



**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

***Compression Arithmétique pour les
interferogrammes InSAR***

Présenté par:

- *BRAHMI Sakina*

Devant le jury:

- *BENTAHAR Tarek*

Encadreur

- *MERAOUMIAI Abdallah*

Président

- *BOUCHEMHA Amal*

Examineur

Année Universitaire 2020 / 2021

Remerciements

*Je remercie mon Dieu de m'avoir permis de
réaliser et de faire aboutir ce travail,*

Je tiens, tout d'abord, à remercier

Dr. BENTAHAR Tarek, mon

*Encadreur dévoué pour bien vouloir diriger et
encadrer ce Travail puis Je tiens à remercier
sincèrement les membres de jury d'avoir acceptés
d'évaluer mon travail*

*Je remercié également tout la famille les amies qui
ont contribué à faire aboutir ce travail*

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents qui ont toujours été là pour moi et qui m'ont soutenu et encouragé durant toute la période de mes études, j'espère qu'ils seront fiers de moi et que Dieu les protège.

À mes frères et sœurs, ainsi que leur enfants (Zouhir, Amir, Seradje, Amine, Mortdha et Alla) ;

À tous mes ami(es) proche surtout : Hinda, Dido, Sonya, Chaïma, Nazo, Loli, Manal et Salwa ;

À tous mes collègues.

Liste du figure

Figure I 1: Principe d'interférométrie inSAR

Figure I 2 : géométrie d'acquisition d'un couple interférométrique

Figure I 3: Géométrie d'acquisition interférométrique .

Figure I 4: Les angles d'incidence et la décorrélation spatiale [1].

Figure I 5: Exemple d'image inSAR de VatnajökullERS-1/2(*tandem data*)ESA, (a) image d'amplitude, (b) interférogramme, (c) image de cohérence. [1]

Figure I 6- Principe de DInSAR

Figure I 7: Déformation temporelle et DInSAR

Figure I 8: le déroulement de phase

Figure I 9 : Déroulement de phase

Figure-I.10: a1, a2) interférogrammes réels images 300*300
(b1) résidu en noir (-1) et blanc (1) (résidu des zones faiblement ambiguës), b2) résidu en noir (-1) et blanc (1) (résidu des zones fortement ambiguës), c1) et c2) zooms des coins gauches

Figure II 1: Schéma de la compression [4].

Figure II .2 : Une vision simplifiée de la compression sans perte [4].

Figure II.3: Arbre de Huffman

Figure III.1 : Organigramme à des fins de comparaison

Figure III.2 : (a) interférogramme réel, (b) image déroulée utilisant la méthode de Goldstein, (c) méthode QC de Giglia, (d) méthode Herràez, (e) méthode MN de Giglia et (f) méthode de Costantini

Liste des Acronyme

SAR :Synthetic Aperture Radar

InSAR : Interferometric SAR

BC : branches coupées

QG :qualité guidée

MNT : Modèle Numérique de Terrain

ERS : European remote sensing

MSE : l'erreur quadratique moyenn

SSIM :Indice de similarité structurelle

BI:Borne Inférieure

BS: Borne sperieure

Sommaire

Introduction générale

Chapitre 01 : Généralité sur le système inSAR et déroulement de phase

I. Introduction

II. Système inSAR

1. Principes de l'interférométrie inSAR

2. Géométrie d'acquisition inSAR

3. Signal de corrélation et les images inSAR

- ✓ Décorrélation spatiale*
- ✓ Décorrélation temporelle*
- ✓ les images inSAR*

4. Applications et limites de l'interférométrie

5. Interférométrie différentielle

- ✓ principe DInSAR*
- ✓ Interférométrie différentiel multi passe*

III. Etat de l'art sur les algorithmes de déroulement de phase

1. principes de déroulement de phase

2. Méthodes de déroulement de phase local

- ✓ Méthode de détection*

3. Méthodes de déroulement de phase local

4. Méthodes de déroulement de phase hybride

- ✓ Approche markovien*

IV. Conclusion

Chapitre 02 : Les codes de compression

- I. Introduction**
- II. Concepts généraux sur la compression d'image**
 - 1. Image**
 - ✓ Définition d'image
 - ✓ Définition d'image numérique
 - ✓ Type d'image
 - A. Image matricielle
 - B. Image vectorielle
 - ✓ Définition d'un pixel
 - ✓ La quantification
 - ✓ L'histogramme
 - 2. La compression**
 - ✓ La définition de compression
 - ✓ Les types de compression
 - A. Compression symétrique et a symétrique
 - B. Compression avec perte
 - C. Compression sans perte
- III. Le codage**
 1. Définition du codage
 2. Définition d'entropie
 3. Le codage de Shannon-Fano
 - ✓ L'algorithme de compression Shannon-Fano
 - ✓ Modèles et code
 4. Le codage de Huffman
 5. Lempel_Ziv_Welch Codage: Lempel_Ziv Welch (LZW)
 6. Codage arithmétique
 7. Avantages et inconvénients de la compression sans perte
- IV. Conclusion .**

Chapitre 02 : Implémentation et analyse

- I. Introduction**
- II. Implémentation du code Arithmétique**
- III. Analyse l'effet du code sur les interferogrammes**
- IV. Conclusion**

Conclusion générale

Résumé :

Le système inSAR génère deux types d'images ; d'amplitude (avec sa cohérence)

et de phase (interferogrammes) ; l'image d'amplitude directement exploitable mais elle contient un taux élevé de bruits, l'interferogrammes 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; Le déroulement de phase est une étape clé pour reconstruire les images de phase du système inSAR, Parmi ces méthodes nous trouvons celles de des branches coupées (BC) et la qualité guidée (QG).

Notre travail consiste à implémenter, tester et analyser le codage compresseur arithmétique pour la transmission des images d'Interférogramme. Cela permet d'analyser profondément l'effet de ce code sur le processus de déroulement de phase qui est un étape clé dans la chaîne de traitement d'Interférogramme. Le MATLAB a été utilisé comme un environnement d'implémentation et de test. La discussion a été faite sous plusieurs métriques pérennantes tell que SSIM, MSE et IPU. Les données utilisées sont des interférogrammes réels fournit par l'ESA ERS-1.

Les mots clés : InSAR, interférogramme, compression, SSIM, MSE, code arithmétique ,DInSAR, déroulement de phase

المُلخَص

يُنشئ نظام inSAR نوعين من الصور؛ السعة (مع تماسكها) والمرحلة (التداخل)؛ يمكن استغلال صورة السعة بشكل مباشر ولكنها تحتوي على معدل ضوضاء مرتفع، ويحتوي مخطط لتداخل على ضوضاء (مخلفات) أقل مقارنة معصورة السعة ولكنها ليست قابلة للاستغلال بشكل مباشر، وبالتالي من الضروري فك جميع المراحل لتجنب هذه المخلفات من أجل الحد من انتشار الخطأ؛ يعد فك الطور خطوة أساسية لإعادة بناء صور الطور لنظام inSAR، ومن بين هذه الطرق نجد تلك الخاصة بالفروع المقطوعة (BC) والجودة الموجهة (HQ) ،

يتكون عملنا من تنفيذ واختبار وتحليل الترميز الحسابي للضاغط لنقل صور التداخل. هذا يجعل من الممكن إجراء تحليل متعمق لتأثير هذا الرمز على عملية فك الطور والتي تعد خطوة أساسية في سلسلة معالجة التداخل. تم استخدام MATLAB كبيئة تنفيذ واختبار. تم إجراء المناقشة بموجب العديد من المقاييس الدائمة المعروفة باسم SSIM و MSE و IPU. البيانات المستخدمة هي مخططات تداخل حقيقية مقدمة من

الكلمات المفتاحية : قياس التداخل (sar)، التداخل، الضغط، مؤشر التشابه الهيكلية (SSIM)، الخطأ التريبيعي المتوسط (MSE)، كود حسابي، مرحلة الفك، قياس التداخل التفاضلي (DInSAR)

Abstract

The inSAR system generates two types of images; amplitude (with its consistency) and phase (interferograms); the amplitude image can be directly exploited but it contains a high rate of noise, the interferograms have less noise (residuals) compared with the amplitude image but it is not directly exploitable, and therefore it is imperative to unwrap all the phases while avoiding these residues in order to limit the error propagation; The phase unwrapping is a key step to reconstruct the phase images of the inSAR system, Among these methods we find those of cut branches (BC) and guided quality (QG).

Our work consists in implementing, testing and analysing the arithmetic compressor coding for the transmission of interferogram images. This allows to deeply analysing the effect of this code on the phase unwrapping process which is a key step in the processing chain of the interferogram. Several metrics such as SSIM, MSE and IUP have been used for comparison purposes. The data are real interferogram provided by l'ESA ERS-1.

Keywords: InSAR, interferogram, compression, SSIM, MSE, Arithmetic code, DInSAR, phase unwrapping

Introduction générale

Introduction

La technique SAR, pour Synthetic Aperture Radar, soit Radar à synthèse d'ouverture, exploite le déplacement de l'antenne pour former une antenne "de synthèse" de dimension plus importante, et donc d'une résolution angulaire plus élevée que la même antenne, immobile. Le radar à synthèse d'ouverture (SAR) est une forme de radar dans laquelle un traitement sophistiqué des données radar est utilisé pour produire un faisceau efficace très étroit. Il peut être utilisé pour former des images de cibles relativement immobiles; les cibles en mouvement peuvent être floues ou déplacées dans les images formées.

L'image SAR (Synthetic Aperture Radar) sont formées à partir d'ondes hyper fréquences émises et enregistrées par des systèmes radar aéroportés ou à bord de satellites. Ces systèmes mesurant les temps des trajets aller-retour des ondes, et donc des distances, sont sensibles à la topographie du terrain. La technique qui exploite cette particularité pour mesurer le relief à partir des images SAR est dénommée interférométrie radar à synthèse d'ouverture InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar)

L'interférométrie est un technique très important en imagerie SAR. Elle a été développée depuis les années 1980. Sa première application concerne la cartographie topographique (Zebker et Goldstein 1986) mais sans utilisation est encore présent dans plusieurs domaines d'application tel que la surveillance des changements survenus sur la surface terrestre et la génération de modèles numériques.

L'InSAR est conjugué du SAR le fait d'utiliser deux acquisitions soit par deux antennes et un seul passage ou une antenne et deux (voire multi) passages. Les deux images acquises sont nécessaires pour produire un interférogramme. Pour l'application de génération de modèle numérique en terrain le processus de déroulement de phase est une étape indispensable pour trouver la proportionnalité exacte entre le point imagé et la phase détectée.

Plusieurs algorithmes de déroulement de phase ont été proposés durant les dernières décennies dont leurs catégories se différencient selon leurs stratégies. Peu importe la technique de déroulement utilisée le problème principal vis-à-vis la transmission est la taille des interférogrammes qui est généralement immense. Donc l'utilisation des techniques de compression est incontournable. La question qui se pose : est la compression sans influence sur le déroulement de phase ? C'est notre objectif dans ce travail.

Le mémoire s'articule autour de trois chapitres principaux :

Dans le premier chapitre nous allons donner une généralité sur le système d'imagerie inSAR et les caractéristiques principales de ces images générés. Les algorithmes de déroulement de phase font aussi l'objectif de ce chapitre. Dans le deuxième chapitre, nous allons présenter quelques techniques de codages largement connus. Nous focalisons sur le code arithmétique car il fait partie substantielle de notre travail. Pour le troisième chapitre, nous allons montrer l'effet du code arithmétique sur certains algorithmes de déroulement de phase pionniers sous l'environnement MATLAB avec une discussion sur l'influence de l'utilisation du tel code. Les interférogrammes de test sont réels et fournis par ESA-ERS-1. Finalement, nous concluons le mémoire par une conclusion qui révèle les principaux points déduits.

Chapitre 01 : Généralité sur le système inSAR et déroulement

Chapitre01 : Généralité sur les système inSAR et déroulement de phase

I. Introduction

II. Système inSAR

6. Principe d'interférométrie inSAR

7. Géométrie d'acquisition inSAR

8. Signal de corrélation et les images inSAR

- ✓ Décorrélation spatial*
- ✓ Décorrélation temporelle*
- ✓ Les images inSAR*

9. Applications et limites de l'interférométrie

10. Interférométrie différentielle

- ✓ Principe DInSAR*
- ✓ Interférométrie différentiel multi passe*

III. Etat de l'art sur les algorithmes de déroulement de phase

5. Principe de déroulement de phase

6. Méthode de déroulement de phase local

- ✓ Méthode dedétection*

7. Méthode de déroulement de phase local

8. Méthode de déroulement de phase hybride

✓ ***Approche markovien***

IV. Conclusion

Introduction

Le principe de l'interférométrie a été initialement utilisé lors des applications classiques de télédétection des planètes distantes. Goldstein et Zebker ont été les premiers à présenter les résultats obtenus à partir de ce satellite. Le processus consiste à comparer deux images d'une même zone en démontrant la faisabilité de l'interférométrie à partir des données satellitaires.

Le but de l'interférométrie est d'analyser les différences de phase, pixel à pixel, de deux images d'une même région acquises. L'interférométrie radar offre l'opportunité de détecter et d'évaluer les variations altimétriques du terrain et fournit, par conséquent, des informations précieuses dans plusieurs domaines des sciences de la terre.

La phase ϕ donnée par l'interférogramme représente la phase interférométrique roulée (Wrapped-Phase), c'est-à-dire connue modulo 2π , 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).

L'objectif de ce chapitre est d'expliquer les fondements de la technique interférométrique SAR. Nous commençons par présenter le principe de cette technique et voir l'utilité de déroulement avec ses formulations de base, commençant une description mathématique détaillée de déroulement qui sera présentée.

Principe d'interférométrie inSAR

L'interférométrie est une technique de mesure qui exploite les interférences intervenant entre des ondes hyperfréquence cohérentes entre elles pour calculer les différences de phase pixel à pixel entre deux images radar d'une même zone terrestre, acquises dans les mêmes conditions de prise de vue mais à différentes coordonnées (altitude, angle de visée)

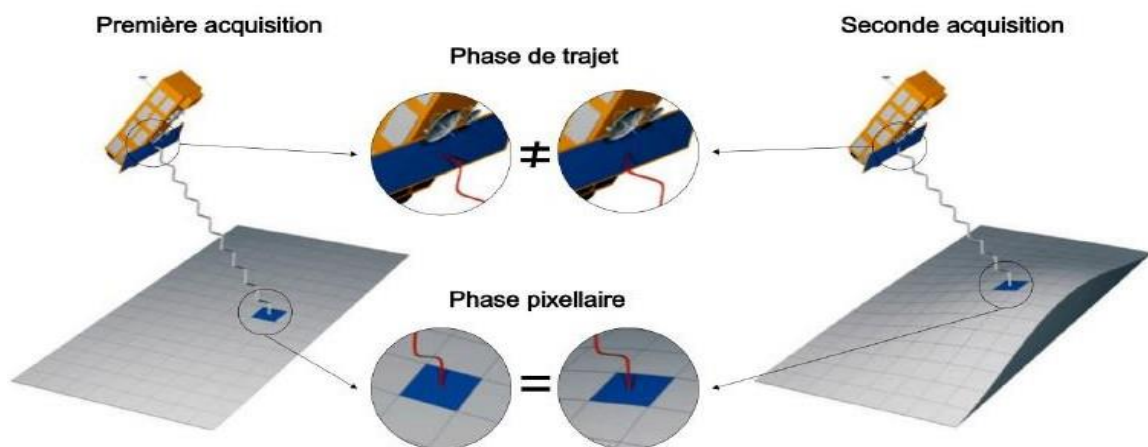


Figure I 1: Principe d'interférométrie inSAR

La connaissance de la position de l'antenne lors des deux passages permet de calculer l'altitude d'une cible à partir de la différence de phase des deux rétrodiffusés par la même cible.

La phase d'un signal radar rétrodiffusé est une information riche mais difficile à exploiter directement car elle est la somme de six phases qui se combinent:

$$\varphi_{total} = \varphi_{trajet} + \varphi_{météo} + \varphi_{construction} + \varphi_{rétrodiffusion} + \varphi_{instrumentale} + \varphi_{bruit} \quad (1.1)$$

- φ_{trajet} : La phase du trajet est le déphasage lié à la distance parcouru par l'onde
- $\varphi_{météo}$: La phase météo est un seconde déphasage de trajet produit par les conditions atmosphérique particulières.
- $\varphi_{construction}$: La phase de construction sert à modéliser la phase globale de l'ensemble des échos correspondant à un pixel de résolution.
- $\varphi_{rétrodiffusion}$: La phase rétrodiffusée est le déphasage introduit au moment de l'interaction avec l'élément de surface.
- $\varphi_{instrumentale}$: La phase instrumentale est celle produite par le système électronique d'émission et d'acquisition (temps de réponse des amplificateurs et autres dispositifs électroniques).
- φ_{bruit} : Un bruit de phase introduit par l'instrumentation et les procédés d'acquisition (numérisation, dérives fréquentielles de la porteuse, etc.).

Puisque la technique InSAR exige l'utilisation de deux images radar, acquises avec un intervalle de temps de préférence faible, alors on peut dire que la phase météo et la phase instrumentale sont similaires pour les deux acquisitions. D'autre part, les phases de construction et la phase de rétrodiffusion dépendent des paramètres propres de la cible telle que la constante diélectrique et la pénétration des ondes. Enfin la phase due au trajet qui dépend directement de la géométrie (aller-retour entre l'antenne et la cible), peut être représentée par:

$$\varphi_{trajet} = \frac{4\pi}{\lambda} R = 2\pi f_0 t \quad (1.2)$$

Où λ est la longueur d'onde du signal émis, f_0 est la fréquence radar et R la distance radar-cible.

Si P est un point au sol, R_a et R_b les distances de p au rada lors des deux acquisitions A et B (figure), les phase correspondant au point p dans ces deux images sont alors :

$$\varphi_A(p) = \frac{4\pi}{\lambda} R_a + \varphi_{propre} + \varphi_s \quad (1.3)$$

$$\varphi_B(p) = \frac{4\pi}{\lambda} R_b + \varphi_{propre} + \varphi_s \quad (1.4)$$

Avec φ_s la somme de la phase de bruit, la phase météo et la phase instrumentale.

La différence entre les deux phases $\varphi_A(\mathbf{p})$ et $\varphi_B(\mathbf{p})$ est :

$$\Delta\varphi(\mathbf{p}) = \varphi_A(\mathbf{p}) - \varphi_B(\mathbf{p}) = \frac{4\pi}{\lambda} (R_a - R_b) + \Delta\varphi_{\text{propre}} + \Delta\varphi_s \quad (1.5)$$

Par hypothèse, le terme de phase propre et le terme de phase météo et la phase instrumentale sont identiques dans les deux images (forte corrélation entre les deux acquisitions) le terme $\Delta\varphi_{\text{propre}}$ et le terme $\Delta\varphi_s$ sont négligeables ou nuls, alors la différence de phase $\Delta\varphi$ mesure la différence de chemin entre les deux signaux. D'où :

$$\Delta\varphi(\mathbf{p}) = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R \quad (1.6)$$

A partir de la différence de phase des deux signaux rétrodiffusés aux deux antennes, on peut tirer l'altitude z de la cible:

$$z = H - R_A \cos\left[\arcsin\left(\frac{\Delta R}{b_x}\right)\right] \quad (1.7)$$

Ou:

ΔR : la différence des distances radiales entre les deux prises de vue.

b_x : la composante horizontale de la distance entre les deux satellites appelée Baseline.

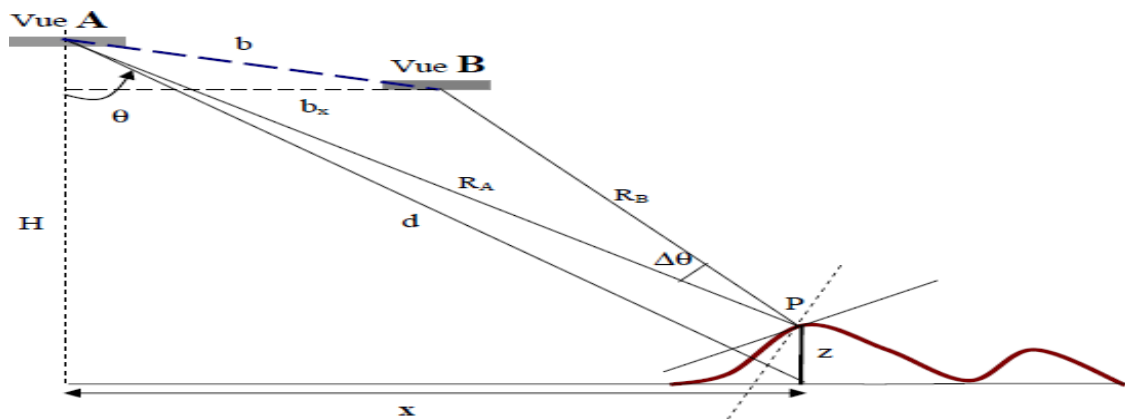


Figure I 2 : géométrie d'acquisition d'un couple interférométrique

Calcul direct de cette équation nécessite une bonne maîtrise des paramètres H et b_x et passe par la détermination exacte de l'angle dévisé par $\arcsin((R_A - R_B)/b_x)$.

Lin du JPL [Lin-94] propose une autre formulation basée sur les seules coordonnées cartésiennes du point P . Avec les notations de la figure (géométrie d'acquisition d'un couple interférométrique) ou x représente l'éloignement au nadir de P et d la distance du satellite à la projection verticale de P sur

l'altitude de référence : ($d = \sqrt{H^2 + x^2}$) la différence de chemin $\Delta R = R_A + R_B$ peut s'écrire:

$$\Delta R = \sqrt{x^2 + (H - z)^2} - \sqrt{(x - b_x)^2 + (H - z)^2} \quad (1.8)$$

Dans un développement limité deuxième ordre et en tenant compte des rapports entre distances ($z \ll H, b_x \ll x$), les termes de plus haut degré sont négligeables, ΔR devient alors:

$$\Delta R = \frac{x b_x}{d} + \frac{x b_x H}{d^3} \quad (1.9)$$

Le premier terme de cette équation $\Delta R_{orbitale} = x b_x / d$ est indépendant de z . Pour un terrain plat, l'équation (1.7) correspond à la différence de chemin due à la géométrie des deux orbites.

Ceci fait apparaître une évolution systématique de la phase due à l'éloignement en distance au sol. L'interférogramme d'un terrain plat est formé de franges parallèles à la direction azimutale, dont la largeur est fonction de l'éloignement de x et de la base b_x . Elles sont désignées par le nombre de franges orbitales. Comme elles ne sont pas liées à la topographie du terrain, il est indispensable de les soustraire de l'interférogramme initial. Le second terme

$\Delta R_{topographique} = z x b_x H / d^3$ est relié à l'élévation z . Les variations de la phase qu'il entraîne, créent dans l'interférogramme des franges appelées par la suite franges topographiques.

Géométrie d'acquisition inSAR

À partir de signaux rétrodiffusés et mesurés par le radar, les images S_1 et S_2 sont générées. Leurs expressions respectives sont les suivantes:

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

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

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

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

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

Tel que:

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

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

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

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

A. Phase d'interférométrie:

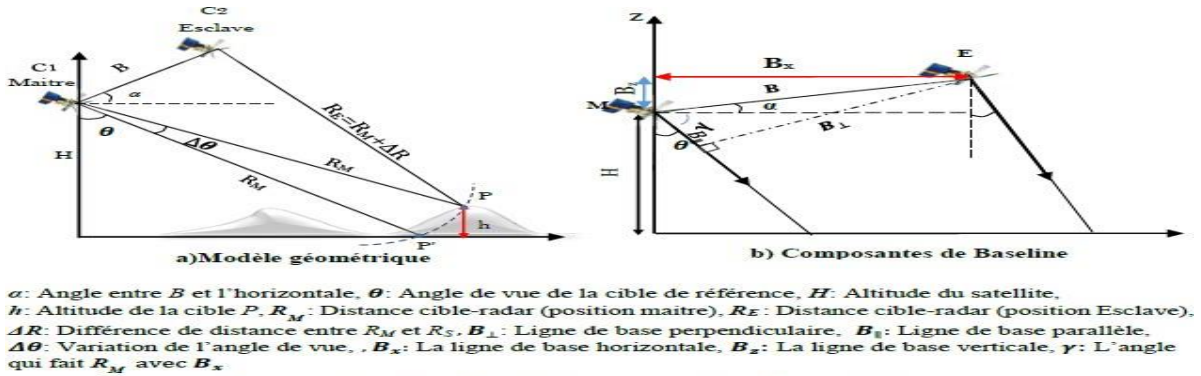


Figure I3: Géométrie d'acquisition interférométrique .

Soit I_1 et I_2 deux images SAR, qui sont exprimées de la manière complexe suivante: Image1: $I_1(x,y)=|I_1(x,y)|e^{j\phi^1(x,y)}$

Et Image2: $I_2(x,y)=|I_2(x,y)|e^{j\phi^2(x,y)}$

La phase interférométrique présente la différence de phase de deux signaux radar, sous la forme suivante:

$$\varphi_{int} = \varphi_1 - \varphi_2 = (\varphi_{trajet1} - \varphi_{trajet2}) + (\varphi_{propre1} - \varphi_{propre2}) + (\varphi_{atmosphere1} - \varphi_{atmosphere2}) + (\varphi_{bruit1} - \varphi_{bruit2}) = \Delta\varphi_{trajet} + \Delta\varphi_{propre} + \Delta\varphi_{atmosphere} + \Delta\varphi_{bruit} \quad (A.1)$$

Si on suppose que l'intervalle de temps entre les deux acquisitions est très réduit (cas du couple en tandem) et que la ligne de base est choisie de façon optimale, la différence de phase $\Delta\varphi$ sera approximée à zéro et que l'effet atmosphérique sur la différence de phase des deux images est négligeable, de même que pour les retards dus à l'instrumentation électronique

Ceci implique que: $\Delta\varphi_{bruit} \approx 0$ et $\Delta\varphi_{atmosphere} \approx 0$

Il en résulte de ces hypothèses que la phase interférométrique sera proportionnelle à la différence de trajet aller-retour de l'onde-cible, son expression est la suivante:

$$\Phi_{int} \approx \Delta\Phi_{int} \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R \quad (A.2)$$

B. Relation entre la phase InSAR et l'altitude

Comme le montre la figure I.11(a), les réponses des cibles p à une altitude h et p' à $h=0$ sont confondues pour une seule acquisition car les deux cibles se trouvent sur le même front d'onde par rapport au capteur CI (Maitre). Cependant, la variation de l'angle de vue $\Delta\theta$ peut être mesurée. En revanche, si on a deux passages effectués par un ou deux capteurs avec des angles de vues légèrement différents, la variation de Δ peut être déterminée à partir de la phase interférométrique [32].

En utilisant la hauteur du satellite et la distance RM séparant le satellite aux point p et p' , on peut calculer l'altitude h . La phase interférométrique du point p est donnée par:

$$\varphi(p) = \varphi_1(p) - \varphi_2(p) = \frac{4\pi}{\lambda} (R_M - R_E) = \frac{4\pi}{\lambda} \partial\Delta R \quad (B.1)$$

Toute variation de différence de distance ΔR engendre une variation de la phase interférométrique au point p , elle est raduit par l'équation suivante:

$$\partial\varphi(p) = \frac{4\pi}{\lambda} \partial\Delta R \quad (B.2)$$

De la figure(3)on peut écrire que:

$$\cos(\gamma + \alpha) \approx \frac{\Delta R}{B} \rightarrow \Delta R = B \cos(\gamma + \alpha) = B \cos\left(\frac{\pi}{2} - (\theta - \alpha)\right) = B \sin(\theta - \alpha) = B_{||} \quad (B.3)$$

La variation ΔR est en fonction de la variation de l'angle de visée, son expression est la suivante:

$$\partial\Delta R = B \cos(\theta - \alpha) \partial\theta \quad (B.4)$$

Le θ^0 correspond à la cible de référence.

En combinant les équations (I.13) et (I.14), on obtient la variation de la phase interférométrique donnée par l'expression suivante:

$$\partial\varphi(p) = \frac{-4\pi}{\lambda} B \cos(\theta^0 - \alpha) \partial\theta$$

Par rapport à un point de référence, elle représente la différence entre la phase interférométrique déroulée de la cible p et la phase de la cible de référence p' . Son expression est la suivante:

$$\partial\varphi(p) = \varphi_p - \varphi_{p'}$$

Où φ_p est la phase due à la ligne de base 'terrain plat' $\varphi_p \approx B_{\perp}$

Par ailleurs, la relation entre (p) et h est déterminée en utilisant la configuration géométrique d'acquisition des couples de la manière suivant:

- La hauteur du satellite par rapport au point de référence p' est exprimée par:

$$H_{sat} = R_M \cos \theta$$

La variation de cette hauteur par rapport à un point p distant aussi de R_M sera donnée par la relation suivante:

$$\partial H_{sat} = -h_p = -R_M \sin \theta_p^0 \partial \theta$$

$$\text{Avec } B \cos(\theta_p^0 - \alpha) = B_{\perp}^0$$

(dédiuite géométriquement de la figure I.12.b)

- Si la variation de phase interférométrique est égale à $2(\partial \varphi_p = 2\pi)$, l'altitude correspondante est dite altitude d'ambiguïté (elle correspond à une frange) [33], elle peut être assimilée à une unité de mesure interférométrique pour une ligne de base donnée. Son expression sera comme suit:

$$h_{2\pi} = \left| \frac{R_{1p} \sin \theta_p^0}{B_{\perp P}^0} \right|$$

L'obtention de l'altitude de chaque cible (pixel) de l'interférogramme permet de générer le Modèle Numérique de Terrain (MNT).

Signal de corrélation et les images inSAR

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

$$P_{\text{corrélation}} = \langle S_1 \cdot S_2^* \rangle \quad (\text{I.1.3.1})$$

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

$$\rho_{\text{système}} = \frac{\langle S_1 \cdot S_2^* \rangle}{\sqrt{\langle S_1 \cdot S_1 \rangle \langle S_2 \cdot S_2 \rangle}} \quad (\text{I.1.3.2})$$

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

$$\rho_{totale} = \rho_{système} \rho_{spatiale} \rho_{temporelle} \quad (I.1.3.3)$$

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

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]:

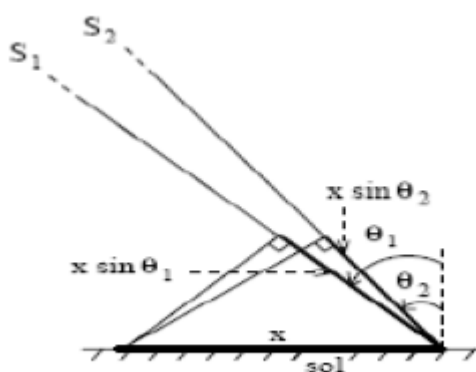


Figure I 4: Les angles d'incidence et la décorrélation spatiale [1].

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

$$\rho_{spatial} = 1 - \frac{2rd\Delta\theta \cos(\theta_2)}{\lambda} \quad (I.1.3.4)$$

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 ($r_2 = \Delta r$ dans la figure I.7 et I.8). [12]

Alors l'équation (I.15) en fonction de la Baseline Bx est:

$$\rho_{spatial} = 1 - \frac{2rdBx(\cos(\theta_2))^2}{\lambda r^2} \quad (I.1.3.5)$$

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 σ_h et vertical σ_v . [11]

Le coefficient de décorrélation temporelle vaut:

$$\rho_{temporelle} = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{4\pi}{\lambda}\right)^2 ((\sigma_h \sin \theta)^2 + (\sigma_v \sin \theta)^2)\right] \quad (I.1.3.6)$$

Avec θ est l'angle d'incidence de l'antenne maîtresse.

Les images inSAR

En interférométrie, pour générer les différentes images inSAR un autre coefficient complexe γ déduit du coefficient de corrélation ρ 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 décorrélation spatiale. [1]

$$\gamma(i', j') = \frac{\sum_{ij}^{MN} S_1(i, j) S_2^*(i, j)}{\sqrt{\sum_{ij}^{MN} S_1(i, j) S_1^*(i, j) \cdot \sum_{ij}^{MN} S_2(i, j) S_2^*(i, j)}} \quad (I.1.3.7)$$

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

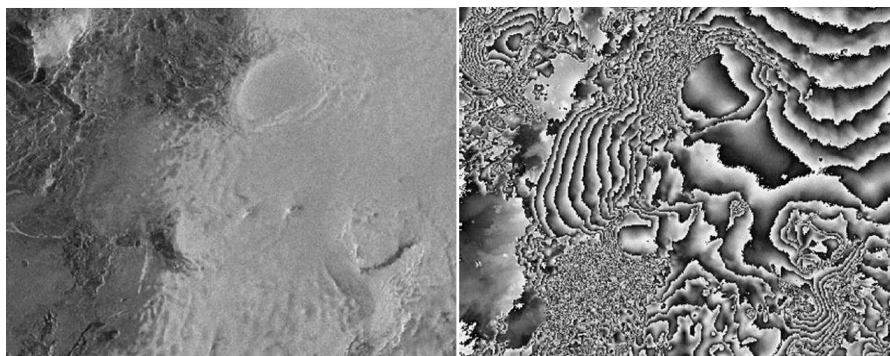
$$A(i', j') = \frac{1}{MN} \left| \sum_{ij}^{MN} S_1(i, j) S_2^*(i, j) \right| \quad (I.1.3.8)$$

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 (i', j') .

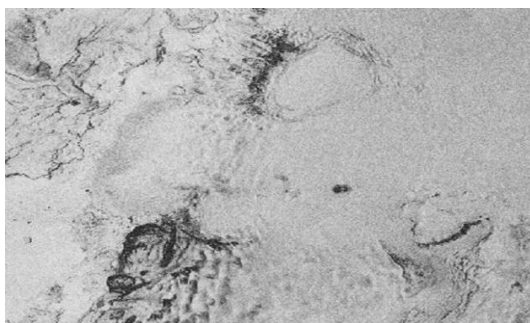
L'image de cohérence : qui est le module de (i', j') , elle est considérée comme une image indiquant la qualité de mesure et la rugosité utiliser pour le déroulement de phase. [1]

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.

(a) (b)



(c)

Figure I5: Exemple d'image inSAR de Vatnajökull ERS 1/2 (tandem data) ESA, (a) image d'amplitude, (b) interférogramme, (c) image de cohérence. [1]

Applications et limites de l'interférométrie

L'évolution technologique des capteurs, aéro et spatio portés, a permis à cette technique de se développer

et promouvoir diverses applications nécessitant l'information contenue dans l'interférogramme:

- Information sur l'élévation : les franges de l'interférogramme peuvent être considérées comme un réseau de courbe siso-altitude ;
- Information sur le mouvement de terrain : la phase est proportionnelle à la distance. Si le sol se déforme entre les deux prises de vues radar la modification se verra directement dans l'interférogramme ,avec une précision centimétrique. L'interférogramme peut alors être interprété comme l'image des mouvements du terrain où les franges sont des lignes d'iso-déplacement;
- Information sur la cohérence : lorsque la nature physique ou géométrique du sol a changé, la phase des pixels diffère d'une acquisition à l'autre (chatoiements différents). La mesure de la stabilité de la phase ,appelée cohérence, est un indicateur très sensible aux changements survenus sur le sol, même subtils.

Interférométrie différentielle

La technique DInSAR (Interférométrie SAR différentielle) est utilisée par de nombreux laboratoires pour des applications telles que l'étude des volcans, des tremblements de terre, des plaques tectoniques.....

L'Interférométrie différentielle SAR utilise les mêmes concepts que InSAR Sauf qu'on focalise sur le déplacement altimétrique d'un cible selon la visée satellite

- la distance au radar s'est modifiée et la différence de phase est affectée de la façon proportionnelle au déplacement d_{los} vers le radar (Los- line of sight)

$$\delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} d_{los}$$

Principe de DInSAR

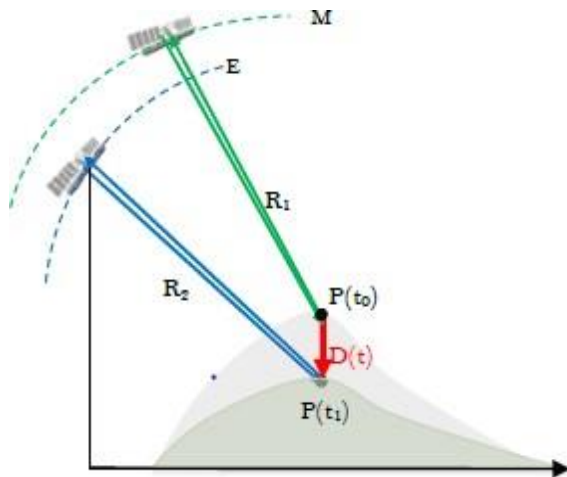


Figure I 6-Principe de DInSAR

Soit l'image M prise comme image de référence à un temps t_0 dont la phase du signal est φ_1 et la deuxième image E esclave prise à un temps t_1 dont la phase correspondante est φ_2 .

On suppose qu'une déformation de la surface $D(t)$ s'est produite entre les temps (t_0, t_1) , le point $P(t_0)$ se déplace vers le point $P(t_1)$. Ce déplacement est détecté selon la direction de visée du radar. La phase interférométrique entre ces deux signaux formulée comme suit:

$$\begin{aligned} \varphi_{int} &= (\varphi_1 - \varphi_2) = \Delta\varphi = -\frac{4\pi}{\lambda} ((R_1 - R_2) + D(t)) + \Delta\varphi_{atm} + \Delta\varphi_{bruit} \\ &= \Delta\varphi_{topo} + \Delta\varphi_{defo} + \Delta\varphi_{atm} + \Delta\varphi_{bruit} \end{aligned}$$

φ_{defo} est la phase de déformation, est la phase topographique.

Les phases d'erreurs dues aux couches atmosphériques et aux bruits perturbent la phase différentielle puisque cette dernière est de l'ordre de $\lambda \times \text{nombre}$, alors si le radar fonctionne en bande $C \approx 5,4 \text{ cm}$, une frange dans l'interférogramme différentielle correspond à un déplacement de 2,7 cm.

la phase due au déplacement éventuel lent sera nulle, par conséquent, seule la phase topographique est évaluée pour générer un MNT. Mais si les deux images sont prises à des dates différentes, la phase due au déplacement éventuel contribue dans . Pour pouvoir estimer le déplacement, il faut soustraire la composante topographique de l'interférogramme après l'avoir ramenée à la géométrie du couple interférométrique. Le résultat correspond à l'interférogramme différentiel est donné par:

$$\varphi_{defo} = (\varphi_{int} - \varphi_{topo}) + \Delta\varphi_{atm} + \Delta\varphi_{bruit}$$

Deux configurations sont possibles pour générer la phase topographique:

➤ Par simulation d'un interférogramme à partir d'un MNT existant après l'avoir ramené à la géométrie du couple interférométrique. Cette configuration est dite DInSAR à deux passes. Avec cette configuration on ne peut déterminer le déplacement que pour un instant donné.

➤ Par différences d'interférogramme générés avec une image de référence acquise avant l'évènement (la déformation de la surface): à partir de trois images acquises sur la même scène; on génère deux interférogramme en utilisant l'image référence 'maitre', un, représente la phase interférométrique (avant) et l'autre la phase interférométrique (après). La différence permet d'éliminer la composante topographique comme suit:

$$\varphi_{defo} = (\varphi_{int1} - \varphi_{int2}) + \Delta\varphi_{atm} + \Delta\varphi_{bruit}$$

Avec ces deux configurations, nous ne pouvons pas modéliser et suivre l'évolution des déformations des surfaces.

Par ailleurs et à première vue, la détection et la mesure de déplacement paraît simple, alors que son application réelle est pratiquement impossible. Les raisons essentielles sont dues aux erreurs topographiques (imprécision de la phase topographique), aux retards introduits par les couches atmosphériques qui peuvent avoir un nombre de franges supérieurs à celui des déplacements, ainsi que le retard introduit par les systèmes électroniques d'acquisition et de formation des images. Cet état de fait à pousser la communauté scientifique de s'orienter vers les recherches de solutions permettant d'exploiter les données radar interférométriques dans divers domaines d'application à savoir la surveillance le suivi des mouvement de glaciers, la cartographie des déformations après des éruptions sismiques ou volcaniques, le contrôle et suivi de la stabilité des ouvrages pétrolier sou hydroliques, ...etc .Ces nouvelles orientations portent

sur le traitement, non pas de deux interférogrammes, mais de série d'interférogrammes différentiels d'où l'appellation de l'interférométrie différentielles multipasses.

Interférométrie différentielle multi-passes

L'analyse qualitative et quantitative des déplacements est réalisée par le traitement d'un ensemble d'interférogrammes. Elle permet d'estimer la vitesse de déplacement, les erreurs topographique et atmosphérique. La figure (I.13) illustre le *DInSAR* multipasse (interférogramme différentiels temporels) comparativement au *DInSAR* (deux interférogrammes).

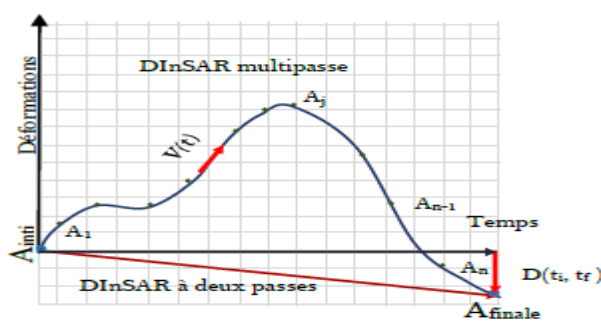


Figure I 7: Déformations temporelles et DInSAR

Pour sa mise en œuvre, différents concepts ont été proposés et développés [36], [37] et [38]. Ils font appel à des modélisations et des outils mathématiques adaptés aux problématiques étudiées. Parmi ces concepts, nous citons:

- Le concept des sous-ensembles à faibles lignes de base spatiales et temporelle SBAS (Small Baseline Subsets ou sous-ensembles des petites lignes de bases) [38]: il se base sur la construction des sous-ensembles ayant une continuité temporelle et faibles lignes de base spatiales (minimisation des phénomènes de décorrelations). Les plus importants avantages de ce concept sont: l'utilisation de toutes les acquisitions parfois redondantes dans les sous-ensembles augmente le ré-échantillonnage. La préservation de l'information différentielle par la sélection des interférogrammes ayant des petites lignes de base spatiales. Les inconvénients sont liés principalement aux modèles d'inversion utilisés et aux imprécisions du déroulement de phase spatiale, puisqu'on utilise, dans ce processus des interférogrammes différentiels déroulés.

- Le concept des *PS* (*Permanent Scatterer* ou diffuseurs permanents) [39] est fondé, principalement sur l'utilisation, dans le processus de traitement, que les cibles qui affichent une stabilité temporelle de la rétrodiffusion (caractéristique physique) d'où l'appellation de 'diffuseurs permanents'. Trois conditions sont nécessaires, pour une meilleure évaluation de l'application du

processus des *PS* à savoir:

- Le nombre d'images doit être important (supérieur à 30 images) mais parfois la non disponibilité des acquisitions sur la région d'étude fait défaut.
- Le déplacement doit être linéaire et long (pas de discontinuités temporelles des phases différentielles qui va poser des problèmes dans le déroulement de phase 3D).
- Le nombre de *PS* doit être grand afin de pouvoir couvrir toute la région avec une densité et une distribution adéquates. Néanmoins la rareté des *PS* dans certaines zones d'étude rend ce concept inapplicable dans ces zones.

Ce dernier critère conditionne les résultats du processus par les *PS* c'est pour cette raison que plusieurs algorithmes de sélection de ces cibles stables ont été développés [40] et [41], ils sont classés principalement en deux types: les algorithmes qui utilisent les amplitudes et ceux qui utilisent les images de cohérence. Dans la première catégorie on estime le seuil de dispersion d'amplitude qui est le rapport de l'écart type de l'amplitude sur sa moyenne. Pour la deuxième catégorie, on applique un seuillage sur l'ensemble des cartes de cohérence disponibles, toute fois, la cohérence est étroitement liée aux lignes de base interférométrique.

Néanmoins l'application du processus des *PS*, avec succès, dans les milieux présentant des cibles invariantes à l'échelle des études telles que les zones urbaines a été démontrée à travers plusieurs travaux publiés [42] et [43]. Toute fois, dans les zones non urbaines, cette technique est défailante à cause de la rareté des *PS*(s).

Pour compenser cette rareté et la rendre exploitable dans ces zones, une orientation vers la construction de sous-ensembles de formes et de tailles différentes à partir des cibles ayant des caractéristiques statistiques similaires, sous la condition d'adjacence spatiale. Ces sous-ensembles sont dits *DS* (Diffuseurs distribués, en anglais *Distributed Scatterers*).

Etat de l'art sur les algorithmes de déroulement de phase

Le déroulement de phase interférométrie l'un des plus grandes difficultés du traitement des images interférométriques est recherche de la valeur exacte de la phase interférométrique en chaque pixel,

Principe de déroulement de phase

L'une des principales difficultés pour la réalisation des MNT par l'interférométrie SAR est le déroulement de phase qui consiste à calculer la phase exacte (absolue) en chaque pixel à partir de la phase mesurée par l'interférogramme. Cela revient à trouver le facteur k qui vérifie :

$$\varphi(p) = \varphi_0(p) + 2k\pi \text{ Avec } k \in \mathbb{Z}$$

Dans le cas où nous travaillons dans l'espace à une dimension, la première idée qui vient à l'esprit

est de corriger un pixel par rapport à un pixel adjacent en supposant que la phase déroulée ne doit jamais varier de plus de entre deux points consécutifs. Dans le cas où la différence de phase dépasse, on dit que la phase a changé de cycle, c'est-à-dire que k doit augmenter ou diminuer de 1 de telle manière que la pente entre ces deux points soit la plus faible possible dans le cas où nous travaillons dans l'espace à deux dimensions, la mesure de l'interférogramme qui est modulo 2π , représente un réseau de franges dont les bords transitent de 0 à 2π brusquement, ces franges apparaissent comme des courbes de niveau séparées par une altitude dite altitude d'ambiguïté.

L'hypothèse fondamentale pour le déroulement de phase est de considérer que la surface à reconstruire est relativement régulière, et que par conséquent la phase déroulée est continue. Or, le signal bidimensionnel formant l'interférogramme, provient d'un échantillonnage spatial obtenu en azimut et en distance. Si le critère de Nyquist est respecté lors de l'échantillonnage dans les deux directions, l'échantillonnage doit se faire au double des fréquences maximales. Puisque la période des franges est de 2π , la différence de phase entre deux pixels voisins doit donc être inférieure à la demi période c.à.d :

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

Où p_1 et p_2 sont deux pixels voisins au sens des 8 connexités.

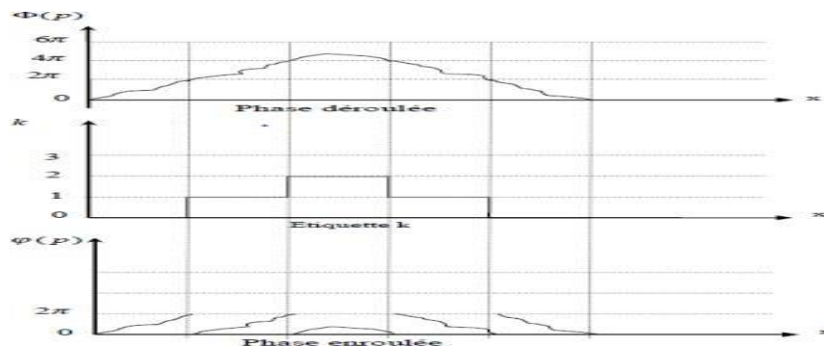


Figure I 8: le déroulement de phase

Méthode de déroulement de phase local

Le principe de cette méthode est basé sur le traitement des phases (pixels) de manière séquentielle selon une initialisation et un parcours. Dans ce sens, dans cette approche le signal bidimensionnel de phase, connu modulo 2π dans l'interférogramme, est échantillonné spatialement selon les tailles de pixel obtenue en azimut et en distance.

La première étape de cette méthode, consiste à déterminer la valeur de l'étiquette 'k' qui minimise la différence de phase entre deux pixels voisins selon la règle suivante:

On considère deux pixels voisins p_1 et p_2 où p_1 représente le point de référence, (c.à.d, on déroule p_2 par rapport à p_1) et $\Delta\varphi$ la différence de phase enroulée

Les différences de phase déroulée $\Delta\phi$ et la phase déroulée sont données par:

$$\text{Si } |\Delta\phi(p_1, p_2)| \leq \pi \text{ alors } \Delta\phi(p_1, p_2) = \Delta\phi(p_1, p_2) \Rightarrow k(p_2) = k(p_1)$$

$$\text{Si } |\Delta\phi(p_1, p_2)| > \pi \text{ alors } \Delta\phi(p_1, p_2) = \Delta\phi(p_1, p_2) - 2\pi \Rightarrow k(p_2) = k(p_1) + 1$$

$$\text{Si } |\Delta\phi(p_1, p_2)| < -\pi \text{ alors } \Delta\phi(p_1, p_2) = \Delta\phi(p_1, p_2) + 2\pi \Rightarrow k(p_2) = k(p_1) - 1$$

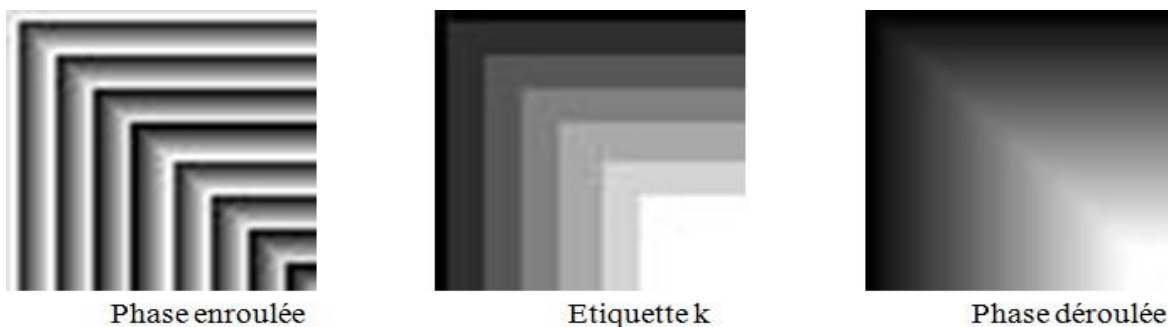


Figure I 9 : Déroulement de phase

Si la condition de Nyquist est respectée sur toute l'image (I 9), le déroulement s'obtient sans aucune difficulté par propagation à partir d'un pixel de référence, en prenant un chemin quelconque d'intégration.

Pour tenir compte des discontinuités de phase dues au bruit ou aux régions comportant une forte variation d'altitude, les recherches [Zebk-98] ont montré l'existence des pixels dits résidus, témoins d'erreurs locales, qui risquent d'entraîner des erreurs globales. Un résidu est détecté, lorsqu'on déroule l'interférogramme selon un parcours fermé.

Pour une meilleure compréhension de cette approche nous présentons l'exemple suivant:

L'intervalle des données interférométriques est $[-0,2, 0,2]$, on peut le normaliser à $[0,1[$, donc la valeur 0.5 remplace le nombre K. Si on prend la valeur du coin supérieur gauche comme référence (c à d, on lui attribue l'ordre $k=0$), on effectue le déroulement par rapport à cette valeur, en prenant deux sens de parcours différents comme le montre l'exemple suivant

Dans le cas non bruité:

Le déroulement est effectué en colonne et les colonnes sont ajustées selon la première ligne, les résultats

0.4	0.8	→	0.1	0	0	1	0.4	0.8	1.1
↓	↑		↓	0	0	0	0.3	0.5	0.7
↓	↑		↓	0	0	0	0.2	0.6	0.2
0.2	→	0.6	0.2	0	0	0	0.2	0.6	0.2
Interférogramme normalisé				Etiquettes			Phase déroulée		

Soit une fonction numérique $G(x)$ définie sur D telle que:

$$\forall, (x) = (x) - \varphi(x_{prec}) + 2k_x\pi$$

$$\text{avec } \hat{x} = \underset{x}{\operatorname{argmin}} |\varphi(x) - \varphi(x_{prec}) + 2k_x\pi| \text{ avec } k \in \mathbb{Z}$$

Où x_{prec} désigne le point qui précède x dans D (image interférogramme). On dit que la fonction G est la pseudo-dérivée

$$\forall x \in D, -\pi \leq G(x) \leq \pi$$

Définition 2: (pseudo-gradient)

Soit D un espace à deux dimensions, on définit $G(x,y)$ le pseudo-gradient de $\varphi(x,y)$ par:

$G(x,y) = (G_x(x,y), G_y(x,y))$ où $G_x(x,y)$ et $G_y(x,y)$ représentent la pseudo-dérivée de $\varphi(x,y)$ par rapport à x et y respectivement.

A partir de ces définitions, on introduit la notion de phase corrigée $(p1,p2)$ qui est calculée à partir des différences entre les phases principales

$\Delta\varphi(p1,2) = \varphi(p2) - \varphi(p1)$ selon la règle

$$\left\{ \begin{array}{ll} \Delta\varphi(p1,2) & \text{si } -\pi < (p1,p2) < \pi \\ \Delta\varphi(p1,2) + 2\pi & \text{si } (p1,2) \leq -\pi \\ \Delta\varphi(p1,2) - 2\pi & \text{si } (p1,2) \geq \pi \end{array} \right.$$

Les différences de phase corrigées selon les deux axes forment un champ vectoriel noté (x,y) :

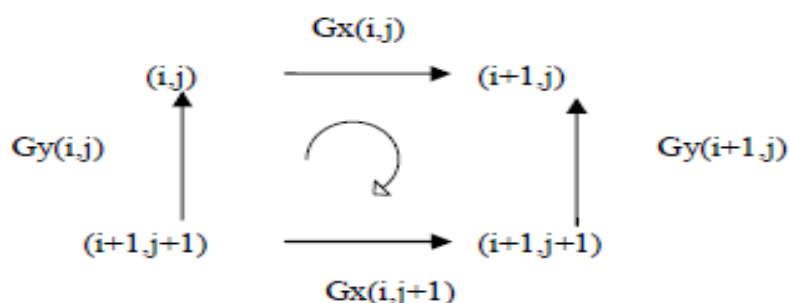
□ □

$$(i,j) = ((i,j), (i,j+1))$$

Dans le cas 2D, pour détecter la présence des singularités (les résidus), on peut considérer un contour fermé, formé par quatre pixels adjacents, la somme des différences de phase le long de tels contours vaut soit 1, -1 ou 0 ; les points pour lesquels la somme est non nulle sont appelés résidus positifs ou négatifs selon le signe du résultat pour un sens de parcours fixé.

Quand on intègre selon un parcours fixe, représenté par les schémas ci-dessous, le résidu est donné par :

$$\text{résidu}(i, j) = G_x(i, j) - G_y(i+1, j) - G_x(i, j+1) + G_y(i, j)$$



On peut ainsi détecter un résidu sur l'ensemble de l'image et créer une image 'résidus'. Si on reprend les exemples précédents:

0.4	0.4	0.8	-0.7	0.1	0.4	0.4	0.8	0.3	0.1	0.4	0.8	0.1
0.1		0.3		-0.6	0.1		0.3		0.4	0		0
0.3	0.2	0.5	0.2	0.7	0.3	0.2	0.5	0.2	0.7	0.3	0.5	0.7
0.1		-0.1		0.5	0.1		-0.1		0.5	0		0
0.2	0.4	0.6	-0.4	0.2	0.2	0.4	0.6	-0.4	0.2	0.2	0.6	0.2
Différences de phase					Phases corrigés					Détection des résidus		

0.9	-0.1	0.8	-0.7	0.1	0.9	-0.1	0.8	0.3	0.1	0.9	0.8	0.1
-0.4		0.3		-0.6	-0.4		0.3		0.4	-1		0
0.3	0.2	0.5	0.2	0.7	0.3	0.2	0.5	0.2	0.7	0.3	0.5	0.7
0.1		-0.1		0.5	0.1		-0.1		0.5	0		0
0.2	0.4	0.6	0.4	0.2	0.2	0.4	0.6	0.4	0.2	0.2	0.6	0.2
Différences de phase					Phases corrigés					Détection des résidus		

Nous remarquons que dans le premier exemple, tous les résidus sont nuls, alors on peut dire que c'est un interférogramme non bruité. Par contre, dans le deuxième exemple on a trouvé un résidu non nul, on dit alors que la phase est ambiguë, c'est pour cette raison que le problème du déroulement de phase n'est pas simple.

Nous avons testé ce processus sur des interférogramme réels. La figure I.10 représente les résultats obtenus.

Dans certaines zones (figure I.10a1), nous remarquons que les franges apparaissent de façon distincte. On dit alors que la phase est faiblement ambiguë. Dans d'autres zones, les

franges ont pratiquement disparu, on dit que la phase est fortement ambiguë

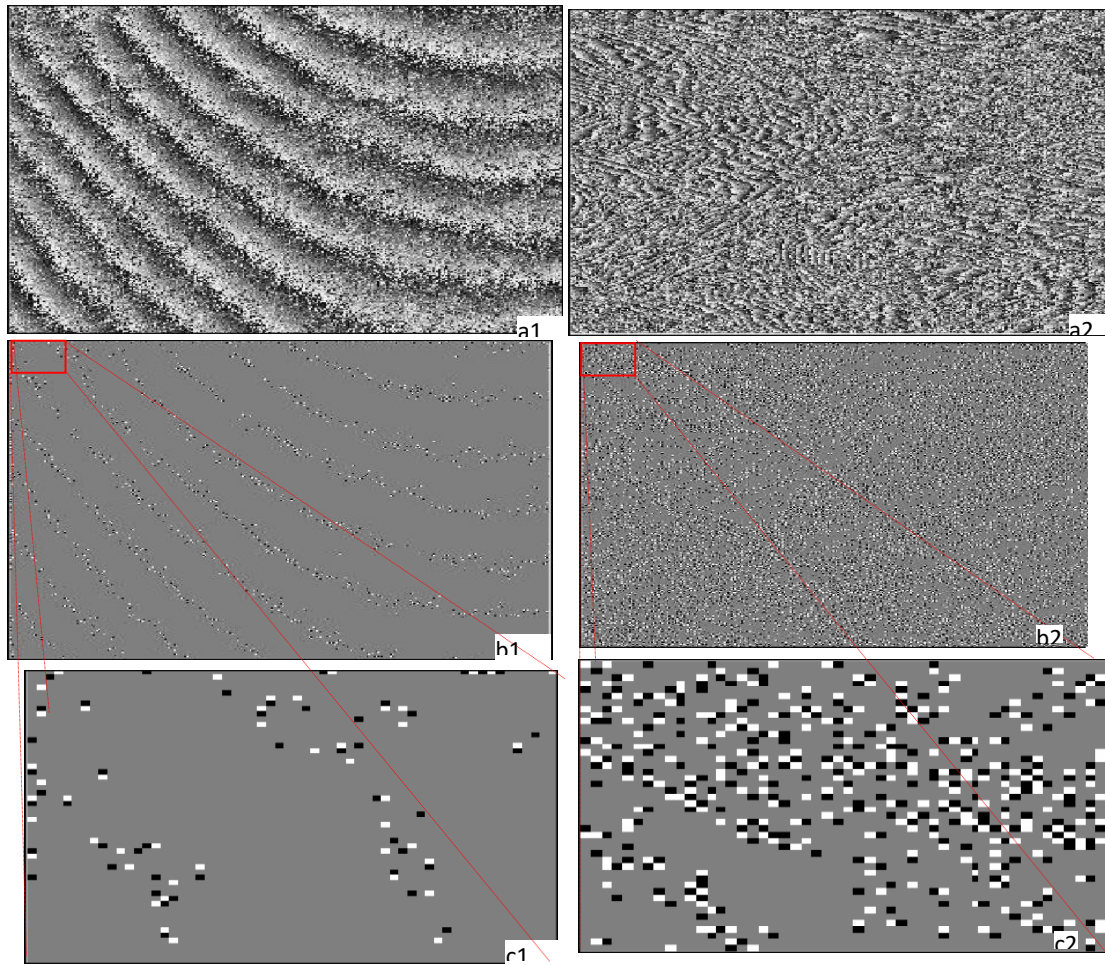


Figure-I.10: a1,a2) interférogrammes réel simagettes300*300

(b1)résidu en noir(-1) et blanc(1)(résidu des zones faible mentambiguë),b2) résidu en noir(-1) et blanc (1)(résidu des zones fortement ambiguë),c1)et c2) zooms des coins gauches

Bone[Igor-00& Zebk-98]a présenté un résultat important qui montre que le nombre de résidus positifs dans une image est égal au nombre de résidus négatifs. Ces résidus jouent un rôle très important dans le déroulement de phase.

A partir de ce résultat, plusieurs méthodes locales de déroulement de phase ont été développées pour déterminer de manière automatique les coupures et les masques permettant de neutraliser l'effet de différences de phase erronées. Nous présentons brièvement ces méthodes plus loin.

Méthode de déroulement de phase globale

Dans cette méthode, les pixels sont regroupés en région homogènes du point de vue des sauts de phase. Utilise les contours des régions détectés par un gradient puis une fermeture des contours pour

ajouter $+\pi$ à chaque fois qu'une de ces lignes est traversée. Cette approche, liée à la détection des contours, est très sensible au bruit malgré le large filtre gaussien utilisé. Ce dernier a été supprimé par ailleurs certains détails (franges étroites), cette méthode présente l'avantage de beaucoup moins propager les erreurs que les méthodes locales.

Méthode de déroulement de phase hybride

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

La méthode Markovienne formalise le problème de déroulement de phase comme un problème d'étiquetage de graphe. Chaque pixel est un nœud du graphe que l'on doit classer.

Les classes possibles sont des étiquettes qui correspondent à un nombre de cycles de phase à ajouter.

Approche Markovienne

On a vu que le problème du déroulement de phases pouvait être assimilé à un problème d'étiquetage. En effet, les champs de Markov constituent une autre approche permettant la recherche d'une solution globale à partir de la modélisation des interactions locales. Le développement de phase est alors vu comme une recherche des étiquettes k correspondant aux

Multiples de 2π recherchés sur l'ensemble des sites (pixels) de l'interférogramme.

➤ Définition

Soit $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$ un ensemble des m sites de l'image. Chaque site prend sa valeur sur l'ensemble des étiquettes possibles $A = \{1, 2, 3, \dots, k_{\max}\}$ où k_{\max} est un entier préalablement déterminé tel qu'il soit supérieur ou égal au nombre estimé de franges.

Soit $\varphi = \{\varphi_s, s \in S\}$ un champ connu des données où φ_s est un pixel au sites. On définit

$\Omega = \{\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n\}$ un ensemble de configurations des phases déroulées. Notre but est de

Rechercher parmi toutes les configurations possibles de Ω la configuration optimale à notre système $\phi_{opt} \in \Omega$

➤ Modélisation Markovienne

Dérouler la phase consiste à trouver une configuration estimée $\hat{\phi}$ la plus optimale $\hat{\phi} \in \Omega_{opt}$ telle que:

$$\phi = \underset{\hat{\phi} \in \Omega}{\operatorname{argmin}} \int R(\phi, \hat{\phi}) P(\phi / \varphi) d\phi$$

Où R est le risque de Bayes déterminé par l'estimateur bayésien adopté. Par l'application de la règle de Bayes:

$$P(\phi/\varphi) = \frac{P(\phi/\varphi)P(\phi)}{P(\varphi)}$$

$P(\varphi/\phi)$: est la probabilité conditionnelle.

$P(\phi)$: est la probabilité a priori.

$P(\varphi)$: la probabilité du champ des données observées. Elle est uniformément distribuée, donc elle est constante pour toute l'image.

$P(\phi/\varphi)$: est la probabilité a posteriori.

La configuration optimale est trouvée par la maximisation de l'expression précédente

Pour cela on doit modéliser les probabilités $P(\phi/\varphi)$ et $P(\phi)$

Conclusion

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

Notamment pour les images de phase interférométriques (interférogrammes), cette étude est considérée comme un Background suffisant avant d'entamer le déroulement.

Ce chapitre a aussi fourni une présentation de problème de déroulement de phase, formulations pertinentes, un état de l'art sur quelques méthodes référentielles, petite analyse et comparaison ont été élaborés.

Chapitre 02 : Les codes de compression

Chapitre 02 : Les codes de compression

V. Introduction

VI. Concepts généraux sur la compression d'image

3. Image

- ✓ Définition d'image
- ✓ Définition d'image numérique
- ✓ Type d'image

C. Image matricielle

D. Image vectorielle

- ✓ Définition d'un pixel
- ✓ La quantification
- ✓ L'histogramme

4. La compression

- ✓ La définition de compression
- ✓ Les types de compression

D. Compression symétrique et a symétrique

E. Compression avec perte

F. Compression sans perte

VII. Le codage

8. Définition du codage

9. Définition d'entropie

10. Le codage de Shannon-Fano

- ✓ L'algorithme de compression Shannon-Fano
- ✓ Modèles et code

11. Le codage de Huffman

12. Lempel_Ziv_WelchCodage: Lempel_Ziv Welch (LZW)

13. Codage arithmétique

14. Avantages et inconvénients de la compression sans perte

VIII. Conclusion .

I.Introduction

La compression de données en informatique ou dans le domaine des télécommunications est un processus visant à diminuer le volume des fichiers informatiques ou la quantité de données transmises. La compression, c'est l'opération informatique consistant à transformer une suite de bits A en une suite de bits B plus courte pouvant restituer les mêmes informations, ou des informations voisines, en utilisant un algorithme de décompression. C'est une opération de codage qui raccourcit la taille (de transmission, de stockage) des données au prix d'un travail de compression. Celle-ci est l'opération inverse de la décompression.

Il s'agit donc de convertir des données d'un format d'origine vers un format compressé, ce qui peut se faire avec perte ou sans perte d'information

Un algorithme de compression sans perte restitue après décompression une suite de bits strictement identique à l'originale. Les algorithmes de compression sans perte sont utilisés pour les archives, les fichiers exécutables ou les textes.

Un algorithme de compression sans perte restitue après décompression une suite de bits strictement identique à l'originale. Les algorithmes de compression sans perte sont utilisés pour les archives, les fichiers exécutables ou les textes.

Concepts généraux sur la compression d'image

1. Image

✓ **Définition d'image** : Une image en informatique est appelée une image numérique et qui désigne toute image acquise, créée, traitée et stockée sous forme binaire.

✓ **Définition d'image numérique** : Le terme d'image numérique désigne, dans son sens le plus général, toute image qui a été acquise, traitée et sauvegardée sous une forme codée représentable par des nombres (valeurs numériques). La numérisation est le processus qui permet de passer de l'état d'image physique (image optique par exemple) qui est caractérisée par l'aspect continu du signal qu'elle représente (une infinité de valeur de l'intensité lumineuse par exemple), à l'état d'image numérique qui est caractérisée par l'aspect discret (l'intensité lumineuse ne peut prendre que des valeurs quantifiées en un nombre fini de points distincts)[13]

C'est cette forme numérique qui permet une exploitation ultérieure par des outils logiciels sur ordinateur [2].

✓ Type d'image

Image matricielle : Une image matricielle est une image en mode point. Le système de codage le plus universel consiste en effet à décomposer la représentation graphique, l'image, en un certain nombre de points élémentaires caractérisés par leurs coordonnées spatiales et leur couleur.

Image vectorielle : Dans une image vectorielle les données sont représentées par des formes géométriques simples qui sont décrites d'un point de vue mathématique. Il s'agit de représenter les données de l'image par des formules géométriques qui vont pouvoir être décrites d'une façon mathématique. Autrement dit, on stocke la succession d'opérations conduisant au tracé dans le cas d'une image vectorielle, alors qu'on mémorise une mosaïque de points élémentaires dans le cas d'image matricielle. Ces images présentent deux avantages : elles occupent peu de place en mémoire et peuvent être redimensionnées sans perte d'information

✓ **Définition d'un pixel :** Contraction de l'expression anglaise « Picture éléments » : élément d'image, le pixel est le plus petit point de l'image, c'est une entité calculable qui peut recevoir une structure et une quantification. Si le bit est la plus petite unité d'information que peut traiter un ordinateur, le pixel est le plus petit élément que peuvent manipuler les matériels et logiciels d'affichage ou d'impression [3].

La quantité d'information que véhicule chaque pixel donne des nuances entre image monochromes et image couleurs. Dans le cas d'une image monochrome, chaque pixel est codé sur un octet, et la taille mémoire nécessaire pour afficher une telle image est directement liée à la taille de l'image.

Codage de pixel

Pratiquement toujours, la valeur d'un pixel est un mot binaire de longueur K bits, par conséquent un pixel peut prendre l'une des valeurs de l'intervalle $[0 \dots 2^K - 1]$. La valeur K est appelée profondeur de l'image. L'ensemble de ces pixels est contenu dans un tableau à deux dimensions (une matrice) constituant l'image finalement obtenue.

✓ **La quantification :**

Une variante de la précédente consiste à mettre à zéro m coefficients, $0 < m \leq N * N$ parmi les plus petits (tri des valeurs dans l'ordre décroissant). C'est ce qui est fait dans le tutoriel 2. On

peut prévoir le taux de compression, mais pas l'impact sur la qualité : en effet, même si le spectre contient des coefficients élevés, s'il y en a beaucoup, certains seront éliminés

✓ **Histogramme**

L'histogramme des niveaux de gris ou des couleurs d'une image est une fonction qui associe à chaque valeur d'intensité le nombre de pixels de l'image ayant cette valeur.

On appelle histogramme de l'image I, la fonction H définie sur l'ensemble des entiers naturels par : $H(x) = \text{Card} \{P : I(P) = x\}$ c'est à dire que H(x) traduit le nombre d'apparitions du niveau de gris x dans l'image I. Cette définition se généralise aux images multi-bandes, L'histogramme est un outil privilégié en analyse d'images car il représente un résumé simple, mais souvent suffisant du contenu de l'image. Pour diminuer l'erreur de quantification, pour comparer deux images obtenues sous des éclairages différents, ou encore pour mesurer certaines propriétés sur une image, on modifie souvent l'histogramme correspondant [4].

2. La compression

✓ **La définition de compression**

La compression de données est un processus de réduction du nombre de bits utilisés pour stocker ou transmettre informations et diminuer l'espace parce que la taille de données est réduite, temps de transmission, et le coût. Données compression est couramment utilisées dans les systèmes modernes de base de données [5]. Plusieurs mesures sont couramment utilisées pour exprimer l'exécution d'un procédé de compression, elles basées sur :

Les différents algorithmes de compression trois critères :

- Le taux de compression : c'est le rapport de la taille du fichier compressé sur la taille du fichier initial.
- La qualité de compression : sans ou avec pertes.
- La vitesse de compression et de décompression

✓ **Les types de compression**

A. Compression symétrique et a symétrique

Les algorithmes de compression peuvent être divisés en deux catégories distinctes symétrique et asymétrique. Une méthode de compression symétrique utilise le même algorithme, et demande la même capacité de calcul, aussi bien pour la compression que pour la décompression. Les méthodes de compression asymétriques demandent plus de travail

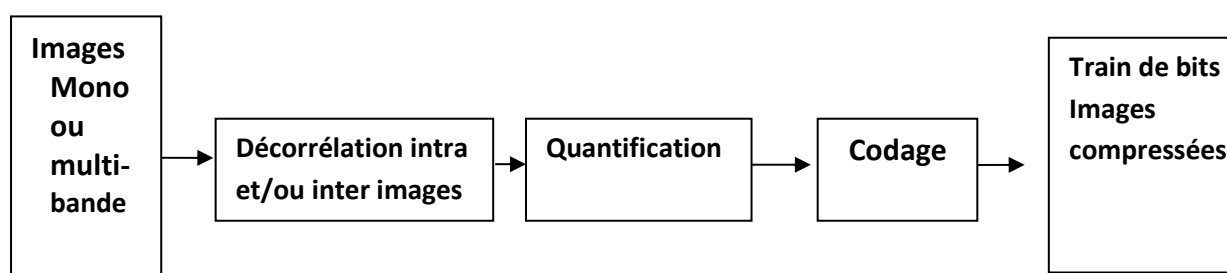
dans une direction que dans l'autre. Normalement, l'étape de compression demande beaucoup plus de temps et de ressources systèmes que l'étape de décompression.

Dans la pratique, cela prend tout son sens : par exemple, imaginons que nous ayons une base de données où les données seront compressées une seule fois mais décompressées un grand nombre de fois pour la consultation, alors on pourra certainement tolérer un temps beaucoup plus grand pour la compression, dans le but de trouver le taux de compression le plus élevé, que pour la décompression, où la vitesse est prédominante. Un algorithme asymétrique qui utilise beaucoup plus de temps CPU pour la compression mais qui est beaucoup plus rapide à la décompression serait un bon choix dans ce cas-là.

B. Compression avec pertes

La compression avec pertes est aussi appelée communément compression destructrice. La compression avec pertes utilise des algorithmes qui compressent les données en les dégradant. Pour éviter que ces dégradations soient perçues par les utilisateurs, les concepteurs d'algorithmes pour la compression destructrice se basent sur les limites de perception au niveau de l'ouïe et de la vue chez l'être humain [5].

Les algorithmes de compression destructrice sont utilisés pour compresser des données graphiques, audio et vidéo. Ils ne pourraient être appliqués sur des données textuelles ou sur celles d'un programme au risque de les rendre illisibles ou inexécutables. La perte d'information est irréversible, il est impossible de retrouver les données d'origine après une telle compression. La compression avec perte est pour cela parfois appelée compression irréversible ou non conservative.



FigureII 1: Schéma de la compression [4].

C. Compression sans pertes

La compression sans perte (loss less) est principalement applicable aux données qui demandent une restitution exacte. Dans le contexte de la compression sans perte, la méthode prend en entrée une série de bits X qu'elle transforme en une nouvelle série de bits Y plus courte que X . La série de bits Y est transmise ou stockée pour usage ultérieur. Lorsque l'on veut récupérer les données, on prend Y et on applique la méthode de compression inverse (la méthode de décompression) pour récupérer X intact. La figure (II.1) illustre schématiquement le processus [5].

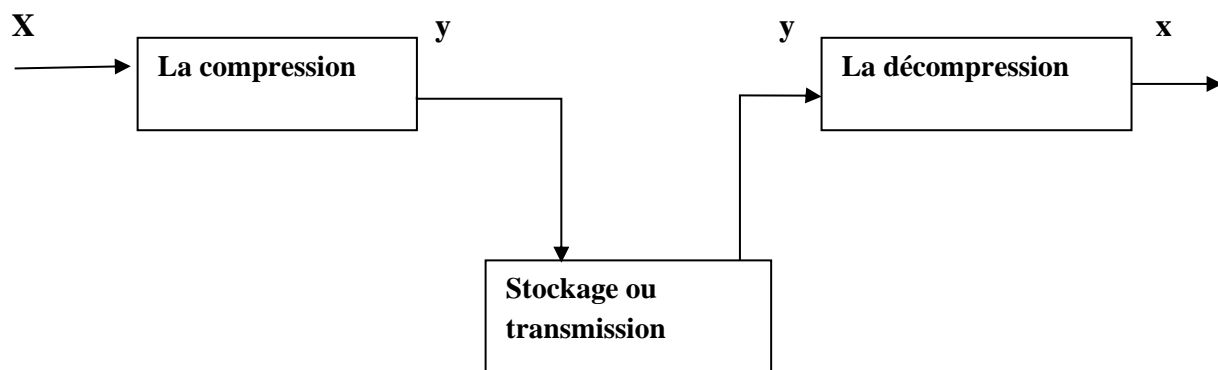


Figure II .2 : Une vision simplifiée de la compression sans perte [4].

II. Le codage

1. Définition du codage :

Le codage consiste à donner un mot de code à chaque symbole d'un alphabet donné. Une fonction de codage $C : \Sigma \rightarrow \{0, 1\}$ Permet de traduire un symbole de l'alphabet Σ en une séquence de bits, ou mot de code.

2. Définition d'entropie :

En informatique, l'entropie désigne la quantité d'informations que peut représenter ou contenir une source d'information. Ce concept a été introduit en 1948 par Claude Shannon, une source d'information est généralement un fichier informatique quelconque. Plus une source d'information est redondante, moins elle contient d'information au sens de Shannon. Une source d'information dont tous les symboles sont équiprobables a une entropie maximale. L'entropie est aussi la plus petite quantité moyenne de bits nécessaire pour communiquer la vraie valeur d'une variable aléatoire. En d'autres mots, l'entropie est

la plus petite quantité moyenne de bits capable de représenter l'information tirée de la variable aléatoire. Il s'agit d'une limite mathématique fondamentale pour la compression de données sans perte [7].

L'entropie d'une variable aléatoire discrète X, qui peut prendre les valeurs $\{x_1, x_2, \dots, x_i\}$, est :

$$H(x) = \sum_{i=1}^N P(x_i) \log_2 \left(\frac{1}{P(x_i)} \right) = -\sum_{i=1}^N P(x_i) \log_2 \left(\frac{1}{P(x_i)} \right)$$

Où $P(x_i)$ est la probabilité de x_i

3. Le codage de Shannon-Fano

Les principaux pionniers de la compression de données furent sans doute C. Shannon et R. M. Fano. Ils démontrèrent que l'on peut coder un message en utilisant la probabilité d'apparition d'un symbole ainsi que la base 2. Le principe est de recoder des informations sur moins de 8 bits.

✓ L'algorithme de compression Shannon-Fano

Il utilise des codes de longueur variable, comportant d'autant plus de bits que la probabilité du symbole est faible. Les codes sont définis à l'aide d'un algorithme spécifique selon un arbre de Shannon-Fano [8].

1. Les symboles sont triés et classés en fonction de leur fréquence en commençant par le plus fréquent.
2. La liste des symboles est ensuite divisée en deux parties de manière à ce que le total des fréquences de chaque partie soit aussi proche que possible.
3. Le chiffre binaire 0 est affecté à la première partie de la liste, le chiffre 1 à la deuxième partie.
4. On répète les étapes 2 et 3 sur chacune des parties. Et ainsi de suite jusqu'à ce que chaque symbole corresponde à un code déterminé [8].

• Remarque

Cette méthode ne permet pas d'approcher efficacement l'entropie. On lui préfère l'algorithme de Huffman.

✓ Modèles et code

Code de modèle divisé en codage de Huffman et codage arithmétique.

4. Le codage de Huffman

Un premier algorithme de codage de Huffman a été développé par David Huffman en 1951. Le codage de Huffman est un algorithme de codage entropique utilisé pour la compression de données sans perte. Dans cet algorithme, les codes de longueur fixe sont

remplacés par des codes de longueur variable. Lorsque vous utilisez des mots de code de longueur variable, il est souhaitable de créer un code de préfixe, évitant ainsi la nécessité d'un séparateur pour déterminer les limites des mots de code. Huffman utilise un tel code de préfixe [9].

Cet algorithme permet d'obtenir de bons résultats, mais il faut conserver entre la compression et la décompression, le dictionnaire des codes utilisés.

La procédure de Huffman repose sur deux observations concernant les codes de préfixe optimaux [10].

1. Dans un code optimal, les symboles qui apparaissent plus fréquemment (ont une probabilité d'occurrence plus élevée) auront des mots de code plus courts que les symboles moins fréquents.
2. Dans un code optimal, les deux symboles les moins fréquents auront la même longueur.
3. Les deux mots de code les plus longs ne diffèrent que par leur dernier bit et correspondent au symbole le plus long.

a) Le But

Réduire le nombre de bits utilisés pour le codage des caractères fréquents et d'augmenter ce nombre pour des caractères plus rares [11].

b) Algorithme

L'algorithme de Huffman utilise l'approche gloutonne, c'est-à-dire qu'à chaque étape, l'algorithme choisit la meilleure option disponible. Un arbre binaire est construit de bas en haut. — Algorithme de compression

1. On cherche la fréquence des caractères (symboles).
2. On trie les caractères par ordre décroissant de fréquence.
3. On construit un arbre pour donner le code binaire de chaque caractère.

✓ Construction de l'arbre :

on relie deux à deux les caractères de fréquence les plus basses et on affecte à ce nœud la somme des fréquences des caractères. Puis, on répète ceci jusqu'à ce que l'arbre relie toutes les lettres. L'arbre étant construit, on met un 1 sur la branche à droite du nœud et un 0 sur celle de gauche [11].

✓ Exemple d'encodage de Huffman

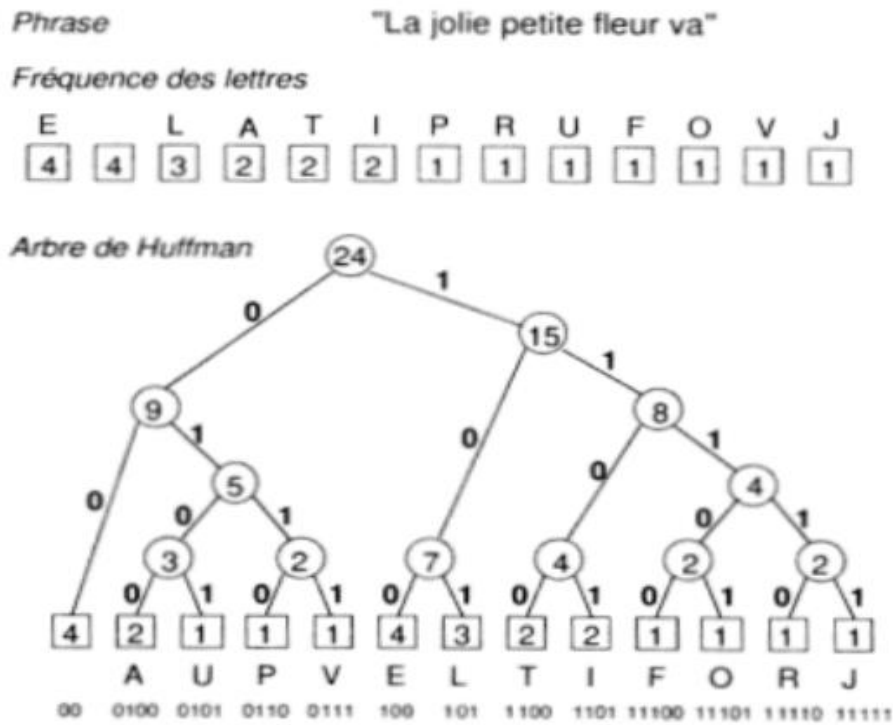


Figure II.3: Arbre de Huffman

Le fichier compressé se compose d'une suite de codes sans séparateur, bien que les codes comportent un nombre variable de bits, car chaque code a la propriété d'unicité de son préfixe.

✓ **Algorithme de décompression**

On transmet la bibliothèque de codage, puis on associe les caractères à leur code [12].

c) Utilité et caractéristiques de compression

Cet algorithme permet de compresser aussi bien des images que des textes, on parle de compression statistique ou codage entropique (probabilités d'apparition d'un caractère). On obtient une compression satisfaisante et un temps de compression assez rapide. En revanche il faut transmettre la bibliothèque en même temps.

Pour une source X d'entropie $H(X)$. La longueur moyenne L d'un mot de code obtenu par codage de Huffman vérifie la relation suivant [13] :

$$H(x) \leq L < H(x) + 1$$

En résumé l'algorithme de codage de Huffman peut-être traduite de la manière suivante :

1. Les symboles sont triés et classés en fonction de leur fréquence dans un ordre décroissant.
2. A partir des deux symboles présentant la fréquence la plus faible, un nœud est créé. Il lui est affecté un poids égal à la somme des fréquences des deux symboles.
3. Le nœud créé remplace désormais les deux symboles dans la suite du processus. A ces derniers sont affectés respectivement les chiffres binaires 0 pour le plus fréquent et 1 pour le plus rare.
4. La même démarche est reprise en considérant les deux symboles ou nœuds de poids le plus faible. Elle est renouvelée tant qu'il ne reste plus d'un nœud libre.

5. Codage arithmétique

La compression arithmétique, comme Huffman est une compression statistique, mais elle utilise des réels à la place des bits. Dans cette section, on va présenter les idées principales du codage arithmétique [13], qui est une des techniques de compression sans pertes plus performante, et probablement la plus importante dans les applications et les normes actuelles. Contrairement aux algorithmes de codage utilisant des mots de codes à longueur variable, le code ici, est associé à la séquence et non pas à chaque symbole pris individuellement. Le codage Arithmétique se singularise par sa capacité à un ensemble de symboles sur un nombre non entier de bits. En réalité, il n'assigne pas un mot de code à chaque symbole mais il associe une valeur de l'intervalle $[0,1]$ à un ensemble de symboles. Le principe repose sur le découpage de l'intervalle $[0,1]$. Chaque symbole se voit attribué une partition de l'intervalle dont la taille est égale à sa probabilité d'occurrence. L'ordre de rangement est mémorisé pour être utilisé lors du décodage.

L'objectif principal du codage Arithmétique est d'attribuer un intervalle à chaque symbole potentiel. Ensuite, un nombre décimal est attribué à cet intervalle. L'algorithme commence avec un intervalle de 0.0 et 1.0. Après la lecture de chaque symbole d'entrée de l'alphabet, l'intervalle est subdivisé dans un intervalle plus petit proportionnellement à la probabilité du symbole d'entrée. Ce sous-intervalle devient alors le nouvel intervalle et est divisé en parties en fonction de la probabilité des symboles de l'alphabet saisi. Ceci est répété pour chaque symbole d'entrée. Et, à la fin, tout nombre à virgule flottante du dernier intervalle détermine de manière unique les données d'entrée [14].

Propriétés du codage Arithmétique [14]:

- 1- Il utilise un nombre fractionnaire binaire.
- 2- Convient aux petits alphabets avec des probabilités très asymétriques.
- 3- Ce codage prend un flux de symbole d'entrée et le remplace par des nombres à virgule flottante (0,1).
- 4- Cela produit des résultats dans un flux de bit.
 - a) Algorithme [15]
 1. Calculer la probabilité associée à chaque symbole dans la chaîne à coder.
 2. Associer à chaque symbole un sous-intervalle proportionnel à sa probabilité d'occurrence dans l'intervalle [0 1] (l'ordre de rangement sera mémorisé car il est nécessaire au décodeur).
 3. Initialiser la limite inférieure de l'intervalle de travail à la valeur 0 et la limite supérieure à la valeur 1.
 4. Tant qu'il reste un symbole dans la chaîne à coder:
 - Largeur = limite supérieure – limite inférieure
 - Limite inférieure = limite inférieure + Largeur x (limite basse du sous-intervalle du symbole)
 - Limite supérieure = limite inférieure + Largeur x (limite haute du sous-intervalle du symbole).
 - 5. La limite inférieure code la chaîne de manière unique.

Codage arithmétique: exemple

Soit la séquence binaire à coder : 100110, pour cette séquence on applique l'algorithme de compression arithmétique orienté bit c.-à-d. on voit l'information comme un train des bits de deux états possibles (0,1). Donc le tableau des probabilités est :

état	Probabilité (occurrence)	Intervalle
0	3/6	[0,0.5[
1	3/6	[0.5 ,1[

La compression :

Symbole	BI	BS	BB
	0	1	1
1	0.5	1	0.5
0	0.5	0.75	0.25

0	0.5	0.625	0.125
1	0.5625	0.6250	0.0625
1	0.59375	0.6250	0.3125
0	0.56375	0.609375	0.015625

On peut choisir n'importe quel nombre flottant dans le dernier intervalle, exemple n=0

La décompression :

état	Probabilité (occurrence)	Intervalle
0	3/6	[0,0.5[
1	3/6	[0.5 ,1[

L=6 ; n=0.6

N	Symbole décodé	BI	P
0.6	1	0.5	0.5
0.2	0	0	0.5
0.4	0	0	0.5
0.8	1	0.5	0.5
0.6	1	0.5	0.5
0.2	0		

Exemple :

Pour présenter la compression, nous allons utiliser un exemple et nous décrirons chaque étape de compression. Codons le mot "ESIPE" à l'aide du codage arithmétique.

La première étape consiste à décompter chaque lettre du mot. Nous avons donc 2 'E', 1 'S', 1 'I' et 1 'P'. Nous en générons alors une probabilité de présence dans le mot soit 40% de chance de trouver un E et 20% de chance pour les autres lettres. Dernière actions à effectuer pour cette première partie, nous affectons à chaque lettre un intervalle entre 0 et 1 de la manière suivante :

- La lettre 'E' à une probabilité de 40% (soit 0.4). Son intervalle est donc [0,0.4[

- La lettre 'P' a une probabilité de 20% (soit 0.2). Son intervalle est donc [0.4,0.6[
- Etc...

On obtient dès lors le tableau suivant :

Lettre	Probabilité	Intervalle
E	4/10	[0,0.4[
S	2/10	[0.4,0.6[
I	2/10	[0.6,0.8[
P	2/10	[0.8,1.0[

Le codage va maintenant consister à remplacer le mot ESIPÉ par un nombre flottant lui correspondant. Pour cela, le mot va se voir affecter un intervalle compris entre 0 et 1 où chaque nombre compris entre les deux intervalles permettra de retrouver le mot ESIPÉ.

L'algorithme appliqué est le suivant : le mot commence avec un intervalle de [0,1[. Puis pour chaque lettre croisée, nous appliquons la formule suivante :

- La borne inférieure (BI) du mot est modifiée avec le résultat du calcul " $BI + (BS - BI) * \text{Borne_Inférieure_Lettre}$ "
- La borne supérieure (BS) du mot est modifiée avec le résultat du calcul " $BI + (BS - BI) * \text{Borne_Supérieure_Lettre}$ "

Le tableau suivant montre les étapes du calcul:

Lettre	Borne Inférieure	Borne Supérieure
	0.0	1.0
E	0.0	0.4
S	0.16	0.24
I	0.208	0.224
P	0.2208	0.224
E	0.2208	0.22208

Dès lors, tous nombre flottant entre 0.2208 et 0.22208 est le format compressé du mot "ESIPÉ"

6. Avantages et inconvénients de la compression sans perte

Des techniques	Avantages	Désavantages
Codage LZW	<p>Compression simple, rapide et bonne [16].</p> <p>Table de mots de code dynamique construite pour chaque fichier [16].</p> <p>La décompression recrée la table de mots de code afin qu'il ne soit pas nécessaire de la passer [19].</p>	<p>-La compression réelle est difficile à prédire Jin dal [16].</p> <p>- Il occupe plus d'espace de stockage que le taux de compression optimal [16].</p> <p>L'algorithme LZW ne fonctionne que lorsque les données d'entrée sont suffisamment grandes et que la redondance des données est suffisante [17].</p>
codage de Huffman	<p>cet algorithme de compression très simple et efficace compressant des fichiers texte ou programme [16].</p> <p>Cette technique montre des séquences plus courtes pour des caractères plus fréquents [17].</p> <p>Sans préfixe: aucun codage de séquence de bits d'un caractère n'est le préfixe de tout autre codage de séquence de bits [17].</p>	<p>Une image compressée par cette technique est mieux compressée par d'autres algorithmes de compression [16].</p> <p>L'arbre de code doit également être transmis ainsi que le message (sauf si une table de code ou une table de prédiction est convenue entre l'expéditeur et le destinataire) [17].</p> <p>Données entières corrompues par un bit corrompu [17].</p> <p>La performance dépend d'une bonne estimation si l'estimation n'est pas meilleure que la performance est mauvaise [17].</p>
codage arithmétique	<p>sa capacité à garder le codage et le modeler séparés [18].</p> <p>aucune arborescence de code ne doit être transmise au récepteur</p>	<p>le codage arithmétique a des opérations complexes car il consiste en additions soustractions multiplications et</p>

	<p>[18]. son utilisation les valeurs fractionnaires [18].</p>	<p>divisions [18]. codage arithmétique nettement plus lent que le codage de Huffman, il n'existe aucune précision infinie [18]. deux structures de problèmes pour stocker les nombres et la division constante de l'intervalle peuvent entraîner un chevauchement de code [18]</p>
--	---	--

III. Conclusion .

Dans ce chapitre nous avons présenté les codes de compression. Les concepts généraux sur ces codes et leurs applications sur l'image a été le but substantiel de ce chapitre. Nous avons principalement élaboré les définitions et les types des compressions possibles applicable pour les images (compression symétrique et a symétrique , avec perte et sans perte) et précisément nous avons étudié les codes de compression Huffman ,l'entropie ,Shannon, et le code arithmétique.

Les notions de base étudiées dans ce chapitre ouvrent les perspectives de notre travail qui est : comment appliquer le code arithmétique sur les images interférométriques InSAR. cela fait l'objet du dernier chapitre.

Chapitre 03 : Implémentation et Analyse

Introduction

Le système de radar interférométrique à synthèse d'ouverture (InSAR) est un outil de télédétection fiable utilisé principalement pour étudier les surfaces terrestres. Il est capable de fonctionner de jour comme de nuit et dans toutes les conditions météorologiques sans être gêné par la présence de brouillard, de nuages ou d'autres obstacles météorologiques. Deux applications globales sont envisagées dans les systèmes d'imagerie inSAR : l'obtention de cartes topographiques [1] et le suivi de l'évolution de la surface [2]. La différence entre SAR et inSAR est la double acquisition du signal rétrodiffusé soit par deux antennes et un passage soit par une antenne et deux passages [3]. La double acquisition du signal rend l'interférogramme inSAR plus utile que l'image de phase de SAR par le fait que la mesure résultante contient uniquement la phase liée au chemin parcouru. Cependant, l'interférogramme inSAR n'est pas directement utilisable car toutes les phases mesurées sont enroulées dans $(-\pi, \pi]$. Pour retrouver la vraie phase qui interprète correctement l'attitude du point imagé, il faut utiliser la technique du dépliage de phase. Interferogram, le dépliage de phase n'est qu'une simple intégration des différences enveloppées dans une grille à deux dimensions. Pratiquement, il n'y a pas de mesure interférométrique sans bruit. En effet, les interférogrammes sont sujets à de nombreux bruits produisant des sauts de phase qui peuvent engendrer des résidus dans des zones critiques. Nous proposons d'analyser l'effet du code arithmétique sur les algorithmes de dépliage de phase choisis parmi différents groupes. Le chapitre précédent est de présenter le code arithmétique avec ses principales formules mathématiques. Dans ce chapitre on a montré l'effet de ce code est analysé selon deux métriques largement utilisées : l'indice de similarité structurelle pour la mesure (SSIM) et l'erreur quadratique moyenne (MSE) et l'erreur de déroulement de phase basée sur la condition Itoh (IPUE). On conclut par le résultat de l'effet.

Implémentation du code arithmétique

Les algorithmes de déroulement de phase choisis sont diversifiés et tirés de différentes catégories qui sont : la coupe de branche de Goldstein [31], la qualité de Gighlia guidée [32], la qualité de Herráez guidée [33], la norme minimale de Gighlia (MN) [34] et le flux de coût minimum de Costantini [35]. L'interférogramme réel choisi est fourni par l'ESA ERS-1 de la région de Vatnajökull. La taille recadrée est de 200x200 pixels avec un taux de résidus de 0,0112%.

✓ Méthode des branches coupées(BC)

La méthode BC a été proposée la première fois par Goldstein. Les points résiduels connectés à une branche doivent être équilibrés en charge pour assurer que le chemin intégral évite les points résiduels.

✓ Méthode de qualité guidéeQG

La méthode de déroulement guidée par une carte de qualité est premièrement proposée par Parti. Cette méthode utilise les informations extraites de la carte de cohérence du système inSAR comme

référence de la qualité pour guider le processus de déroulement. Le principe de cette méthode est d'utiliser les valeurs qualitatives des pixels pour prioriser le chemin de déroulement dans les zones de haute qualité

Cet interférogramme est une donnée d'essai typique car il est réaliste et sa distribution de résidus n'est pas uniforme.

La valeur de pixel de l'interférogramme est comprise entre $[-\pi, +\pi]$, c'est un intervalle continu. Pour mettre en œuvre la technique de codage arithmétique, les valeurs continues doivent être quantifiées pour former un ensemble de données. Dans ce cas, deux codes arithmétiques peuvent être utilisés: un ensemble de données non binaires (avec les valeurs de phase quantifiées d'origine) et un ensemble de données binaires (après avoir binarisé les valeurs quantifiées). Pour le premier type, le nombre de symboles est élevé surtout avec de petites étapes de quantification. Cela conduit à de nombreux intervalles et à de longs nombres fractionnaires. Le deuxième type est plus pratique avec seulement deux partitions à chaque itération.

Les étapes suivantes résument le processus de mise en œuvre

- ✓ **Quantification:** chaque pixel est quantifié en fonction du pas utilisé.
- ✓ **Binarisation:** chaque pixel quantifié est converti en une chaîne binaire (c'est l'ensemble de données à encoder).
- ✓ **Compression arithmétique:** chaque chaîne binaire est codée (calculez n_1).

Le résultat est un tableau de n_1 et P_0 plutôt que l'interférogramme entier des valeurs de phase continue.

L'organigramme de la figure III.1 ci-dessous montre les blocs principaux utilisés pour la comparaison entre la phase non emballée de l'interférogramme non compressé et la phase non emballée après compression / décompression en utilisant un code arithmétique.

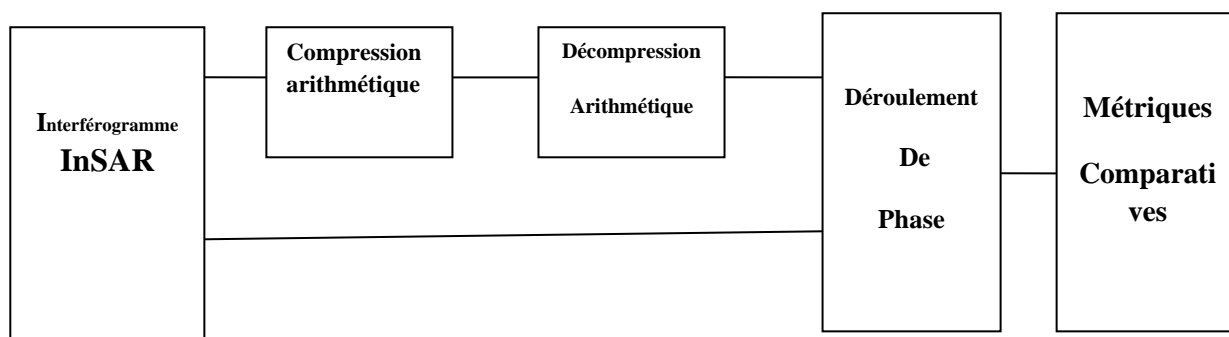


Figure III.1 : Organigramme à des fins de comparaison

II. ANALYSE ET DISCUSSION

La figure III. 2 montre les images de phase non emballées de l'interférogramme compressé / décompressé en utilisant les cinq algorithmes cités ci-dessus. Il n'y a pas de différence visuelle substantielle entre le déballage de l'interférogramme non compressé et compressé / décompressé; pour ces raisons, nous ne montrons pas les images non emballées correspondantes. À titre de brève comparaison entre les algorithmes étudiés, la qualité visuelle est dans cet ordre croissant: méthode de Goldstein, méthode QG de Gighlia, méthode de Herráez, méthode MN de Gighlia et méthode de Costantini. Le critère suivi est celui des discontinuités dans l'image déballée, notamment dans les régions à forte densité de résidus qui correspondent aux franges haute fréquence. Cette analyse qualitative montre que la mise en œuvre du code arithmétique n'a aucun effet sur l'ordre de performance des algorithmes étudiés puisqu'il s'agit du même constat pour les images non emballées de l'interférogramme non compressé.

Quantitativement, dérouler l'interférogramme non compressé et compressé / décompressé en utilisant le même algorithme non sans différence. En effet, les résultats obtenus résumés dans les tableaux 1, 2, 3 et 4 montrent que l'utilisation du code arithmétique a un effet sur le processus de déroulement de phase du fait de l'opération de quantification. Trois étapes de quantification ont été utilisées: 0,01, 0,05 et 0,1 rad. La phase déroulée étant en $(-\pi, \pi]$, cela conduit respectivement à 628, 126 et 63 niveaux de quantification. Chaque niveau de quantification est considéré comme un caractère, donc 10, 7 et 6 bits sont respectivement nécessaires. La différence entre non compressé et l'interférogramme non emballé compressé / décompressé est proportionnel au pas de quantification, plus le pas est petit, plus la différence est petite, c'est-à-dire que l'information est bien conservée avec le grand nombre de niveaux de quantification.

Tableau 01 : Les métriques obtenues pour l'interférogramme compressé

	Goldstein's BC	Gighlia's QG	Herráez's QG	Ghiglia's MN	Costantini's MCF
SSIM	1	1	1	1	1
MSE	0	0	0	0	0
IPUE(%)	0.8375	0.8386	0.8325	0.5768	0.3245

TAB1.1 : les métriques pour image simulé non compressé

	Goldstein's BC	Giglia's QG	Herráez's QG	Ghiglia's MN	Costantini's MCF
MSE	0	0	0	0	0
SSIM	1	1	1	1	1

Tableau 02 : Les métriques obtenues pour l'interférogramme compressé /décompressé en utilisant une pas de quantification 0,01

	Goldstein's BC	Giglia's QG	Herráez's QG	Ghiglia's MN	Costantini's MCF
SSIM	0.9876	0.9965	0.9761	0.9981	0.9745
MSE	0.0032	0.0065	0.0087	0.0046	0.0039
IPUE(%)	0.9375	0.9840	0.9546	0.7654	0.4563

TAB2.1 : les métriques pour image simulé quantifier avec pas 0 .01

	Goldstein's BC	Giglia's QG	Herráez's QG	Ghiglia's MN	Costantini's MCF
MSE	0 ,082	0,62	0 ,055	0 ,055	0 ,65
SSIM	1	0.995	0.982	0.993	0.977

Tableau 0 3 : Les métriques obtenues pour l'interférogramme compressé /décompressé en utilisant une pas de quantification 0,05.

	Goldstein's BC	Giglia's QG	Herráez's QG	Ghiglia's MN	Costantini's MCF
SSIM	0.9345	0.9543	0.8964	0.8657	0.9563
MSE	0.0056	0.0074	0.0098	0.0075	0.0059
IPUE(%)	1.1375	0.9867	1.0327	0.9735	0.8361

TAB3.1 : les métriques pour image simulé quantifier avec pas 0 .05

	Goldstein's BC	Giglia's QG	Herráez's QG	Ghiglia's MN	Costantini's MCF
SSIM	0 ,130	0,099	0,092	0 ,100	0 ,90
MSE	0.990	0.987	0.971	0.964	0.932

Tableau 04 : Les métriques obtenues pour l'interférogramme compressé /décompressé en utilisant une pas de quantification 0,1.

	Goldstein's BC	Giglia's QG	Herráez's QG	Ghiglia's MN	Costantini's MCF
SSIM	0.8654	0.8623	0.8451	0.7896	0.8970
MSE	0.0125	0.0167	0.0189	0.0142	0.0184
IPUE(%)	1.1687	1.2462	1.3235	1.1430	0.9874

TAB4.1 : les métriques pour image simulé quantifier avec pas 0.1

	Goldstein's BC	Giglia's QG	Herráez's QG	Ghiglia's MN	Costantini's MCF
SSIM	0,155	0,122	0,132	0,136	0,210
MSE	1	0.999	0.995	0.982	0.970

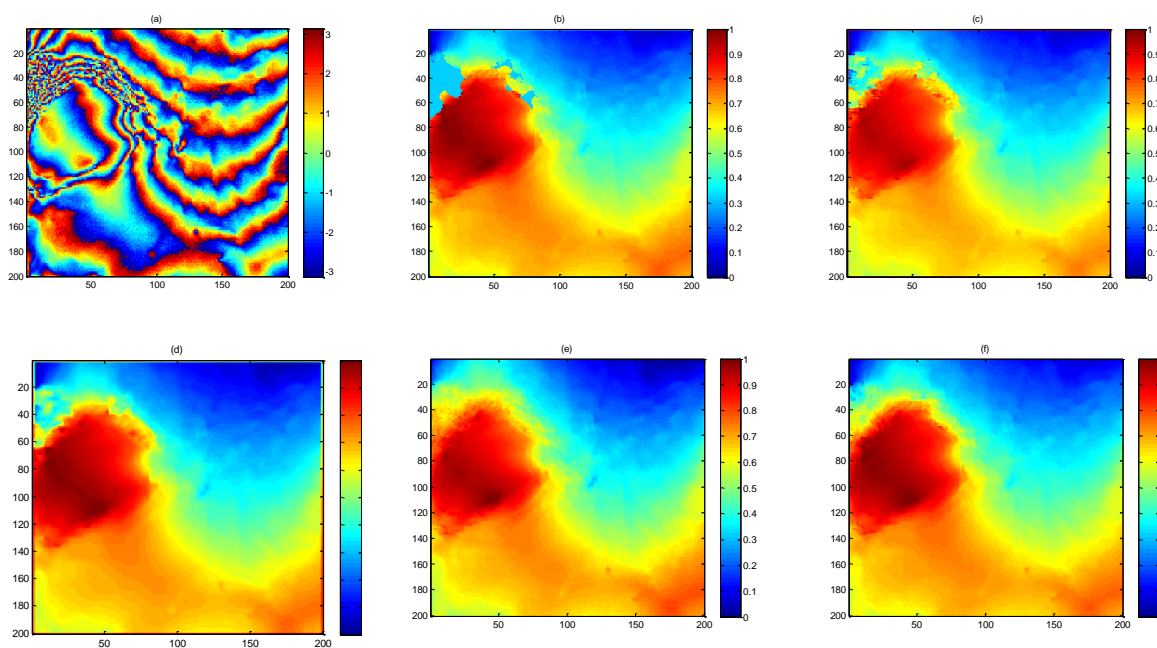


Figure III.2 : (a) interférogramme réel, (b) image déroulée utilisant la méthode de Goldstein,(c) méthode QC de Gighlia , (d) méthode Herráez ,(e) méthode MN de Gighlia et (f) méthode de Costantini

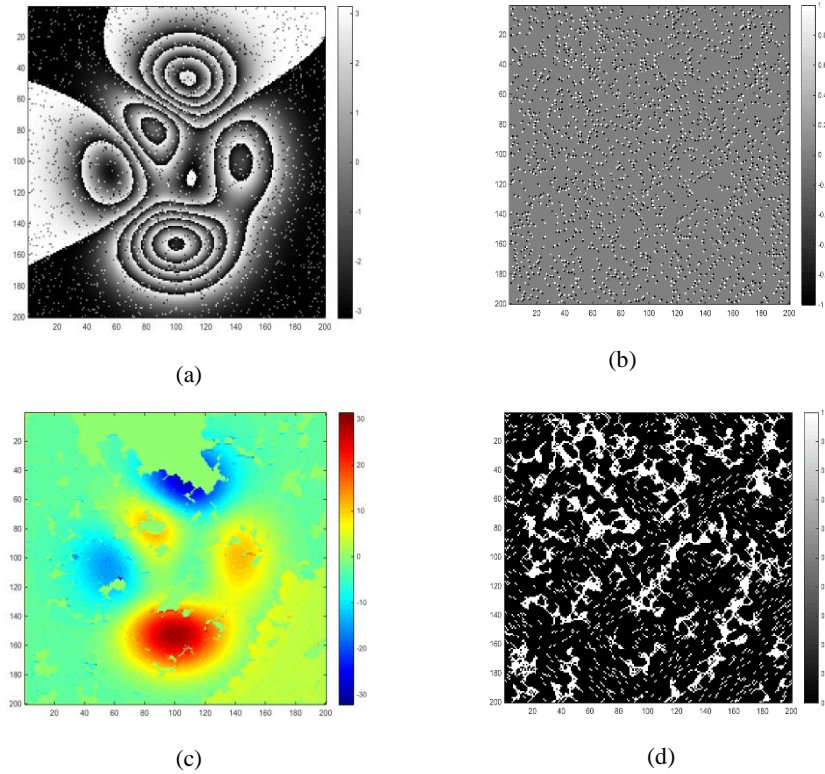


Figure III.3: Test d'algorithme de déroulement Goldstein pour une image simulée, (a) l'image simulée, (b) la carte des résidus, (c) l'image de phase déroulée, (d) la carte de branches.

CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons montré l'effet du code arithmétique sur certains algorithmes de déroulement de phase pionniers. Le test est réalisé sur un interférogramme inSAR réel sans distribution uniforme des résidus, de sorte que la comparaison est craintive et crédible. Les images de phase non emballées de l'interférogramme non compressé et compressé / décompressé à l'aide de cinq méthodes de tête sont comparées selon trois métriques fiables. Les résultats obtenus montrent que le processus de quantification incorporé dans le codage arithmétique a un effet sur les performances de déroulement de phase, et cet effet est proportionnel aux niveaux de quantification utilisés

Conclusion générale

Depuis plus de 40 ans, la technique InSAR n'a cessé de connaître des avancées significatives relatives aux modes d'acquisition et aux méthodes de traitement. Ainsi, les acteurs de l'InSAR proposent aujourd'hui des mesures dont la précision peut être quantifiée. Cependant, la fiabilité de la mesure dépend de nombreux facteurs (nombre d'images, capteur radar, algorithme utilisé, nature du terrain,...)

Dans ce manuscrit, nous avons mené une étude sur la compression arithmétique des interférogramme in sar ,Où nous avons été entamés sur les généralités des système InSAR comme le principe, les paramètres mathématiques d'InSAR, leur applications et l'InSAR différentiel ainsi que état de l'art sur les algorithmes de déroulement de phase

ensuit nous avons montrés en détail certains codes de compression tel que l'encodage entropique, Shanon-Fano,LZW et le code arithmétique en plus de leur avantages et inconvénients

Enfin , nous avons montré l'effet du code arithmétique sur certains algorithmes de déroulement de phase pionniers. Le test est réalisé sur un interférogrammeInSAR réel sans distribution uniforme des résidus, de sorte que la comparaison est craintive et crédible. Les images de phase non emballées de l'interférogramme non compressé et compressé / décompressé à l'aide de cinq méthodes(Goldstein's BC, Gighlia's QG, Herráez's QG, Ghiglia's MN, Costantini'sMCF) de tête sont comparées selon trois métriques fiables

Les résultats obtenus montrent que le processus de quantification incorporé dans le codage arithmétique a un effet sur les performances de déroulement de phase, et cet effet est proportionnel aux niveaux de quantification utilisés

liste des références

Références bibliographiques

- [1] <http://planet-terre.ens-lyon.fr/article/interferometrie-radar>.
- [2]. Youcef Khalil MOHAREM , Interférométrie à base de radar à ouverture synthétique pour la génération d'un modèle numérique de terrain
- [3] .Li, F and GOLDSTEIN , R , «Studies of multi-baseline spaceborne interferometric synthetic aperture radars ,» chez /GARSS'87-international Geoscience and Remote Sensing Symposium , vol.28
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Zebker, H. (1992). "Decorrelation interferometric Radar echoes." IEEE transaction on geoscience and remote sensing, Volume 30 N 5(1992): 9.
- [7] 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.
- [8] C. Colesanti; A. Ferretti; F. Novali; C. Prati & F. Rocca, « SAR monitoring of progressive and seasonal ground deformation using the permanent Scatterers analysis,» *differential SAR interferograms IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 41, July 2003.
- [9] A. Ferretti; C. Prati & F. Rocca, «Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry,» *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, vol. 38, n° 15, 2000
- [10] M. Fekir, «Coherent Targets Selection based on Small Baseline interferogram Subsets,» chez *New ways of accessing space for benefit of society, RAST 2013 conference*, Istanbul. Turkey, juin 2013.
- [11] Kampes, B. M & Hanssen, R, «Ambiguity resolution for permanent Scatterer Interferometry,» *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 42, n° 11, November 2004.
- [12] Crosetto, M., A. Arnaud, J. Duro, E. Biescas, and M. Agudo , «Deformation monitoring using remotely sensed radar interferometric data,» chez *paper presented at 11th FIG Symposium on Deformation Measurements*, Patras Univ, Santorini, Greece, 2003.

- [13] .AHMED Oussama ‘DEVELOPPEMENT ET EVALUATION DES TECHNIQUES CLASSIQUES DE COMPRESSION ’ .UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M’SILA , 2016
- [14]<http://www.map.toulouse.archi.fr/works/panoformation/imagenum/imagenum.htm>.
- [15]M . BENABDELLAH “Outils de compression et de cryptocompression : Applications aux images fixes et video”,UNIVERSITE MOHAMMED V-AGDAL, Juin 2007
- [16] R . Gonzales, P. Wintz “Digital Image Processing”, Addison Wesley, 1977.
- [17]S. Pigeon, “Contributions à la compression de données,” Thèse présentée à la Faculté des arts et sciences en vue de l’obtention du grade Philosophiæ Doctor (Ph. D.) en Informatique, Décembre 2001.
- [19] V. Beaudoin, “Développement de nouvelles techniques de compression de données sans perte”, Thèse Maître ès sciences en Sciences et génie, Université Laval, 2008
- [20] Ch. TAOUCHE, “Implémentation d'un environnement parallèle pour la compression d'images à l'aide des fractales,” mémoire de Magister, Département d'Informatique, Université Mentouri Constantine, 2005..
- [21] A. J. Maan. ” Analysis and comparison of algorithms for lossless data compression,” 3(3):139-46; Int. J. Inf. Computat. Technol., 2013.
- [22] K. Sayood. “Introduction to data compression,” Third Edition, Morgan Kaufman Series in Multimedia Information and Systems, 2017
- [23] C. Benoit & A. Dusson, "La compression de données informatiques," Juin 1999.
<http://www.esil.univ-mrs.fr/~cbenoit/projets/comp/>
- [24] B. Christophe, D. Alexandre. “TIPE sur la compression de données informatiques,” MSPI. [13] G. L. J. Rissanen, “Arithmetic Coding ‘’, IEEE Trans. on communication.
- [25] O. Ghazi, A. Khukre, ”Lossy compression using stationary wavelet transform and vector quantization,” Master In Information Technology, Department of Information Technology, Institute of Graduate Studies and Research Alexandria University, 2016.
- [26] F. Davoine, “Compression d'images par fractales basée sur la triangulation de delaunay,” Thèse l'INPG, Institut National Polytechnique de Grenoble, Décembre 1995
- [27] V. Jindal, A. K. Verma, S. Bawa. “Impact of compression algorithms on data transmission,” 2(2): 2319-526; Int. J. Adv. Comput. Theory.Eng., 2013.
- [28] P. Gupta, G. N. Purohit, V. Bansal .”A survey on image compression techniques,” 3(8): 7762-8; Int. J. Adv. Res. Comput. Commun. Eng. 2014.
- [29] C. Iombo. Predictive. “Data compression using adaptive arithmetic coding,” PhD Thesis.Agricultural and Mechanical College, Louisiana State University; 2007.
- [30] W. Sweldens, “The lifting scheme: A custom-design construction of biorthogonal wavelets,” Appl. Comput. Harmon. Anal., 3(2): 186-200, 1996.
- [31]R. M. Goldstein, H. A. Zebker, and C. L. Werner, “Satellite radar interferometry: Two dimensional phase unwrapping,” Radio Science, vol. 23, no. 4, pp. 713–720, Jul. 1988.

- [32]D. C. Ghiglia and M. D. Pritt, *Two-Dimensional Phase Unwrapping: Theory, Algorithms, and Software*. New York: Wiley, 1998
- [33]H. S. Abdul-Rahman, M. A. Gdeisat, D. R. Burton, M. J. Lalor, F. Lilley, and C. J. Moore, "Fast and robust three-dimensional best path phase unwrapping algorithm," *Applied Optics*, vol. 46, no. 26, p. 6623, Sep. 2007.
- [34] D. C. Ghiglia and L. A. Romero, "Robust two-dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods," *J. Opt. Soc. Amer. A, Opt. Image Sci.*, vol. 11, pp. 107–117, Nov. 1994
- [35] M. Costantini, "A novel phase unwrapping method based on network programming," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 36, no. 3, pp. 813–821, May 1998.
- [36]N. H. Ching, D. Rosenfeld, and M. Braun, "Two-dimensional phase unwrapping using minimum spanning tree algorithm," *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 1, no. 3, pp. 355–365, 1992.
- [37]W. Nan and F. Dazheng, "InSAR phase unwrapping algorithm using the branch-cut and finite element method," in *Proceedings 7th International Conference on Signal Processing, 2004. Proceedings. ICSP '04*. 2004.
- [38]X. Feng, W. Jicang, Z. Lei, and L. Xiaoling, "A new method about placement of the branch cut in two-dimensional phase unwrapping," in *2007 1st Asian and Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, 2007*.
- [39]C. Li and D.-Y. Zhu, "A Residue-Pairing Algorithm for Insar Phase Unwrapping," *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 95, pp. 341–354, 2009.
- [40]D. Zheng and F. Da, "A novel algorithm for branch cut phase unwrapping," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 49, no. 5, pp. 609–617, May 2011.
- [41]Hanwen Yu, Mengdao Xing, and Zheng Bao, "A Fast Phase Unwrapping Method for Large-Scale Interferograms," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 51, no. 7, pp. 4240–4248, Jul. 2013.
- [42]Z. Yan and X. ZiJian, "A Phase Unwrapping Algorithm Based on Branch-cut and B-Spline Fitting in InSAR," in *2018 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC)*, 2018.
- [43]T. Liu, Z. Shang, J. Wu, D. Zhou, and S. Yan, "Improved branch-cut phase unwrapping strategy based on dynamic adjacent table," *The Journal of Engineering*, vol. 2019, no. 19, pp. 5805–5809, Oct. 2019.
- [44]T. J. Flynn, "Consistent 2-D phase unwrapping guided by a quality map," *IGARSS '96. International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Lincoln, NE, USA*, vol. 4, pp. 2057-2059, 1996.
- [45]Wei Xu and I. Cumming, "A region-growing algorithm for InSAR phase unwrapping," in *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 37, no. 1, pp. 124-134, Jan. 1999.

- [46]H. Zhong, J. Tang, S. Zhang, and M. Chen, "An Improved Quality-Guided Phase-Unwrapping Algorithm Based on Priority Queue," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 8, no. 2, pp. 364–368, Mar. 2011.
- [47]Z. Dai and X. Zha, "An Accurate Phase Unwrapping Algorithm Based on Reliability Sorting and Residue Mask," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 9, no. 2, pp. 219–223, Mar. 2012.
- [48]H. Zhong, J. Tang, S. Zhang, and X. Zhang, "A Quality-Guided and Local Minimum Discontinuity Based Phase Unwrapping Algorithm for InSAR/InSAS Interferograms," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 11, no. 1, pp. 215–219, Jan. 2014.
- [49]G. Jian, "Reliability-Map-Guided Phase Unwrapping Method," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 13, no. 5, pp. 716–720, May 2016.
- [50]H. Wang, L. Tong, Y. Li and F. Xiao, "Phase Unwrapping Algorithm Based on Improved Weighted Quality Graph," *IGARSS 2019 - 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Yokohama, Japan, pp. 1769-1772, 2019.
- D. C. Ghiglia and L. A. Romero, "Minimum Lp-norm two-dimensional phase unwrapping," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 13, no. 10, p. 1999, Oct. 1996
- [51]. Geymen, "Digital elevation model (DEM) generation using the SAR interferometry technique," *Arab J Geosci*, vol. 7, no. 2, pp. 827–837, Dec. 2012.
- [52]O. Monserrat, M. Crosetto, and G. Luzi, "A review of ground-based SAR interferometry for deformation measurement," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 93, pp. 40–48, Jul. 2014.
- [53]A. Moreira, P. Prats-Iraola, M. Younis, G. Krieger, I. Hajnsek, and K. P. Papathanassiou, "A tutorial on synthetic aperture radar," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, vol. 1, no. 1, pp. 6–43, Mar. 2013.