) compared with the amplitude image but it is not directly exploitable, and therefore it is imperative to unwind all the phases while avoiding these residues in order to limit the error propagation. Among these algorithms we find mainly branch breaking (Branch Cut) and Guided Quality, each has advantages and disadvantages vis-à-vis the other. In our work, we have to develop a graphical interface that will allow us to do a comparative analysis on the differences between the two algorithms according to several relevant criteria and using some metrics for evaluations such as the square root of the mean squared error (RMSE), peak signal-to-noise ratio (PSNR), structural similarity index (SSIM), and gradient-based structural similarity index (GSSIM), as well as the execution time of unwinding operations.

**Keywords:** Graphical interface, phase unwinding algorithms, inSAR system, SSIM, RMSE, PSNR, GSSIM.

## المُلخَص :

يعد نظام (insar) من أهم الأنظمة فهو يستطيع العمل بغض النظر عن مصادر الإضاءة الموجودة لأنه يعتمد على مصادره الكهرومغناطيسية الخاصة، فضلا على أن جودته ودقته العالية يؤهلانه ليكون نظام تصوير راند مقارنة بغيره من الأنظمة التصويرية البصرية.

فنظام (insar) يولد نوعان من الصور هما صورة السعة (بتناغمها) ومخطط المراحل (التداخل) ; بالنسبة لصورة السعة فهي قابلة للاستغلال مباشرة وهذا ما يميزها عن مخطط التداخل الغير قابل للاستغلال المباشر إلا أنها تحتوي على معدل عال من الضوضاء مقارنة بمخطط التداخل وهو ما يوجب فك جميع التداخل (المراحل) من اجل تجنب هذه المعوقات للحد من انتشار الخطأ.

ومن بين الخوارزميات نجد اساسيتين هما فواصل الفروع و النوعية الموجهة ولكل منهما مزايا وعيوب تميزه عن الاخر. وفي عملنا هذا تصوير لواجهة رسومية تسمح لنا بعمل تحليل للمقارنة يبين نقاط الاختلاف بين هذه الخوارزميات بالاعتماد على عدة معايير مستخدمين في ذلك بعض المجالات والنقاط لعمليات التقييم مثل الجذر التربيعي للخطأ التربيعي , نسب الذروة الى الضوضاء مؤشر التشابه الهيكلية, مؤشر التشابه الهيكلية القائم على التدرج وكذلك وقت تنفيذ العمليات.

الكلمات المفتاحية : واجهة المستخدم الرسومية ,نظام (insar) خوارزميات فك , التداخل, مؤشر التشابه الهيكلية(ssim), الجذر التربيعي للخطأ التربيعي(rmse), نسب الذروة الى الضوضاء(psnr), التشابه الهيكلية القائم على التدرج(gssim).

# **Introduction générale**

## Introduction générale

Avec l'avancement de la technologie et le développement de l'esprit de la recherche, Il est devenu impératif de suivre le rythme des développements scientifique. L'imagerie satellitaire fait partie des donnes qui est intéressent dans les communications depuis plusieurs décennies pour des raisons utiles pour découverte l'univers en générale et le monde en particulier.

Les images de télédétection qu'elles soient aériennes ou satellitaires, sont de plus en plus populaires. En tant qu'outil d'observation de la terre, ces images sont en fait de merveilleuses représentations de l'espace géographique.

L'utilisation des systèmes d'information géographique, en particulier pour la surveillance de l'environnement, comprend des critères de qualité et d'exactitude des données, et il noté que la capture de satellitaire est une tâche très complexe par rapport à la photographie ordinaire.

Dans notre travail ne devant développer une interface graphique qui nous permettras de faire une analyse comparative sur les différences entre les deux algorithmes selon plusieurs critères pertinents et utilisant quelques métriques pour l'évaluation.

Ce mémoire s'articule autour de trois chapitres :

Dans le premier chapitre nous allons donner généralité sur le système d'imagerie inSAR, ainsi certaines notions de base sur ces systèmes.

Dans le deuxième chapitre, présente la chaîne de traitement d'image inSAR (le déroulement de phase), cette information est mesurée dans l'intervalle  $[-\pi, \pi]$ . La phase  $\phi$  donnée par l'interférogramme représente la phase interférométrique roulée, c'est-à-dire connue modulo  $2\pi$ , et tant que l'obtention de l'altitude exacte du point imagé est proportionnelle à la phase réelle absolue cette phase doit être reconstruite par une opération inverse non linéaire pour avoir une phase déroulée.

Pour le troisième chapitre, qui va présenter le développement d'une interface graphique en utilisant les GUIs de Matlab, pour le déroulement des images simulent et interférogrammes réels en utilisent deux algorithmes des déroulements. Ce choix nous permettra de voir en mieux le déroulement des images. Plusieurs méthodes pour ce fait sont utilisées pour dérouler les images, dans notre travail ont a utilisés deux algorithme (Flynn et Goldstein). En a aussi pour l'étape d'évaluation nous avons utilisées des métriques pour évoluer la qualité des images déroulées.

# **Chapitre I :**

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

## I.1 Introduction

Ce chapitre contient des concepts de base liés au ce système d'imagerie radar tel que les bandes de fréquences utilisées, le fonctionnement, les caractéristiques et les différentes images générées, ainsi que l'avantage de ce système comparativement à celui du système optique, sa capacité de fonctionner dans toutes les conditions météorologiques.

Le système inSAR est utilisé dans plusieurs domaines notamment dans les topographies du terrain et c'est ce que nous allons expliquer dans ce chapitre.

## I.2 C'est quoi le système inSAR

Le système inSAR est chaque méthode employant des signaux complexes issus de des images SAR [1]. Il 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 il est principalement constitué une ou deux antennes séparée par une Baseline, 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 un maître et l'autre est un esclave.

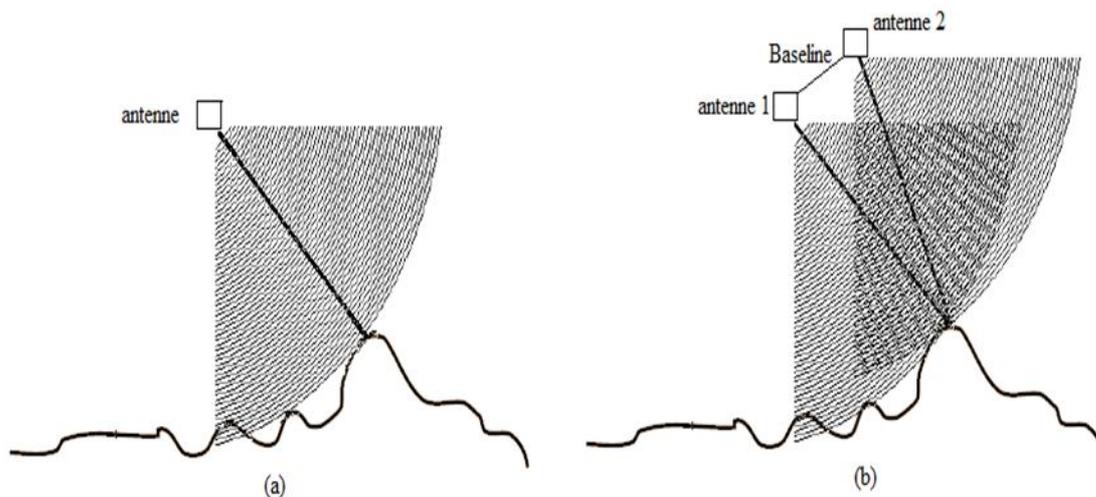


Figure I.1 : Différence entre SAR et inSAR, (a) SAR, (b) inSAR.[1]

### I.2.1 L'antenne radar

C'est 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. [1]

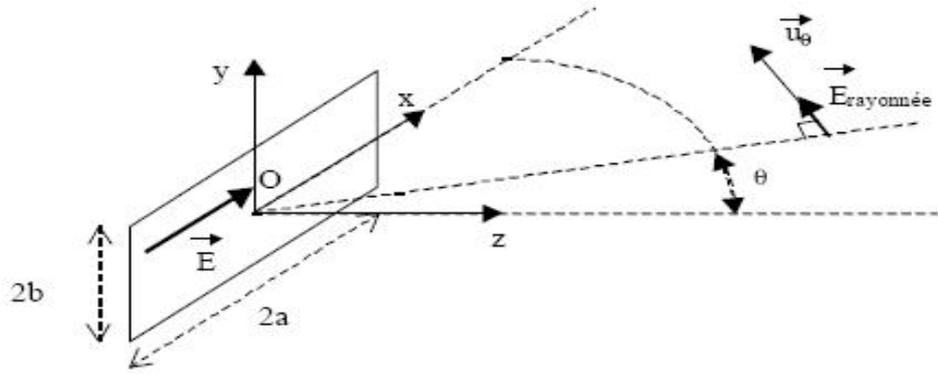


Figure I.2 : L'ouverture rayonnante rectangulaire. [1]

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

Tableau I.1: Les bandes de fréquences SAR et inSAR. [2]

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

### I.2.3 Quelques satellites SAR et inSAR

Le tableau ci-dessous montre quelques satellites spécifiques.

**Tableau I.2:** Quelques satellites SAR. [3]

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

## I.3 Principe de SAR

### I.3.1 La résolution

Contrairement aux anciens systèmes 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. [1]

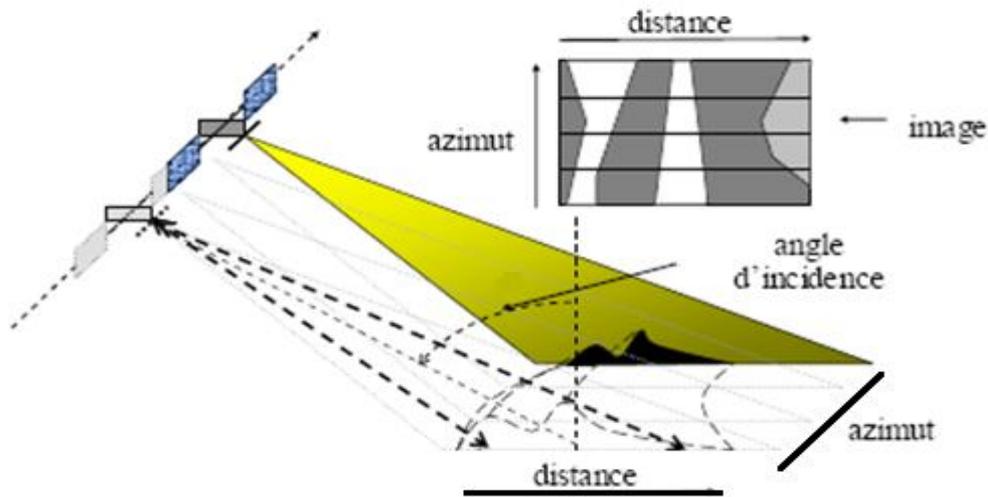


Figure I.3 : Notion d'illumination en azimute et en distance. [1]

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 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 : [1]

$$Rd = \frac{c\tau}{2} \quad (I.1)$$

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 [2].

La véritable résolution distale au sol n'est qu'une projection selon l'angle d'incidence de faisceau  $\theta$ , l'équation I.1 devient : [4]

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

Autre approximation est proposée dans [9] en développant la formule de telle façon qu'elle soit en fonction de la bande passante de l'impulsion  $B$ . [10]

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

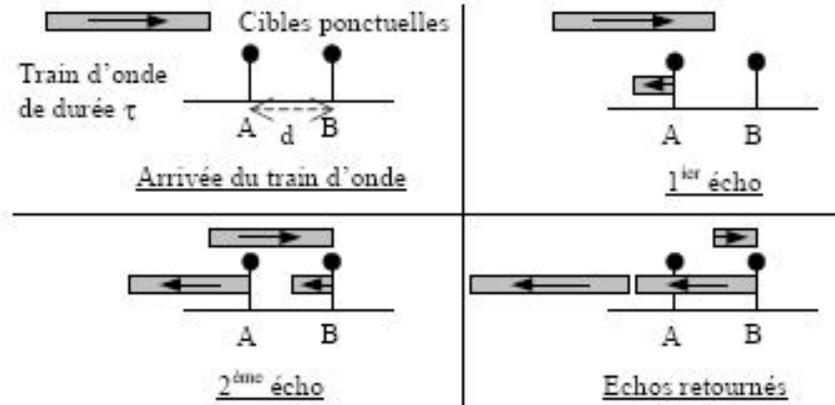


Figure I.4: La durée d'impulsion et la résolution distale. [1]

La résolution azimutale dépend principalement de dimension d'antenne ou son ouverture rayonnante [8], 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 image et  $D$  est l'ouverture d'antenne [9-10]. Cette expression de  $Ra$  veut dire que; pour une longueur d'onde et distance  $r$  données; nous pouvons avoir une bonne (fine) résolution azimutale 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 les tableaux I.1 et I.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 le remplaçant par une autre virtuelle synthétique. [1]

### 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.

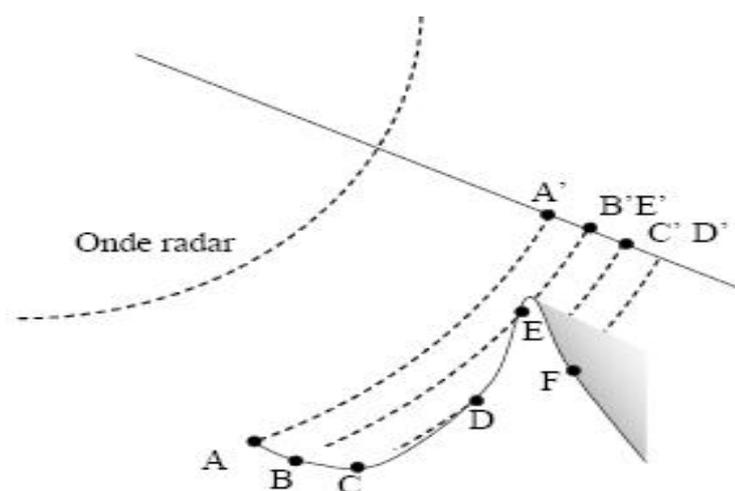


Figure I.5 : Les défauts de projection parabolique de l'onde radar. [1]

Zones de compression ou zones d'accumulation (C'est le cas des points B et E).

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). [1]

Zones d'ombre (C'est le cas de point F où il y aura aucun écho car ce point se situe dans l'ombre).

### 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 [1]

Parmi ces paramètres nous en trouvons : [7]

- 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,...).

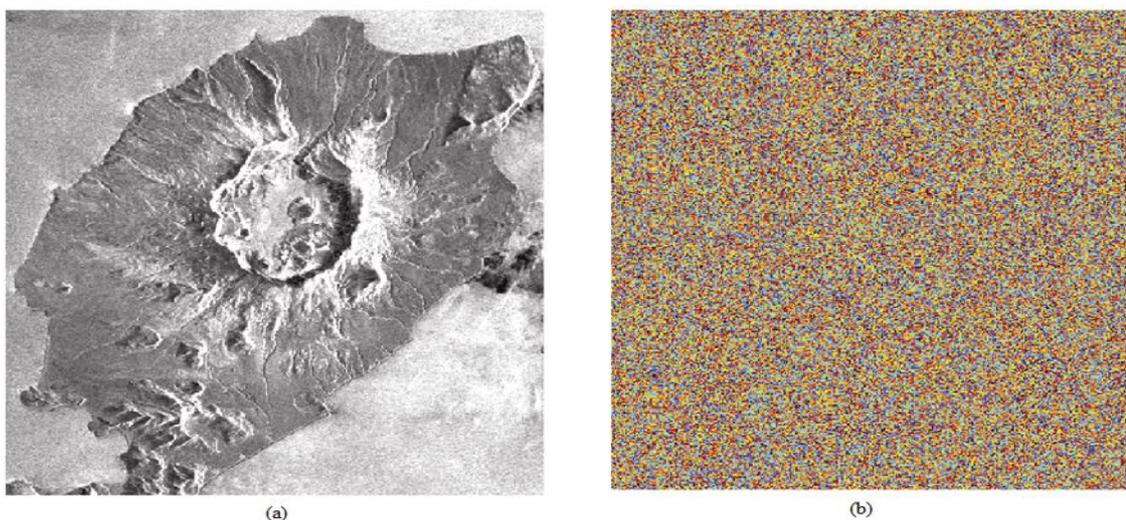


Figure I.6 : Images SAR, (a) image d'amplitude, (b) image de phase. [38]

## 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 (*Baseline*)  $Bx$ , 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. [1]

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

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r \quad (1.6)$$

D'autre part, géométriquement nous avons :

$$h = H - r \cos \left[ \arcsin \left( \frac{\Delta r}{B_x} \right) \right] \quad (1.7)$$

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

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi B_x}{\lambda} \sin \left( \arccos \left( \frac{H-h}{r} \right) \right) \quad (1.8)$$

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. [1]

Donc cette technique d'interférométrie permet d'avoir une relation directe entre l'altitude est la phase interférométrique mesurée par la corrélation 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.

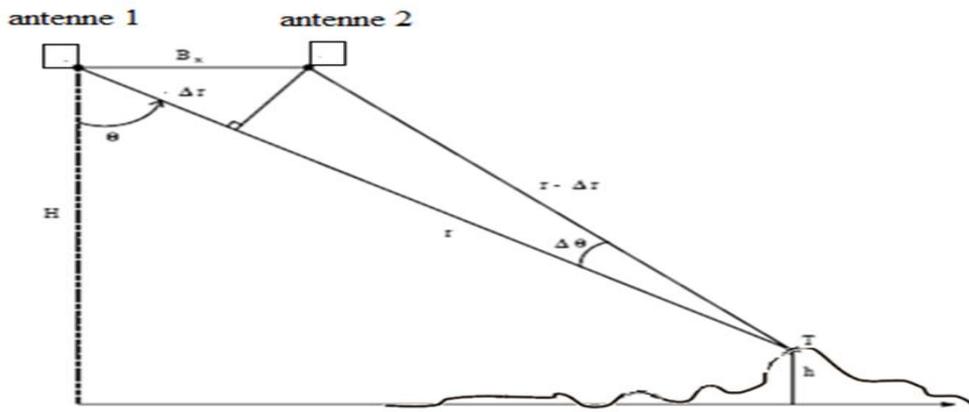


Figure I.7 : L'altitude de point imagé et la différence de trajet. [1]

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  $ha$  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).

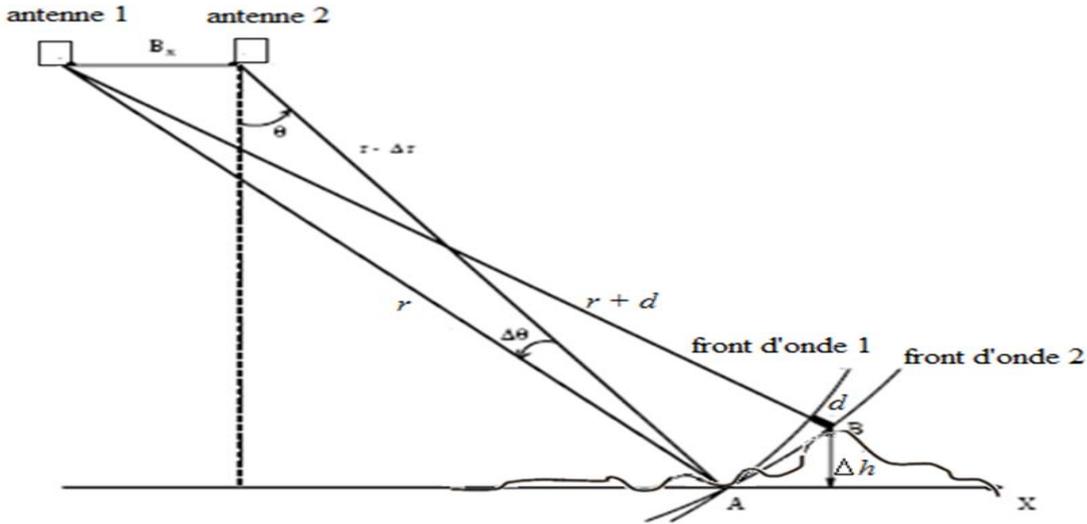


Figure I.8 : La différence d'altitude et la différence de la distance radiale. [1]

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.

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

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

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

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 Baseline, et inversement proportionnelle avec la hauteur de l'orbite (altitude du porteur).

Exemple : ERS-1,  $\lambda=5.66$  cm,  $r = 800$ km,  $\theta=23$ ,  $Bx = 1300$ 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 et I.2). [1]

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

La figure (I.9) montre un exemple de l'image d'amplitude, les images de phase singulière et

L'interférogramme générés par l'inSAR.

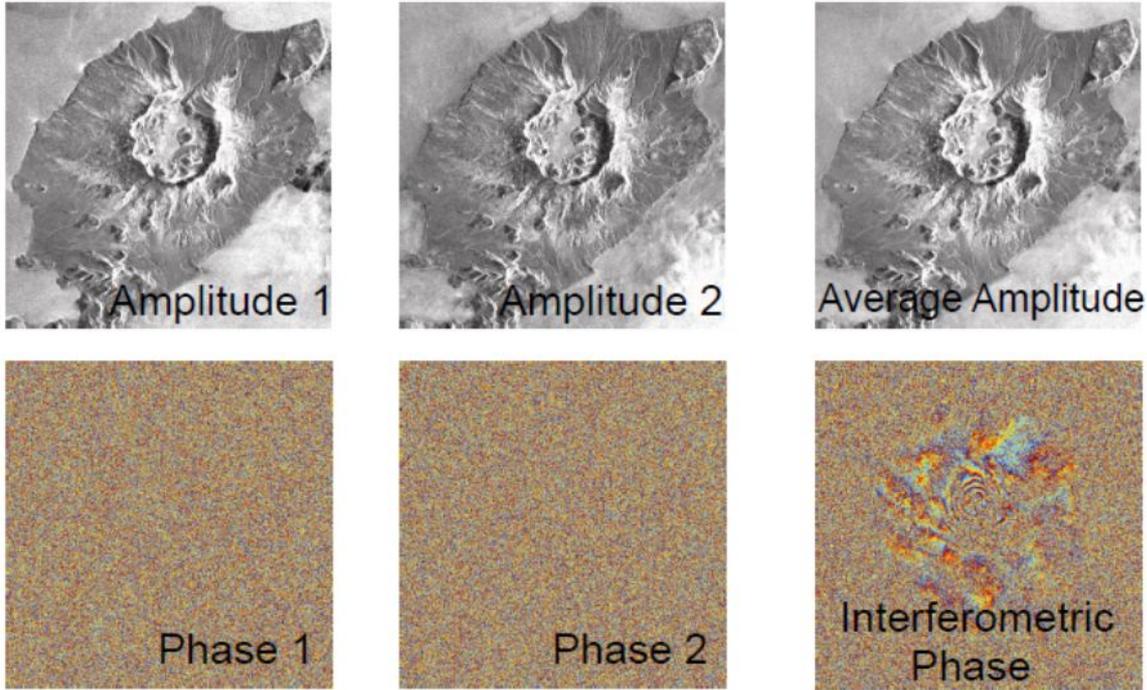


Figure I.9: Images inSAR. [38]

## 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 :

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

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.

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

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

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

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

### I.5.1 Décorrélation spatiale

La Baseline 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 [6] :

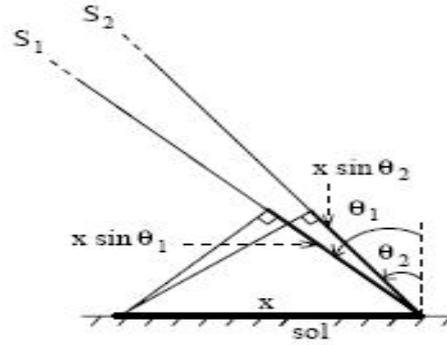


Figure I.10 : Les angles d'incidence et la décorrélation spatiale. [1]

Le coefficient de décorrélation spatial vaut : [1-6]

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

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 I.8). [12]

Alors l'équation (I.15) en fonction de la Baseline  $Bx$  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 [5] 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  $\sigma_v$ . [11]

Le coefficient de décorrélation temporelle vaut:

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

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 préfiltrer les bruits, minimiser la taille immense des images et faire une correction géométrique (recalage) de la dé-corrélation spatiale. [1]

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

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

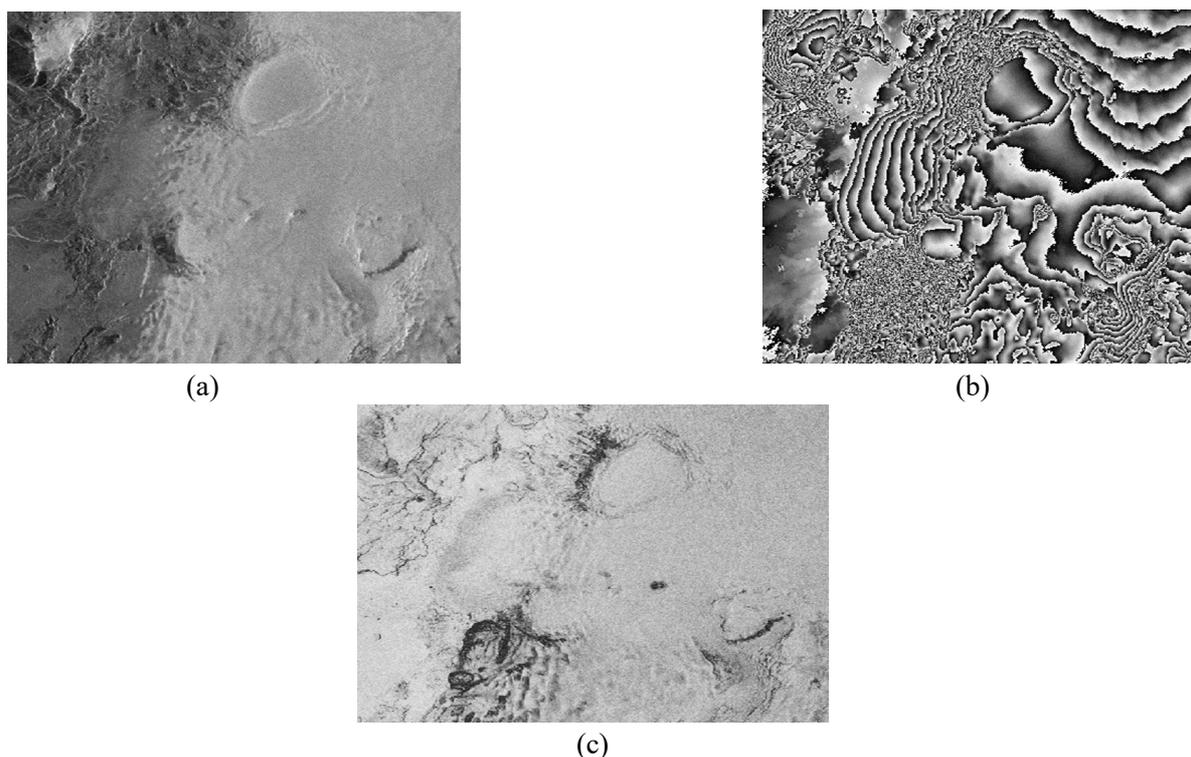
$$A(i', j') = \frac{1}{MN} \left| \sum_{ij}^{MN} S_1(i, j) S_2^*(i, j) \right| \quad (I.19)$$

Elle se diffère de celle de SAR seulement par le moyen nage, c'est pour cela qu'il est mentionné dans la figure (I.9) « avec 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 utiliser pour le déroulement de phase.[1]

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. [1]

## I.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons essayé de donner une brève aperçus 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. Cette étude est considérée comme un Background suffisant avant passer au développement d'une interface graphique qui nous permet l'analyse et la comparaison entre deux algorithmes de déroulement de phase, qui constituent le but de notre travail et qui font l'objet des prochains chapitres.

## **Chapitre II :**

# **Etat de l'art sur quelques méthodes de reconstruction**

## II.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter la chaîne de traitement d'image inSAR (le déroulement de phase), cette information est mesurée dans l'intervalle  $[-\pi, \pi]$ . La phase  $\phi$  donnée par l'interférogramme représente la phase interférométrique roulée (*Wrapped-Phase*), c'est-à-dire connue modulo  $2\pi$ , et tant que l'obtention de l'altitude exacte du point imagé est proportionnelle à la phase réelle absolue cette phase doit être reconstruite par une opération inverse non linéaire pour avoir une phase déroulée (*Unwrapped -phase*).

Nous allons voir l'utilité de déroulement avec ses formulations de base, commençant une description mathématique détaillée de déroulement qui sera présentée, et par cette description une méthode d'ajustement sera ainsi déduite. En suite en passe à la présentation d'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.

## II.2 Le déroulement de phase

Le principe de déroulement de phase consiste à trouver une estimation de la phase absolue pour chaque cible (pixel) à partir de la phase mesurée. [14]

Un exemple de déroulement unidimensionnel est donné par la Figure (II.1) :

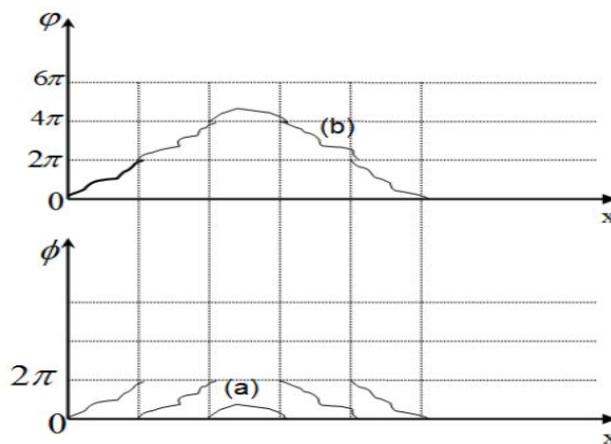


Figure II.1: (a) Phase roulée (mesurée), (b) Phase déroulée (déduite). [14]

Il existe différentes méthodes permettent [15] l'estimation de la phase déroulée. On retrouve essentiellement trois approches :

- L'approche locale, elle est basée sur un déroulement des phases de proche en proche selon un parcours d'intégration.
- L'approche globale qui consiste à minimiser des fonctions d'erreurs globales.
- L'approche mixte (hybride). Les méthodes de cette approche sont basées sur la minimisation d'une énergie d'interaction dans un voisinage approprié. Ces méthodes sont itératives et font appel à des algorithmes d'optimisation déterministe heuristiques ou méta heuristiques [16].

## II.2.1 Formulations

Dans ces techniques, la phase n'est pas observée directement mais calculée à partir d'un signal complexe. Par conséquent, les valeurs mesurées sont enveloppées dans un l'intervalle de  $[-\pi, \pi]$  et le signal observé présente  $2\pi$  saute. Le déroulement de phase est la procédure qui nous permet de supprimer pratiquement ces discontinuités pour obtenir la phase actuelle image [17].

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 :

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

Avec

$$w(\vartheta_{i,j}) = \text{mod}\{[\pi + \vartheta_{i,j}], 2\pi\} - \pi \quad (\text{II .2})$$

Et  $k \in \mathbb{Z}$

Cette opération est non-linéaire et elle possède les propriétés suivantes: [13].

$$\begin{aligned} f &= w^{-1}wf \\ wf &= ww^{-1}f \\ w^{-1}f &= w^{-1}w^{-1}f \\ \sin(f) &= \sin(wf) \end{aligned} \quad (\text{II .3})$$

Le déroulement de phase est un problème, s'il n'y a pas d'autres informations supplémentaires telle qu'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 :

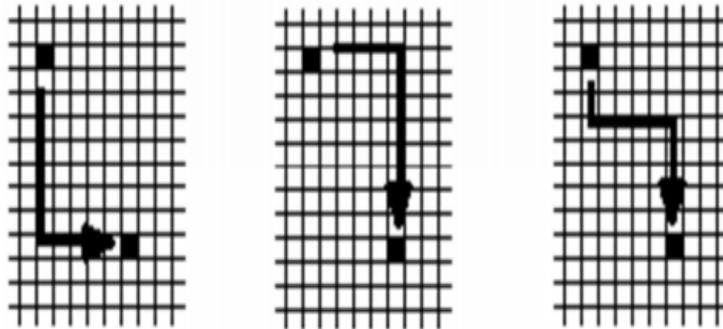


Figure II.2 : Problème non-unicité de déroulement selon le parcours suivi et le point de départ. [13]

La figure (II.2) 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. [13]

## II.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 frange. [13]

### II.3.1 Traitements 1D

Dans une dimension, le processus de déroulement est simple puisqu'il n'y a qu'un seul "chemin" possible et une simple intégration peut récupérer la phase réelle. Cependant, cela ne fonctionne que

lorsque la condition de douceur Itoh [17] est satisfait, c'est-à-dire lorsque la valeur absolue du gradient de phase est inférieure ou égale à  $\pi$ . La présence de bruit ou de discontinuités pourrait violer cette condition, provoquant des erreurs de déroulement.

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

$$k(x_i) = \begin{cases} \sum_{a=1}^i k_a(x_a); & 1 < i \leq N \\ 0; & i = 1 \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

On définit la fonction  $k_i(x_i)$  pour chaque  $x_i \neq x_1$ , par :

$$k_i(x_i) = \begin{cases} 0, & |Q_m(x_i) - Q_m(x_{i-1})| \leq \pi \\ +1, & |Q_m(x_i) - Q_m(x_{i-1})| > \pi \text{ et } Q_m(x_{i-1}) > Q_m(x_i) \\ -1, & |Q_m(x_i) - Q_m(x_{i-1})| > \pi \text{ et } Q_m(x_{i-1}) < Q_m(x_i) \end{cases} \quad (\text{II.5})$$

Alors chaque pixel  $x_i$  est attribué à 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. [13]

### II.3.2 Traitement 2D

La plupart des méthodes existantes étendent ce principe d'intégration à deux dimensions 2D et sont dénommées algorithmes de suivi de chemin. Le problème en 2D est la propagation d'erreur lorsque la condition de lissage est violée. Cela se produit parce que les résultats d'intégration dépendent du chemin d'intégration choisi et des points de début et de fin. Le défi consiste à distinguer les sauts dus à l'enroulement de phase de ceux dus au bruit et aux discontinuités dans la fonction réelle. Plusieurs travaux ont considéré des informations supplémentaires telles que des cartes de qualité de pixel [19] pour mettre à jour de manière appropriée le chemin d'intégration. Cependant, les algorithmes ont quelques difficultés à gérer des niveaux de bruit élevés.

La matrice d'attribution des nombres de cycle est :

$$k(x_i, y_j) = \begin{cases} \sum_{a=1}^i k_a^E(x_a, y_j) + \sum_{B=1}^j k_B^I(x_i, y_B); & 1 < i \leq N \text{ et } 1 < j \leq M \\ 0; & i = 1 \text{ et } j = 1 \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

Où :

$$k_i^E(x_i, y_j) = \begin{cases} 0, & |Q_m(x_i, y_j) - Q_m(x_{i-1}, y_j)| \leq \pi \\ 1, & |Q_m(x_i, y_j) - Q_m(x_{i-1}, y_j)| > \pi \text{ et } Q_m(x_{i-1}, y_j) > Q_m(x_i, y_j) \\ -1, & |Q_m(x_i, y_j) - Q_m(x_{i-1}, y_j)| > \pi \text{ et } Q_m(x_{i-1}, y_j) < Q_m(x_i, y_j) \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

$$k_i^I(x_i, y_j) = \begin{cases} 0, & |Q_m(x_i, y_j) - Q_m(x_i, y_{j-1})| \leq \pi \\ 1, & |Q_m(x_i, y_j) - Q_m(x_i, y_{j-1})| > \pi \text{ et } Q_m(x_i, y_{j-1}) > Q_m(x_i, y_j) \\ -1, & |Q_m(x_i, y_j) - Q_m(x_i, y_{j-1})| > \pi \text{ et } Q_m(x_i, y_{j-1}) < Q_m(x_i, y_j) \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

### II.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. [13]

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

Les méthodes de déroulement de phase basées sur (*Branchcut*) tentent d'identifier ces lignes et de les exclure du chemin d'intégration ou les utiliser pour corriger les estimations de différence de phase le long de la coupe de branches en ajoutant des multiples entiers de  $2\pi$  / échantillon avant l'intégration. [21]

### II.4.1.1 La méthode de Goldstein

L'exécution de l'algorithme se déroule comme suit : [22]

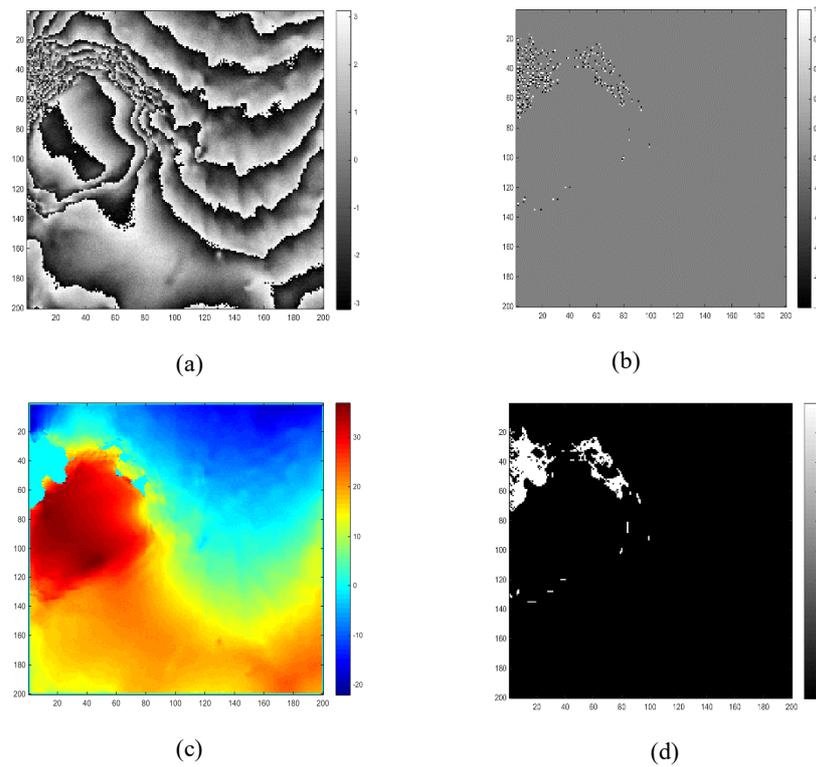
1- Générer la mappe des résidus.

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 apparaît 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. [13]

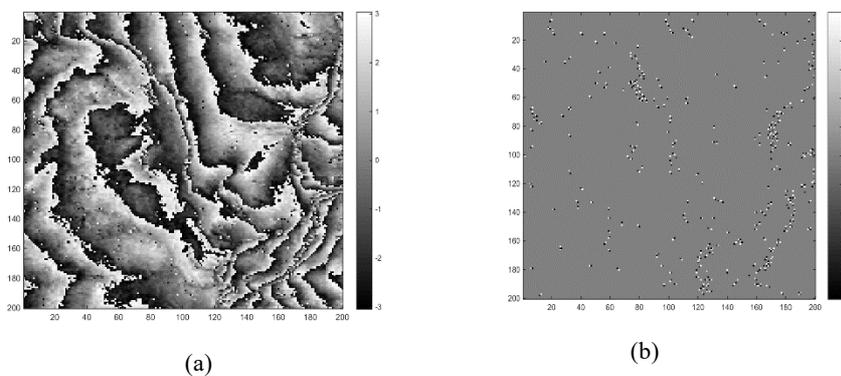
3- (*Flood-Fill*) cette étape pour évitant toutes les branches et les régions isolées.

Les figures (II.3,4 et 5) ci-dessous représente trois interférogrammes réelles, le première choisi est fournies par l'ES1(ESA), il s'agit d'une région de Vatnajökull, prise le 31 décembre 1995, sur l'orbite 23315,et le taux de résidus 0.0112(%), deuxième, il s'agit d'une région de Chilcotin, prise le 11 avril 1995, le taux de résidus 0.0151(%), et la ligne de base 42(m),le troisième, il s'agit d'une région de Sardaigne , prise le 02 Août 1991, le taux de résidus 0.0621(%),sur l'orbite 241, et la ligne de base 126(m) , et la figure (II.6 ) une image simulée.

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.



**Figure II.3 :** Test d'algorithme de déroulement Goldstein pour un interférogramme réel. (a) l'interférogramme réel, (b) la mappe des résidus, (c) l'image de phase déroulée, (d) la mappe de branches.



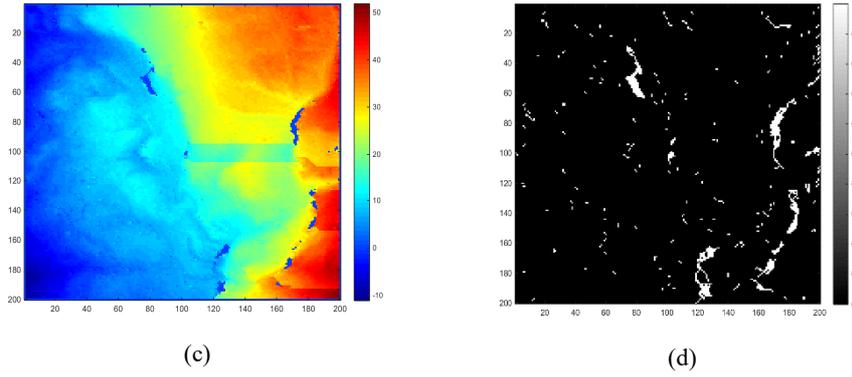


Figure II.4 : Test d'algorithme de déroulement Goldstein pour un interférogramme réel. (a) l'interférogramme réel, (b) la mappe des résidus, (c) l'image de phase déroulée, (d) la mappe de branches.

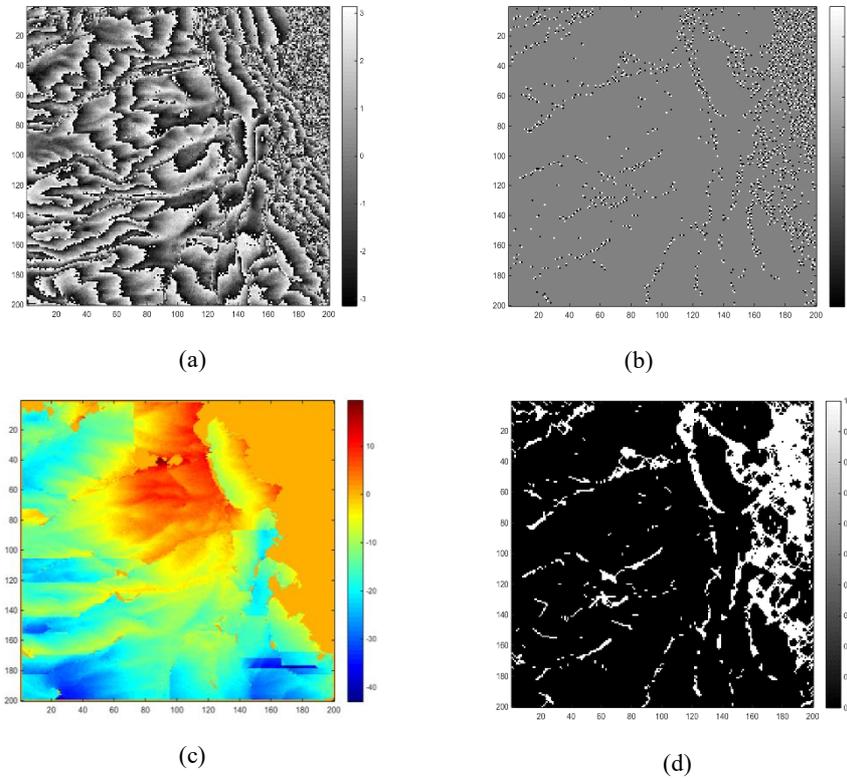
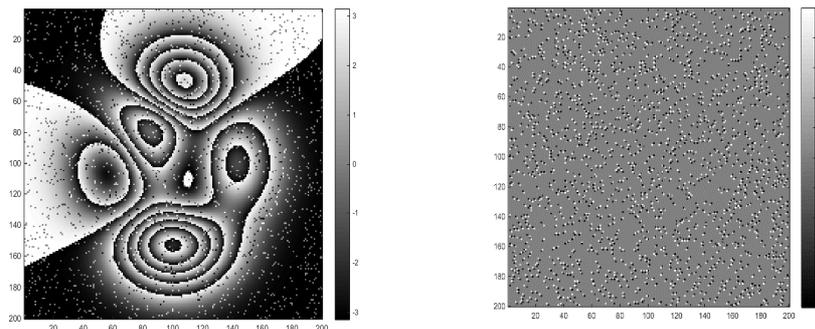
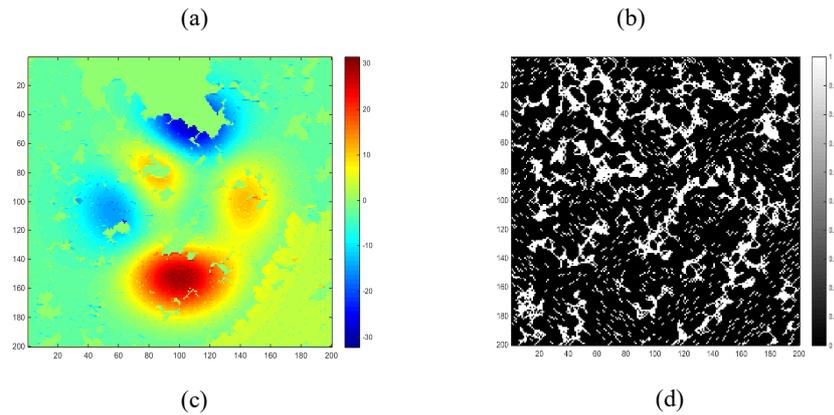


Figure II.5: Test d'algorithme de déroulement Goldstein pour un interférogramme réel. (a) l'interférogramme réel, (b) la mappe des résidus, (c) l'image de phase déroulée, (d) la mappe de branches.





**Figure II.6 :** Test d'algorithme de déroulement Goldstein pour une image simulée, (a) l'image simulée, (b) la mappe des résidus, (c) l'image de phase déroulée, (d) la mappe de branches.

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

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

Le déroulement de phase par la qualité guidée est une approche appartient à la catégorie (*Path - Following*), elle est essentiellement basée sur la génération d'une mappe 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. [23]

Le processus d'obtention de la mappe 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 mappe guidant le filtrage d'interférogramme.

Dans ce cas nous nous trouvons face à deux possibilités d'utilisation :

- Une mappe de qualité définissant les grappes et les régions isolées résultant des branches qui contiennent des pixels de mauvaise qualité à n'est pas dérouler. [23]
- Une mappe de qualité définissant les régions saines et consistantes qui contiennent des pixels de bonne qualité à dérouler. [24]

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

### II.4.2.1 La méthode de Flynn

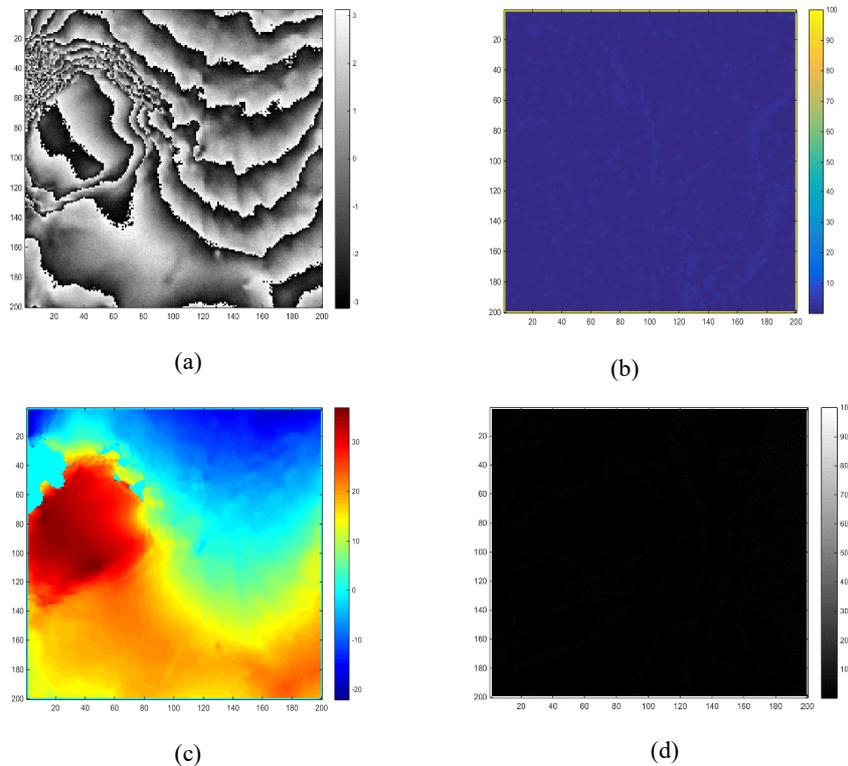
*Flynn* a proposé pour la première fois d'utiliser une mappe de qualité [23] pour couvrir les régions de grappe non-chargées (équivalentes aux branches de *Goldstein*). Par un masque, le masque qui couvre ces régions de mauvaise qualité devrait être de petite surface que possible pour garder les détails d'information de phase dans l'interférogramme et cela faisable uniquement si le taux des résidus n'est pas trop grand.

En résumé la méthode de Flynn suit les étapes suivantes :

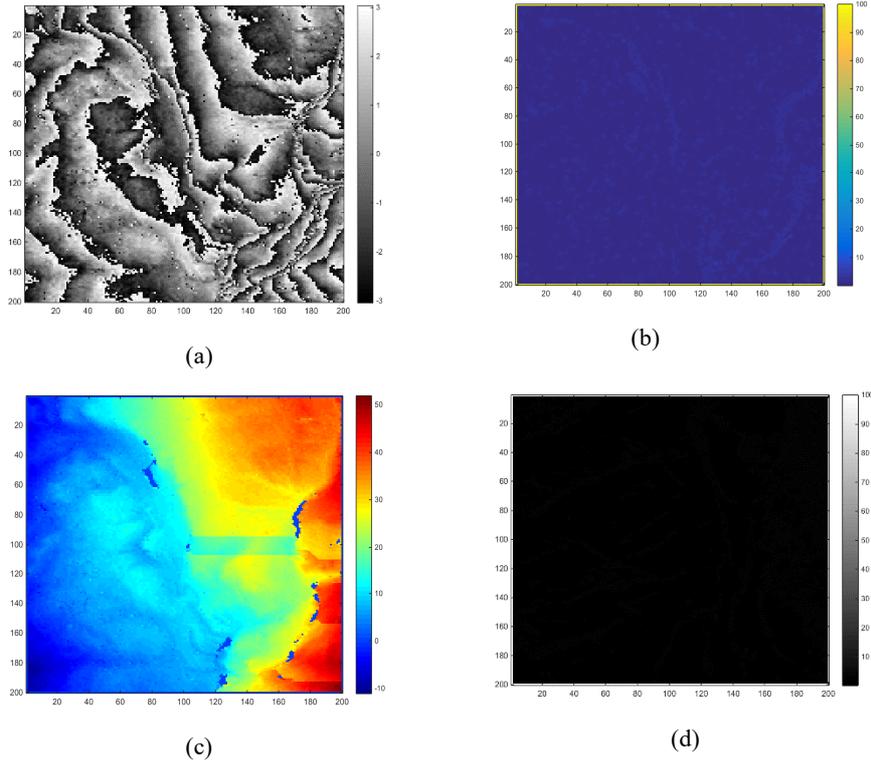
- 1- Générer la mappe des résidus et celle de qualité d'interférogramme avec (phase dérivative variance).
- 2- Tous les pixels résidus et ses voisins qui l'entourent se déclarent initialement comme graines pour le processus de (*Region-Growing*) et se mettent dans le masque initial.
- 3- Chercher parmi les voisins des pixels graines (sauf les résidus) ceux qui ont une qualité inférieure à un seuil prédéterminé.
- 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).
- 5- Le processus se termine quand toutes les composantes soient balancées.

Les figures (II.7,8 et 9)ci-dessous représente trois interférogrammes réel, le première choisi est fournies par l'ES1(ESA), il s'agit d'une région de Vatnajökull, prise le 31 décembre 1995, sur l'orbite 23315,et le taux de résidus 0.0112(%), deuxième, il s'agit d'une région de Chilcotin, prise le 11avril 1995, le taux de résidus 0.0151(%), et la ligne de base 42(m),le troisième, il s'agit d'une région de Sardaigne, prise le 02 Août 1991, le taux de résidus 0.0621(%),sur l'orbite 241,et la ligne de base 126(m), et la figure (II.10)une image simulée.

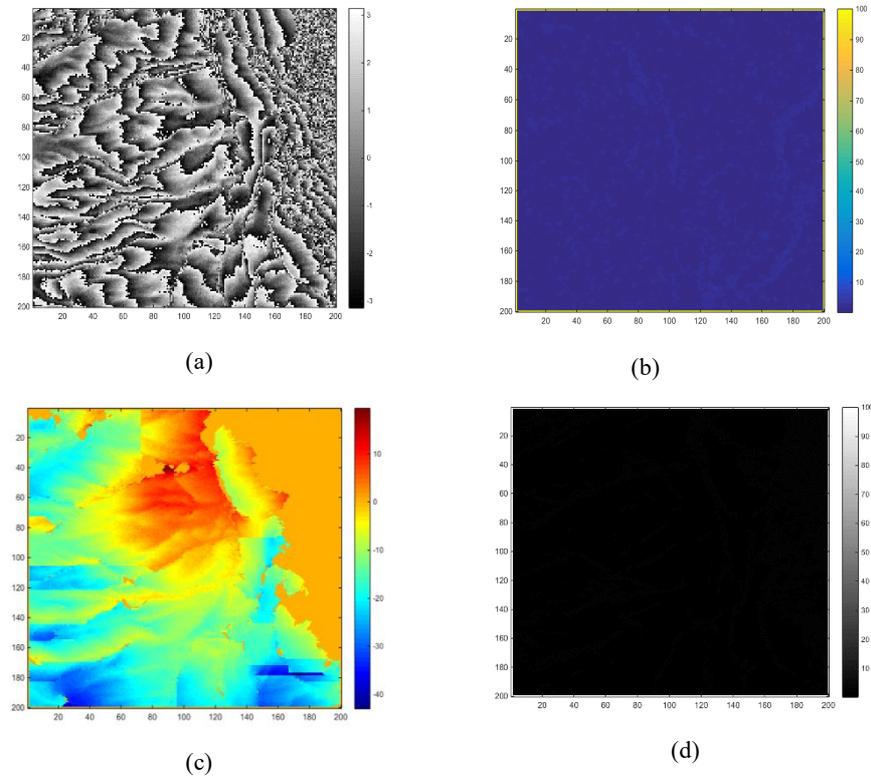
Nous remarquons que l'algorithme de *Flynn* est déroulé toutes les zones de l'image, (les régions qui auraient été isolées par l'algorithme de *Goldstein*).



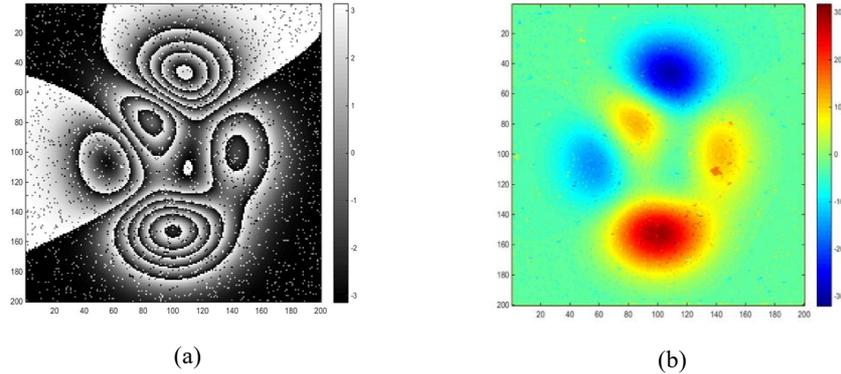
**Figure II.7 :** Test d'algorithme de déroulement de Flynn pour un interférogramme réel. (a) l'interférogramme réel, (b) im phase quality (avec couleur),(c) l'image de phase déroulée (d) im phase quality.



**Figure II.8 :** Test d'algorithme de déroulement de Flynn pour un interférogamme réel, (a) l'interférogamme réel, (b) im phase quality (avec couleur), (c) l'image de phase déroulée (d) im phase quality.



**Figure II.9:** Test d'algorithme de déroulement Goldstein pour un interférogamme réel, (a) l'interférogamme réel, (b) la mappe des résidus, (c) l'image de phase déroulée, (d) la mappe de branches.



**Figure II.10:** Test d'algorithme de déroulement de Flynn pour une image simulée. (a) image simulée, (b) l'image de phase déroulée.

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

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. [24]

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

Les méthodes MN (Minimum Norm) 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. [14]

## II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'état de l'art sur quelques méthodes de reconstruction avec des différentes méthodes de déroulement de phase, ce qui a permis de faire une étude suffisante pour comprendre les mécanismes de chaque approche avec les avantages et les inconvénients.

D'après cette étude nous pouvons constater que les approches PF (Path Flowing) fournissent des bonnes qualités d'image de phase par rapport aux approches MN (Minimum Norm) par ce que les inconvénients de c'est approches n'est qu'une estimation globale. En revanche les approches PF prennent plus de temps.

En comparant la méthode BC et QG nous pouvons constater que la méthode BC est plus rapide par rapport à QG mais son 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.

**CHAPITRE III :**

**Conception de l'interface  
graphique**

## III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons le développement d'une interface graphique en utilisant les GUIs (graphical user interface) de Matlab, pour le déroulement des images en utilisant les algorithmes des déroulements. Ce choix nous permettra de voir en mieux le déroulement des images. Plusieurs méthodes pour ce fait sont utilisées pour dérouler les images, dans notre travail on a utilisé deux algorithmes (Flynn et Goldstein). Des métriques sont utilisées pour évoluer la qualité des images déroulées.

## III.2 Interfaces graphiques

En informatique, une interface graphique (en anglais GUI pour graphical user interface) est un dispositif de dialogue homme-machine, dans lequel les objets à manipuler sont dessinés sous forme de pictogrammes à l'écran, de sorte que l'utilisateur peut utiliser en imitant la manipulation physique de ces objets avec un dispositif de pointage, le plus souvent une souris. [26]

## III.3 Objets graphiques

### III.3.1 Objet figure

Les objets Figure dans la création d'une interface graphique sont les conteneurs visibles où sont disposés tous les autres objets enfants. Ces objets sont couramment appelés « fenêtres ». Plusieurs objets Figure peuvent être ouverts simultanément et peuvent éventuellement communiquer entre eux. [26]

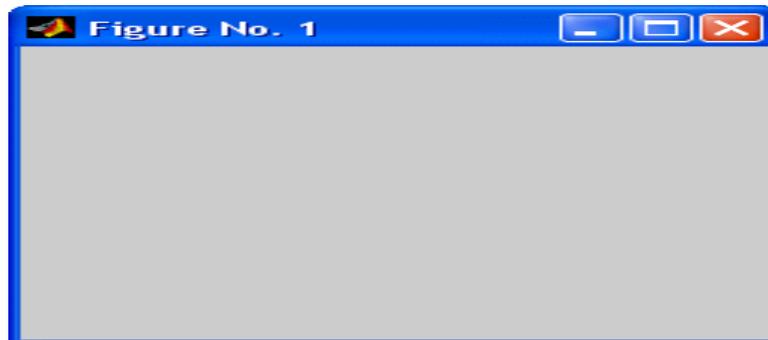


Figure III.2: affichage de figure sur matlab.

### III.3.2 Objets Axes

Les objets Axes sont créés par la fonction **axes**. Ce sont les zones de traçages des graphiques 2D ou 3D. Les résultats de calcul ou de simulation y sont affichés et peuvent y être manipulés (zoom, rotation...). Une Figure peut posséder plusieurs objets Axes simultanément. On utilise alors la fonction **subplot** pour gérer la position de ces objets. [26]

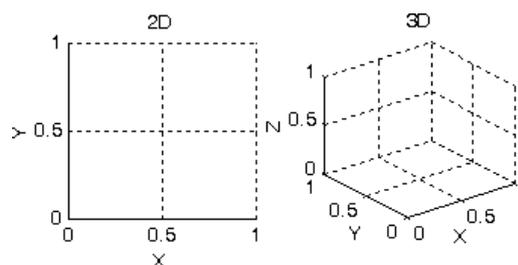


Figure III.2 : Objet axes.

### III.3.3 Objets GUI

Au même niveau hiérarchique que les objets Axes, on trouve les objets GUI (graphical User Interface). Certains de ces objets (comme les boutons, les menus, les cases à cocher) permettent à l'utilisateur d'interagir avec l'interface graphique grâce à la souris ou au clavier. D'autres objets (comme les panels, les tables...) servent à la mise en forme de l'interface graphique. [25]

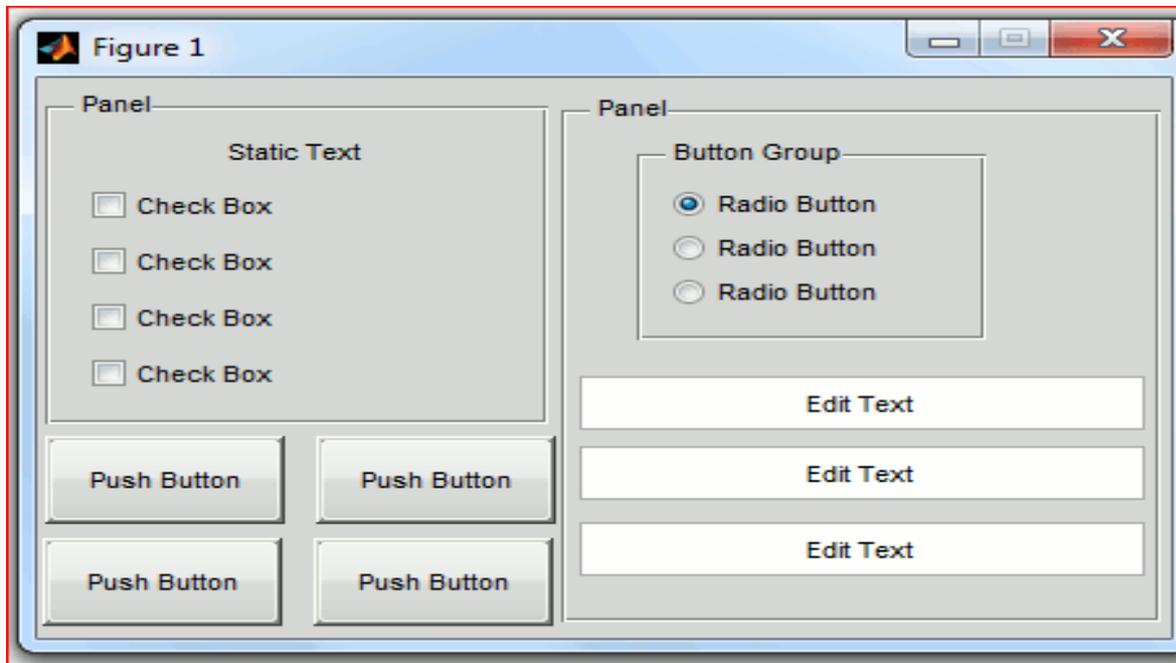


Figure III.3 : Exemple d'une interface graphique.

## III.4 Les deux algorithmes sur des images simulées et réelles étudiées

### III.4.1 Algorithmes de Flynn

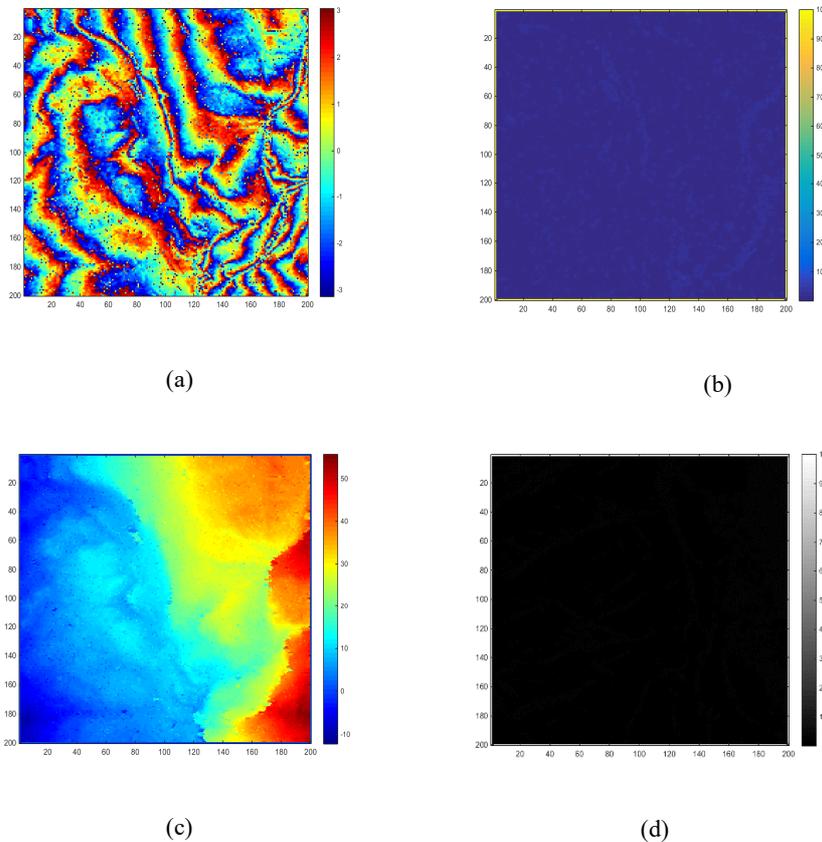
Flynn a proposé pour la première fois d'utiliser une mappe de qualité [23] pour couvrir les régions de grappe non-chargées (équivalentes aux branches de Goldstein) par un masque, le masque qui couvre ces régions de mauvaise qualité devrait être de petite surface que possible pour garder les détails d'information 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 (Foold-Fill) en évitant tous les pixels de masque. En résumé la méthode de Flynn suit les étapes suivantes :

- 1- Générer la mappe des résidus et celle de qualité d'interférogramme avec (phase dérivative variance).
- 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.
- 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).
- 5- Le processus se termine quand toutes les composantes soient balancées. [13]

La figure (III.4) défini dans chapitre (II).



**Figure III.4:** Test d'algorithme de déroulement de Flynn pour un interférogramme réel (a) l'interférogramme réel (b) image phase qualité (avec couleur), (c) l'image de phase déroulée (d) image phase qualité.

### III.4.2 La méthode de Goldstein

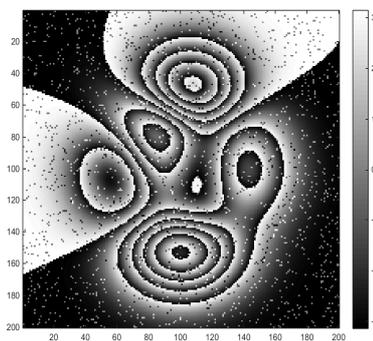
L'exécution de l'algorithme se déroule comme suit :

- 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

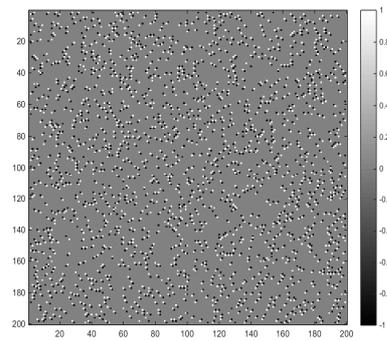
engendrée. Mais certaines erreurs locales (régions distordues sans déroulement) peuvent se produire. Bien sûr les pixels des extrémités de chaque branche sont de signe opposé donc cette branche représente la discontinuité de phase. Le but est de choisir les branches de telle manière de minimiser la longueur totale des branches et par conséquent minimiser les discontinuités et les régions restées sans déroulement.

- 3- 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. [13]
- 4- 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 centraux 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 or les grappes de branches et toutes les branches sont balancées.
  - c- S'il y a des résidus restants 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.

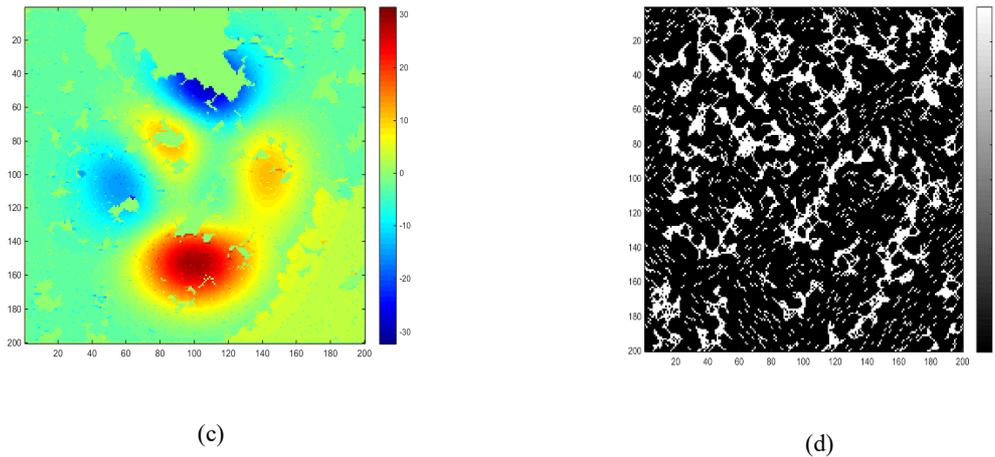
1-Finalement l'intégration des gradients s'exécute en évitant toutes les branches et les régions isolées, cette étape est appelée (Flood-Fill) c.-à-d. un remplissage simulé par un écoulement inondant. [13]



(a)



(b)



**Figure III.5 :** Test d'algorithme de déroulement Goldstein pour une image simulée, (a) l'image simulée, (b) la mappe des résidus, (c) l'image de phase déroulée, (d) la mappe de branches.

### III.4.2 Comparaison des deux algorithmes

- 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.
- L'algorithme de Flynn est déroulé toutes les zones de l'image, (les régions qui auraient été isolées par l'algorithme de Goldstein).
- le temps d'exécution de l'algorithme de Goldstein est aussi court que 20 secondes.
- le temps d'exécution de l'algorithme de Flynn est un peu plus de 60 secondes.
- Plus la volatilité est élevée, plus le résultat est mauvais de déroulement (l'algorithme de Goldstein).
- Plus la volatilité est élevée, plus le résultat est presque bon de déroulement (l'algorithme de Flynn).
- la méthode de Goldstein est plus rapide en que l'autre algorithme proposé par Flynn.

### III.4.4 Définition du Types des images étudiées

Il existe trois types d'image : les images matricielles, les images vectorielles et les fichiers de logiciel de traitement d'images. Chacun de ces types est utilisé et créé de différente façon, il est donc important de prendre du temps pour apprendre ces différences. [29] Dans notre cas, nous avons utilisé les images de format PNG (**Portable Network Graphics**) : est un format d'image, ce format est agréable car il permet notamment de pouvoir mettre des fonds transparents. [29]



Image simulée



Int1



Int2



Int3

**Figure III.6 :** Les images utilisées pour le déroulement, une image simulée, et (Int1, Int2 et Int3) des interférogrammes réelles.

**Table III.1:** les inforamation sur les inerférogrammes utliseés.

	Région imagée	Prise sur	Orbite	Ligne de base (m)	Taux de résidus (%)
Int1	Sardaigne	2Août, 1991	241	126	0.0621
Int2	Chilcotin	11Avril, 1995	Noun fourni	42	0.0151
Int3	Vatnajökull	31Décembre, 1995	23315	Noun fourni	0.0112

Image simulée: est une formée par l'étude simulée de l'interférence entre les transducteurs, de la propagation physique et temporelle.

Interférogramme: est une image d'un emplacement géographique. .

### III.4.5 Nature des bruits ajoutés aux images

Le bruit est une dégradation dans l'image, où cette dégradations est causée par une certaine perturbation purement externe à titre d' exemples on peut dire que parfois on envoie une image via une voie électronique d'un endroits à un autre en faisant appel à un satellite ou d'autre moyens de transmission comme le câble réseau, on constate que ces erreurs sont très clair sur l'image, de différentes manière concernant le type de cette perturbation, donc on tombe dans l'obligation de bien connaître les types de ces erreurs pour pouvoir réduire les effets[25]. Dans ce travaille on utilisé le bruit **Poivre & Sel**, parfois une forte perturbation soudaine tel que les turbulences atmosphériques, les nuages et les foudres dans le signal peut causer cette dégradation. [25]

### III.5 Interfaces graphiques développées

Le développement des interfaces graphiques peut être séparé en deux parties :

- Gestion de la mise en place et des propriétés des objets.
- Programmation des interactions avec les objets.

Il existe deux méthodes de développement des interfaces graphiques sous MATLAB. La première utilise un outil graphique dédié et la seconde nécessite de programmer entièrement à la main. Nous allons donc aborder chaque méthode dans ce chapitre en l'expliquant avec illustration d'exemple simple. Pour ce faire, nous allons prendre l'exemple d'une interface graphique contenant un objet Figure, un objet Axe et un objet Uicontrol de type Pushbutton comme le montre la figure ci-dessous. [27]

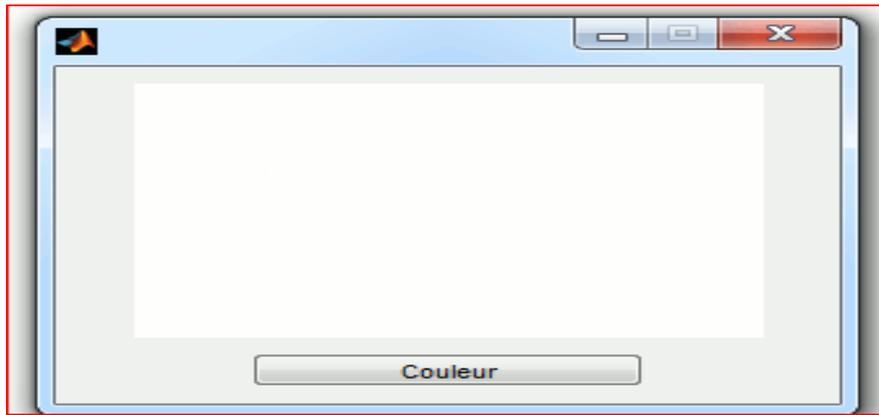


Figure III.7:exemple d'une interface.

Dans ns cette interface lorsque l'utilisateur clique sur l'objet Pushbutton couleur, l'objet axes change de couleur de façon aléatoire.

### III.5.1 Description de l'interface graphique

Le GUIDE est un outil graphique qui regroupe tout ce dont le programmeur a besoin pour c réer une interface graphique de façon intuitive [25].En tapant GUIDE dans fenêtre « MATLAB command » on obtient la figure (III.8).

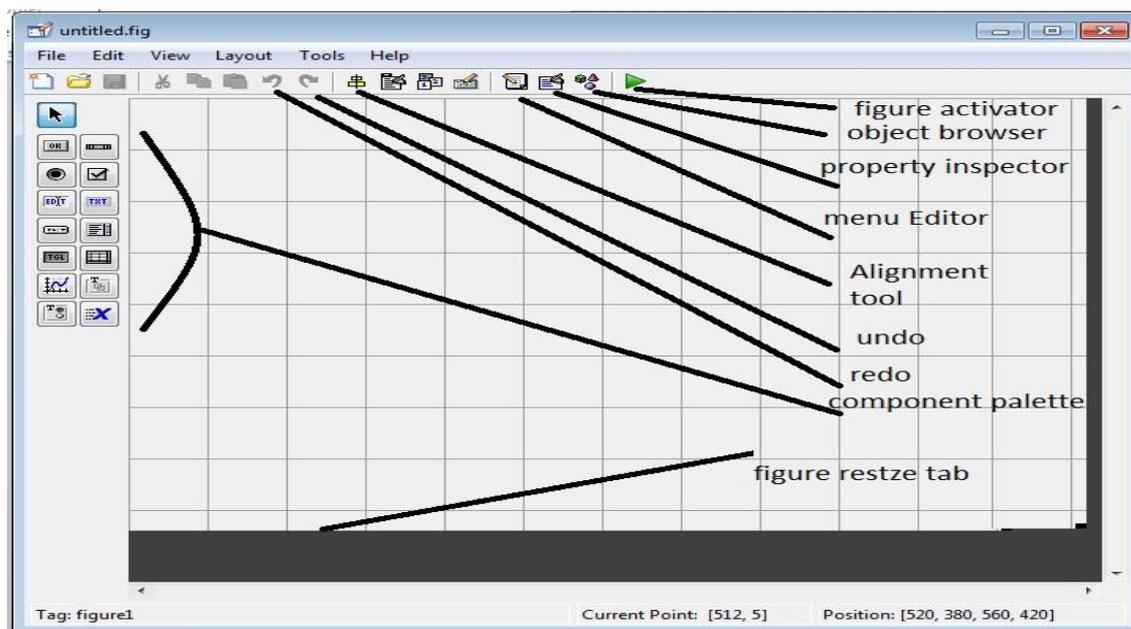


Figure III.8: La fenêtre d'une interface graphique.

Le placement des objets est réalisé par sélection dans la boite à outils, mise en place et mise à dimension à la souris. Un double-clic sur chaque objet permet de faire apparaître un menu avec les propriétés de cet objet. Leur modification et l'aperçu de ces modifications sont immédiats. Un fichier.fig (non éditable) contenant les objets graphiques (Figure, Axes et Pushbutton) et un fichier.m. [27]

### III.5.2 Présentation des différentes fenêtres de l'interface

Matlab permet à l'utilisateur de programmer des interfaces graphiques interactives afin de présenter ses résultats. Les interfaces graphiques réalisables restent relativement simples. Une interface graphique comprend des menus, des boutons, des "ascenseurs", des cases à cocher, des listes de choix, des zones de texte. [28]

- Les notions principales d'une interface graphique sont :
- Les divers objets graphiques,
- Auxquels sont attribués des noms symboliques ;

La figure (III.9) montre la fenêtre principale du GUI.

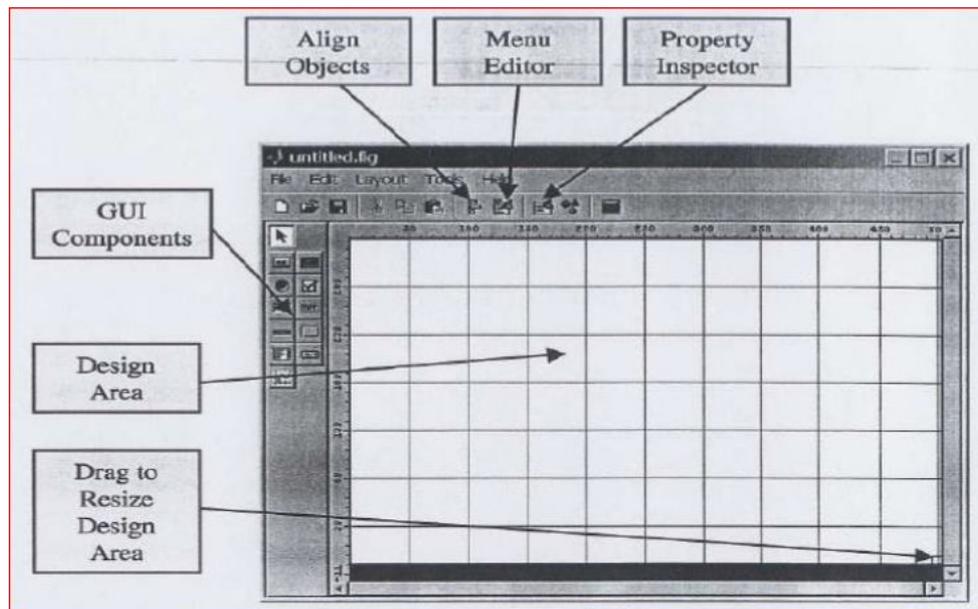


Figure III.9:fenêtre principale de GUI.

Un double-clic sur un objet permet de faire apparaître le PropertyInspector où les propriétés des objets sont facilement éditables. Leurs modifications et la visualisation de ces modifications sont immédiates. [28]

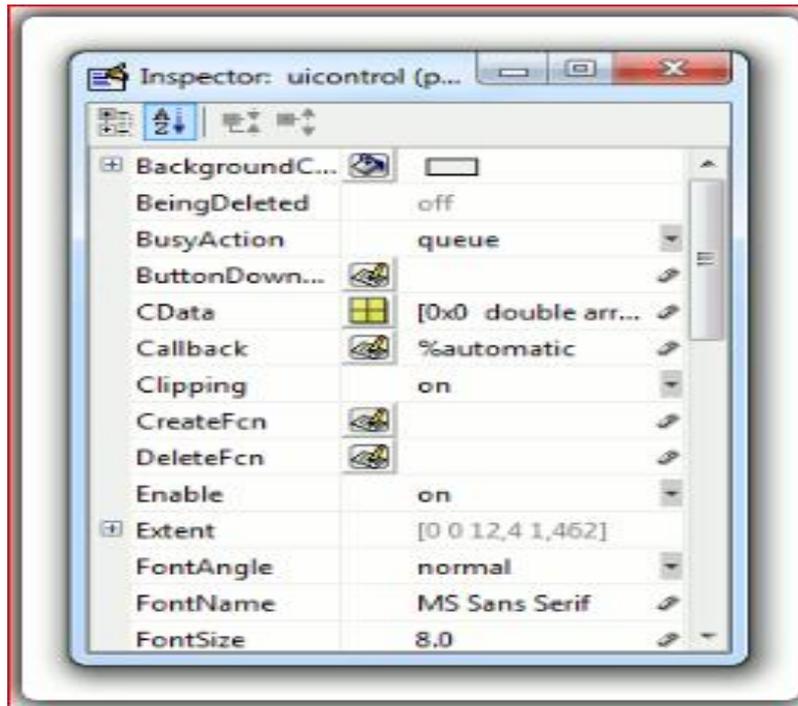


Figure III.10: Property Inspector d'un button.

Le GUIDE possède également des outils pour gérer l'alignement des objets et pour créer des barres d'outils ou des menus. Une fois l'interface graphique terminée, son enregistrement donne deux fichiers portant le même nom mais dont les deux extensions sont **fig.m**.

Le fichier .fig contient la définition des objets graphiques (positions et propriétés). Ce fichier peut être ouvert ultérieurement avec le GUIDE pour modifier les objets graphiques.

Le fichier .m contient les lignes de code qui assurent le fonctionnement de l'interface graphique (actions des objets). Ce fichier peut être édité dans le MATLAB Editor pour y ajouter des actions à la main. C'est ce fichier qui doit être lancé pour utiliser l'interface graphique. [27]

### III.5.3 Structure de l'interface proposée

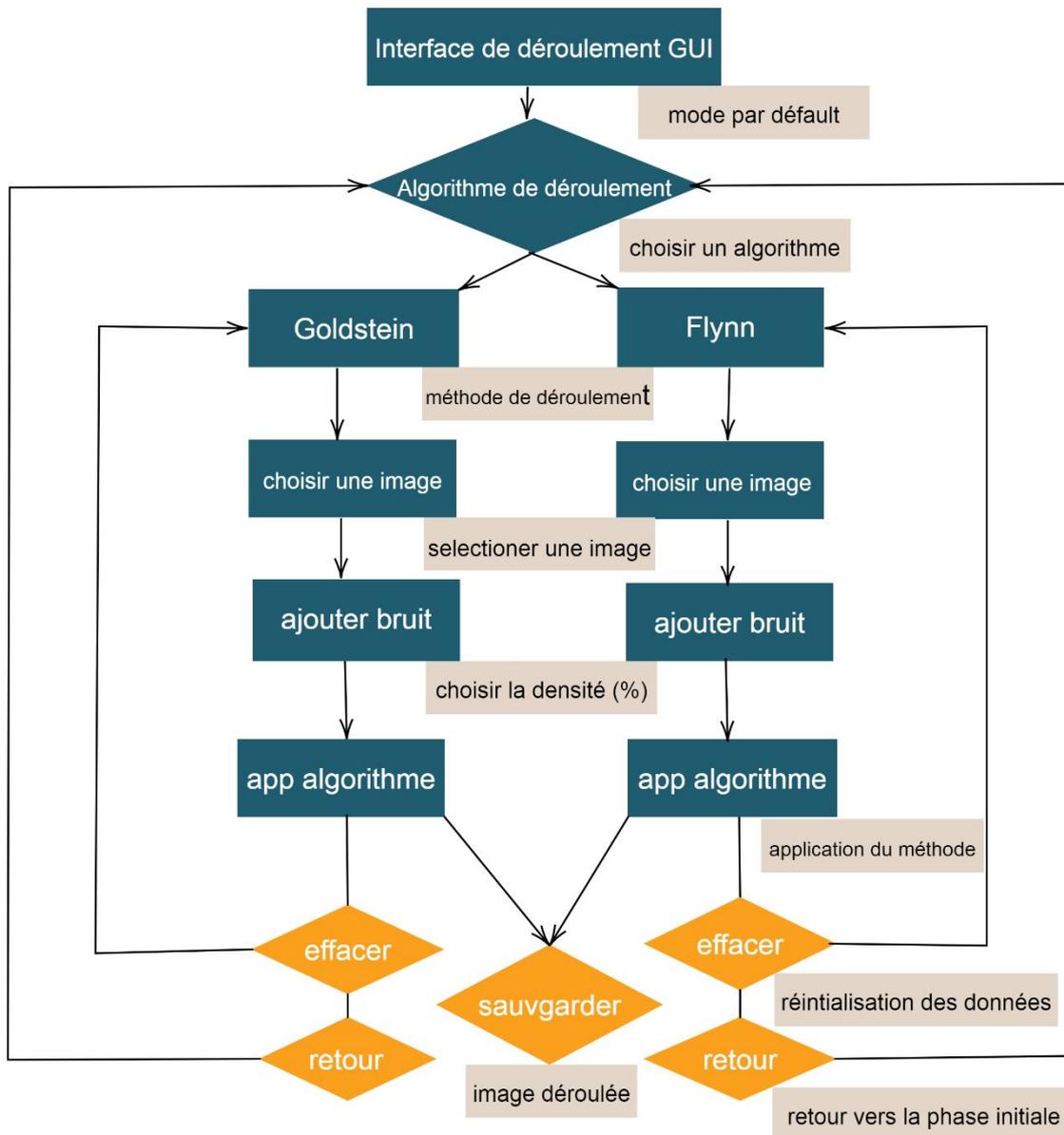


Figure III.11: Organigramme de l'interface graphique proposée.

### III.5.4 Exemple l'exécution

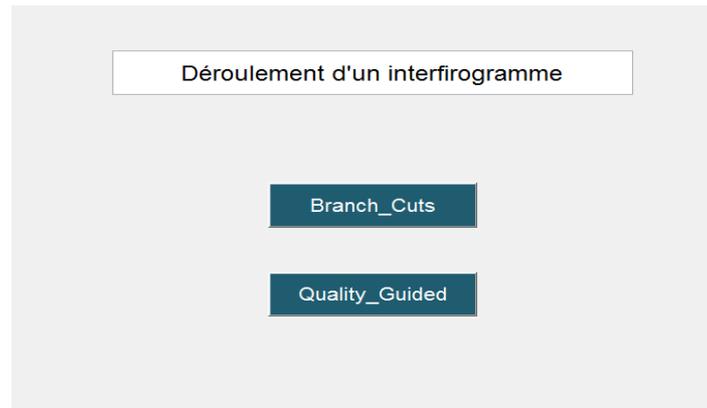


Figure III.12: l'interface graphique principale.

La figure ci-dessus représente l'interface principale, c'est l'interface d'entrée afin de faire un déroulement selon deux algorithmes.

**Branch\_Cuts** : Aller vers la sous interface (algorithme de Goldstein).

**Quality\_Guided** : Aller vers la sous interface (algorithme de Flynn).

### III.5.5 Résultats après exécution premier algorithme(Goldstein)

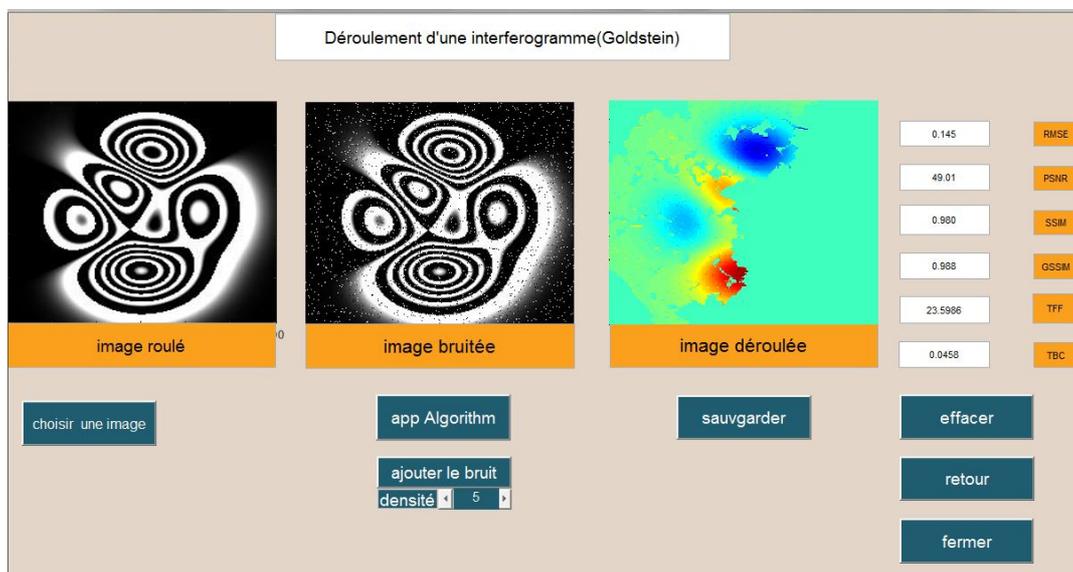


Figure III.13:Interface graphique représenté le déroulement d'une image simulée avec la méthode de Goldstein(BC).

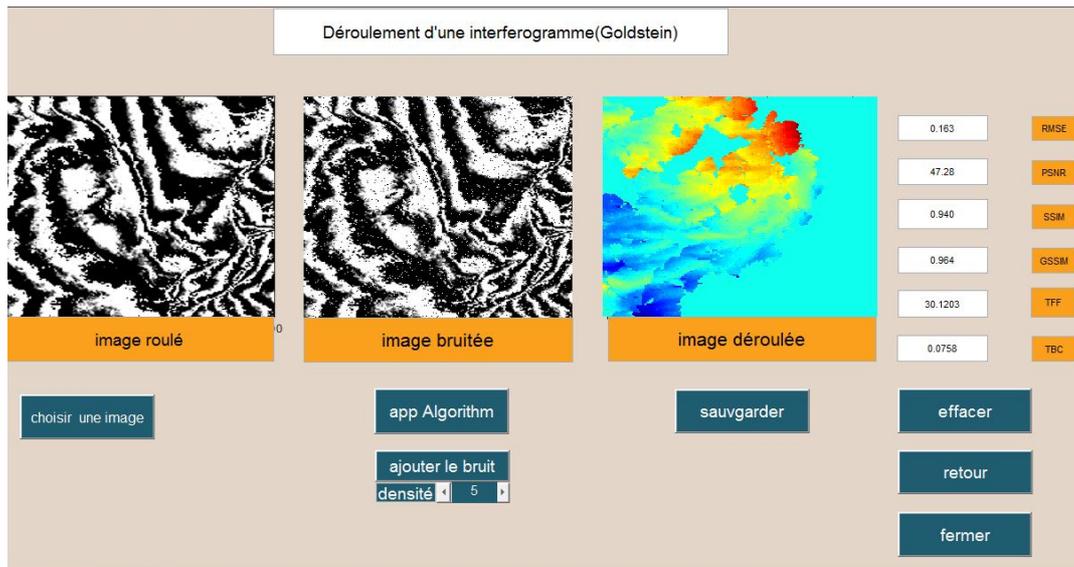


Figure III.14:Interface graphique représenté le déroulement d"interférogramme avec la méthode de Goldstein(BC).

### III.5.6 Résultats après exécution premier algorithme(Flynn)

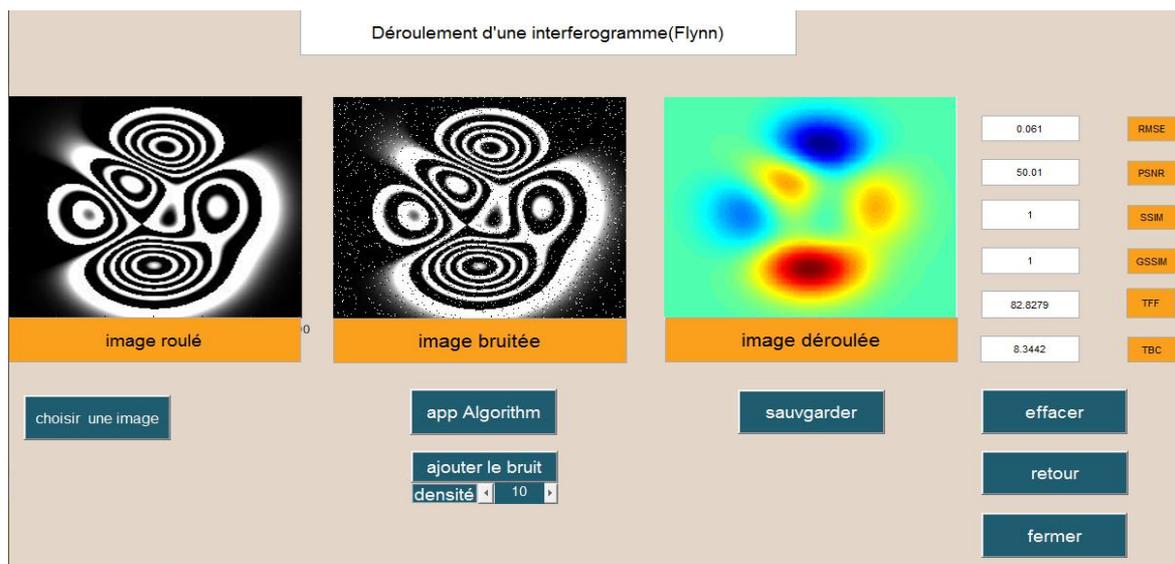


Figure III.15:Interface graphique représenté le déroulement d'une image simulée avec la méthode de Flynn(QG).

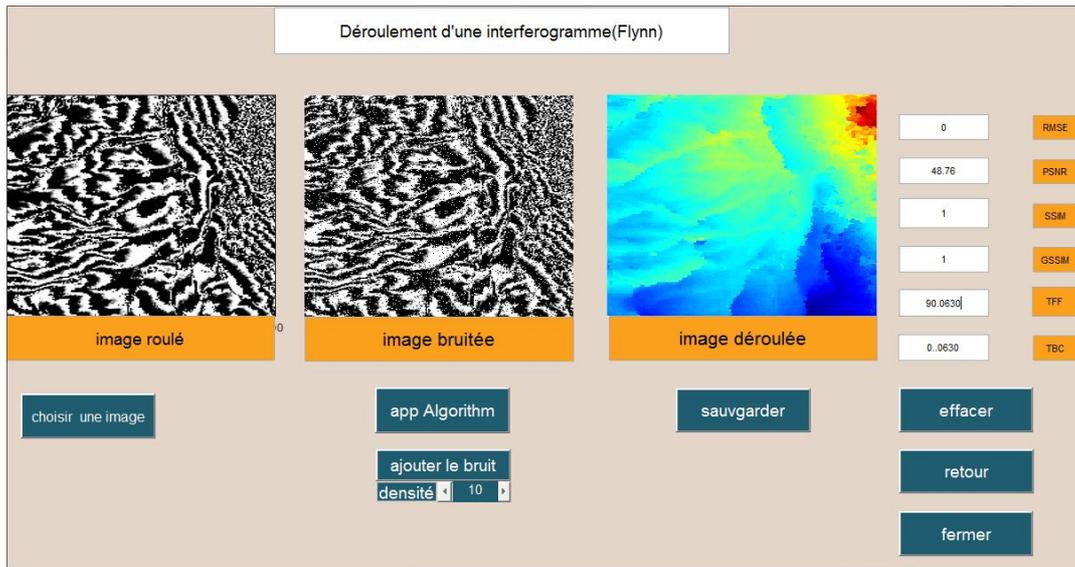


Figure III.16:Interface graphique représenté le déroulement d'interférogramme avec la méthode de Flynn(QG).

TFF: le temps d'exciton de déroulement.

TBC: le temps normalisé.

### III.6 Analyse comparative des performances

#### III.6.1 Analyse des performances

Pour l'analyse des performances et la comparaison des deux algorithmes, concernant la qualité des leurs résultats, les outils utilisés dans ce travail sont :

La racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (**RMSE**), le rapport crête signal sur bruit (Peak Signal to Noise Ratio, **PSNR**), (Indice de Similarité structurale) **SSIM**, Similitude structurale à base de gradient (**GSSIM**).

##### III.6.1.1 La racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)

Calcule La racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) entre l'image référence et image déroulée est donnée par. [34]

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \|X - \hat{X}\|^2} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X - \hat{X})^2} \quad (III.1)$$

Table III.2: valeurs RMSE pour le déroulement des interférogrammes (BC).

Bruit (%)	Image simulée						Interférogramme					
	0	2	5	10	15	20	0	2	5	10	15	20
RMS E	0	0.082	0.130	0.155	0.212	0.326	0	0.096	0.151	0.166	0.233	0.345

D'après les résultats du RMSE donnes par le tableau (III.2), en vois clairement l'influence du bruit sur la qualité des images que ça soit simules ou réels concernant l'algorithme Branch\_Cuts(BC).

Table III.3: valeurs RMSE pour le déroulement des interférogrammes (QG).

Bruit (%)	Image simulée						Interférogramme					
	0	2	5	10	15	20	0	2	5	10	15	20
RMS E	0	0	0	0.055	0.092	0.132	0	0	0	0	0.114	0.147

Et d'après les résultats du RMSE donnes par le tableau (III.3), en vois ici qu'après 50% de bruit quand commence de voir clairement l'influence du bruit sur la qualité des images que ça soit simules ou réels concernant l'algorithme Quality\_Guided(QG).

Les résultats des deux tableaux (III.2& III.3) sont graphiquement illustrés sur la figure (III.17).

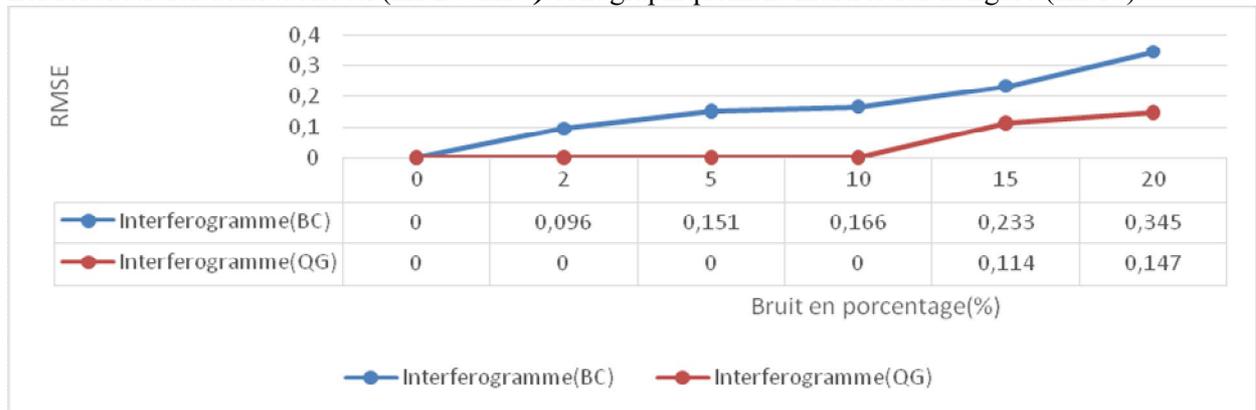


Figure III.17: Courbe graphique représenté les valeurs (RMSE) d'interférogramme déroulées avec les deux algorithmes (BC & QG).

D'après les résultats du RMSE représenté par la figure (III.17), en vois clairement l'influence du bruit sur la qualité des images réels concernant l'algorithme Branch\_Cuts(BC) et en vois ici qu'après 50% de bruit quand commence de voir clairement l'influence du bruit sur la qualité des images réels concernant l'algorithme Quality\_Guided(QG). Il est remarquable que les valeurs obtenues pour la méthode de Flynn soient très élevées par rapport à la méthode de Goldstein.

### III.6.1.2 Rapport crête signal sur bruit (PSNR)

Le Rapport crête signal sur bruit estime la puissance entre une image de référence et une image déroulée, considérant le premier comme un signal et le second comme bruit [35], il est donné par :

$$PSNR = 10 \log_{10} \left[ \frac{Peak^2}{MSE} \right] \quad (III.2)$$

Où :

**Peak** : est la valeur maximale dans l'image.

La valeur de l'erreur quadratique moyenne MSE est mathématiquement donnée par :

$$MSE = \frac{1}{M \times N} \sum_{m=1}^M (I(m, n) - \hat{I}(m, n))^2 \quad (III.3)$$

Où :

(M × N) qui désigne la taille de l'image (l'interférogramme) et l'image déroulée [2].

Table III.4: valeurs PSNR pour le déroulement des interférogrammes (BC).

Bruit (%)	Image simulée						Interférogramme					
	0	2	5	10	15	20	0	2	5	10	15	20
PSNR (dB)	52.47	51.29	50.49	48.49	47.36	45.12	49.58	48.96	47.74	46.25	45.88	44.74

D'après les résultats du PSNR données par le tableau (III.4), les valeurs du PSNR sont acceptables est en vois toujours l'influence du bruit sur la qualité des images que ça soit simules ou réels concernant l'algorithme Branch\_Cuts(BC).

Table III.5: valeurs PSNR pour le déroulement des interférogrammes (QG).

Bruit (%)	Image simulée						Interférogramme					
	0	2	5	10	15	20	0	2	5	10	15	20
PSNR (dB)	52.75	52.69	51.36	49.73	49.29	48.57	49.74	49.73	49.	49.10	48.96	47.75

Et d'après les résultats du PSNR données par le tableau (III.5), en vois ici que presque les valeurs du Le Rapport crête signal sur bruit sont les mêmes pour toutes les quantités du bruit existante, qui influés sur la qualité des images que ça soit simules ou réels concernant l'algorithme Quality\_Guided (QG).

Les résultats des deux tableaux (III.4& III.5) sont graphiquement illustrés sur la figure (III.18).

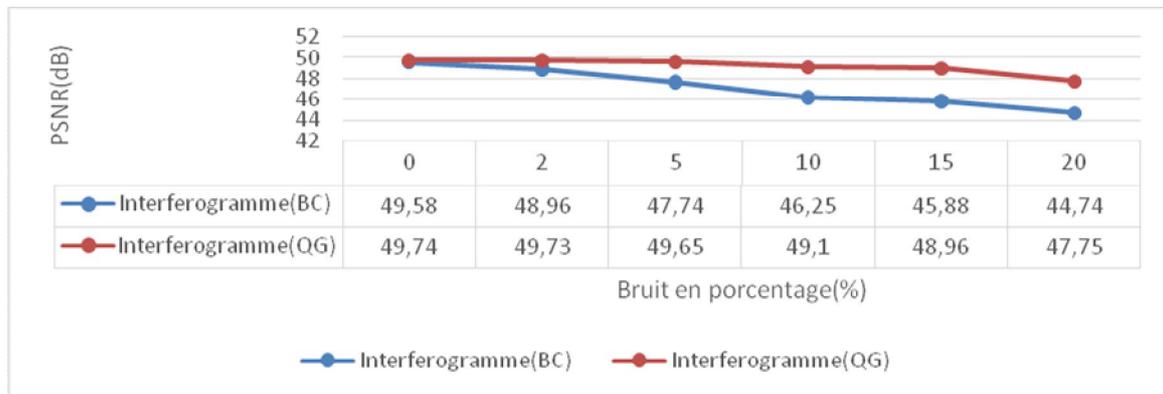


Figure III.18: Courbe graphique représenté les valeurs (PSNR) d'interférogramme déroulées avec les deux algorithmes (BC & QG).

D'après les résultats du PSNR représentés par la figure (III.18), les valeurs du PSNR sont acceptables est en vois toujours l'influence du bruit sur la qualité des images réels concernant l'algorithme Branch\_Cuts(BC). On voit aussi que les valeurs sont à peu près les mêmes pour toutes les quantités du bruit présentes, qui influés sur la qualité des images réels concernant l'algorithme Quality\_Guided (QG). On peut distinguer directement que la méthode de Flynn est plus efficace que la méthode de Goldstein.

### III.6.1.3 Indice de similarité structurelle (SSIM)

On peut définir le SSIM selon Wang et al [36], comme la mesure de similarité entre deux images numérique, l'objectif majeur de son développement est la mesure de la qualité visuelle d'une image déformée, on peut aussi mesure le contracte pour chaque fenêtre comme suit :

$$SSIM = f(L(i,j), C(i,j), S(i,j)) \quad (III.4)$$

Où  $L$  est la luminosité,  $C$  définie le contraste,  $S$  la saturation.

Table III.6: valeurs SSIM pour le déroulement des interférogrammes (BC).

Bruit (%)	Image simulée						Interférogramme					
	0	2	5	10	15	20	0	2	5	10	15	20
SSIM	1	0.999	0.988	0.976	0.955	0.929	1	0.996	0.977	0.945	0.932	0.915

D'après les résultats du SSIM donnes par le tableau (III.6), en vois ici clairement que l'absence du bruit (0%) a donné une valeur optimale du SSIM qui indique la similitude totale des images que ça soit simules ou réels concernant l'algorithme Branch\_Cuts (BC), et même un pourcentage du bruit dans l'image au-delà de zéro.

Table III.7: valeurs SSIM pour le déroulement des interférogrammes (QG).

Bruit (%)	Image simulée						Interférogramme					
	0	2	5	10	15	20	0	2	5	10	15	20
SSIM	1	1	1	1	0.995	0.982	1	1	1	1	0.993	0.977

Et selon les résultats du SSIM donnes par le tableau (III.7), en vois ici clairement que le pourcentage de zéro a dix donne des valeurs optimales du SSIM qui indique la similitude totale des images que ça soit simules ou réels concernant l'algorithme Quality\_Guided (QG), et même un pourcentage du bruit dans l'image au-delà de dix.

Les résultats des deux tableaux (III.6& III.7) sont graphiquement illustrés sur la figure (III.19).

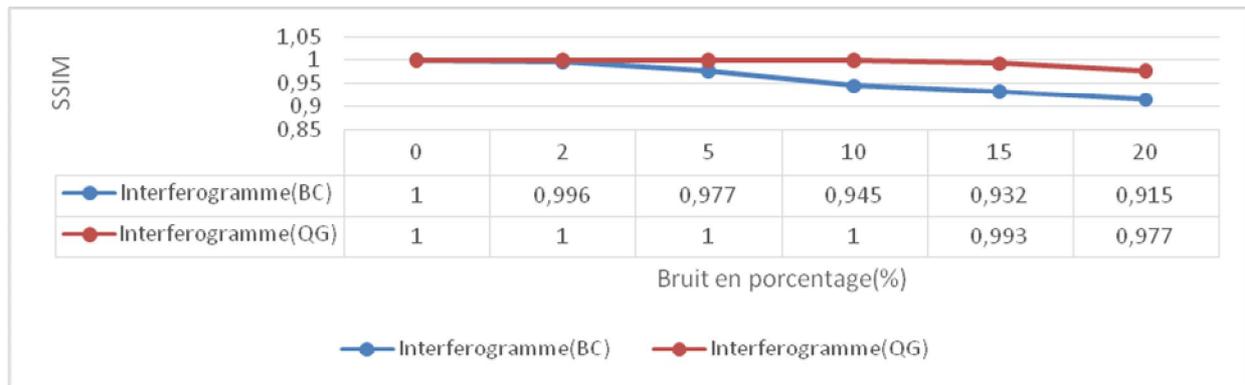


Figure III.19: Courbe graphique représenté les valeurs (SSIM) d'interférogramme déroulés avec les deux algorithmes (BC & QG).

D'après les résultats du SSIM représentés par la figure (III.19), on voit ici clairement que l'absence de bruit (0%) a donné une valeur optimale du SSIM qui indique la similitude totale des images réelles concernant l'algorithme Branch\_Cuts (BC), et même un pourcentage du bruit dans l'image au-delà de zéro. On voit aussi que le pourcentage de zéro à dix donne des valeurs optimales du SSIM qui indique la similitude totale des images réelles concernant l'algorithme Quality\_Guided (QG), et même un pourcentage du bruit dans l'image au-delà de dix. On peut constater que la méthode de Flynn et très potentielle en termes de SSIM, pour la méthode de Goldstein sont très proches de celle de Flynn et sont aussi très satisfaisantes.

### III.6.1.4 Similitude structurale à base de gradient(GSSIM)

Les résultats des études de nombreux chercheurs révèlent que l'œil humain est très sensible aux informations de bord et de contour d'une image, c'est-à-dire que les informations de bord et de contour peuvent être les plus importantes sur la structure d'une image pour humain pour «capturer» la scène. Sur cette base, nous développons un algorithme SSIM amélioré Structural basé sur le gradient Similarité (GSSIM), qui compare les informations de bord entre le bloc d'image déformé et l'original, et remplace la comparaison de contraste  $c(x, y)$  et la structure comparaison  $s(x, y)$  dans l'équation (III.4), avec le gradient comparaison de contraste  $c_g(x, y)$  et comparaison de structure  $s_g(x, y)$  respectivement. [37]

Table III.8: valeurs GSSIM pour le déroulement des interférogrammes (BC).

Bruit (%)	Image simulée						Interférogramme					
	0	2	5	10	15	20	0	2	5	10	15	20
GSSI M	1	0.999	0.995	0.982	0.970	0.959	1	0.990	0.987	0.971	0.964	0.932

D'après les résultats du GSSIM donnés par le tableau (III.8), on voit ici clairement que l'absence de bruit (0%) nous a donné une valeur optimale du GSSIM qui indique la similitude totale des images que ça soit simulées ou réelles concernant l'algorithme Branch\_Cuts (BC), et même qu'un pourcentage

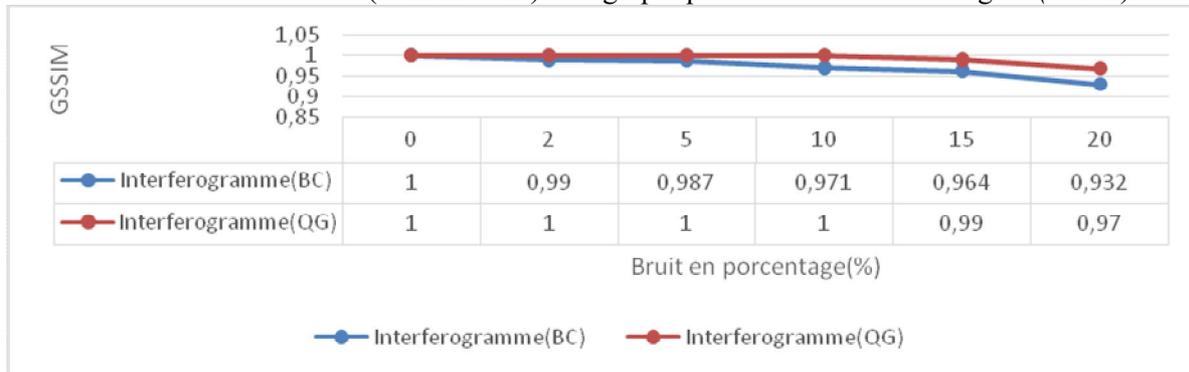
du bruit dans l'image au-delà de zéro les valeurs sont très proches de la valeur optimale, ou nous pouvons conclure que la similitude est bonne même en présence du bruit.

**Table III.9:** valeurs GSSIM pour le déroulement des interférogrammes (QG).

Bruit (%)	Image simulée						Interférogramme					
	0	2	5	10	15	20	0	2	5	10	15	20
GSSI M	1	1	1	1	0,99	0,98	1	1	1	1	0,99	0,97

Et selon les valeurs du GSSIM données par le tableau (III.9), on voit ici clairement que le pourcentage de zéro à dix donne des valeurs optimales du GSSIM indiquant la similitude totale des images que ça soit simulées ou réelles concernant l'algorithme Quality\_Guided (QG), et même qu'un pourcentage de bruit dans l'image au-delà de dix, les valeurs sont très proches de la valeur optimale, ou nous pouvons conclure aussi dans ce cas que la similitude est bonne même en présence du bruit.

Les résultats des deux tableaux (III.8 & III.9) sont graphiquement illustrés sur la figure (III.20).



**Figure III.20:** Courbe graphique représentée les valeurs (GSSIM) d'interférogramme déroulées avec les deux algorithmes (BC & QG).

D'après les résultats du GSSIM représentés par la figure (III.20), on voit ici clairement que l'absence du bruit (0%) nous a donné une valeur optimale du GSSIM qui indique la similitude totale des images réelles concernant l'algorithme Branch\_Cuts (BC), et même qu'un pourcentage de bruit dans l'image au-delà de zéro les valeurs sont très proches de la valeur optimale, ou nous pouvons conclure que la similitude est bonne même en présence du bruit. On voit aussi clairement que le pourcentage de zéro à dix donne des valeurs optimales du GSSIM indiquant la similitude totale des images que ça soit simulées ou réelles concernant l'algorithme Quality\_Guided (QG), et même qu'un pourcentage de bruit dans l'image au-delà de dix, les valeurs sont très proches de la valeur optimale, ou nous pouvons conclure aussi dans ce cas que la similitude est bonne même en présence du bruit. On peut constater que la méthode de Goldstein est moins potentielle en termes de GSSIM que la méthode de Flynn.

### III.7 le temps d'exécution pour l'étape de déroulement de phase deux algorithmes (BC & QG)

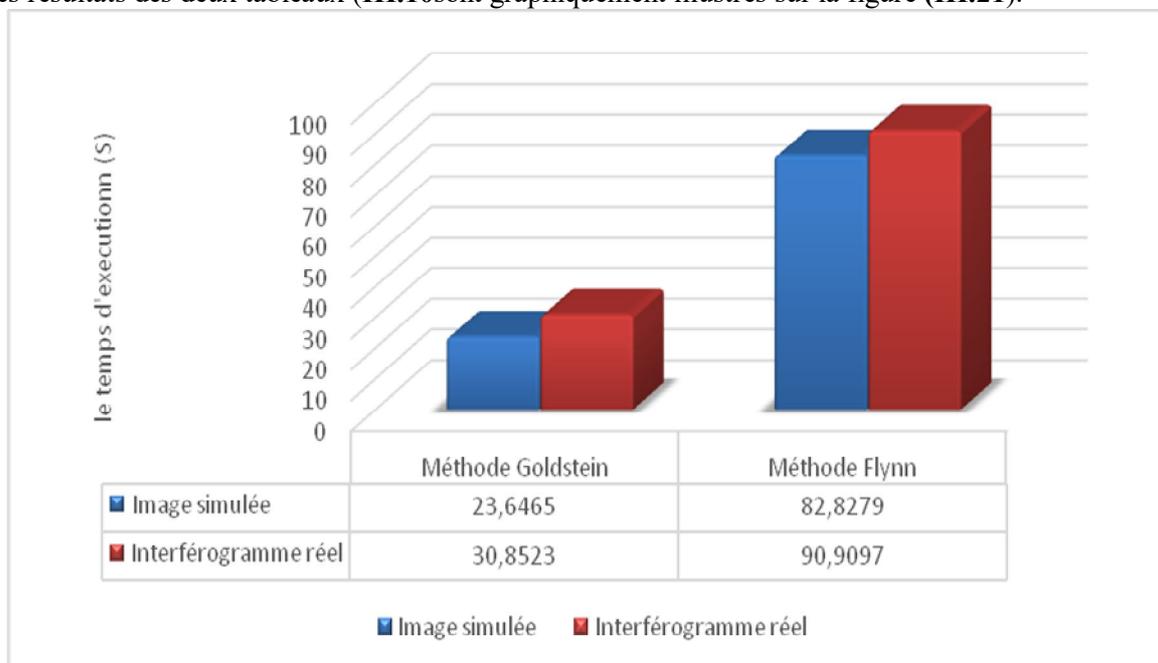
Pour renforcer notre travail d'analyse et comparaison entre les deux algorithmes, nous avons utilisé le critère du calcul du temps d'exécution des opérations du déroulement pour une image simulée et un interférogramme réel.

**Table III.10:** le temps d'exécution de les deux algorithmes (BC & QG) pour le déroulement.

Le temps d'exécution (secondes)		
	Méthode Goldstein	Méthode Flynn
Image simulée	23.6465	82.8279
Interférogramme réel	30.8523	90.9097

D'après les résultats donnés par le tableau (III.10) indiquant le temps d'exécution, on voit clairement que l'algorithme de Goldstein est le plus rapide concernant l'opération du déroulement que ce soit pour l'image simulée ou l'interférogramme réel par rapport à l'algorithme proposé par Flynn. Ceci correspond avec la théorie citée dans le chapitre(II).

Les résultats des deux tableaux (III.10) sont graphiquement illustrés sur la figure (III.21).



**Figure III.21:** Colonnes graphiques représentent le temps d'exécution de les deux algorithmes (BC & QG) pour le déroulement.

### **III.6 Conclusion**

Depuis les résultats illustrés sur les tableaux au-dessus obtenues après application des métriques qui sont les plus utilisés dans domaine d'imagerie, on peut conclure que la méthode de Flynn est plus efficace que la méthode de Goldstein, sauf pour le temps d'exécution, la méthode de Goldstein est plus rapide que l'autre algorithme proposé par Flynn. Enfin l'interface suggérée facilite la manipulation pour divers catégories d'utilisateurs.

**Conclusion**

**général**

## Conclusion générale

Dans ce mémoire nous avons mené une étude sur le système d'imagerie radar tel que les systèmes SAR et inSAR en particulier. Sur l'opération de déroulement de phase avec ces formulations pertinentes sous forme d'une description mathématique, puis une étude, sur quelques algorithmes de déroulement tel que les méthodes de Branch-cut et la méthode de Goldstein, arrivant au développement d'une interface graphique sous matlab, pour analyse et comparaison des deux algorithmes

Pour cela, nous avons commencé tout d'abord par donner un aperçu sur le principe et les composants des systèmes d'imagerie en générale

Puis nous avons présenté la chaîne de traitement d'image inSAR (le déroulement de phase), que l'information est mesurée dans l'intervalle  $[-\pi, \pi]$ . Ou la phase  $\phi$  donnée par l'interférogramme représente la phase interférométrique roulée (Wrapped-Phase), et pour que l'obtention de l'altitude exacte du point imagé est proportionnelle à la phase réelle absolue cette phase doit être reconstruite par une opération inverse non linéaire pour avoir une phase déroulée (Unwrapped - phase). Ou nous avons vu l'utilité de déroulement avec ses formulations de base, En suite en est passé à la présentation d'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.

A la fin, nous avons présenté le développement d'une interface graphique en utilisant les GUIs de Matlab, pour le déroulement des images en utilisant les algorithmes des déroulements. Ce choix nous permettra de voir en mieux le déroulement des images. Pour ce fait, dans ce travail ont été utilisés deux algorithmes (Flynn et Goldstein) pour analyse et comparaison. Ainsi que quelques métriques pour évaluer la qualité des images déroulées par les deux algorithmes.

Depuis les résultats obtenus après application des métriques qui sont puissantes en domaine d'imagerie, on peut conclure que la méthode de Flynn est plus efficace que la méthode de Goldstein, sauf pour le temps d'exécution, la méthode de Goldstein est plus rapide que l'algorithme proposé par Flynn. Enfin l'interface suggérée facilite la manipulation de la phase de déroulement pour les divers utilisateurs.

Et 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 rapides relativement aux QG.

Néanmoins une hybridation entre les différentes méthodes est toujours souhaitable afin de combiner les avantages et en sortir avec un compromis.

**Références**

**bibliographiques**

- [1] BENTAHAR, T. (2017). Approche de déroulement de phase éliminant l'effet de propagation d'erreur due aux sauts de phase par l'interférogramme SAR. Faculté de Technologie Département d'Électronique Université de Batna -2- DOCTORAT 120.
- [2]. Chapman, B. and R. G. Blom (2013). "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).
- [3] Lu, Z. and D. Dzurisin (2014). "Introduction to Interferometric, Synthetic Aperture Radar InSAR Imaging of Aleutian Volcanoes." Springer Praxis Books DOI: 10.1007/978-3-642-003486\_1(2014).
- [4] Dupont, S. (1994). "Interférométrie radar et déroulement de phase." N 2344, programme 4-robotique, image et vision, Projet Pastis(1994).
- [5] Zebker, H. (1992). "Decorrelation interferometric Radar echoes." IEEE transaction on geoscience and remotesensing, Volume 30 N 5(1992): 9.
- [6] Rodriguez, E. (1992). "Theory and design of interferometry SAR." IEEE Proceedings F - Radar and Signal Processing Volume 139 N 2(1992): 11.
- [7] Bayer, winter et al. 1991, Dupont 1994, Franceschetti and Lanari 1999, Soumekh 1999, Chatterjee 2004.
- [8] Chatterjee, R. (2004). "Antenna Theory and Practice." New Age International Pvt Ltd, New York.
- [9] Franceschetti, G. and R. Lanari (1999). "Synthetic Aperture Radar Processing." CRC Press.
- [10] Soumekh, M. (1999). "Synthetic Aperture Radar Signal Processing with MATLAB algorithms." Wiley-Interscience. 1994
- [11]Chen, C.W., Zebker, H.A.: 'Phase unwrapping for large SAR interferograms: statistical segmentation and generalized network models', IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 2002, 40, (1), pp. 1709–1719.
- [12]H. Yu, H. Lee, N. Cao, and Y. Lan, —Optimal baseline design for multi-baseline InSAR phase unwrapping, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., to be published.
- [13] T. Bentahar, "Approche de déroulement de phase éliminant l'effet de propagation d'erreur due aux sauts de phase par l'interférogramme SAR ", thèse pour obtenir le grade de Docteur, Université de Batna 2, Batna, 2017, p 43-44-45-46-51.
- [14] F.Hocine, A.Haddoud, M.Belhadj-aissa, M.Fekir, " Méthodes de déroulement de phase interférométrique étude comparative et application", Bab Ezzouar, Novembre 2009.
- [15]Zebker H.A.LU Y " Phase unwrapping algorithms for radar interferometry "residus-cat, least squares, and synthesis algorithms, Journal of optical society American, Vol.15, no.3, pp.586-598, March 1998.
- [16] Laboursse .D, " modélisation markovienne pour le déroulement de phases interférométrique sar", thèse de doctorat, université de Nice Sophia Antipolis, 1996.
- [17] L. Ying, "Phase unwrapping, Wiley Encyclopedia of Biomedical Engineering ", John Wiley & Sons, Inc., 2006.
- [18] 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.

- [19] D.C. Ghiglia and M.D. Pritt, Two-dimensional phase unwrapping: theory, algorithms, and software, Wiley, 1998.
- [20] Flynn T J 1997 Two-dimensional phase unwrapping with minimum weighted discontinuity J. Opt. Soc. Am. A 14 2692–701.
- [21] Goldstein R M, Zebker H A and Werner C L 1988 Satellite radar interferometry: two-dimensional phase unwrapping Radio Sci. 23 713–20.
- [22] 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.
- [23] T. J. Flynn, "Consistent 2-D phase unwrapping guided by a quality map," IGARSS'96, Proceeding, Lincoln, NE, pp 2057–2059, Mar 1996.
- [24] 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.
- [25] <https://fr.matworks.com/>
- [26] <https://briot-jerome.developpez.com/matlab/tutoriels/introduction-programmation-interfaces-graphiques/#LII-B>
- [27] <https://briot-jerome.developpez.com/matlab/tutoriels/presentation-objets-graphiques/>
- [28] Zhou Wang, A.C. Bovik, HR Sheikh, and EP Simoncelli, "Assessing Image Quality: From Error Perception to Structural Similarity," in IEEE Transactions on Image Processing, vol. 13, no. 4, p. 600-612 April 2004
- [29] <https://www.supinfo.com/articles/single/10148-differents-types-image>
- [30] T. Bentahar, "Approche de déroulement de phase éliminant l'effet de propagation d'erreur due aux sauts de phase par l'interférogramme SAR ", thèse pour obtenir le grade de Docteur, Université de Batna 2, Batna, 2017, p 51.
- [31] Goldstein R M, Zebker H A and Werner C L 1988 Satellite radar interferometry: two-dimensional phase unwrapping Radio Sci. 23 713–20.
- [32] Flynn T J 1997 Two-dimensional phase unwrapping with minimum weighted discontinuity J. Opt. Soc. Am. A 14 2692–701.
- [33] T. J. Flynn, "Consistent 2-D phase unwrapping guided by a quality map," IGARSS'96, Proceeding, Lincoln, NE, pp 2057–2059, Mar 1996.
- [34] Pandey, S. and Gupta, R., 2016. A novel approach for digital image watermarking using 5-DWT-SVD and stream cipher encryption with different attacks. 2016 International Conference on Computing Communication Control and automation (ICCUBEA).

[35] Zhou Wang, A.C. Bovik, HR Sheikh, and EP Simoncelli, “Assessing Image Quality: From Error Perception to Structural Similarity,” in IEEE Transactions on Image Processing, vol. 13, no. 4, p. 600-612 April 2004

[36] H. R. Sheikh, Z. Wang, L. Cormack, and A. C. Bovik, “LIVE Image Quality Assessment Database Release 2,” available at: <http://live.ece.utexas.edu/research/quality>

[37] Chen, G., Yang, C. and Xie, S., 2006. Gradient-Based Structural Similarity for Image Quality Assessment. 2006 International Conference on Image Processing.

[38] ([www.gps.alaska.edu](http://www.gps.alaska.edu) GEOS 655 TectonicGeodesy, Jeff Consulté le: 14/02/2018. Freymueller).