



République Algérienne Démocratique et
Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de
la Recherche Scientifique
Université Mohamed Ben Ahmed Oran 2
Faculté des Sciences de la Terre et de
l'Univers



Département de Géographie et Aménagement du Territoire

MÉMOIRE DE FIN D'ETUDES

*Pour l'obtention du diplôme de Master en Géographie et
Aménagement de territoire, Option : Géomatique*

Intitulé :

**L'apport de l'imagerie Radar dans la mesure
de déplacement dû à l'exploitation de carrière**

**Cas de Djebel Aoud Asma (Monts d'Ouled Ali) -
OGGAZ Wilaya de MASCARA**

Présenté et soutenu par :

**M^{me} HADEF MAIMOUNA
M^{lle} OUKFIF NASRINE**

Devant le jury composé de :

M^{me} BACHIR BELMEHDI Farida

Encadrante

Mr. HASNI KAMEL

Co-encadrant

Mr. ALLAL Nadir Ouassini

Président

M^{me} SENHADJI Hafida

Examinatrice

Année universitaire 2021 - 2022

Remerciement

Le présent travail a été réalisé au Département Géographie et Aménagement du territoire de la Faculté Sciences de la terre de l'Université Mohamed Ben Ahmed Oran2.

Je souhaiterais tout d'abord à nous remercions Dieu, le tout puissant pour la volonté, la patience et le courage qu'il nous a accordés pour mener à terme ce travail.

Nous 'aimerons chaleureusement remercie Mme. GOURINE Farida pour avoir accepté de nous encadrer, pour son attention discrète, ses recommandations mesurées et ses précieux conseils et surtout pour ses qualités humaines et scientifiques toujours en toute Modestie, sa passion du métier qu'il sait rendre contagieuse et la confiance qu'il a bien voulu nous accorder tout au long de ce travail.

Nous voudrions ensuite remercier tous les membres du jury qui vont juger ce modeste travail et nous faire profiter de leurs connaissances et remarques constructives, Mme SENHADJI, Mr .ALLAL Nadir Ouassini.

Nous tenons à exprimer nos gratitude envers professeurs pour la qualité du l'enseignement qu'ils ont pré digué au cours de nos études passés. Ainsi tous le corps enseignant administratifs et la faculté science de la terre.

Un remerciement au personnel administratifs et à tous ceux qui nous ont reçus au centre des techniques spatiales d'ARZEW Oran. Notamment Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements pour Mr. HASNI. KAMEL et plus particulièrement Mr.GOURINE .Bachir pour avoir accueillir et guidé tout au long de stage.

Enfin, nous tenons à remercier tous ceux qui nous aidé de près ou de loin pour 'élaboration de ce mémoire.

Maimouna

Nasrine

Dédicaces :

*Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail
À ceux qui, quels que soient les termes embrassés, je n'arriverais
Jamais à leur exprimer mon amour sincère.*

*A ma famille, elle qui m'a doté d'une éducation digne,
Son amour a fait de moi ce que je suis aujourd'hui :
Particulièrement à l'homme, mon précieux offre du dieu, qui doit ma vie, ma réussite
Et tout mon respect : mon cher père RABAH.
A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit
Non âmes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre
Heureuse : mon adorable mère NAIMA.
A mes chères sœurs DIANA ET IBTISSAM et mes chers frères GHILAS et YANI
qui n'ont pas
Cessés de me conseiller, encourager et soutenir tout au long de mes
Études. Que Dieu les protège et leurs offre la chance et le bonheur.*

*A une meilleure famille que j'ai jamais rencontrés dans ma vie je tiens à vous souhaiter
tout le bonheur toute la paix du monde la famille GOURINE je vous aime*

*A mes grands-mères LAKRI et DAHBIA, mon grand-père SALAH Que Dieu leurs
donnent une longue et joyeuse vie.*

*A tous les cousins, les voisins et les amis que j'ai connu jusqu'à
Maintenant.*

Merci pour leurs amours et leurs encouragements.

*Sans oublier mon excellente binôme MIMOUNA et ses enfants ASSIL et ANES
pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet
Je n'arrive pas à exprimer tout ce que tu m'as fait depuis mon séjour à Oran*

*Je dédie cet événement marquant de ma vie à la mémoire de mon grand-père disparu.
J'espère que, du monde qui est sien maintenant, il apprécie cet humble geste
comme preuve de reconnaissance de la part d'une fille qui a toujours prié pour le salut
de son âme. Puisse Dieu, le tout puissant, l'avoir en sa sainte miséricorde !*

Nasrine

Je dédie ce modeste travail :

A ma chère mère 'AICHA' ;

Tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi. Ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études. Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que tu mérites pour tous les sacrifices que tu n'as cessé de me donner.

A mon chère père 'A.ELMADJID' ;

Tu as toujours été un exemple du père respectueux, honnête, de la personne méticuleuse, je tiens à honorer l'homme que tu es. Grâce à toi j'ai appris le sens de la responsabilité. Je voudrais te remercier pour ton amour, ta générosité, ta compréhension. Ton soutien fut une lumière dans tout mon parcours. Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour l'estime et le respect que j'ai toujours eu pour toi.

Je t'aime mes parents et j'implore le tout-puissant pour qu'il vous accorde une bonne santé et une vie longue et heureuse.

A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur mon chère mari ACHRAF.

A ma douce fille, ASSIL, et à mon adorable fils ANAS, je prie Dieu de vous protéger et de vous accorder le succès dans votre vie.

A mes très chers frères HOUDEIFA, DJABER, AYMEN et MOUAD, et ma chère sœur KOUATHER pour ses soutiens moral et leurs conseils précieux tout au long de mes études.

A toute la famille de mon mari KERBOUA, aucun langage ne saurait exprimer mon respect et ma considération pour votre soutien et encouragements, surtout à ma belle-mère, qui m'a aidé à créer une bonne ambiance pour mes études.

A ma chère binôme NASRINE et ça famille OUKFIF, ma douce sœur qui a eu la patience de me supporter durant ce mémoire, et qui m'a soutenu et encouragé pendant tous les moments difficiles vécus, je t'aime beaucoup ma chère.

A tous les étudiants de la promotion 20021/2022 option Géomatique.

Maimouna

Résumé :

L'analyse et la compréhension de la dynamique des milieux physiques par l'exploitation de carrières constituent un enjeu fondamental en matière de prévention de déclenchement des risques naturels. Les monts de l'Ouled Ali (monts des Beni Chougrane) comportent des zones fortement instables qui rendent vulnérables le milieu naturel de la région de Sig (wilaya de Mascara).

L'imagerie radar, de par sa capacité d'observer de jour comme de nuit (tout le temps) et quelles que soient les conditions climatiques (nuage, brouillard, neige, etc.) a donné l'essor à la technique d'Interférométrie Radar à Ouverture de Synthèse (InSAR) qui a trouvé son domaine d'application dans les sciences de la terre pour la mesure de déplacements en surface, cette technique représente le moyen le plus simple pour la surveillance des carrières.

Notre présente étude s'intéresse à caractériser la cinématique des versants de Djebel Aoud Asma, une des régions touchés par l'exploitation de carrières. Pour ce faire, les moyens sont nombreux et variés en termes de propriétés spécifiques, type d'utilisation, déplacement mesurée ainsi que leur étendue et précision. La méthode des réflecteurs persistents PS (Persistent Scatters) et celle des petites lignes de bases SBAS (Small Baseline) permet de mesurer le déplacement en vertical des mouvements de masses qui sont provoqué par l'exploitation de carrières.

La méthodologie de travail adoptée est basée sur l'utilisation des données multi-datées d'images SAR de La région d'étude, pendant la période de 2003 à 2010, suivie par une étude comparative des résultats de positionnement des points de déplacement par la méthode PS et avec la méthode SBAS pour valider les mesures.

En effet, l'utilisation de l'interférométrie radar par les deux méthodes nous a permis d'estimer un important déplacement depuis 2006 la période de l'installation de la cimenterie LAFARGE proche de la ville d'Oggaz (Sig, Mascara). Par ailleurs, l'exploitation de carrière dans Djebel Aoud Asma contribuée largement au changement du paysage.

Mots clés : *Exploitation de carrières ; Monts de Ouled Ali (Dj. Aoud Asma) ; Image SAR ; mesure de déplacement par SBAS et PS.*

Abstract:

The analysis and understanding of the dynamics of physical environments through quarries exploitation constitutes a fundamental issue in terms of preventing natural risks outbreak. The Ouled Ali Mountains (Beni Chougrane Mountains) embrace highly unstable areas that make the natural environment of Sig region (wilaya of Mascara) highly vulnerable.

The ability of Radar imagery to observe day and night and in different climatic conditions (cloud, fog, snow, etc.), has given rise to the technique of Interferometry Synthetic Aperture Radar (InSAR). This later has found its application field in earth sciences ,especially for measuring surface displacements, this technique represents the simplest means for monitoring quarries.

Our present study aims to characterize the kinematics of the slopes of Djebel Aoud Asma, one of the regions affected by the exploitation of quarries. To accomplish this, there are various means and methods. Each one differs from the other in terms of specific properties, type of use, measured displacement as well as the extent and precision. The method of persistent reflectors PS (Persistent Scatters) and that of small baselines (Small Baseline SBAS) enable the measuring of vertical displacement of the masses movements caused by the exploitation of quarries.

The work methodology adopted is based on the use of multi-dated data from SAR images of the study region, during the period from 2003 to 2010, followed by a comparative study of the positioning results of the PS displacement points to those obtained by the SBAS method in order validate the measurements.

Indeed, the use of radar interferometry by the two methods allowed us to estimate a significant displacement since 2006, the period of the installation of the LAFARGE cement plant near the town of Oggaz (Sig, Mascara). In addition, quarrying in Djebel Aoud Asma has largely contributed to changing the landscape.

Keywords: *Quarrying; Mounts of Ouled Ali (Djebel Aoud Asma); SAR picture; displacement measurement by SBAS and PS.*

Table des matières

Introduction générale.....	1
1. Problématique de recherche.....	2
2. Objectif de travail	3
3. Organisation du document.....	3
Chapitre I : Généralités sur Imagerie Radar d'Observation de la Terre.....	
1. Introduction	5
2. Notion de base.....	6
1.1 Radar	6
1.1.1 L'antenne radar	6
1.1.2 Fréquences Radar	8
1.1.3 Spécificité du Radar	10
3. Principes de construction de l'image Radar	11
3.1 Radar classique	11
3.2 Radar à vision latérale (SLAR)	12
3.3 Radar à synthèse d'ouverture SAR (RSO)	15
3.4.1 Construction d'un radar à ouverture de synthèse	15
3.4.2 Résolution	16
4. Caractéristiques de l'image SAR)	18
4.1 Géométrie d'acquisition	18
4.2 Mesure complexe d'une cellule de résolution	20
5. Interférométrie SAR	22
5.1 Principes de l'InSAR : comment ça marche ?	23
5.2 Lien phase-altitude	25
6. Limitations du SAR	28
6.1 Prise en compte de la géométrie réelle de prise de vue	28

6.2	Prise en compte de l'évolution temporelle du milieu observé	32
6.3	Prise en compte des sources d'erreurs	36
7.	Que fait-on des données d'interférométrie radar ?	39
8.	Méthodes de traitement In SAR avancées pour la mesure de déplacement	42
9.	Conclusion	43

Chapitre 02 : Mise en application des méthodes d'interférométries radar sur Djebel Aoud Asma (les monts d'ouled Ali)

1.	Introduction	44
2.	Présentation de la zone d'étude	44
2.1	Situation géographique de Djebel Aoud Asma	44
2.2	Contexte Climatique	46
2.3	Contexte géologique	46
2.4	Contexte Topographique	47
3.	Application à Djebel Aoud Asma	52
3.1	Présentation des données	52
3.1.1	Les images	52
3.1.2	Les logiciels utilisés	53
3.1.3	Zone de test	53
4.	Etapas de processus de l'interférométrie	54
4.1	Correction de l'orbite de satellite	54
4.2	Calage	55
4.3	Création des interférogrammes	55
4.4	Cohérence	56
4.5	Filtrage de phase	56
4.6	Déroulement de phase	56
5.	Présentation des techniques interférométriques	57
5.1	Méthode PSInSAR (Permanent Scatterers):	57
5.1.1	Origine et Développement	59

5.1.2	Principe	60
5.1.3	Avantages et limites du PS Insar (Permanent Scatterers)...	60
5.2	Traitement PSInSAR (Permanent Scatterers)	62
5.2.1	Traitement InSAR (SNAP).....	62
5.2.1.1	Choix de l'image maitresse.....	62
5.2.1.2	Co registration.....	66
5.2.1.3	Génération des Interférogrammes et élimination de la phase topographique.....	68
5.2.2	Traitement PS (STAMPS).....	69
5.2.2.1	Exportation des interférogrammes vers STAMPS....	69
5.2.2.2	Vérifier les interférogrammes	70
5.2.2.3	Estimation de la cohérence	71
5.2.2.4	Déroulement de la phase	72
5.3	Résultat et discussion.....	76
6.	Méthode SBAS (Small BASeline Subset).....	77
6.1	L'approche SBAS (Small BASeline Subset).....	77
6.2	Méthodologie de travail et données utilisées.....	78
6.3	Traitement SBAS (Small BASeline Subset) :.....	81
6.3.1	Extraction de la zone d'intérêt.....	81
6.3.2	Génération des interférogrammes.....	82
6.3.3	Déroulement de phase	83
6.3.4	Détermination de la vitesse annuelle du déplacement et de sa précision	85
7.	Etude comparative des deux méthodes SBAS et PS.....	89
	Conclusion général.....	91

Liste des figures

Fig. 1.1 : Ouverture plane rectangulaire	7
Fig. 1.2 : Puissance rayonnée par l'ouverture.....	7
Fig. 1.3 : Projection de diagramme d'antenne au sol	8
Fig. 1.4 : Transmittance atmosphérique des ondes électromagnétiques	9
Fig. 1.5 : Vision en range et en azimut d'un radar	11
Fig. 1.6 : Radar à visée latérale (SLAR)	13
Fig. 1.7 : Illustration schématique de la construction d'une antenne synthétique.....	16
Fig. 1.8 : Acquisition des images SAR	16
Fig. 1.9 : Réponse d'une cible ponctuelle dans les données brutes	17
Fig. 1.10 : Géométrie d'acquisition de l'image SAR	19
Fig. 1.11 : Géométrie d'acquisition d'un couple interférométrique	24
Fig.1.12 : Le Mont Etna, Sicile, Italie, SIR-C/X-SAR, bande X	25
Fig. 1.13 : Influence de la base sur la géométrie de l'image	29
Fig. 1.14 : Influence de la base sur la phase interférométrique	31
Fig. 1.15 : Influence de l'orientation du radar durant l'acquisition des données.....	32
Fig. 1.16 : Perte d'information liée à l'évolution temporelle de l'état de la Surface.....	34

Fig. 1.17 : Effet atmosphérique dans les interférogrammes	36
Fig. 1.18 : Exemple d'utilisation des données InSAR	41
Fig. 2.1 : Carte de la situation géographique de Djebel Aoud Asma OGGAZ- MASCARA.	45
Fig. 2.2 : Carte Croquis géologique de djebel Aoud Asma	47
Fig. 2.3 : Carte de réseau hydrographique de SIG – MASCARA	48
Fig. 2.4 : Carte topographique d’OGGAZ – MASCARA	49
Fig. 2.5 : Carte des pentes d’OGGAZ – MASCARA	50
Fig. 2.6 : La zone d’étude sur Google earth	54
Fig. 2.7 : Un schéma représentant le traitement de la méthode PS (Permanent Scatterers) et SBAS	58
Fig. 2.8 : Les étapes de découpage de notre zone sur SNAP	62
Fig. 2.9 : Les étapes pour établir les orbites précises	63
Fig. 2.10 : L’intensité après les orbites précises	64
Fig. 2.11 : Choix de l’image maîtresse	65
Fig. 2.12 : Réseau interférogaphique avec l’image acquise le 08/12/2004 choisie comme image maîtresse.	65
Fig. 2.13 : L’intensité de l’image maîtresse	66
Fig. 2.14 : Les étapes de co-régistration	66
Fig. 2.15 : Les étapes de l’interferogramme.	68
Fig. 2.16 : Cohérence des interférogrammes.	68
Fig. 2.17 : Les étapes d’exportation vers STAMPS.....	67

Fig. 2.18 : Cohérence de l'image maitresse	71
Fig. 2.19 : Carte de localisation des points de déplacements	73
Fig. 2.20 : La droite de régression de déplacement d'un point rouge	73
Fig. 2.21 : La droite de régression de déplacement de point bleu	74
Fig. 2.22 : La droite de régression de déplacement d'un autre point bleu...	75
Fig. 2.23 : Carte de sensibilité au risque du déplacement.....	76
Fig. 2.24 : Combinaisons des paires d'interférogrammes SBAS.....	81
Fig. 2.25 : MNT du versant de Dj. Aoud Asma	82
Fig. 2.26 : Interférogrammes différentiels avec une haute cohérence	83
Fig. 2.27 : Déroulement de phase des couples	84
Fig. 2.28 : Image géocodée en géométrie radar	85
Fig. 2.29 : Image de déplacement cumuler de la période 2003 à 2010	87
Fig. 2.30 : Déplacements verticaux de quelques points dans la carrière de Dj. Aoud Asma pendant la période de 2003 à 2010	87
Fig. 2.31 : Série temporelle de la vitesse moyenne de déplacement entre 02/07/2003 et 04/08/2010.	88

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Gamme des fréquences radar (microondes)	10
Tableau 2.1 : les caractéristiques du satellite ENVISAT.....	52

Introduction général

La surface de la Terre est affectée par différents types de phénomènes qui peuvent provoquer des déformations. Selon le type de phénomène, ils peuvent varier considérablement dans leurs caractéristiques en termes d'amplitude et d'échelle. Dans le domaine des risques naturels et anthropiques, les déformations auxquelles nous pouvons avoir à faire correspondent à des phénomènes allant de plusieurs centaines de kilomètres (tectonique sismique) à des phénomènes très locaux (affaissement, contraction, dilatation...).

Ces déplacements peuvent souvent être surveillés afin de mieux comprendre ces aléas ou de prévoir leurs conséquences. La cartographie des déplacements et la connaissance de son évolution peut fournir une information utile pour la modélisation, et les mesures de déformation de surface peuvent améliorer les modèles de déplacement en profondeur, aussi la connaissance de la déformation de surface peut permettre de mieux comprendre l'avenir des phénomènes évolutifs et leurs conséquences en termes d'endommagement.

L'imagerie radar l'une des sources d'information les plus importants dans le domaine de la télédétection, de par sa richesse de l'information contenue dans ces images, sa capacité d'observer de jour comme de nuit (tout le temps) et quelles que soient les conditions climatiques (nuage, brouillard, neige, etc.) a donné l'essor à la technique d'Interférométrie Radar à Ouverture de Synthèse (InSAR) qui a trouvé son domaine d'application dans les sciences de la terre.

Les techniques de l'Imagerie Radar utilisant des données d'observation de la terre permettent de remplacer ou compléter l'information issue des mesures au sol. L'intérêt de ce dispositif est l'offre de la possibilité d'effectuer des études a posteriori fournissant un historique de la déformation.

Les précisions des mesures résultant de ses techniques sont variables et dépendent des techniques utilisées (interférométrie conventionnelle, interférométrie avec traitement multi temporel de jeux données importants, corrélation d'images) et des capteurs utilisés (résolution, longueur d'onde), néanmoins suivant le contexte, elles peuvent être équivalentes aux précisions des mesures au sol.

La couverture spatiale des capteurs satellitaires permet d'une part d'étudier la plupart des zones affectées par un risque associé à la déformation, d'autre part, la taille des images (de l'ordre de la dizaine à la centaine, voir quelque centaines de km) permet un traitement de l'échelle locale à régionale à partir de jeux pas trop volumineux d'images.

La répétitivité des acquisitions (de quelques jours pour COSMO-SKYMED à 35 jours pour ERS et Envisat) permet une surveillance avec un échantillonnage adopté au type de phénomène (notamment adapté à la vitesse du déplacement).

Ces techniques ne nécessitent pas une intervention au sol (sauf les cas spécifiques utilisant des dispositifs au sol tels que des cornets réflecteurs ou transpondeurs). On peut ainsi s'affranchir d'une des principales limitations des techniques de surveillance au sol.

Suivant la technique utilisée, le résultat se présente souvent sous forme d'image. Ceci fournit directement une vision synoptique de la déformation, alors que les méthodes au sol produisent un réseau de points de mesure dont la densité est souvent limitée du fait des possibilités des opérateurs. Ces techniques spatiales présentent toutefois de nombreuses limitations pour les utilisations.

1. Problématique de recherche :

Notre thème de recherche basé sur la détection des changements de l'espace géographique causé par l'exploitation de la carrière djebel Aouad Asma.

Notre zone d'étude est caractérisée par un ensemble de qualifications distinctives, vu la richesse marquée au niveau de la région **Mascara** et en particulier dans la zone de **SIG** marquée par des Géo – matériaux favorisons l'installation des carrières. Ce que résulte la stabilité de certaines carrières comme celles de LAFARGE sachant que les carrières ont une énorme importance pour l'économie locale et en même temps est un phénomène de changement de l'espace physique.

La fin de vie de la carrière de LAFARGE est en 2017 mais elle existe jusqu'à maintenant, ils ont relancé une autre usine HOLCIM comme si cette usine est lancée dans un autre espace mais en réalité elle est dans le même espace physique. Cette exploitation qui est faite d'une manière non scientifique a causé la disparition de la biodiversité, de la faune et la flore. Ainsi l'espace physique de SIG est devenu vulnérable.

Dans ce cadre on pose notre problématique à travers cette question :

Comment peut-on utilisé l'imagerie radar pour détecter les changements des espaces géographique causé par l'exploitation de carrière dans DJEBEL AOUD ASMA ?

2. Objectif du travail :

L'objet de notre travail est :

- Calcule et mesure de déplacement dû à l'exploitation de carrière par deux méthodes de traitement de l'imagerie radar (RSO)
- Cartographie la sensibilité aux risques de déplacement.

3. Organisation de document :

Afin de développer le thème et l'objet de ce mémoire, le travail a été structuré en deux chapitres consacrés aux fondements théoriques et l'application de l'interférométrie radar.

Dans le premier chapitre a été dédié d'abord à une synthèse bibliographique sur l'imagerie Radar (la formation d'une image SAR, la physique d'acquisition, résolution, image d'amplitude, image de phase, speckle,...), ensuite un aperçu sur l'interférométrie radar (le principe d'interférométrie, les trois termes principaux dans un interférogramme). Dans le même cadre, nous avons exposé les limites de la technique et les domaines d'application, et présentés en général les méthodes In SAR avancées pour la mesure de déplacement.

Dans le deuxième chapitre nous avons étudiés la mise en application des méthodes d'interférométries radar sur Djebel Aoud Asma (les monts d'Ouled Ali). Notre choix est basé sur l'application et comparaison de la méthode SBAS et PS dans le domaine de déplacement causé par l'exploitation de carrière.

Le document se termine par une conclusion qui explique les contraintes rencontrées du déplacement dans l'espace physique, ainsi qu'une présentation des perspectives pour la poursuite de ce travail.

Chapitre 01 :

Généralités sur Imagerie

Radar d'observation de la terre

1. Introduction :

Actuellement, l'utilisation de systèmes d'imagerie aéroportés ou satellitaires est nécessaire pour suivre et contrôler l'évolution de la Terre. La famille des radars fait partie des différents systèmes d'imagerie possibles.

Radar est un acronyme pour "Radio Detection and Ranging" et signifie la détection et la télémétrie par onde radio. Ce système collecte le rayonnement des objets dans la gamme des micro-ondes, c'est-à-dire des longueurs d'onde de l'ordre du centimètre.

L'émetteur émet une impulsion à intervalle régulier et le rayonnement renvoyé par le sol est enregistré pour former une ligne dans une image. L'amplitude, la phase et la polarisation du signal reçu par le radar sont analysées pour déterminer la distance entre l'objet et le capteur et pour mesurer l'intensité de la réponse de l'objet (sa nature).

Par conséquent, les radars sont des systèmes qui reposent sur l'émission et la réception d'ondes électromagnétiques afin d'obtenir diverses informations sur la zone observée. La sensibilité relative des ondes électromagnétiques aux conditions climatiques et le fait que les radars sont des systèmes actifs (le radar a sa propre source d'émission) confèrent au système radar un avantage sur les autres systèmes d'imagerie (exemple d'un capteur optique dans les zones où les conditions de surveillance sont très mauvaises en raison de la présence constante de nuages).

Le radar (Radio Detection And Ranging) a rapidement conquis le monde scientifique et industriel depuis les premières expériences menées par Christian Holmsmayr en 1902 sur le pont de Cologne, pour ses exigences scientifiques et ses réalisations tangibles. Ses premières applications ont été orientées vers la détection, avant son utilisation comme système imageur.

Dans les années 1950, les premières applications du radar ont été mises en œuvre en tant que système imageur dans le cadre du RAR (radar à ouverture réelle) ou du SLAR (radar à ouverture latérale). Embarqué sur un aéronef ou un satellite, le RAR utilise le mouvement du porteur pour obtenir, grâce à des acquisitions successives, une

image de la zone étudiée. En fonction des contraintes de dimension, le RAR est malheureusement limité en résolution par les fondements même des lois de la diffraction et des longueurs d'ondes utilisées. Pour contourner ce problème sur des systèmes embarqués, Carl Wiley en 1951 a établi de manière assez visionnaire le principe du radar à antenne synthétique (RSO), appelé dans le monde anglosaxon Synthetic Array Radar (SAR).

Les premières réalisations ont été fondées sur un traitement optique et un enregistrement sur film, principalement embarqués sur des avions à la fin des années 50. A la fin des années 60 apparut le premier corrélateur numérique, et dès le début des années 70 un système temps réel.

Dans le domaine spatial, le JPL testa un système SAR sur des fusées expérimentales dès 1962, les travaux ultérieurs permettant d'embarquer un SAR sur Apollo 17 (décembre 1972, Apollo Lunar Sounder Experiment), puis de placer en 1978 sur orbite le satellite SEASAT, qui fut le précurseur dans ce domaine d'une longue série internationale (Europe avec ERS et Envisat, Canada avec Radarsat, Japon avec JERS).

2. Notion de base :

2.1 Radar :

2.1.1 L'antenne radar :

Lorsqu'un courant alternatif traverse un conducteur, il crée un champ électromagnétique qui rayonne dans l'espace environnant, formant ainsi un groupe de conducteurs élémentaires traversés par un puissant courant variable, formant une antenne d'émission radio. Les antennes peuvent être plus ou moins directionnelles, selon la disposition de leurs conducteurs de base. Les antennes radar tirent parti des caractéristiques d'une ouverture de rayonnement plate et rectangulaire.¹

¹ Bentahar T. : Modélisation d'un Radar Interférométrique à déroulement de phase et correction des distorsions. Mémoire de Magister, université de Batna, 2006.

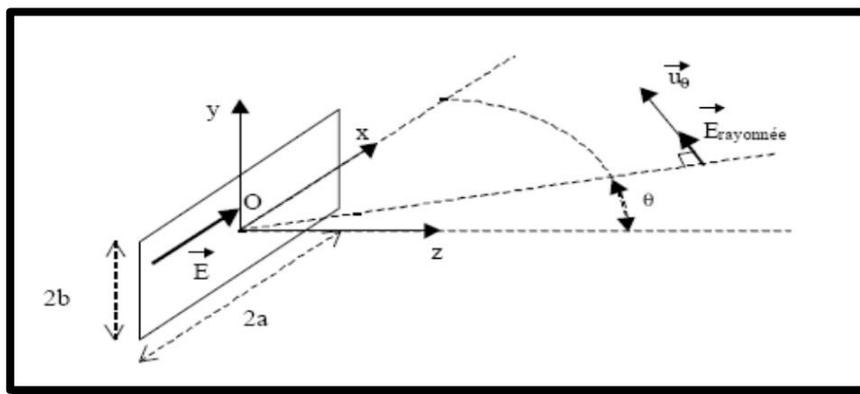


Fig. 1.1 : Ouverture plane rectangulaire.

Dans une ouverture plane rectangulaire de dimension $2a \times 2b$. Elle est traversée par un courant qui permet de maintenir un champ électrique sinusoïdal .

$$E = E_0 e^{-i\omega x} u_x$$

L'expression complexe du champ produit à grande distance se simplifiée lorsque nous nous plaçons dans le plan (xOz) pour prendre la forme :

$$\vec{E}_{rayonné} = ik \frac{e^{-ikr}}{2\pi r} 4abE_0 \frac{\sin(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} e^{-i\omega t} \vec{u}_\theta \quad \dots\dots\dots (1.1)$$

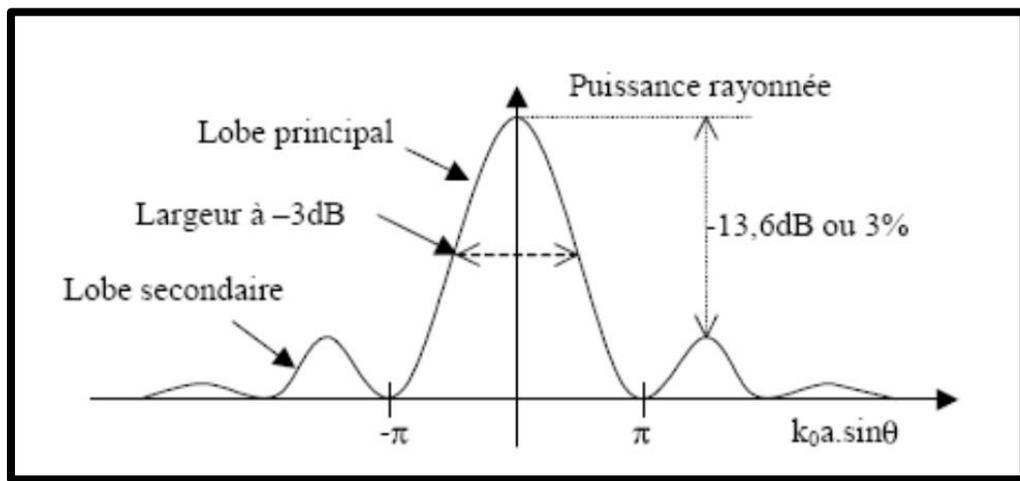


Fig. 1.2 : Puissance rayonnée par l'ouverture.¹

La puissance du champ rayonnée (caractérisée par le nombre d'onde $k_0 = 2\pi/\lambda$) à une distance r de l'antenne varie donc le carré d'un sinus cardinal en fonction de θ . On

définit alors l'ouverture $\Delta\theta$ de l'antenne comme étant la largeur du lobe principal à -3dB c'est-à-dire la moitié de la largeur totale :

$$\Delta\theta = \arcsin\left(\frac{\pi}{ka}\right) = \arcsin\left(\frac{\lambda}{2a}\right) \approx \frac{\lambda}{2a} \dots\dots\dots (1.2)$$

Par conséquent, l'antenne est plus directionnelle car la longueur d'onde est plus petite ou la taille de l'antenne est plus grande dans le plan considéré. Une antenne très longue, donc c'est un faisceau très étroit dans cette direction, mais par contre très ouvert dans le plan orthogonal (Figure 1.3). La dynamique du diagramme d'antenne est telle que les contributions des lobes secondaires sont généralement négligées.¹

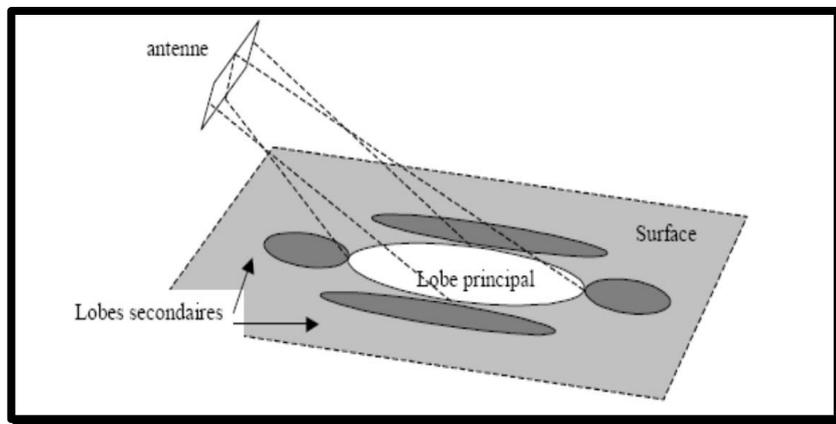


Fig.1.3 : Projection de diagramme d'antenne au sol.¹

2.1.2 Fréquences radar :

La propagation des ondes électromagnétiques dans l'atmosphère dépend surtout de leurs fréquences ; la figure (1.4) représente la transmittance atmosphérique sur une large plage de fréquences. Les systèmes SAR opèrent sur une plage de fréquence avec un minimum d'atténuation. L'avantage des systèmes travaillant sur les plus haute plages et de permettre la réduction de la taille du système et un traitement simplifié du signal radar. Les bandes X, L et C sont les plus utilisées aussi bien pour les systèmes spatiaux que pour les systèmes aéroportés.²

² Akliouat H. : Développement d'un processus de formation d'images Radar SAR SLC à partir de données brutes. . Mémoire de Magister, université de Houari Boumediene USTHB, 2008.

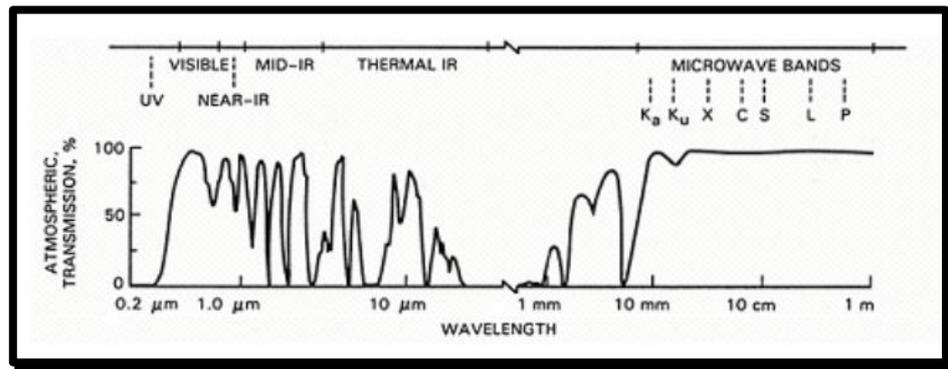


Fig 1.4 : Transmittance atmosphérique des ondes électromagnétiques (NASA 1989)

Quelles que soient les spécificités du radar (modulation de fréquence ou non, ...), le train d'onde produit est caractérisé par la fréquence de la porteuse. En assumant une antenne d'ouverture circulaire de diamètre D alors l'angle d'ouverture de l'antenne à 3 dB est donné par :²

$$\vartheta_a = \frac{\lambda}{D} \quad \dots (1.3)$$

λ : Longueur d'onde.

ϑ_a : Angle d'ouverture azimuthal de l'antenne.

Ainsi les ondes hyperfréquences ou micro-ondes autorisent la réalisation d'antennes de directivités intéressantes.

Ce domaine fréquentiel est subdivisé en 8 bandes, dont les plus utilisées en radar sont les bandes C, L pour les systèmes spatiaux, et X, C, L et P pour les systèmes aéroportés (Tableau 1-1 : Bandes radar).²

Bande Spectrale	Ka	K	Ku	X	C	S	L	P
Fréquence (GHz)	27.0-40.0	18.0-27.0	12.0-18.0	8.0-12.0	4.0-8.0	2.0-4.0	1.0-2.0	0.3-1

Tableau 1.1 : Gamme des fréquences radar (microondes)

2.1.3 Spécificités du radar : Les propriétés du radar se différencient de celles des systèmes optiques, particulièrement au moment de l'interaction de l'onde avec une cible ¹ :

La source d'éclairage est le radar lui-même, les conditions d'illumination (intensité angles) indépendants du moment (heur de jour, saison,...), la source est unique et totalement cohérente, donc les phénomènes d'interférence sont possibles.

Les longueurs d'onde sont considérablement plus grandes que celles du domaine visible : L'onde est très peu sensible à l'état de couches atmosphériques traversées (nuage, humidité, température...) donc la possibilité de travailler par tous temps. Les plus grandes longueurs d'onde sont susceptibles de traverser ou de pénétrer certaines couches de surface (forêts, sable sec,...), la part d'énergie renvoyée est inhérente à la pente et à la rugosité, la réflexion est très importante, et des réflexions multiples sont possibles, les propriétés électriques de la cible dimensionnent fortement le pouvoir réflecteur, l'eau et les objets métalliques sont particulièrement réfléchissants.

Le récepteur est le radar lui-même, la direction d'observation est généralement celle de la rétrodiffusion car c'est souvent la même antenne qui émet et reçoit. Le radar est alors qualifié mono-statique, mais il existe des radars multistatiques (plusieurs récepteurs pour un seul émetteur). L'antenne est sensible à une particulière de polarisation.

Toutes ces caractéristiques en font un instrument complémentaire des dispositifs optiques (fonctionnel par tous temps), et particulièrement adapté aux applications militaires, à l'étude de relief et de la géologie, et bien entendu à la cartographie.

3. Principes de construction de l'image radar :

3.1 Radar classique :

Les premiers radars que l'on peut appeler radars imageurs reposent sur le principe qu'une antenne tournante fournit une vue angulaire et radiale de l'espace environnant ² :

- L'indication de distance est fournie en mesurant le temps écoulé entre le début de l'impulsion et la réception de l'écho.
- Antenne azimutale hautement directionnelle pour un balayage à 360 degrés dans le plan pertinent.

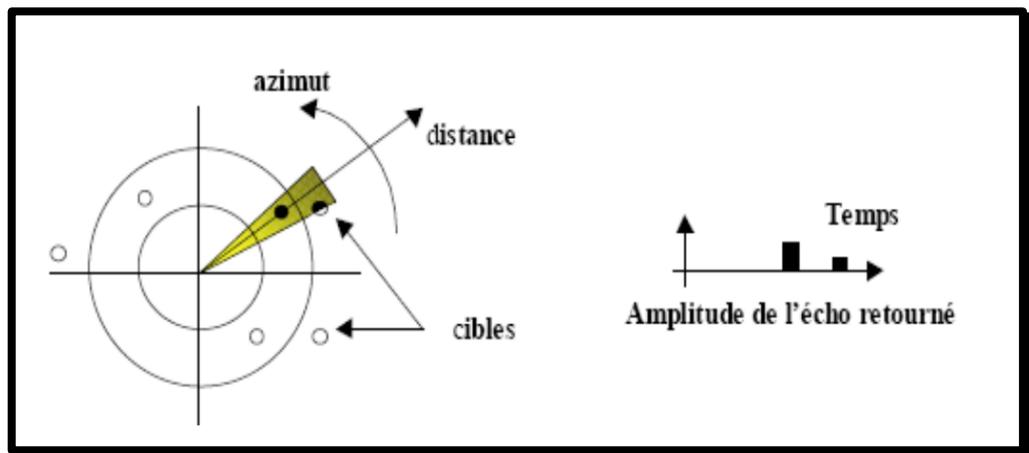


Fig 1.5 : Vision en range et en azimut d'un radar ²

Malgré parfaitement adapté à des applications militaires de type détection de cibles, d'objets volants, cette technique ne fournit pas de résolutions suffisantes et de représentation adéquate pour des applications civiles de type imagerie. Cependant le SLAR en est directement inspiré.

3.2 Radar à vision latérale (SLAR) :

Le SLAR (Side Looking Airborne Radar), ou radar à ouverture réelle, permet d'obtenir des images de qualité acceptable malgré la simplicité de son fonctionnement. Ce type de radar est généralement embarqué sur un avion et il fonctionne en émettant périodiquement, au moyen d'une antenne rectangulaire, un faisceau hyperfréquences dans un plan perpendiculaire à sa trajectoire².

La durée de l'impulsion radar détermine la résolution radiale dans la direction de propagation de l'énergie. Les radars fonctionnent avec une visée latérale : ils envoient un étroit faisceau d'énergie perpendiculairement à la ligne de vol de l'avion. Une impulsion d'énergie est émise par l'antenne radar ; l'intensité relative des échos de retour sert à produire l'image d'une bande de terrain. Lors de la transmission de l'impulsion suivante, l'avion a légèrement avancé, permettant ainsi d'imager une bande de terrain différente. Ces bandes de terrain séquentielles sont ensuite enregistrées côte à côte afin de construire une image complète du terrain.³

Pour ce type de radars, la visée latérale définit les deux axes de l'image¹ :

- **Axe distance** : le temps de retour de l'impulsion électromagnétique fournit la position en distance des différents éléments réflecteurs de la surface. Les signaux mesurés sont donc repérés par distance, qui définit la première composante de l'image. La distance associée au premier point de l'image est appelée « distance proximale » (Near range), tandis que celle associée au dernier point est appelée « portée distale » (far range). La différence entre ces deux derniers détermine la profondeur de champ observé « fauchée ».
- **Axe azimuth** : les positions occupées par le porteur tout au long de sa trajectoire indiquent la position de la projection orthogonale de la cible dans la direction de déplacement. Pour des raisons historiques, cette composante a été dénommée azimuth (en référence aux premiers radars de détection aérienne qui avaient un axe de rotation azimuthal).

³ C.D.T: Principes d'imagerie radar. Centre de Télédétection. Organisation des Nations Unis pour l'Alimentation et l'Agriculture, Rome, 1991.

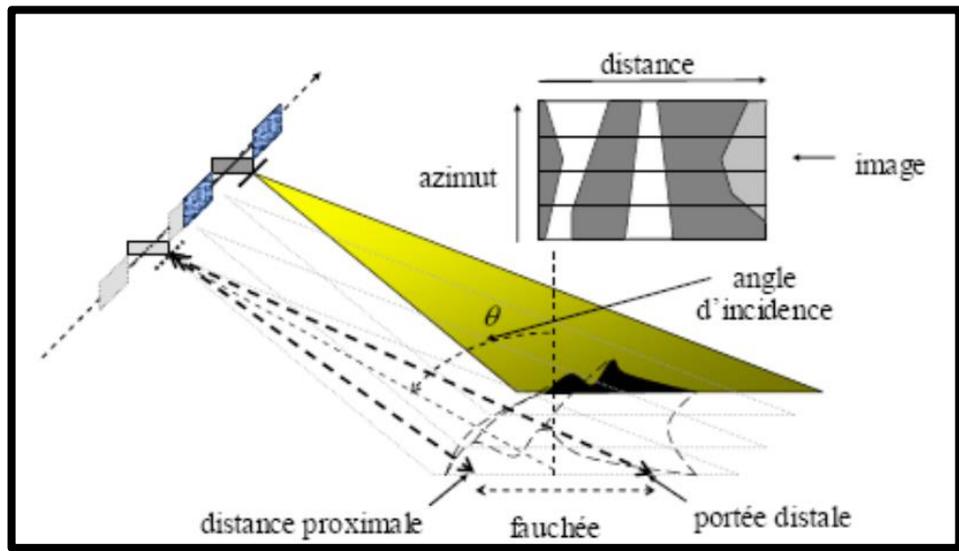


Fig.1.6 : Radar à visée latérale (SLAR) ¹

L'antenne est orientée latéralement plutôt que verticalement puisque le radar ne distingue les cibles que par leur distance, à la verticale du lieu les distance sensiblement les mêmes donc les point ne sont pas discernables. Egalement, deux points situés de part et d'autre de la verticale sont équidistants donc confondus.¹

Pour que le radar puisse séparer deux éléments très rapprochés, les échos de retour doivent nécessairement être reçus à des instants différents.³

Ainsi, la résolution en distance est ⁴:

$$\delta_r = \frac{c\tau}{2} = \frac{c}{2W} \dots (1.4)$$

Car : δ_r dépend de la durée de l'impulsion d'émission τ , ou inversement proportionnelle à la largeur de bande du signal w .

Avec :

C : La vitesse de la lumière dans le vide.

θ : Angle de visée.

⁴ Hasni K. : Intégration de l'Interférométrie Radar (InSAR) et la Technique de positionnement GPS pour les études de déformation. Mémoire de Magister, centre national des techniques spatiales CNTS, 2006.

Pour pouvoir détecter deux cibles séparées dans le plan azimutal (along track), il est nécessaire que la distance entre les cibles soit égale ou légèrement supérieure à la largeur du faisceau radar. Donc la résolution en azimut est donnée par ⁴:

$$\delta_a = \beta R = \frac{\lambda R}{L} = \frac{\lambda H}{L \cos \theta} \dots\dots (1.5)$$

Avec :

R : La distance radiale (la distance entre le radar et la cible).

β : La largeur du faisceau d'antenne, donnée par: $\beta = \frac{\lambda}{L} \dots\dots (1.6)$

Avec:

λ : Longueur d'onde utilisée.

L : Longueur de l'antenne.

H : Altitude de la plate-forme.

θ : Angle de visée.

Pour les radars conventionnels à ouverture réelle, le faisceau forme un angle constant. La résolution azimutale est dépendante de la distance radar/surface ; elle est meilleure pour les points les plus rapprochés avec un faisceau plus étroit.³

Une antenne plus longue permet d'obtenir un angle plus étroit et d'améliorer la résolution azimutale. Une autre façon d'améliorer la résolution azimutale consiste à utiliser une radiation électromagnétique de longueur d'onde plus courte. Néanmoins, il existe des limitations pratiques, par exemple en ce qui concerne la longueur d'une antenne pouvant être transportée, de manière stable, par un avion. De plus, l'utilisation de longueurs d'ondes plus courtes est associée à une plus forte atténuation par les nuages et l'atmosphère, réduisant ainsi la capacité du radar d'acquérir des images par tout temps. Du fait de ces limitations, les radars à ouverture synthétique SAR ont été mis au point : ils permettent en effet d'obtenir, sans longue antenne ou courte longueur d'onde une résolution azimutale ("Along track") satisfaisante indépendante de la distance radar/surface.³

3.3 Radar à synthèse d'ouverture SAR :

Une ouverture synthétique s'obtient, à bord d'un avion ou d'un satellite, en utilisant une antenne relativement courte qui émet et reçoit des impulsions cohérentes à intervalles de temps réguliers le long de la ligne de vol. Quand ces impulsions sont enregistrées, puis combinées, une antenne de longueur effective beaucoup plus grande que l'antenne existante physiquement est créée artificiellement. Cette ouverture synthétique permet d'améliorer la résolution azimutale.³

3.3.1 Construction d'un radar à ouverture de synthèse :

Comme il a été mentionné à l'équation (1.5), la longueur de l'antenne détermine la résolution en azimut (suivant la ligne de vol) ; plus l'antenne est longue et plus la résolution est plus fine. Par exemple, pour obtenir une résolution azimutale de 4 m avec une altitude moyenne de 844 km (le cas d'ERS) et une longueur d'onde de 5.66 cm, une longueur d'antenne de 12 km est requise. La construction et la mise en orbite d'une telle antenne est impensable actuellement. C'est là que les techniques avancées de traitement de signal entrent en jeu et une longue antenne est synthétisée en combinant plusieurs échos reçus par le radar le long de son mouvement. Willy (1954) fut le premier à réaliser que le décalage doppler des signaux pouvait être utilisé pour synthétiser une longue ouverture pour améliorer la résolution du radar à ouverture réelle (voir Fig. 1.7).⁵

Au cours du déplacement du satellite, l'antenne du radar émet régulièrement de brèves impulsions qui illuminent le sol. La surface ainsi éclairée, appelée "l'empreinte au sol de l'antenne", renvoie vers le satellite une partie du rayonnement émis. En retour à l'antenne, ce rayonnement rétrodiffusé est mesuré (phase et amplitude) par le radar. La fréquence à laquelle sont émises les impulsions du radar (couramment appelée PRF, pour Pulse Repetition Frequency) est suffisamment grande pour que deux empreintes successives se chevauchent largement. Ce recouvrement crée une certaine redondance de l'information qui sera utilisée par le traitement SAR (Pour ERS, un même point est mesuré dans environ 1000 impulsions). Ainsi une bande continue de sol parallèle à l'orbite est "vue" par le radar, sa largeur est appelée "la fauchée" (voir Fig. 1.8).⁶

⁵ Cakir Z.: Analysis of the crustal deformation caused by the 1999 Marmara earthquake sequence using synthetic aperture radar interferometry, thèse IPGP, 2003.

⁶ Pathier E. : Apports de l'interférométrie radar différentielle à l'étude de la tectonique active de Taiwan. Thèse de doctorat, Université de Marne-la-Vallée, 2003.

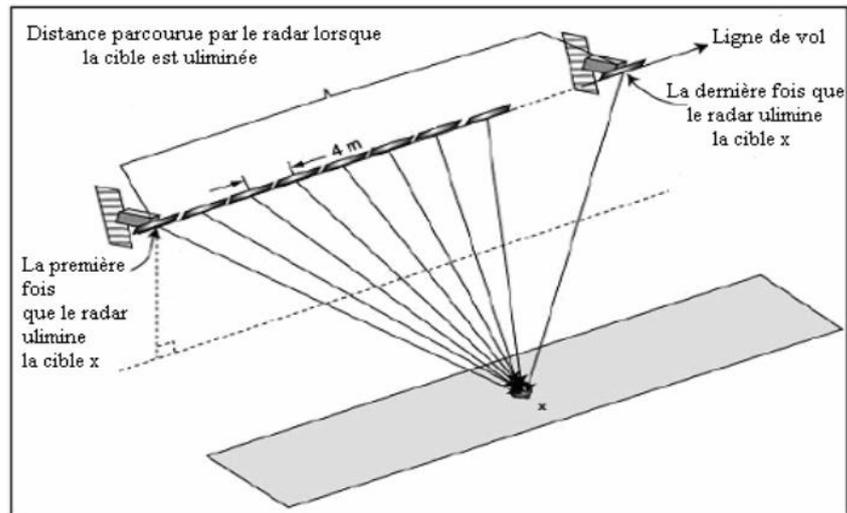


Fig. 1.7 : Illustration schématique de la construction d'une antenne synthétique.⁵

3.3.2 Résolution :

Les systèmes SAR sont nés pour améliorer la résolution naturelle des radars à ouverture réelle. Sont accumule des données d'images tout en parcourant son orbite. Ainsi, des bandes continues de la surface terrestre sont illuminées d'un côté du radar, parallèlement à sa trajectoire. Les données ainsi accumulées sont ensuite traitées afin de produire une image radar².

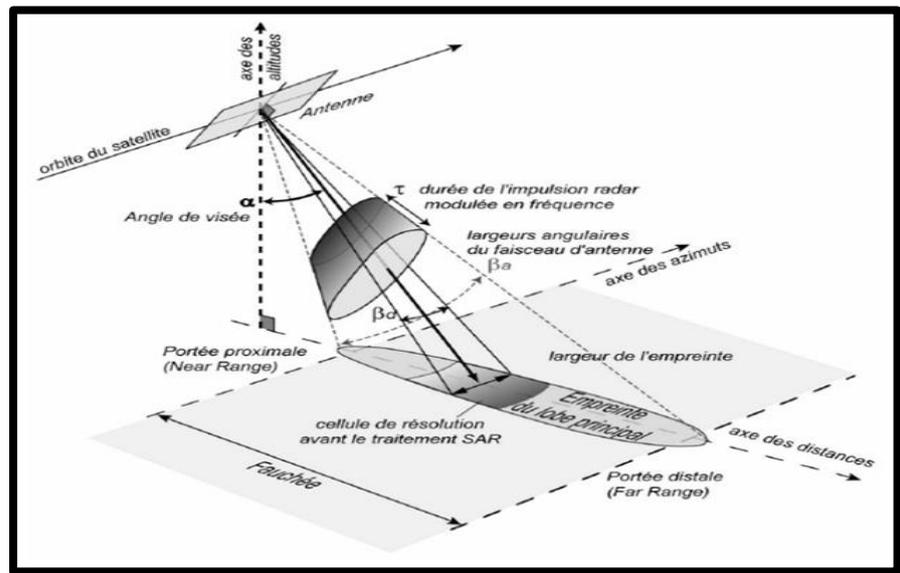


Fig. 1.8 : Acquisition des images SAR.⁶

Nous avons vu que chaque "pixel" de donnée brute correspondait à une cellule de résolution de plusieurs kilomètres carrés. Le traitement SAR va permettre d'obtenir une résolution métrique. Pour cela, la réponse du sol doit être échantillonnée avec un pas semblable à la résolution voulue, d'où les hautes fréquences d'échantillonnage en azimut et en distance par rapport à la taille d'une cellule de résolution de donnée brute. Si l'on se place du point de vue d'un objet précis au sol, la réponse de cet objet est contenue dans plusieurs centaines de pixels de données brutes. Mais, en chaque pixel, elle est mélangée avec les réponses de tous les autres objets de la cellule de résolution correspondante.⁶

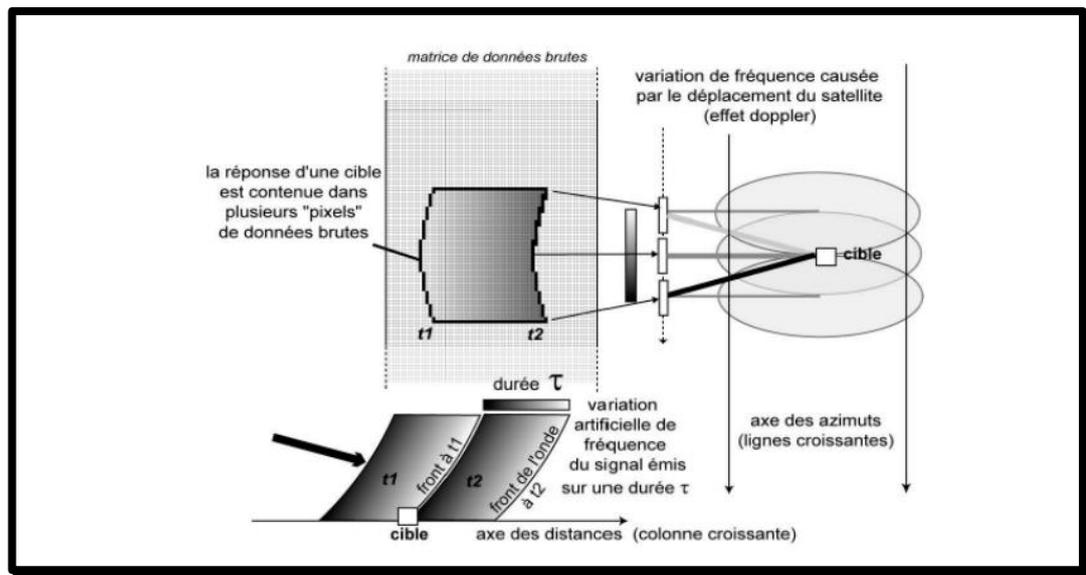


Fig. 1.9 : Réponse d'une cible ponctuelle dans les données brutes.⁶

L'extraction de la réponse d'une cellule de résolution SAR se fait en deux étapes. Appelées "synthèse" ou focalisation, ou encore compression des données brutes (voir Fig. 1.9); en utilisant le fait que le signal radar émis est modulé linéairement en fréquence, la compression en distance permet d'obtenir une résolution $\delta_{r_{sar}}$ Suivant la direction de visée telle que ⁶:

$$\delta_{r_{sar}} = \frac{c}{2B} \dots (1.7)$$

Où: B est la bande de fréquence d'échantillonnage.

En azimut, l'amélioration de la résolution est obtenue grâce à la modulation de fréquence de l'onde radar créée par le déplacement du satellite par rapport au sol. En effet,

la phase observée varie proportionnellement avec la distance satellite-sol, introduisant un effet doppler. La résolution en azimuth après focalisation δ_{asar} devient alors égale à la moitié de la longueur de l'antenne L ⁶:

$$\delta_{asar} = \frac{L}{2} \quad \dots (1.8)$$

La compression en azimuth utilise les différents échos renvoyés sur l'antenne par une même cible, en réponse aux différentes impulsions successives, pendant un déplacement du satellite équivalent à la largeur de l'empreinte du lobe d'antenne. ⁶

Après le traitement SAR, tout se passe comme si une seule impulsion était émise par une grande antenne. Rappelons que sans traitement SAR, la taille de la cellule de résolution en azimuth diminue avec la largeur d'antenne (eq.1.5). Grâce au traitement SAR, plus l'antenne réelle est petite, plus le faisceau est large et donc plus l'antenne simulée est grande. ⁶

Ainsi, l'image SAR peut être considérée comme la matrice de données bruts d'un radar "simulé" ayant les mêmes fréquences d'acquisition en azimuth et en distance que le radar réel, mais possédant une antenne équivalente à l'antenne synthétisée et émettant une impulsion sur une durée beaucoup plus brève (la résolution en distance diminue avec cette durée, eq.1.4). Pour ERS, cela équivaut à une longueur d'antenne de 9400 m et une durée d'impulsion de 64 ns (contre 10m et 37.1 μ s en réalité). La résolution naturelle d'un tel radar simulé est bien de 3.9m en azimuth et de 7.9m en distance, ce qui correspond en terrain plat à une cellule de résolution au sol de 4m par 20m au centre de la scène. Sachant qu'une telle taille d'antenne est irréaliste sur un satellite et qu'il faudrait fournir une puissance instantanée beaucoup plus importante pour obtenir une durée d'impulsion si brève, les avantages du radar à ouverture synthétique sont évidents. Notons aussi une autre caractéristique intéressante de l'imagerie SAR : la résolution d'une image SAR ne dépend pas de la distance radar- sol, mais de la longueur de l'antenne seulement. ⁶

4. Caractéristiques de l'image SAR :

4.1 Géométrie d'acquisition :

L'image SAR peut être considérée comme si le radar avait une visée suivant une direction qui peut être choisie différente de sa visée effective. La géométrie de l'image

SAR devient donc indépendante de l'orientation effective de l'instrument (c'est une grande différence avec l'imagerie optique où l'orientation de l'instrument est décisive en termes de géométrie).⁶

L'ensemble des données mesurées peut être représenté sous la forme d'une matrice bidimensionnelle. Conventionnellement, chaque ligne représente les mesures faites pour une impulsion. Les différentes lignes correspondent aux impulsions successives du radar. Le début de ligne (1ere colonne) correspond à la première mesure et la fin de la ligne à la dernière mesure pour une impulsion donnée. Le nombre de lignes n'est à priori, pas limité car le radar image une bande continue de sol. Cependant, pour des raisons pratiques, lors de la diffusion des données aux utilisateurs, la bande est découpée régulièrement en morceaux (frames).⁶

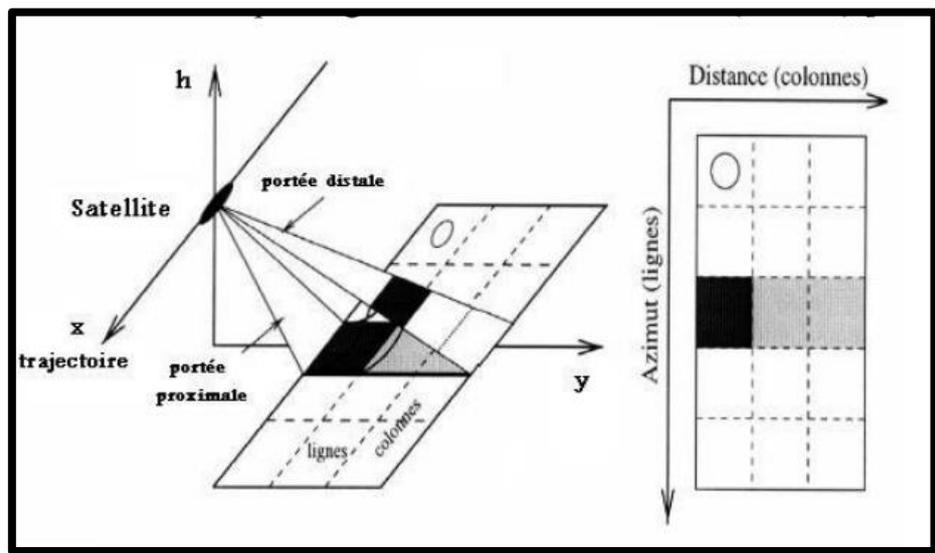


Fig. 1.10 : Géométrie d'acquisition de l'image SAR.⁴

Connaissant la trajectoire du satellite, un pixel de coordonnées (i, j) est donc localisé par les relations :⁴

$$T_i = T_1 + \frac{(i-1)}{PRF} \dots (1.9)$$

$$R_j = NR + j \cdot \delta_{r_{sar}} \dots (1.10)$$

Avec :

T_1 : Date de la première acquisition (la 1^{ère} ligne) après la reconstruction de l'image.

i : Ligne i (azimut).

j : Colonne j (distance).

PRF: La cadence de l'impulsion.

NR: Portée proximale.

Cette image, issue du signal complexe de l'écho radar, contient une information radiométrique (l'amplitude) et une information géométrique (la phase).

4.2 Mesure complexe d'une cellule de résolution :

A chaque pixel de l'image correspond une mesure complexe du signal rétrodiffusé par l'ensemble de diffuseurs d'une cellule de résolution. De nombreux diffuseurs (ou cibles) élémentaires contribuent à la cellule. La source du signal étant cohérente, il se produit des phénomènes d'interférences constructives ou destructives entre les différentes raies d'onde renvoyées vers le radar. La mesure correspond à la somme complexe de ces différentes réponses. Les mesures de phase et d'amplitude sont quasiment imprédictibles car elles dépendent de très nombreux paramètres qui ne sont pas constants à l'intérieur de la cellule de résolution. Par exemple, chaque cible est à une distance différente du radar.⁶

• Image d'amplitude :

Le module d'une image radar représente l'amplitude du signal reçu au niveau du capteur après sa rétrodiffusion par la cible. Ce coefficient de rétrodiffusion dépend non seulement des paramètres techniques liés au capteur (fréquence, polarisation, angle de visée) mais également des paramètres liés à la surface elle-même (rugosité à l'échelle de la longueur d'onde, géométrie, propriétés diélectriques). Ces images peuvent être utilisées comme leur équivalent dans le visible (intéressant dans les régions à forte couverture nuageuse) ou pour leur particularité propre. Elles sont très sensibles aux modifications d'état de la surface et permettent de faire des études sur l'évolution temporelle des phénomènes (érosion du littoral, urbanisation).⁴

• **Image de phase :**

La deuxième grandeur physique présente dans le signal complexe d'une onde radar est la phase. Elle correspond au déphasage entre l'onde émise et l'onde reçue. Plusieurs facteurs contribuent à ce déphasage. Bien que l'information qu'elle contient soit extrêmement riche, la phase mesurée est difficilement interprétable car elle représente la somme de deux contributions distinctes dues d'une part aux propriétés intrinsèques de la cible et d'autre part au trajet aller-retour entre le satellite et la cible.⁴

Donc la phase mesurée est décomposée ainsi :

- Une phase propre (aléatoire) : Elle est propre aux diffuseurs de la cellule de résolution. Elle dépend des paramètres inconnus dont les propriétés diélectriques du sol. Elle est généralement inaccessible.
- Une phase géométrique : Elle est dépendante du temps aller-retour entre l'antenne et la cible.

$$\varphi_{geo} = 2\pi f t = \frac{4\pi R}{\lambda} \dots\dots (1.11)$$

Avec : f la fréquence du radar et R la distance radiale.

L'ambiguïté de la phase est un point très important. Ainsi, si l'on ne prend en compte que φ_{geo} l'ambiguïté fait que si la cible est située à la distance R ou à toute autre distance R telle que:

$$R' = R + K \frac{\lambda}{2} \dots\dots (1.12)$$

Avec: k un nombre entier, alors la phase mesurée sera la même.

• **Speckle :**

Les images radar d'environnement éclairé par une onde électromagnétique cohérente présentent des granulations cohérentes spécifiques, qui limitent l'interprétation des propriétés macroscopiques de la scène observée, en lui donnant une apparence

chaotique et désordonnée. La majorité des milieux naturels présentent des diffuseurs élémentaires dont les dimensions sont de l'ordre de la longueur d'onde incidente. Les surfaces peuvent être alors extrêmement rugueuses et des milieux hétérogènes sources de multiples réflexions aléatoires. Ces réflecteurs élémentaires présentent alors des diffusions indépendantes. La propagation de cette onde réfléchie vers le point d'observation résulte de l'addition cohérente des diffuseurs élémentaires auxquels sont affectés des retards dépendant de la surface ainsi que de la géométrie.⁴

L'interférence de ces ondes déphasées mais cohérentes engendre des granulations dans l'image connue sous le nom de "speckle". L'effet « speckle » se traduit sur l'image par la présence d'une multitude de points soit brillants où l'interférence associée est fortement constructive soit obscurs lorsque l'interférence est destructive.

Le speckle n'est donc pas le résultat d'une variabilité spatiale des propriétés physiques ou électromagnétiques de la surface illuminée par le radar. Dans toute l'image radar, il est courant de rencontrer aussi bien des parcelles où la seule texture présente est celle du speckle dans le cas des zones homogènes, que des parcelles présentant des variations spatiales propres à l'environnement autre que celles du speckle dans le cas des zones hétérogènes. Il est alors indispensable de mettre en place une procédure de réduction de speckle pour une meilleure détection des cibles ainsi que pour une meilleure classification et identification des divers mécanismes de diffusion, présents au sein de l'environnement.

5. Interférométrie SAR :

L'interférométrie radar est développée après la Seconde Guerre mondiale. En 1946, Ryle et Vonberg ont construit un analogue radio de l'interféromètre de Michelson-Morley et ont rapidement localisé un certain nombre de nouvelles sources radio cosmiques. Dans le domaine de cartographie planétaire, la configuration distance-Doppler a permis la cartographie de la réflectivité radar à partir des lignes iso-distance et des lignes iso-Doppler.⁷

Ce qui restait inconnu était l'ambiguïté entre les réflexions des hémisphères nord et sud de la planète. Rogers et Ingalls (1969) ont été les premiers à utiliser l'interférométrie

⁷ Ramont F.H : RADAR INTERFEROMETRY, Data Interpretation and Error Analysis. Print 2001 by Kluwer Academic Publishers.

pour résoudre cette ambiguïté, en utilisant deux antennes. Pour la lune, la largeur du faisceau d'antenne était suffisamment petite pour résoudre l'ambiguïté nord-sud, ce qui a permis d'utiliser l'interférométrie pour mesurer les différences d'élévation.⁷

Bamler et Hartl [1998] soulignent la difficulté de définir l'interférométrie radar. Ils proposent d'utiliser le terme interférométrie radar pour désigner "toutes les méthodes qui emploient au moins deux images SAR complexes afin d'obtenir des informations supplémentaires sur les objets présents dans une seule image SAR, en exploitant l'information de phase du signal SAR."⁶

Les images SAR possèdent une symétrie sphérique. Ainsi, deux cibles situées à une même distance du capteur mais à des hauteurs différentes peuvent apparaître dans un même pixel. Ceci entraîne une ambiguïté et aucune information sur la hauteur des diffuseurs ne peut être obtenue. Pour obtenir plus d'informations par exemple au sujet de la topographie de la scène éclairée, il est nécessaire de briser cette symétrie. Pour cela, une seconde image est simplement utilisée, acquise à partir d'un angle de vue légèrement différent. Il y a deux possibilités pour acquérir des images interférométriques : Soit les capteurs sont montés sur une même plate-forme, séparés physiquement par une distance nommée « base interférométrique ». Ce principe est appelé interférométrie "mono- passe". Soit la plate-forme fait une première passe pour enregistrer les données et refait une autre passe après un certain temps mais sur une autre trajectoire. Dans ce cas, la base interférométrique est générée par la distance entre les deux trajectoires et ce principe est nommé interférométrie "multi-passe" (fig.1.11).⁸

5.1 Principes de l'Insar : comment ça marche ?

Soient $U_1(x, R)$ et $U_2(x, R)$ deux images SAR complexes ⁸:

$$U_1(x, R) = |U_1(x, R)|e^{i\varphi_1(x,R)} \text{ Et } U_2(x, R) = |U_2(x, R)|e^{i\varphi_2(x,R)} \dots (1.13)$$

Ces deux signaux sont composés d'un module, représentant la radiométrie et d'une phase. Comme nous l'avons mentionné précédemment, la phase est composée de plusieurs termes, dont les deux principaux sont :

⁸ GUILLASO S. : Complémentarité polarimétrie/interférométrie pour la détection et la caractérisation de cibles. Thèse de doctorat, Université de Rennes 1, 2003.

$$\varphi_{1,2}(x, R) = \varphi_{1,2_{propre}}(x, R) + \frac{4\pi}{\lambda} R_{1,2} + \varphi_{err} \dots (1.14)$$

Le premier terme de la phase d'une image SAR, $\varphi_{propre}(x, R)$ représente un déphasage dû à l'interaction entre l'onde et la surface, nommée phase propre, ayant un comportement aléatoire et difficile à estimer. Pour le deuxième terme est dû à un déphasage qui est liée au trajet aller-retour de l'onde.

L'idée générale de l'InSAR est de considérer que la phase propre des deux images SAR est identique ($\varphi_{1_{propre}}(x, R) = \varphi_{2_{propre}}(x, R)$) car la différence des angles de vue est faible. Alors la phase interférométrique est directement proportionnelle à la différence de trajet $R1$ et $R2$:

$$\Delta\varphi(x, R) = \varphi_1(x, R) - \varphi_2(x, R) = \frac{4\pi}{\lambda}(R_1 - R_2) + \varphi_{err} \dots (1.15)$$

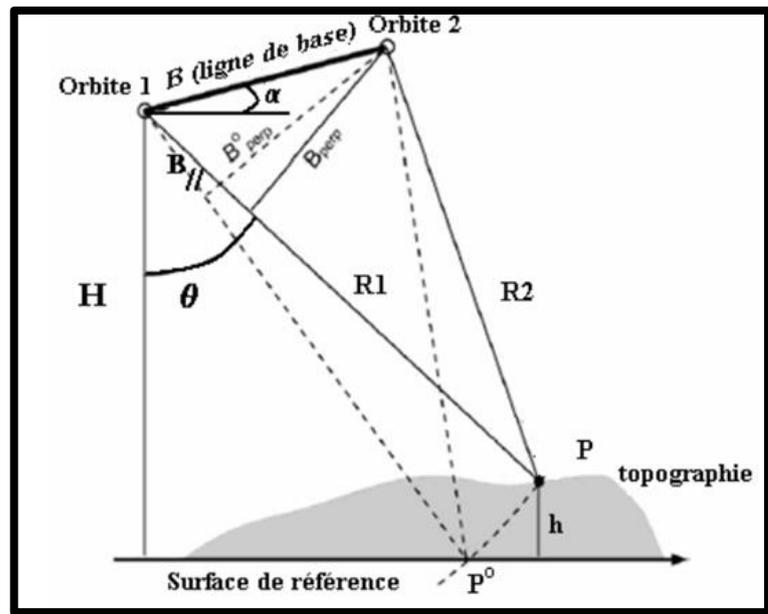


Fig. 1.11 : Géométrie d'acquisition d'un couple interférométrique.⁶

La mesure du déphasage est très précise, mais n'est connue que modulo 2π , $\Delta\varphi(x, R)$ est appelé « interférogramme ». Cette image est constituée de franges dues aux repliements de la phase modulo 2π .

La figure (1.12) montre un exemple d'interférogramme, il s'agit de celui du Mont Etna, Italie, généré à partir d'une paire d'images SAR interférométriques acquises par le capteur SIR-C / X-SAR, en bande X. L'action qui permet de retrouver l'information de la différence de marche à partir d'un interférogramme se fait par un "déroulement de phase".

Le calcul de l'interférogramme s'effectue en recherchant la valeur de $\Delta_\varphi(x, R)$ pour tout point de la scène étudiée. Dans la pratique, il suffit de calculer le coefficient de corrélation entre les deux signaux $U_1(x, R)$, $U_2(x, R)$

$$\rho = \frac{E\{U_1(x,R) U_2^*(x,R)\}}{\sqrt{E\{U_1(x,R)U_1^*(x,R)\}E\{U_2(x,R)U_2^*(x,R)\}}} \dots (1.16)$$

Ainsi ρ est une valeur complexe dont le module est 1, si elle est calculée pour un seul pixel et la phase représente le terme $\Delta_\varphi(x, R)$ cherché. L'estimation de l'amplitude se fait par une estimation locale. Telle que "*" dénote le conjugué et "E" représente l'estimation mathématique.

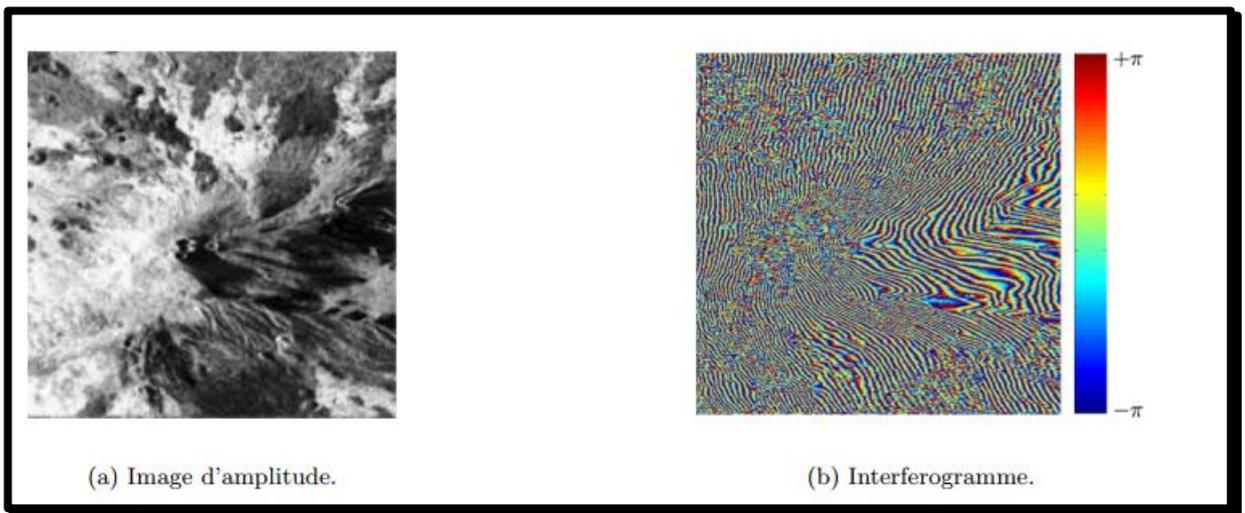


Fig.1.12 : Le Mont Etna, Sicile, Italie, SIR-C/X-SAR, bande X.⁸

5.2 Lien phase-altitude :

De la fig. (1.11), on peut déduire⁴: $\sin(\theta - \alpha) = \frac{R_1^2 - R_2^2 + B^2}{2R_1B} \dots (1.17)$

Avec :

- α : Angle d'orientation de la base.
- La hauteur de la cible p est donnée par :

$$H_p = H - R_1 \cos \theta \dots\dots (1.18)$$

De l'équation (1.17), il est possible d'estimer la différence de trajet $\Delta R = R_1 - R_2$:

$$\Delta R = -\frac{B^2}{2R_1} + B \sin(\theta - \alpha) \dots\dots (1.19)$$

Dans notre cas, où la valeur de la base est faible en comparaison avec les distances radiales R_1 et R_2 , alors le premier terme de l'équation précédente est négligeable, ce qui donne:

$$\Delta R \cong B \sin(\theta - \alpha) \dots(1.20)$$

Communément, il est utile de décomposer la base en deux termes : la base parallèle $B_{//}$ et la base ortho-normale B_{\perp} (Fig. 1.11).

Les valeurs de ces bases sont reliées à la valeur de la base par :

$$B_{//} = B \sin(\theta - \alpha) \text{ et } B_{\perp} = B \cos(\theta - \alpha) \dots\dots (1.21)$$

Ainsi, la phase interférométrique $\Delta\phi$ peut s'écrire en fonction des valeurs des bases:

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R + \varphi_{err} = \frac{4\pi}{\lambda} B \sin(\theta - \alpha) + \varphi_{err} = \frac{4\pi}{\lambda} B_{//} + \varphi_{err} \dots\dots(1.22)$$

Cette phase contient les informations au sujet de la distance radiale ou « phase de la terre plate » φ_{fe} et de la hauteur de la cible p ou « phase topographique » φ_{topo} .

On peut réécrire la phase interférométrique en se basant encore sur la figure (1.11), de la façon suivante:

$$\Delta\phi + 2k\pi = \frac{4\pi}{\lambda} \left(B \sin(\theta - \alpha) + \frac{B_{\perp}}{R_1 \sin \theta} h \right) + \varphi_{err} \dots\dots (1.23)$$

- **Phase de la terre plate :**

Le premier terme $\frac{4\pi}{\lambda} [B \sin(\theta - \alpha)]$ de l'équation (1.23), correspond à la différence de phase qu'il y aurait si la surface observée était la surface de référence. Ce terme domine dans l'interférogramme non corrigé, il se traduit par de nombreuses franges parallèles à l'axe des azimuts appelées « franges orbitales ».

- **Sensibilité en hauteur (la phase topographique) :**

Le deuxième terme $\frac{4\pi}{\lambda} \left[\frac{B_{\perp}}{R_1 \sin \theta} h \right]$ correspond à la différence de phase causée par l'altitude de la surface observée par rapport à la surface de référence. Elle se traduit par des franges qui peuvent être lues comme des lignes d'iso-altitude. Ces franges sont appelées « franges topographiques ».

La différence d'altitude entre chaque courbe est donnée par une quantité appelée « altitude d'ambiguïté ».

$$H_a = \frac{\lambda R_1 \sin \theta}{2 B_{\perp}} \quad \dots\dots (1.24)$$

Plus la base perpendiculaire est petite, plus l'altitude d'ambiguïté est grande et donc la sensibilité de l'interférogramme au relief est faible.

Pour l'étude des déplacements, il faut donc soustraire de l'interférogramme cet effet géométrique. Si l'on connaît la topographie et la base, on est alors capable de modéliser la phase liée à la topographie $\Delta\varphi_{topo}$ et donc de la soustraire.⁶

$$\Delta\varphi_c^0 = \Delta\varphi^0 - \Delta\varphi_{topo} \quad \dots\dots (1.25)$$

L'altitude d'ambiguïté au même titre que la distance inter-orbitale à laquelle elle est intrinsèquement liée, joue un rôle très important puisqu'elle permet le passage de la phase à l'altitude. En effet, l'altitude d'ambiguïté correspond à un déphasage de 2π , on aura :

$$h = H_a \frac{\varphi}{2\pi} \quad \dots\dots (1.26)$$

6. Limitations du SAR :

6.1 Prise en compte de la géométrie réelle de prise de vue :

Dans le cas idéal, lors de l'acquisition de la deuxième image SAR d'un couple interférométrique, le satellite repasse exactement suivant la même orbite que lors de la première acquisition et avec exactement la même orientation. En réalité, cela n'est pas le cas, les différences de géométries de prises de vue ont des conséquences importantes en interférométrie radar, rendant sa mise en œuvre plus compliquée. Nous en verrons les limitations qui en découlent.⁶

- **Influence de la topographie :**

Considérons une situation équivalente à celle du cas idéal à une différence près : maintenant, au deuxième passage, au lieu de repasser suivant la même orbite, le satellite suit une orbite exactement parallèle à la première mais non confondue avec elle. Cette situation permet d'envisager le problème en 2 dimensions dans le plan perpendiculaire à l'orbite.

En l'absence de tout déplacement, la mesure de phase en une même cellule de résolution est différente entre le premier et le deuxième passage. Cette différence dépend de la position de la cellule de résolution et de la position du satellite à chaque passage (l'existence d'une base).

Si la position des satellites est parfaitement connue ainsi que la position du point (par exemple à partir d'un MNT), il est possible de modéliser la différence de phase $\Delta\phi_{\text{géo}}$ induite par cet effet. Il est pratique de décomposer cet effet en deux contributions : Celle liée uniquement à une surface de référence (ellipsoïde, géoïde, sphère, terre plate, etc.) et celle liée uniquement à l'altitude du point par rapport à cette surface de référence. C'est sur ce principe que des MNT peuvent être réalisés à partir de couples d'images SAR. En interférométrie radar différentielle, on soustrait la différence de phase causée par cet effet géométrique de la phase interférométrique (Fig. 1.11).

- **Influence de la base sur la géométrie des images :**

Jusqu'à présent, nous avons considéré des différences de phase pixel à pixel en partant du principe que les deux pixels mis en jeu dans l'opération, correspondaient à une même cellule de résolution. Or, à partir du moment où le couple présente une base non

nulle, la géométrie des images est légèrement différente et il n'est plus possible d'effectuer une différence de phase directement de pixel à pixel (voir Figure 1.13). Les distorsions d'une image par rapport à l'autre ne sont pas homogènes sur l'image, car elles dépendent aussi de la pente locale et donc de la topographie. Le traitement se fait pixel à pixel, en tenant compte de l'angle d'incidence local.

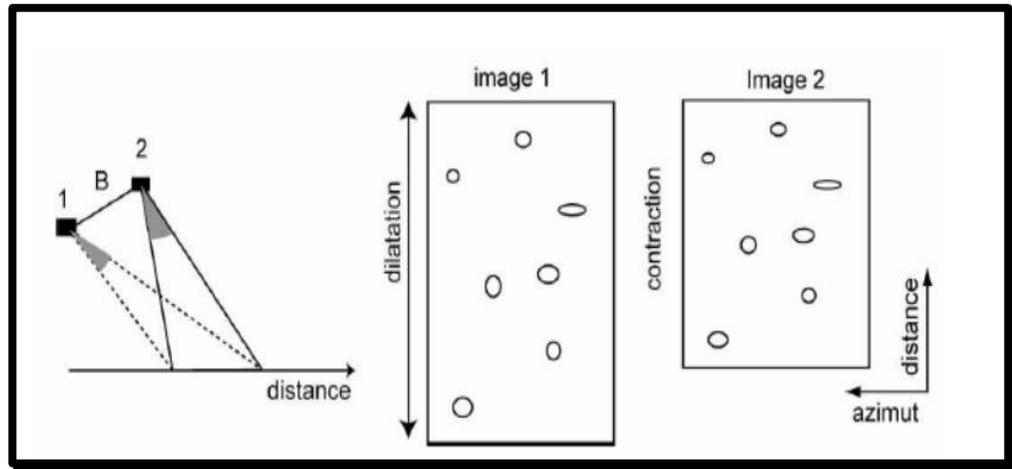


Fig. 1.13 : Influence de la base sur la géométrie de l'image.⁶

Ces distorsions géométriques doivent être corrigées, afin que la différence soit effectuée sur deux mesures de phase correspondantes à une même cellule de résolution. Différentes méthodes existent, le plus souvent basées sur la corrélation entre les deux images d'amplitude. Elles nécessitent une grande précision dans le calage, de l'ordre de 110ème de la taille de la cellule de résolution.

- **Influence de la base sur la stabilité de la phase interférométrique d'un pixel :**

La base du couple interférométrique fait, qu'au sein d'une même cellule de résolution, l'angle de visée est différent pour les deux acquisitions. La phase de construction (représente la phase à ajouter en prenant en compte tous les autres effets liés au contenu de la cellule de résolution) est dépendante de l'angle de visée, qui change d'une image à l'autre.

Cet effet est purement géométrique. En effet, la différence d'angle de visée est suffisamment faible (de l'ordre de 0.1° pour une base perpendiculaire de 1000m sur ERS) pour que l'on puisse considérer que la phase propre d'une cible élémentaire ne change pas ou peu.

Cet effet est à relier à la phase topographique introduite par la base. Nous avons vu au paragraphe précédent qu'une base non nulle, faisait apparaître des franges topographiques (voir Fig 1.14). Ainsi, par rapport à la première image, on peut considérer qu'il est introduit sur la deuxième image un gradient de phase correspondant au gradient de cette phase topographique. Pour que l'interférogramme reste exploitable, il faut que $\Delta\phi_{\text{cons}}$ reste petit. En effet, $\Delta\phi_{\text{cons}}$ peut être considéré comme du bruit dans l'interférogramme car, en pratique, il varie de façon non prédictible d'un pixel à l'autre.

Il dépend donc fortement de la pente locale mais aussi du contenu de la cellule de résolution. On peut établir la base critique au-delà de laquelle $\Delta\phi_{\text{cons}}$ devient si grand que la phase interférométrique est inutilisable car le bruit domine sur le signal. Dans le cas de cibles uniformément réparties, sans l'existence d'une cible qui domine largement par rapport aux autres et d'un terrain plat, la base critique est donnée par :

$$B_c = \frac{\lambda R}{2(\tan \theta) T_d} \dots\dots (1.27)$$

Avec : T_d la taille de la cellule de résolution en distance.

Cette condition peut aussi s'exprimer en termes de contraction ou de dilatation d'une image du couple par rapport à l'autre, faisant le lien avec l'effet vu à la section précédente. Pour ERS, la base critique est d'environ 1100m.

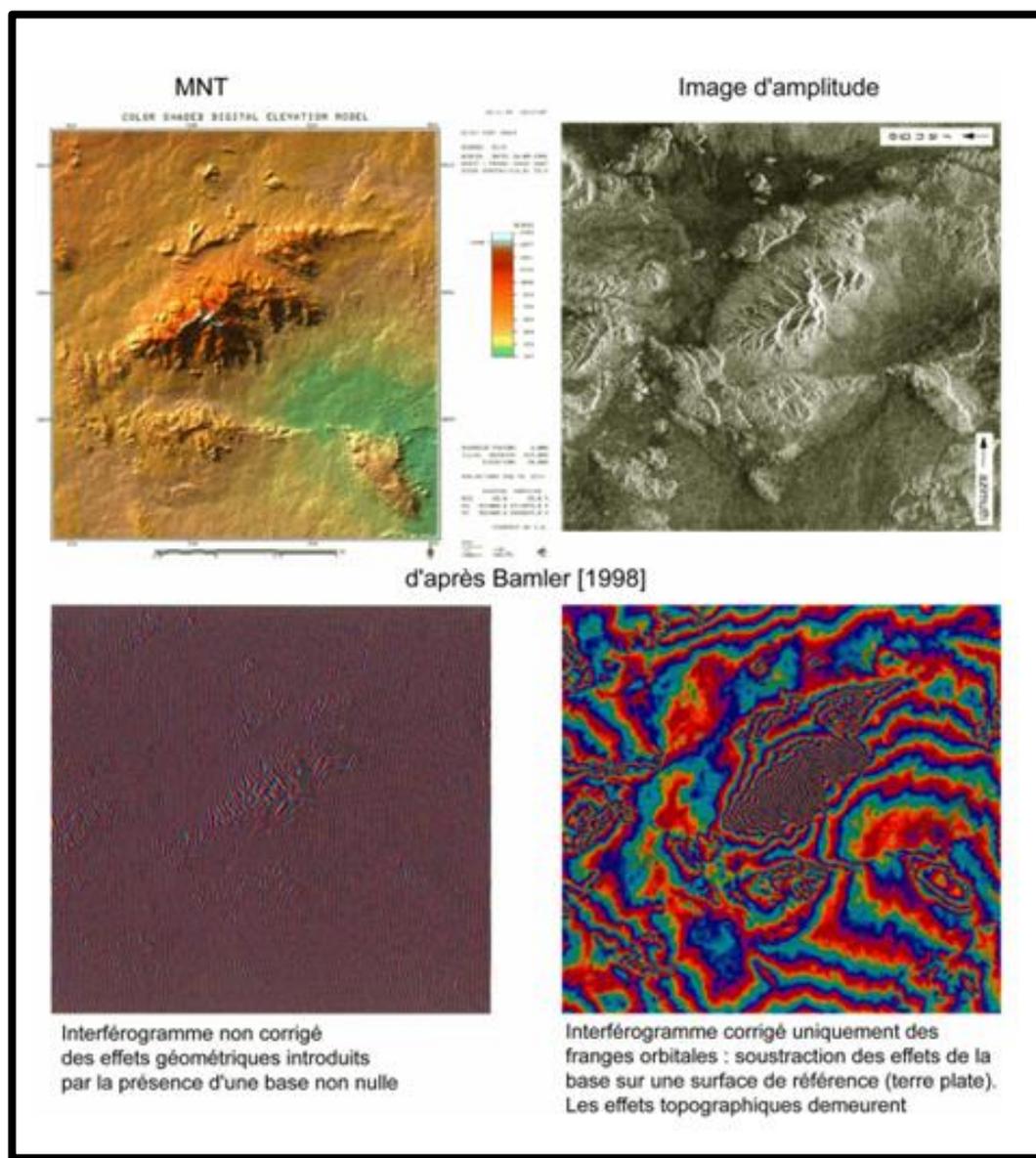


Fig. 1.14 : Influence de la base sur la phase interférométrique.⁶

- **Influence d'orbites non parallèles et de l'orientation de l'instrument :**

Si les orbites ne sont pas parallèles comme nous l'avions supposé jusqu'à maintenant, de nouvelles différences dans la géométrie des images apparaîtront. Il y aura aussi une variation de la base sur l'image. La variation correspondante de la base perpendiculaire fait que les effets évoqués ci-dessus peuvent être différents d'un endroit à l'autre de l'image. Par exemple, les franges orbitales ne sont plus strictement parallèles à l'axe des azimuts.

Cette conséquence se combine avec les effets introduits par les différences d'orientation de l'instrument entre les acquisitions et plus particulièrement celles liées aux angles de lacet et de tangage du satellite (voir Figure 1.15). L'angle de visée effectif du satellite sur une même cellule de résolution sera différent entre les deux acquisitions. Les effets liés à une variation des angles de lacet et de tangage sont assimilables à ceux produits par une rotation de la cellule d'acquisition autour d'un axe parallèle à celui des altitudes ou parallèle à l'axe des distances.

De manière analogue à ce que nous avons vu au paragraphe précédent, ceci cause des différences entre la phase de construction des deux images, qui s'ajoutent à celles créées par la présence d'une base non nulle. Sur l'interférogramme, cela se traduit par une diminution du rapport signal sur bruit.

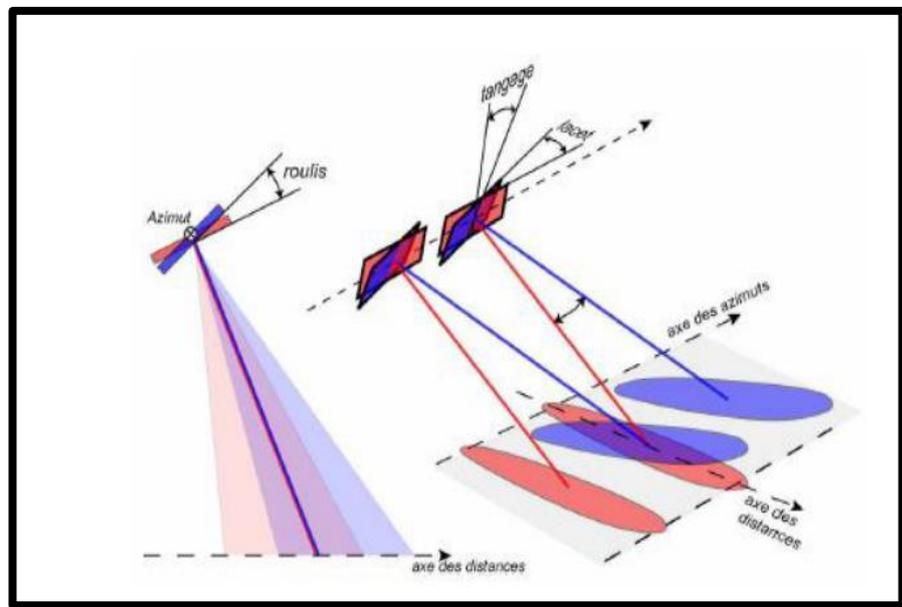


Fig. 1.15 : Influence de l'orientation du radar durant l'acquisition des données brutes.⁶

6.2 Prise en compte de l'évolution temporelle du milieu observé :

Jusqu'à présent, nous avons considéré que le sol conservait son état de surface et que l'atmosphère était inchangée d'une acquisition à l'autre. Naturellement, les différentes

propriétés qui caractérisent le sol et l'atmosphère sont susceptibles d'évolution au cours du temps, ce qui n'est pas sans conséquences pour l'interférométrie radar.⁶

- **Changements liés au sol :**

Toute modification notable des caractéristiques physiques ou géométriques des cibles élémentaires constituant une cellule de résolution est susceptible de modifier sa phase de construction. Par exemple, la position d'un objet dans la cellule peut modifier la phase mesurée

Ceci fait que la composante $\Delta\varphi_{cons}$ de la phase interférométrique sera également modifiée. Or cette composante n'étant pas modélisable et variant rapidement d'un pixel à l'autre de manière indépendante, elle peut être considérée comme un bruit lorsque l'on cherche à extraire l'information de déplacement de la phase interférométrique. La phase interférométrique connue modulo 2π , $\Delta\varphi_{cons}$ (liée à la décorrélation temporelle et spatiale) doit rester très inférieure à 2π pour que l'on puisse obtenir l'information sur le déplacement (voir Figure 1.16).

Puisque la probabilité de modification du sol augmente généralement avec le temps, le bruit introduit dans les interférogrammes augmentera aussi avec le temps. Cependant, les changements du sol ne sont pas forcément irréversibles ; ainsi, une surface recouverte par la neige voit ses propriétés complètement modifiées, mais elle peut retrouver son état initial après la fonte de la neige. L'évolution d'une surface modifiant la phase de construction dépend beaucoup du type de surface concerné et des conditions climatiques.

Ainsi, les étendues d'eau, dont la surface est très mouvante, ont une réponse interférométrique complètement bruitée par $\Delta\varphi_{cons}$. La végétation est également susceptible de changements rapides. Par contre, les constructions entropiques, comme les habitations ou des infrastructures de transport, représentent une grande stabilité dans le temps. La modification de $\Delta\varphi_{cons}$ face à des changements temporels dépend aussi de la longueur d'onde utilisée. Par exemple, le radar JERS, qui utilise une longueur d'onde plus grande que ERS (23.5 cm contre 5.6 cm), est moins sensible à la décorrélation temporelle liée à la végétation. En effet, une plus grande longueur d'onde permet de pénétrer une partie de la végétation et également le sol lorsque les conditions y sont favorables (par exemple ; si le sol est constitué de sable sec).

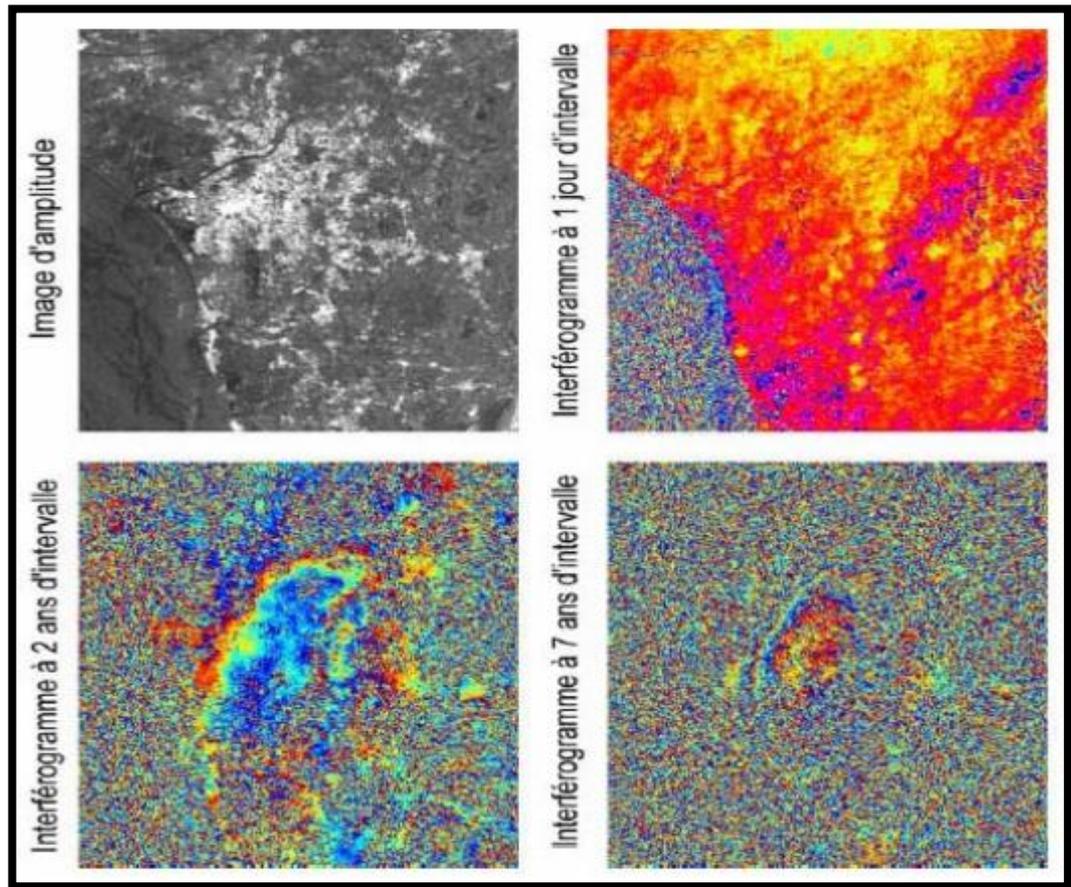


Fig. 1.16 : Perte d'information liée à l'évolution temporelle de l'état de la surface.⁶

- **Influence de l'atmosphère :**

L'atmosphère traversée par le rayonnement émis par le radar peut être très changeante d'une acquisition à l'autre. Des différences notables de propagation du signal peuvent ainsi apparaître. On notera qu'un interférogramme n'est pas lié à l'état atmosphérique d'une date précise mais à la différence d'états atmosphériques entre deux dates.

La différence de phase atmosphérique peut se décomposer en plusieurs composantes

:

$$\Delta\varphi_{atmo} = \Delta\varphi_{iono} + (\Delta\varphi_{hydr} + \Delta\varphi_{hum} + \Delta\varphi_{liq}) \dots\dots (1.28)$$

$\Delta \varphi_{iono}$ Est causée par les changements de la partie supérieure ionisée de l'atmosphère (entre 60 et 600km d'altitude) appelée l'ionosphère. Les trois autres termes concernent principalement la partie inférieure de l'atmosphère neutre : la troposphère (les 15 premiers kilomètres). On distingue la composante hydrostatique $\Delta \varphi_{hydr}$, qui concerne la propagation du signal à travers une atmosphère sans humidité, la composante due à la propagation du signal à travers la vapeur d'eau $\Delta \varphi_{hum}$ et celle à travers la partie liquide de l'atmosphère (volume rempli de gouttelettes d'eau) $\Delta \varphi_{liq}$. Les composantes hydrostatique et ionosphérique sont celles qui ont le plus d'effet sur la propagation de l'onde. Cependant, cet effet varie très lentement sur un interférogramme. Par contre, les différences de propagation causées par la partie humide (vapeur d'eau) et liquide de l'atmosphère ont une distribution spatiale très variable à l'échelle de l'interférogramme.

Différentes études insistent sur l'importance du paramètre du contenu en vapeur d'eau de l'atmosphère en interférométrie. Deux types d'influence peuvent être distingués : celle causée par une atmosphère stratifiée et celle causée par une atmosphère turbulente.

Dans le cas d'une atmosphère stratifiée, idéalement, les différences d'effets atmosphériques sont seulement liées à l'altitude : les variations latérales du délai de propagation sont nulles. Cela se traduit par le fait que le signal atmosphérique est fortement corrélé avec la topographie. Ce signal a été bien mis en évidence sur des volcans.

Dans le cas de l'atmosphère turbulente, les variations latérales de l'atmosphère sont importantes et l'effet atmosphérique peut prendre différentes signatures spatiales (voir Figure 1.17). Des relations entre la présence de nuages et les interférogrammes ont pu être établies à partir de comparaisons opportunistes avec des données satellites météorologiques, ou encore à partir de radar météorologique au sol.

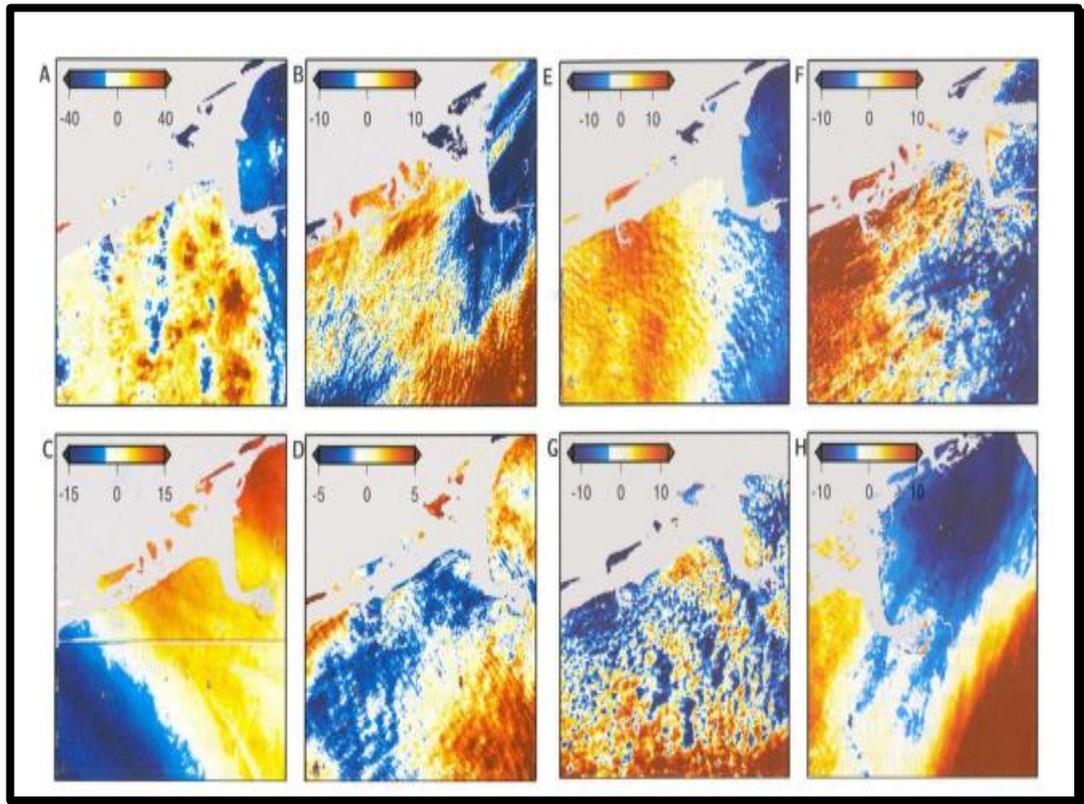


Fig. 1.17 : Effet atmosphérique dans les interférogrammes.⁶

Exemples d'interférogrammes (couples à 1 jour d'intervalle) sur les Pays-Bas (100 km par 100 km). Seul le signal atmosphérique est présent, échelle de couleur exprimée en millimètres de délai zénithal.

Plusieurs caractéristiques particulières au signal peuvent être notées :

- L'irrégularité du signal atmosphérique n'est pas reliée à des caractéristiques de surface ;
- Les irrégularités sont différentes d'un jour à l'autre, elles sont décorrélées temporellement ;
- Les effets sont plus prononcés à basse altitude où le chemin à travers l'atmosphère est le plus long.

6.3 Prise en compte des sources d'erreurs :

Pour finir notre revue des différentes composantes qui interviennent dans la mesure de la phase, nous allons aborder les sources d'erreurs possibles. Bien que les effets atmosphériques ou ceux créés par la base du couple interférométrique puissent être

considérés comme des erreurs, ils font naturellement partie du signal SAR. C'est pourquoi ils ont été traités séparément des erreurs artificiellement introduites dans la phase interférométrique.⁶

- **Erreur sur la phase des images SAR :**

Nous savons déjà que la mesure de la phase par l'instrument est entachée d'une incertitude liée à toute mesure instrumentale. Le traitement SAR peut lui aussi introduire des erreurs ; ce type d'erreurs se traduit par un biais et une diminution du rapport signal sur bruit dans l'interférogramme. Pour l'utilisation d'images SAR en interférométrie, il est préférable de focaliser les images avec une même méthode car, lors de la différence de phase des deux images, certaines erreurs peuvent se compenser. De même il est préférable de traiter les deux images avec un même angle de visée d'acquisition afin de réduire le rapport signal sur bruit de l'interférogramme.

D'autres sources d'erreurs ont été signalisées pour le satellite ERS, à partir de l'analyse d'un interférogramme sur une bande d'environ 3000 km, indiquent que la dérive de l'horloge interne de l'instrument est susceptible d'introduire des erreurs de phase à grande longueur d'onde. Arnaud [1997] propose que ces erreurs aient pour origine une mauvaise interpolation des données orbitales.

Enfin, Delacourt [1997] évoque le problème d'images d'une même région (Chili) mais avec des fréquences d'échantillonnage en ligne (PRF) différentes, créant ainsi un gradient de phase interférométrique perpendiculaire à l'orbite.

- **Erreur de recalage :**

En principe, la différence de phase doit s'effectuer à partir de deux mesures d'une même cellule de résolution. Or à partir du moment où les acquisitions se font sur des orbites différentes, la géométrie des images devient légèrement différente. Donc, les images ne sont pas directement superposables à la précision souhaitée, qui est de l'ordre du 10^{ème} de pixel. Il est ainsi nécessaire de recalibrer finement une des deux images (qui est alors souvent appelée image esclave) sur l'autre (image maîtresse) ce qui nécessite un re-échantillonnage de l'image SAR complexe.

Les erreurs de recalage ont deux origines principales. La première est la qualité du modèle de déformation de l'image esclave. La deuxième concerne les erreurs liées à l'interpolation du signal complexe nécessaire pour le recalage. Ces erreurs se traduisent généralement par une diminution du rapport signal sur bruit dans l'interférogramme.

- **Erreur dans la suppression de la composante topographique :**

L'interférométrie radar différentielle repose sur la suppression de la composante topographique. En pratique, cette suppression peut se faire de deux manières différentes. La première méthode consiste à modéliser la composante topographique à partir d'un MNT et de la connaissance des orbites. Une erreur ε dans le MNT se propage dans l'interférogramme différentiel. Cet effet peut s'exprimer grâce à l'altitude d'ambiguïté H_a (eq. 1.24). L'erreur de phase introduite dans l'interférogramme $\Delta_{\varphi_{err-topo}}$ s'écrit :

$$\Delta_{\varphi_{err-topo}} = \frac{2\pi\varepsilon}{H_a} \dots\dots (1.29)$$

La précision requise pour le MNT est donc fonction de la base du couple. Plus celle-ci est grande, plus le MNT devra être précis. Cependant, aussi précis soit-il, un MNT fournit en chaque pixel une altitude moyenne qui ne correspond pas forcément à celle à laquelle est sensible le radar. Par exemple, si une petite cible domine la cellule de résolution, c'est l'altitude précise de cette cible qu'il faudrait prendre en considération et non l'altitude moyenne de la cellule de résolution. Toutefois, cette limitation n'est en pratique vraie que si l'on utilise des grandes lignes de base.

La deuxième méthode consiste à obtenir la composante topographique à partir d'un interférogramme où l'on suppose les autres composantes (déplacement, atmosphère) négligeables. Cette opération peut sembler plus naturelle que la première, car il est possible de rester en géométrie radar et que l'on ne rencontre pas le problème de la détermination de l'altitude pour une cellule de résolution. Cependant, elle présente plusieurs inconvénients. Tout d'abord, cette méthode nécessite au moins une image SAR supplémentaire. De plus, le couple servant à former l'interférogramme topographique doit répondre aux contraintes sévères posées par l'hypothèse que seule la composante topographique doit être présente. Ceci n'est pas toujours possible et de toute façon cette

hypothèse n'est jamais vraiment vérifiée dans le cas d'acquisitions à des dates différentes. Les effets atmosphériques en sont la principale limitation. D'autre part, l'ajustement de la phase à la base de l'interférogramme différentiel, nécessite le déroulement souvent délicat de la phase interférométrique connue modulo 2π .

Les erreurs sur les orbites mises à part (voir paragraphe suivant), la signature spatiale des erreurs liée à la topographie dépend fortement de l'origine des données utilisées. Si l'origine est un interférogramme topographique, les erreurs auront une signature plutôt semblable à celle des effets atmosphériques.

- **Erreurs liées aux traitements effectués sur l'interférogramme :**

Afin d'améliorer la qualité d'un interférogramme, il est fréquent de recourir à des filtrages, qui peuvent introduire des erreurs. D'autre part, il est souvent nécessaire de dérouler la phase interférométrique pour s'affranchir de l'ambiguïté de la phase. Il peut aussi être pratique de remettre l'interférogramme qui est dans la même géométrie que l'image SAR maîtresse dans un référentiel cartographique (procédure dite d'orthorectification). Toutes ces opérations sont des sources d'erreurs potentielles supplémentaires.

7. Que fait-on des données d'interférométrie radar ?

L'interférométrie radar a un large éventail d'utilisations, permet de détecter et quantifier des déformations du sol avec une précision centimétrique, voire millimétrique, sur de grandes étendues offrant ainsi une vision spatialisée des phénomènes. En environnement urbain, elle permet de caractériser les déformations verticales du sol de faible amplitude et le calcul de modèles numériques de terrain (MNT).

Dans le domaine géologique tels que les déplacements dus à des phénomènes volcaniques, les déplacements tectoniques sismiques ou asismiques, les variations de

l'épaisseur des glaciers, glissements de terrain, des subsidences liés à des pompages excessif des nappes phréatiques.⁹

Les interférogrammes permettent d'obtenir des cartes de déformation, sont généralement utilisés pour trouver les sources qui causent la déformation. Dans le cas d'un volcan par exemple, la source des déformations de surface peut être le remplissage ou la vidange d'un réservoir magmatique dont on ne connaît pas la taille et la profondeur. Généralement, ces sources sont recherchées par "essais ou erreurs", car nous testons de nombreuses géométries différentes et préservons celles qui permettent la meilleure reproductibilité de la déformation. On dit qu'on « renverse » le problème. En fait, on peut calculer les déplacements à partir d'une source connue, mais il est difficile de trouver la source qui connaît les déplacements. Les réflexions permettent de déterminer les paramètres de la source (la quantité de glissement sur une faille, la variabilité de la taille de la chambre magmatique, etc.).⁹

Les modèles utilisés sont basés sur des idées préconçues, puis comparés à d'autres données (terrain, télédétection, etc.). La figure 18 ci-dessous montre le résultat de l'inversion des données obtenues après l'effondrement du cratère Dolomieu (Piton de la Fournaise) lors de l'éruption d'avril 2007. Les résultats montrent que la position de la source est trop superficielle pour correspondre à la chambre magmatique. Des données complémentaires issues de mesures thermiques, des observations de terrain mettant en évidence de nombreuses fumerolles permettent d'interpréter cette source comme un système hydrothermal dans le processus de drainage post-panne.

⁹ <https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/interferometrie-radar.xml> : Interférométrie radar : principes et utilisation dans la surveillance de la déformation du sol. Article sur internet, publié le 29/01/2020 par Aurélien A.

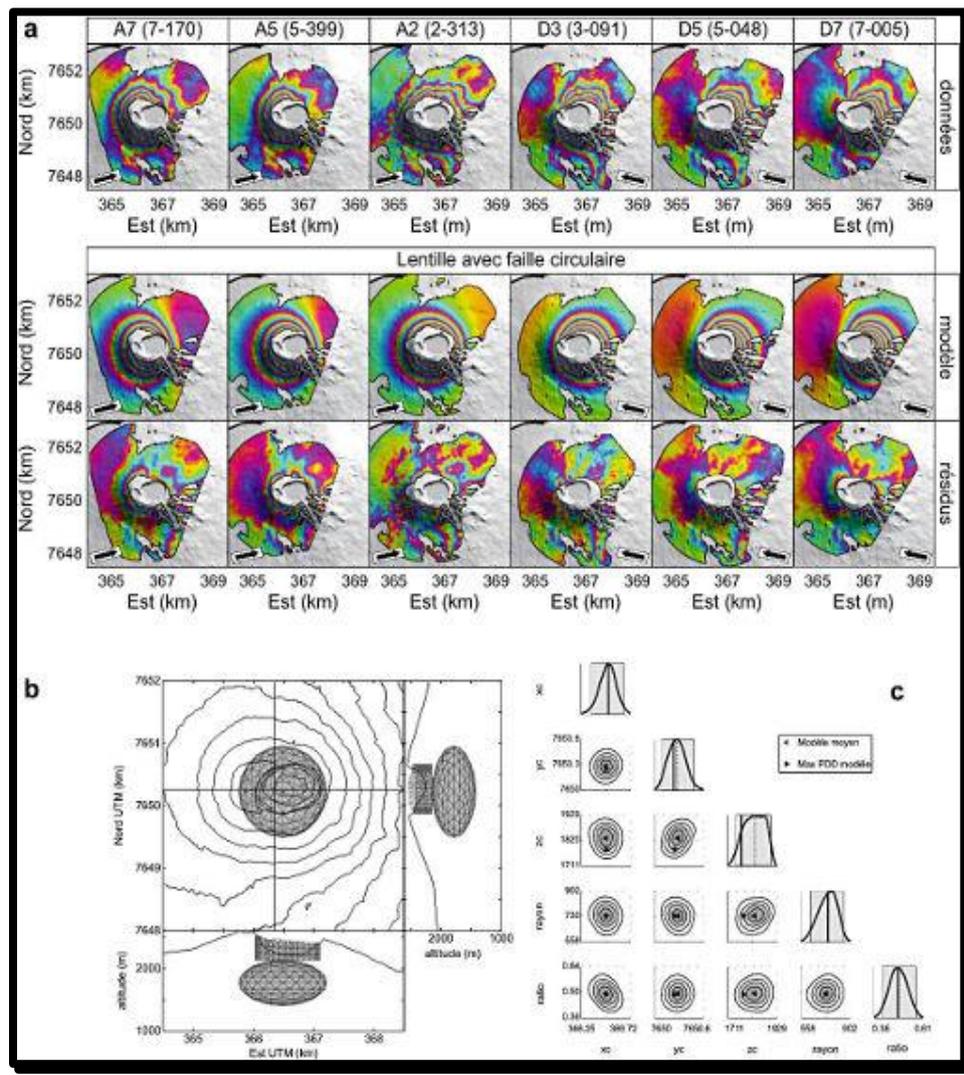


Fig. 1.18 : Exemple d'utilisation des données InSAR⁹ : l'inversion

Il existe 6 interférogrammes dans des géométries d'acquisition différentes, couvrant les déplacements post-éruptifs du cône central du Piton de la Fournaise après l'éruption d'avril 2007. Les résultats du meilleur modèle sont reprojétés dans la géométrie de chaque acquisition. Ici, deux sources ont été prises en compte : une source lenticulaire et une fracture cylindrique. La source lenticulaire est trouvée à haute altitude, ce qui exclut que ces déplacements soient dus à une chambre magmatique. Ils sont interprétés comme un système hydrothermal « percé ». Les courbes de droite montrent les incertitudes des paramètres inversés.

8. Méthodes de traitement In SAR avancées pour la mesure de déplacement :

Les méthodes avancées offrent des solutions aux sources de bruit et ont été développées pour améliorer les mesures de déplacement du sol. Ils consistent à exploiter non pas deux, mais un ensemble d'images (au moins 15-20). Ces méthodes sont classées en Multitemporal InSAR ou MTI (Multitemporal InSAR). Avec ces méthodes, une précision de mesure de déplacement de 1 mm/an peut être atteinte. Plus le nombre d'images est élevé, plus les résultats de mesure sont précis. D'autre part, la perte de précision augmente avec la longueur d'onde, la résolution spatiale et le bruit de phase. De préférence, le mouvement suivant a une vitesse relativement constante dans le temps, mais restaure également le faible non linéarité du signal déformé.¹⁰

Deux approches peuvent être distinguées, la méthode des petites lignes de base (Small BASE line Subset, SBAS) et la méthode des points stables (PS pour Permanent Scatterers), également connue sous le nom d'interférométrie à diffusion persistante (PSI). Dans les deux cas, l'algorithme utilise la phase différentielle, c'est-à-dire après correction de la phase de terrain et de la phase orbitale. Les termes de phase traités sont la phase de déplacement, la phase issue de l'erreur d'altitude, la phase liée à l'erreur orbitale, la phase atmosphérique et la phase de bruit, y compris toutes les autres sources décorréliées. Certaines solutions ajoutent également un terme de dilatation thermique particulièrement utile lorsque l'étude porte sur de grandes structures anthropiques.

Ces deux approches des méthodes des points stables PS et des petites lignes de base SBAS, que nous avons appliquée dans notre étude, nous en parlerons plus en détail dans le deuxième chapitre.

¹⁰ Simonetto E., Fruneau B. et Raucoules D. : Principes de l'interférométrie d'images radar pour la mesure de la topographie et des déplacements du sol et avancées récentes. Article publié le 2020-01-19, France.

9. Conclusion :

A travers ce chapitre, nous avons pu déterminer les particularités des images radar, notamment les principes de leur construction, c'est-à-dire les méthodes utilisées pour obtenir les données. Nous avons également démontré les avantages du SAR par la précision de l'image radar traitée, ce qui a permis de développer une technique de restitution des reliefs appelée « interférométrie radar » dont nous avons évoqué ses principes et ses limites ainsi que ses domaines d'utilisation des données de cette technique.

Sur la base de ces généralités, dans le deuxième chapitre, nous montrerons en détail comment les images radar utilisent la technique d'interférométrie pour mesurer le déplacement résultant de l'exploitation des carrières, en appliquant les deux méthodes du point stables PS et des petites lignes de base sur la carrière du 'Djbel de Aoud ASma' d'OGAZZ

Chapitre 02 :

*Mise en application des méthodes
d'interférométries radar sur Dj Aoud*

Asma (Les monts d'Ouled Ali)

1. Introduction :

Ce travail pratique est une application particulière de l'interférométrie radar (les méthodes SBAS (Small Baseline Subset) et PS (Permanent Scatterers) pour la mesure des déplacements topographique. Cette technique est basée sur l'utilisation d'images de radar à synthèse d'ouverture (RSO) acquises sur une même zone mais à des dates différentes.

L'interférométrie radar a pu être définie comme l'ensemble des méthodes exploitant la phase deux images RSO. Dans les années 90, l'interférométrie radar différentielle était l'unique méthode pour extraire les déplacements de la surface terrestre à partir d'images RSO, elle permet d'obtenir des interférogrammes et par la suite des cartes de déplacement du sol avec une précision sub-centimétrique sur de larges étendues spatiales, entre les deux dates d'acquisitions.

Dans le but de pallier ces limites, d'autres méthodes interférométriques ont été développés à partir des années 2000, basées non-plus sur l'utilisation de deux images RSO mais sur une série de plusieurs couples d'images. Ces méthodes récents, appelées multi-images, peuvent être décomposées en trois classes : la sommation d'interférogrammes, la méthode des petites lignes de base (SBAS), et enfin la méthode des réflecteurs persistants (PS).

Ce chapitre est dédié pour une présentation de notre zone Djebel Aoud Asma de telle situation géographique, le climat, le cadre géologique, la topographie. Ensuite nous aborderons les technique de mesures de déplacements SBAS (Small Baseline Subset) et PS Insar (Permanent Scatterers) ainsi toutes les éléments et les concepts liées ces deux derniers, les données ainsi les outils informatiques utilisés pour cette étude. Et on va faire une étude comparative entre ces deux méthodes, et on termine par une cartographie de sensibilités aux risques.

2. Présentation de la zone d'étude

2.1 Situation géographique de Djebel Aoud Asma

La wilaya de Mascara est située dans la partie Ouest de l'Algérie soit à 400Km de la capitale et 50Km à l'Est d'Oran. Elle est limitrophe avec les wilayas d'Oran au Nord-Ouest, Mostaganem au Nord-Est Relizane à l'Est, Sidi Bel Abbas à l'Ouest et Saida au Sud.

S'étendant sur une superficie de 4900Km², elle comprend plusieurs unités morphologiques : plaine de l'Habra, la dépression de la Macta au Nord-Ouest, les monts des Beni Chougrane dans la partie médiane, plaine de Ghriss et massif de Mergueb au sud.

Le Djebel Aoud Asma, appartient au Monts des Béni Chougrane. Il est situé à l'extrémité Nord-est des Monts des Ouled Ali, dans la partie méridionale du bassin du Bas Chélif. A environ 3 km au Sud-ouest du village d'Oggaz, à 2 km du Douar Ehl Ouennane, et à 5 km au Nord-Ouest de la ville de SIG dans la wilaya de Mascara.

Djebel Aoud Asma est limité au Nord, à l'Ouest et à l'Est par la plaine de l'Habra, et au Sud par Hammar Melloula. Il est formé par un ensemble de monticules qui sont Djebel Haoudh el Ouata au NW, Djebel Halloufa au NE, Djebel Haoudh el Kebir au SW et Djebel Haoudh el Matmar au SE.¹¹

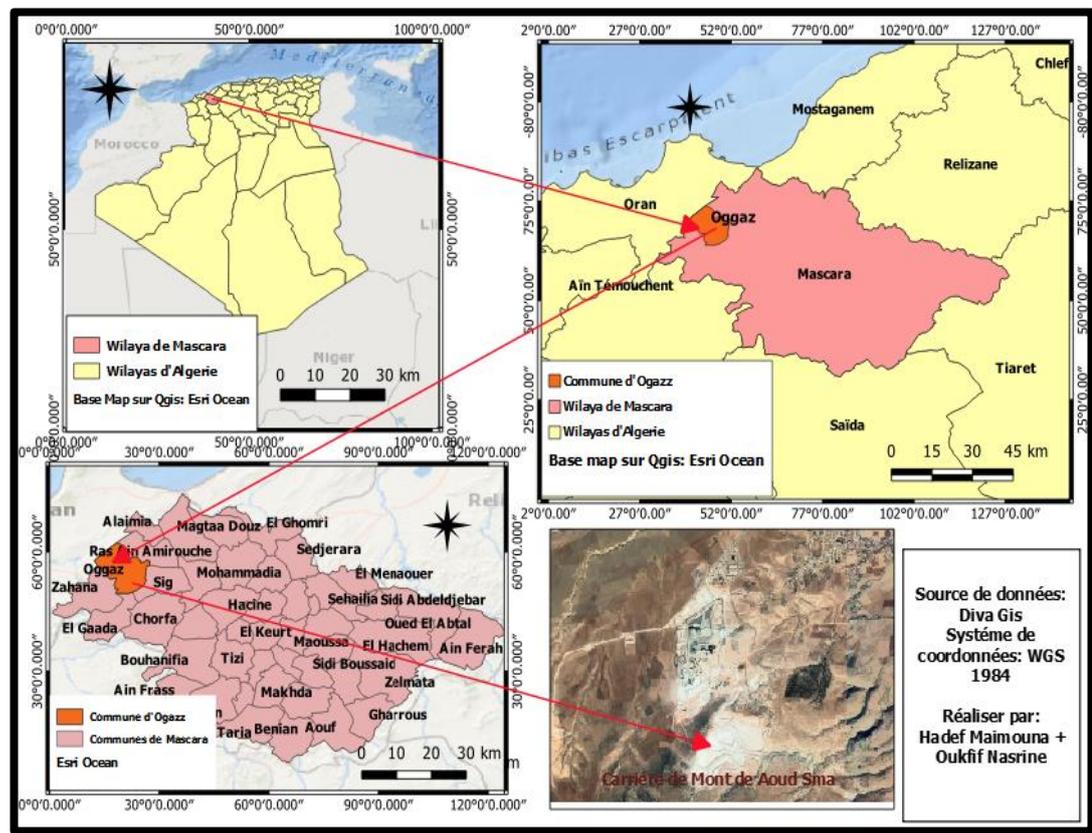


Fig. 2.1 Carte de la situation géographique de Djebel Aoud Asma OGGAZ – MASCARA

¹¹ Bachir Belmehdi.f. : Etude comparative de l'érosion hydrique dans les Beni Chougrane, cas de Djebel Aoud Asma à exposition nord et Djebel Sidi Ali Cherif à exposition sud. Mémoire d'ingénieur. Option aménagement des milieux physiques. Université Oran, Senia 1998.

2.2 Contexte climatique :

Cette région est soumise globalement à un régime semi-aride, les étés sont courts, très chaud, sec et dégagé dans l'ensemble et les hivers sont longs, frisquet et partiellement nuageux. Au cours de l'année, la température varie généralement de 3 °C à 35 °C et est rarement inférieure à -1 °C ou supérieure à 39 °C.¹²

2.3 Contexte géologique :

Le Miocène supérieur domine le Djebel Aoud Asma. Il est représenté par des marnes au Sud, et de diatomites. Sur ces dernières reposent des calcaires à cora linacées, des calcaires gréseux et argilo-Gréseux qui constituent l'unité pré-récifale. Cet ensemble est surmonté par des calcaires construits à Madréporaires, qui représentent l'unité récifale. L'unité post-récifale est représentée essentiellement par des calcaires gréseux, partiellement oolithiques. Ce dispositif de la plate-forme carbonatée du Djebel Aoud Asma, et sa subdivision en trois unités (pré-récifale, récifale, et post-récifale), font d'elle une composante importante et une partie intégrante de la plate-forme carbonatée de la bordure Sud du bassin du Bas Chélif.¹²

L'unité pré-récifale constitue le plus important ensemble dans le secteur où elle dépasse les 100 m d'épaisseur au Nord du Djebel Aoud Asma. Elle est formée par des calcaires bioclastiques parfois dolomitisé, des calcaires dolomitiques où le taux de dolomie atteint au maximum 25 % et de calcaires micritiques. On note la présence d'une bonne fraction biogène dans ces calcaires représentée par des cora linacées, des bryozoaires, des foraminifères, des bivalves, des polypiers et des épulides. Aussi, la présence de cristaux de dolomie indique le début d'une dolomitisation précoce.

D'un point de vue structural. Le Djebel Aoud Asma est un anticlinal dissymétrique. Il est connu pour son pli en genou affectant les terrains depuis le Miocène jusqu'au Quaternaire. Sa structuration remonte à la phase compressive du Pléistocène moyen (Gunz-Mindel), qui a provoqué des plis Nord 30° Est à Nord 50° Est, et qui a fait rejouer des cassures anciennes.¹²

¹² Naimi M.N : La plate-forme carbonatée messénienne du Djebel Aoud Asma (Monts des Ouled Ali, Bassin du Bas Chélif) : sédimentologie et géochimie. Mémoire de master.

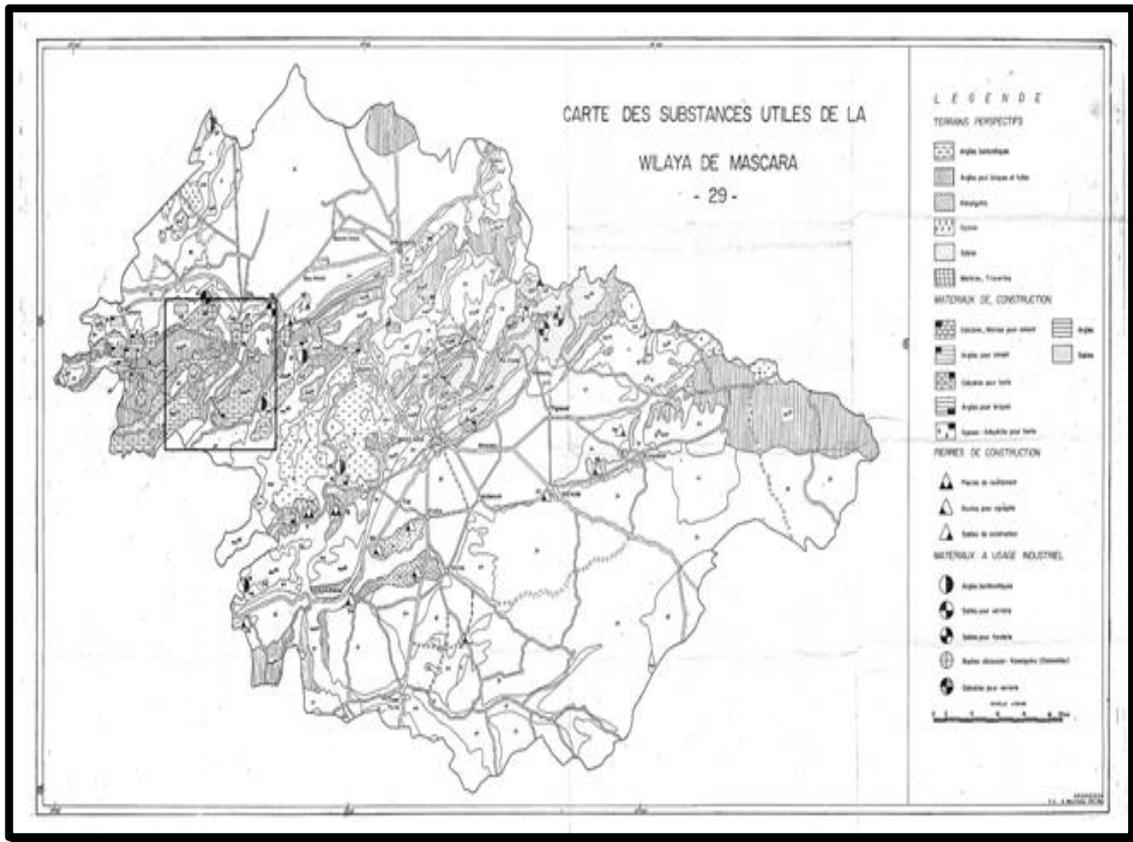


Fig.2.2 : Carte Croquis géologique de Djebel Aoud Asma

2.4 Contexte topographique :

Caractérisé par une extrême densité des talwegs rigoles de ruissellement, ravinement avec tout un chevelu d'affluents limités par des terrasses larges, il se distingue mal les limites des versants du Djebel Aoud Asma. Il s'y reconnaît la prédominance d'une direction OSOENE. Aoud Sma est drainé par plusieurs oueds : Chabet Akt el Mahdi, Chabet Douira, Chabet Maghta

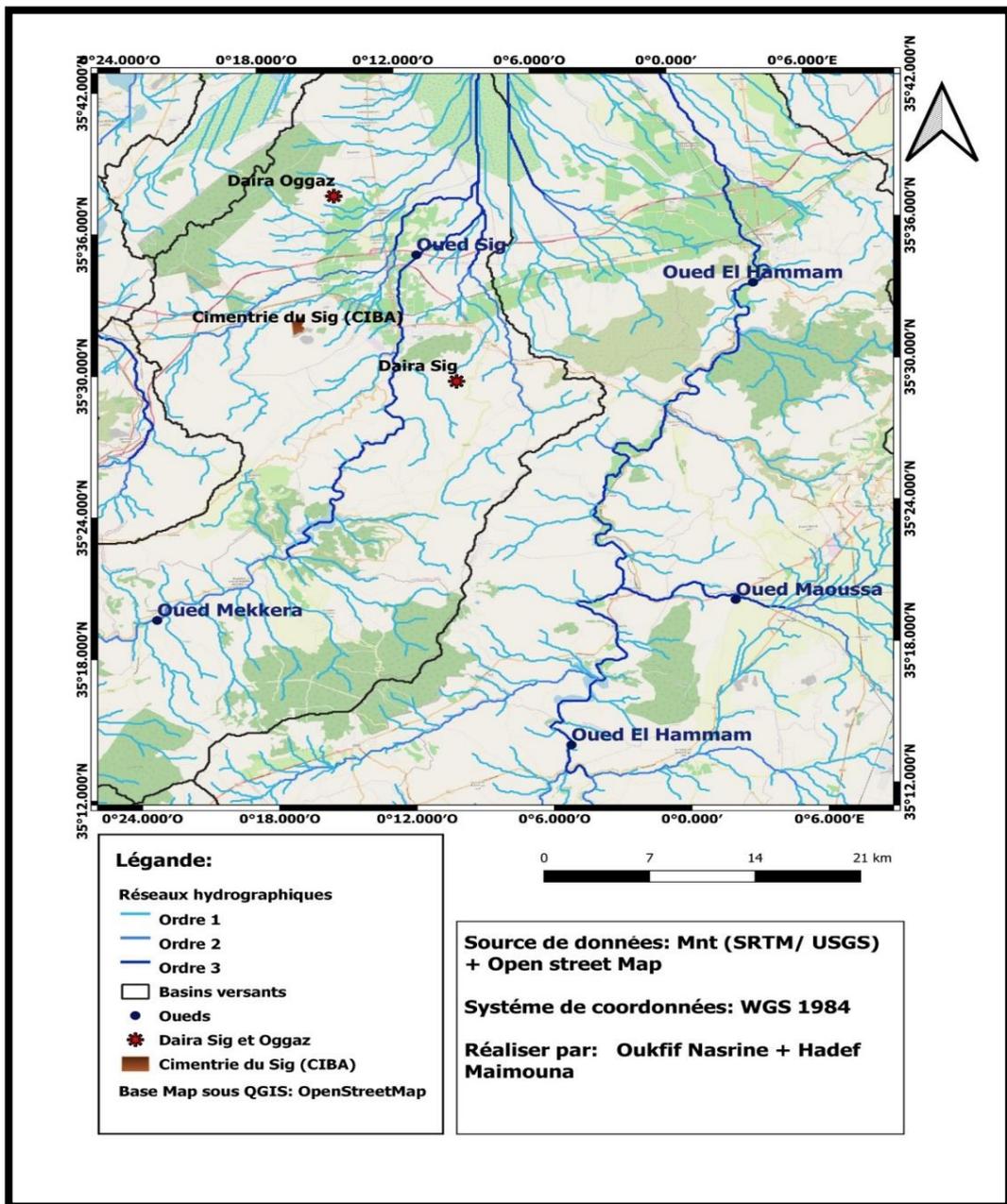


Fig. 2.3 : Carte des réseaux hydrographiques et bassin versants de SIG – Mascara

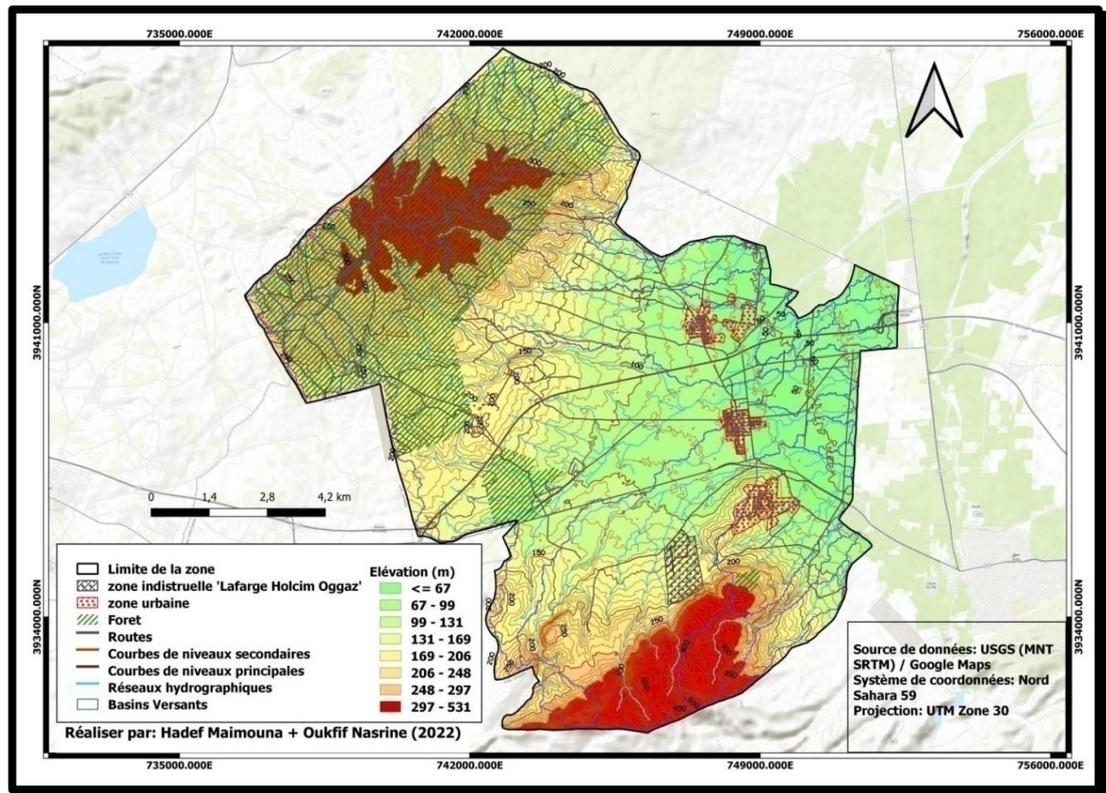


Fig. 2.4 : Carte topographique d'OGGAZ – MASCARA

La grande partie de notre zone est marquée par une faible pente avec 15 % qui apparaît en couleur verte, notamment sur la figure 2.4, nous voyons ce qui concerne la courbe de niveau sont espacés et plus le territoire présenter est plan. D'après la figure 2.5 selon la légende de la carte on remarque que les zones avec des dégradés entre 15 et 30 % ou elles sont classées comme pente moyenne représentent des zones abruptes qui apparaissent en couleur jaunâtre.

Les zones avec des courbes de niveau se resserrent ce qui indique une rupture de pente qui se varie entre 30 et 60 % qui apparaissent en couleur orange occupant (une faible présence de ce type de pente) l'extrême sud et nord-est de notre zones escarpées en couleur rouge foncé avec une pente qui est supérieure à 60 %, c'est une pente raide conformément à la figure 2.4 que les courbes appartiennent à ces zones sont plus resserrées, cette pente est plus artificielle dû à la présence du gardian. C'est auprès de cette zone que s'est installée la cimenterie de LAFARGE.

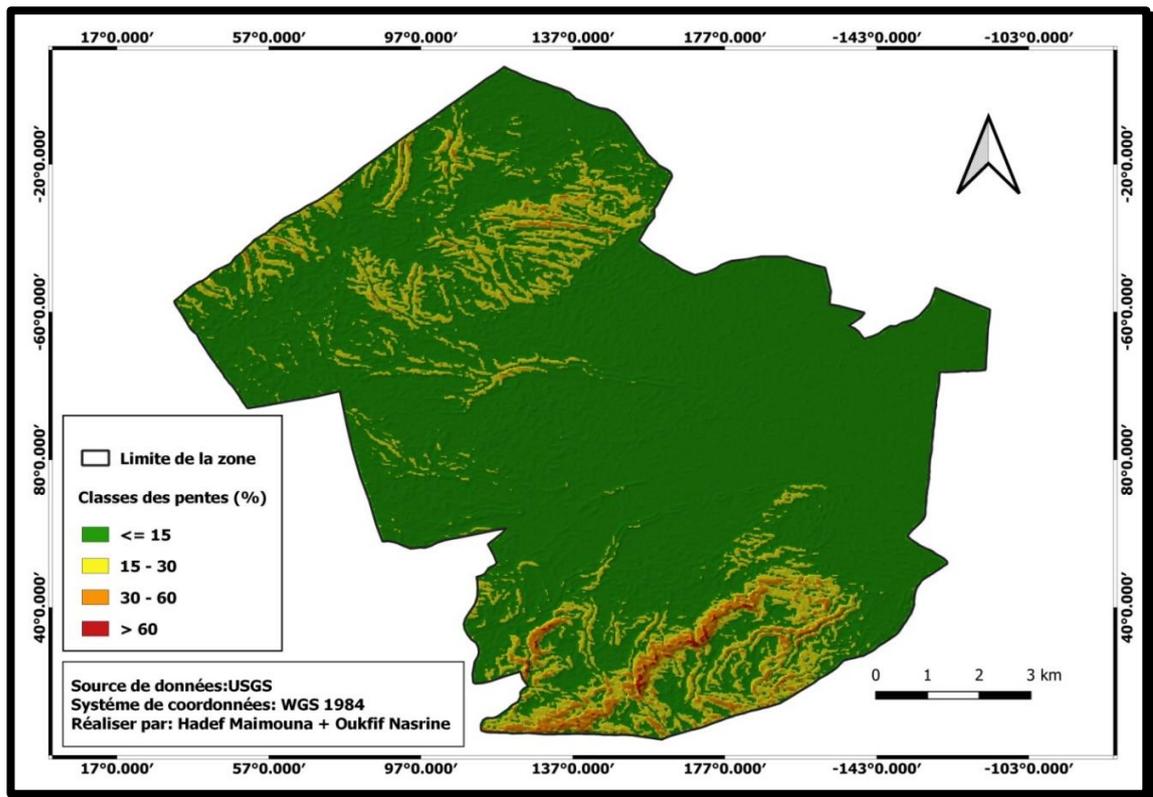


Figure. 2.5 : Carte des pentes d'OGGAZ - MASCARA

Les monts des Ouled-Ali là alternent des chaînons montagneux et des dépressions parallèles orientés SO-NE et coupés par deux grands sillons transversaux. Là s'opposent, sous le même ciel lumineux qui poudroie en été, la même végétation semi-xérophile des crêtes sèches et les verdoyantes oasis d'irrigation des plaines. Il suffit de parcourir rapidement cet région très mouvementé malgré l'altitude inférieure à 800 m, pour y distinguer une série de petites régions d'aspects différents, au Nord, les étendues uniformes des plaines du Tlélat , du Sig et de Habra , où les oliviers dessinent sur le sol leur quadrillage en quinconces, où les primeurs alignent dans, les champs leurs verdure, synonymes de richesse, où les canaux d'irrigation se déroulent rectilignes et ramifiés, semant la fraîcheur au milieu de la sécheresse ambiante.

Ce sont les pentes raides des Djebels, coupés de vallées transversales étroites s'opposant aux dépressions longitudinales constituant leur revers.

La moindre parcelle de terre végétale est tapissée, au printemps, des jeunes épis verdoyants des orges et des blés indigènes. Contrastant avec les argiles ravinées, les petites falaises calcaires ceignent des dômes où pâturent les moutons et les chèvres arabes. En arrière s'ouvre une molle dépression parallèle accidentée d'une suite confuse de mamelons argileux et marneux : c'est la sauvage et stérile dépression des Hammar plus loin, un plateau offre son uniformité inattendue, son sol retourné en tous sens par la charrue européenne, ses bas-fonds cultivés de préférence en céréales, ses côtes en vignes, le tout ceinturé d'une falaise calcaire : c'est le Gadaz. Un autre plateau, plus éventré par l'érosion, celui des Cheurfa, plus sec, plus dénudé, est un terrain de parcours pour les moutons. Une route blanche serpente dans une vallée, où montées et descentes se relayent de terrasse en terrasse. Les replats sont soulignés par la végétation printanière et les cultures indigènes. C'est la vallée du Sig-Mékerra. Étroite et déserte en aval, elle s'élargit en amont en un bassin fertile ponctué de fermes européennes. Là, sur sa rive droite, s'élève une succession de croupes, cultivées en céréales et en vigne, dont les surfaces se raccordent, malgré les ravins profonds et boisés qui les séparent : ce sont les bleds de la moyenne Mékerra.

Plus au Sud, précédée par une série de mamelons sauvages et pierreux au Nord-Est, cultivés et argileux au Nord-Ouest, une longue crête dessine une courbe boisée et déserte, tache toujours verte dans le paysage, c'est la forêt de Guétarnia.

Encore plus au Sud, une dépression parallèle, longue et étroite, sans réseau hydrographique, est envahie par la vigne aux dépens des céréales, c'est la gouttière de Mercier-La combe ou de Tiliouine, bordée, au Sud, par la crête ravinée de Sfisef, demi-forêt, demi-brousse, qui la sépare de la large dépression oued Ténira - oued Melrir, avant-coureur de la Meseta sud-oranaise. Tout à fait à l'Ouest s'ouvre un long couloir NNE-SSO, le sillon oued Tlélat - oued Imbert, sauvage par endroits, cultivé en vignes ailleurs.

Enfin vers l'Est se dessine, également NNE-SSO, la large entaille de la vallée de oued el Hammam- Habra, aux versants dénudés ; le fond alluvial n'est occupé par des cultures variées que dans le bassin de Dublineau. Pour expliquer les formes si diverses des monts des Ouled-Ali.¹³

¹³ Tinthoin R. : Les monts des Ouled-Ali esquisse morphologique En : Annales de Géographie, t. 46, n°262, 1937. pp. 374-389.

3. Application du traitement d'image radar à Djebel Aoud

Asma :

L'objet de ce partie est d'expliquer et de mieux comprendre comment, à partir d'images RSO et des techniques interférométriques radars, il est possible de mesurer les déplacements de la surface. Pour cela, une zone d'étude Djebel. Aoud Asma (Cimenterie de LAFARG) a été choisi, et différentes données ont été utilisées.

Avant de lancer les traitements :

- Il faut organiser des répertoires et sous répertoires de manière que le traitement des deux méthodes se déroulent sans problème.
- Il faut installer certains éléments nécessaires au traitement.

3.1 Présentation des données :

3.1.1 Les images :

Dans ce travail, nous avons utilisé l'interférométrie dite « *two-passinterferometry* » pour développer les aspects majeurs liés au traitement de cette méthode. Les données acquises par le capteur SAR du satellite Envisat de l'Agence Spatiale Européenne (ESA), sont de la Bande-C en orbite descendant. : Sa longueur d'onde est 5.6 cm, sa fréquence est 5.3 GHz.

Les interférogrammes calculés à partir de ces données présentent une bonne cohérence essentiellement en zone urbaine. L'un des inconvénient de notre étude est l'absence de nouvelles données avec la fin 2010 jusqu'à présent. Toutes ces données permettent un suivi des déformations sur 9 ans.

Satellite	Capteur	Band	λ	ϑ	cycle	Résolution	Acquisition
ENVISAT	ASAR	C	5.6 cm	23°	35 J	30 M	2002-2010

Tableau 2.1 : Les caractéristiques du satellite ENVISAT

Dans notre étude on a utilisé des images radars issus de satellite ENVISAT avec un nombre de 31 images acquissent de 12/02/2003 jusqu'à 04/08/2010.

3.1.2 Les logiciels utilisés :

* **SNAP** : (**Sentinel** Application Platform) est un logiciel gratuit et libre regroupant plusieurs boîtes à outils permettant de visualiser, de traiter et d'analyser les données satellites. SNAP permet à l'utilisateur de définir une série de fichiers XML contenant un traitement défini par l'utilisateur workflow en utilisant son Graph Builder. Ces fichiers peuvent être utilisés pour exécuter le traitement SNAP en mode batch en utilisant la commande GPT (Graph Processing Tool).⁴

* **Stamps** : Stamps (Stanford Méthode for Persistent Scatterers), est un logiciel conçu pour analyser les déplacements du sol à partir de l'étude de séries temporelles d'images RADAR de type SAR. Il permet de mettre en œuvre les méthodes PS (Permanent Scatterers) et SBAS (Small Baseline Subset). Développé à l'origine au sein de l'Université de Stanford, aujourd'hui des universitaires de nombreux établissements contribuent à son développement et en particulier A. Hopper de l'Université de Leeds qui participe activement au projet. La version 4.1 de Stamps est disponible sur GitHub sous la licence GNU GPL3 qui autorise une utilisation commerciale du logiciel. Stamps utilise des scripts Matlab pour fonctionner ainsi que plusieurs bibliothèques qui doivent être installées pour pouvoir réaliser un traitement d'images RADAR.

* **SNAPHU** : Ce logiciel (Statistical-Cost Network-Flow Algorithm for Phase Unwrapping), est un programme libre qui peut s'implémenter sous le logiciel DORIS. Il permet de faire le déroulement de phase. Le logiciel SNAPHU a été écrit à l'université de Stanford.

* **QGIS** : un Système d'Information Géographique, open source. Ce programme est reconnu pour sa vaste palette d'outils, la multitude de formats gérés et la simplicité de son interface, Parmi ses qualités, on soulignera l'accès aux fonctionnalités d'autres logiciels libres inclus lors de l'installation.

3.1.3 Zone de test :

- L'image représente la zone d'OGGAZ.
- Les coordonnées de la zone d'étude : 35°36'08.05'' N, 0°20'58.24'' O , 35°28'09.11'' S , 0°07'58.81'' E

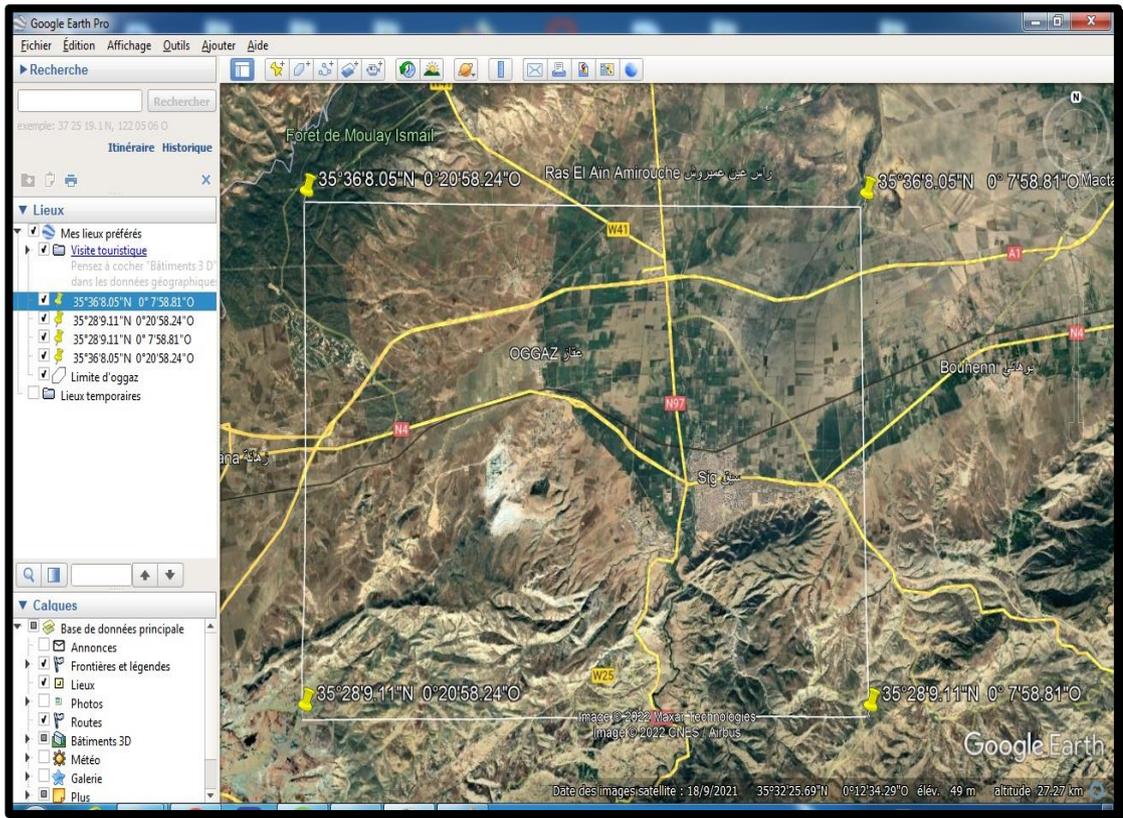


Fig. 2.6 : La zone d'étude sur Google earth

4. Etapes de processus de l'interférométrie :

4.1 Correction de l'orbite du satellite :

Avant de faire le traitement, nous devons procéder à une correction d'orbite car les erreurs d'orbite influent sur le résultat final.

Cependant ces orbites sont prédites et leur précision n'est pas meilleure que 25m. Pour le processus interférométrique. Les orbites précises sont fournies pour des arcs de longueur de 5.5 jours dont 3.5 jours à part et 2 jours communs avec d'autres arcs. Elles sont établies dans le système CTRS (Conventional Terrestrial Reference System), avec le pôle moyen IERS (International Earth Rotation Service) ; quant aux altitudes, elles se rapportent à l'ellipsoïde GRS80.

4.2 Calage :

Pour superposer l'image esclave sur l'image maîtresse, DORIS procède en cinq étapes :

- Le calcul des décalages lignes et colonnes entre les images : Cette étape utilise les orbites ; si le fichier d'orbites précises n'existe pas, DORIS se contente alors des points accompagnant les données. Le résultat de cette étape est le décalage en ligne et colonne. Le calage basé sur les orbites des deux images à une précision de 30 pixels (orbites précises). Les décalages sont définis dans le sens où pour un point P, ayant les coordonnées p_m (ligne, colonne) dans l'image maîtresse et p_s (ligne, colonne) dans l'image esclave, nous avons :

$$P_s(\text{ligne}, \text{colonne}) = P_m(\text{ligne}, \text{colonne}) + \text{décalage}(\text{ligne}, \text{colonne})$$

- Un deuxième calage utilisant les images d'amplitudes : Nous procédons au calcul de la cohérence entre de petites parcelles des deux images.
- Le filtrage en azimuth : Nous procédons à ce filtrage pour les deux images, pour supprimées les portions de spectre non-chevauchées (les deux scènes ont un différent doppler centroïde).
- Le calcul des paramètres de calage : Les décalages calculés dans plusieurs portions des images avec différentes cohérences, sont maintenant approximés avec une fonction polynomiale. Ensuite, les résidus sont calculés et s'ils sont élevés dans une région, la fonction polynomiale devra être ajustée. La précision du résultat est une fraction de pixel. - Finalement, l'image esclave est recalée pour qu'elle puisse être superposable sur l'image maîtresse.
- Le filtrage en distance : Les spectres des deux scènes ne se chevauchent pas complètement. A cause de la légère différence entre les angles de visée des deux capteurs, le filtrage en distance réduit ce bruit.

4.3 Création de l'interférogrammes :

Après le calage des deux images, nous procédons à la génération de l'interférogramme. La multiplication complexe est utilisée pour extraire l'information de phase. Comme résultat, nous avons deux images : une image d'amplitude qui est la moyenne des deux amplitudes et une image de phase ou "interférogramme". Ces images

sont créées simultanément. Nous procédons à d'autres étapes pour pouvoir bénéficier de l'image de phase comme information (à cause de l'existence de franges orbitales).

4.4 Cohérence :

La cohérence est automatiquement calculée après la création de l'interférogramme en utilisant l'équation, car elle définit sa qualité.

Cohérence (γ) est une mesure de corrélation de la phase interférométrique et quantifie le degré de corrélation entre la phase et l'amplitude de deux images SAR. $\gamma = 0$ indique aucune cohérence et $\gamma = 1$ une parfaite corrélation Utile pour cartographier les changements des propriétés de surface due aux perturbations naturelles ou anthropiques.

– Les PS (Permanent Scatterers) d'une cohérence inférieure à 0,2 ne sont pas exploitables.

– Les PS (Permanent Scatterers) d'une cohérence de 0,2 à 0,5 sont généralement exclus de l'analyse interférométrique ; ils possèdent un comportement fortement non linéaire, ou bien il s'agit d'une série dont le bruit est trop important avec des erreurs d'aliasing.

– Les PS (Permanent Scatterers) d'une cohérence comprise entre 0,5 et 0,8 donnent une estimation fiable des déplacements avec une précision de 1-3mm/an et d'une précision de 5mm sur les valeurs Dz.

– Pour une cohérence supérieure à 0,8, l'estimation des déplacements dans le temps est extrêmement fiable avec une précision millimétrique.¹⁴

4.5 Filtrage de phase :

Cette étape peut être utilisée optionnellement pour filtrer l'interférogramme nettoyé des franges orbitales, afin de réduire le bruit. Le filtrage de phase permet d'arriver à un meilleur résultat de déroulement.

4.6 Déroulement de phase :

La phase enroulée qui est dans l'intervalle $[-\pi, \pi]$, va être déroulée pour qu'elle puisse prendre sa valeur initiale qui est n'importe quel nombre réel. Cette étape a été réalisée avec le logiciel libre SNAPHU de l'université de Stanford. Le déroulement de

¹⁴ FRANCESCA C, DEODATO T, I TALIAN SPACE AGENCY (ASI), SCIENTIFIC RESEARCH UNIT Initiation imagerie radar (SAR) , 2019.

phase débute par le calcul de la différence de phase temporelle pour tous les pixels PS (Permanent Scatterers) ; après chaque étape, la phase est déroulée spatialement. Il est donc nécessaire de choisir une double référence temporelle (une date) et spatiale (un pixel) pour réaliser le déroulement de la phase. Une fois la phase déroulée, une série de filtres (spatial passe-haut et temporel passe-bas) est appliquée de façon à estimer les différentes contributions de la phase et à ne garder que le terme lié au déplacement (en utilisant les caractéristiques spatio-temporelles des signaux atmosphériques).¹⁵

5. Présentation des techniques interférométriques

5.1 La méthode PS InSAR (Permanent Scatterers) :

Persistent Scatterers InSAR utilise des images SAR multi-temporelles, traitement Multi-image de + de 20 images SAR pour identifier des cibles réfléchissantes, détecter leurs positions et estimer leurs déplacements qui a pour but d'exploiter une série de données radar SAR tout en s'affranchissant des limitations de l'interférométrie différentielle telles que les dés corrélations temporelles, géométriques et les déphasages liés aux effets de l'atmosphère.

Le traitement des données en appliquant la méthode PSI (Permanent Scatterers) par les deux logiciels consiste en deux tâches indépendantes : (i) traitement DInSAR pour l'image principale et préparation des images esclaves par SNAP, et (ii) analyse InSAR par Stamps. La figure 2.6 illustre un diagramme de traitement des données InSAR par système de diffusion de données à l'aide de SNAP et de Stamps. Les détails de ces étapes seront décrits dans les sections suivantes.

¹⁵ Antoine B : Amélioration et test d'une solution d'auscultation de terrain de champs de déformation complexes par intégration de données InSAR, GNSS et nivellement. MÉMOIRE d'ingénieur 2019.

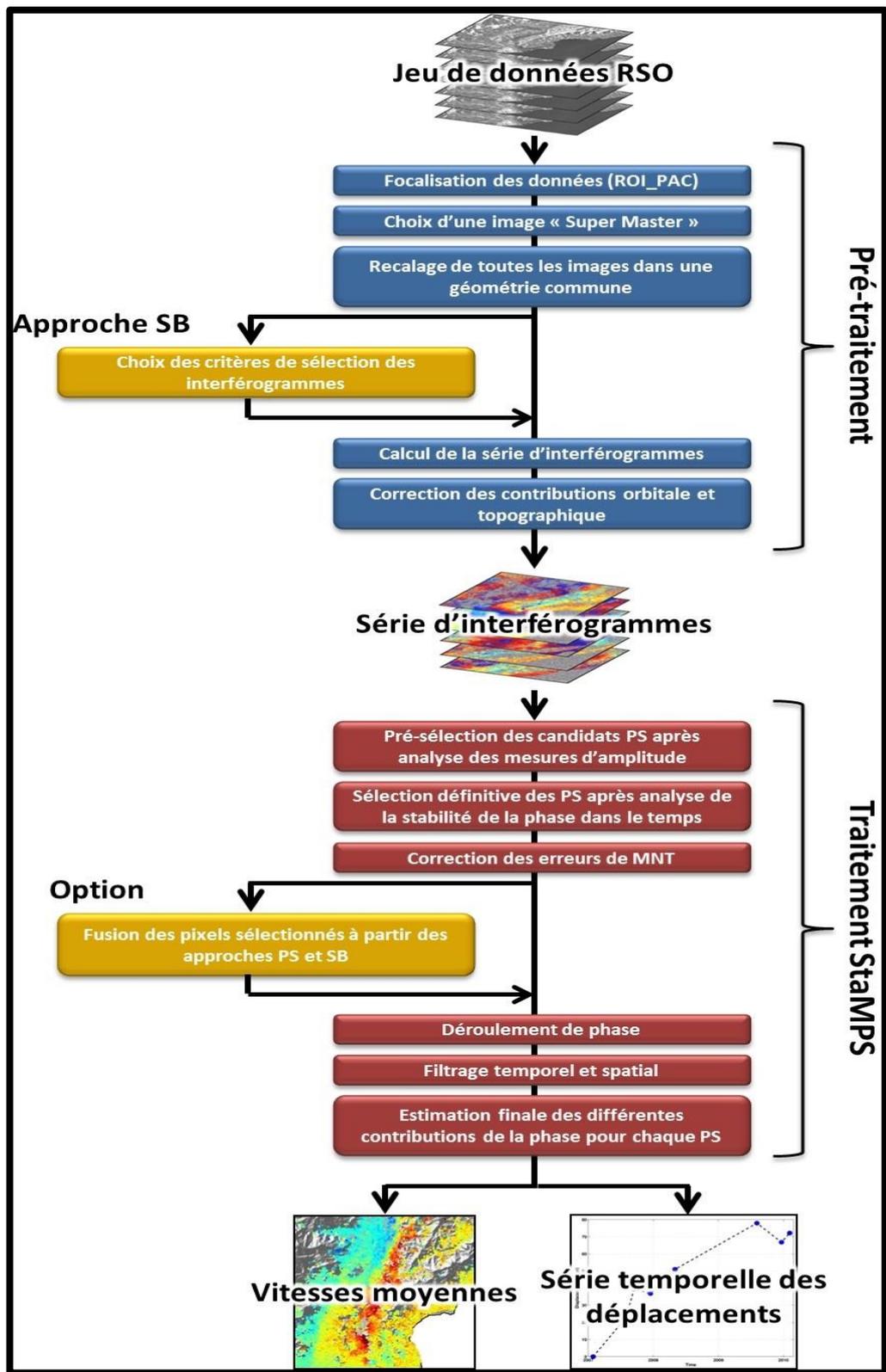


Fig. 2.7 : Un schéma représentant le traitement de la méthode PS (Permanent Scatterers) et SBAS.

5.1.1 Origine et Développement :

Historiquement, Cette méthode apparait pour la première fois en 1999 lorsque l'école polytechnique de milan en a produit un premier algorithme, a été développée en milieu urbain, elle correspond à la deuxième génération de technique d'interférométrie radar mise en place après le DInsar.

De nombreuses approches ont commencé à être développées à partir de la fin des années 90 pour essayer de résoudre les problèmes de la méthode différentielle et d'exploiter au mieux les bases de données fournies par les satellites SAR. Ces approches, utilisant plusieurs acquisitions sur une même scène, permettent d'améliorer la précision des mesures et de suivre en temps l'évolution des déplacements de coins rétrodiffusant. D'autres méthodes de calcul utilisant le principe des réflecteurs persistants existent dorénavant. La technique PSI (Permanent Scatterers). Fait également l'objet d'une exploitation industrielle et commerciale par la société TRE (TeleRilevamento) Europa L'analyse PSI (Permanent Scatterers) repose généralement sur des modèles de déplacements linéaires, c'est-à dire des déplacements avec des taux de déformations relativement constant au cours de la période d'observation. Si il est possible jusqu'à un certain degré de décrire des déplacements non linéaires avec ces méthodes, des profils vont être rejeté ou jugé de mauvaise qualité car le modèle linéaire ne suffit pas pour permettre de suivre dans le temps un phénomène non linéaire comme ceux lié au RGA. L'enjeu est désormais de concevoir un traitement spécifique en se basant sur un modèle non linéaire, adapté à des déplacements non continu dans le temps. TRE a développé un algorithme PS InSAR Analysis (APSA), de même ALTAMIRA a mise au point un algorithme avec un modèle de déplacement non linéaire. Ces réflecteurs sont dit « stables » non pas qui soient immobiles au cours du temps, mais stable au sens où ils sont suffisamment rétrodiffusant pour qu'on puisse étudier la phase du signal dominant : grâce à la redondance de l'information, apportée par le fait d'utiliser plusieurs interférogrammes, il est possible de diminuer le bruit sur les mesures et de séparer le terme de phase lié à la déformation du reste du signal interférométrique. Dans la littérature scientifique, on parle aussi de points permanents, terme jugé moins ambiguë.¹⁶

¹⁶ Kaveh H. : Apport de l'interférométrie radar (DinSAR et PSI) pour l'étude des effets de la sécheresse géotechniques : applications à l'Est de la région Île-de-France. Université Paris-Est, 2010.

5.1.2 Principe :

PS (Permanent Scatterers) dont la réponse radar est suffisamment forte et continue dans le temps. Ces points radar réflecteurs sont dits « stables » non pas parce que leur comportement de la surface du sol qu'il représente soit immobile ou monotone dans le temps, mais stables dans le sens où ce sont de points suffisamment réflecteurs permettant le calcul du déphasage lié aux mouvements des réflecteurs au cours du temps. Pour cela on sélectionne une seule image maîtresse et à combiner le maximum d'images avec celle-ci, malgré des différences orbitales conséquentes (grandes lignes de base perpendiculaires). Plus la ligne de base (spatiale et temporelle) est grande, plus le degré de corrélation entre les deux images est important. Un point clé de la méthode est donc de sélectionner correctement les réflecteurs dont la phase reste stable dans le temps et quelles que soient les configurations orbitales : l'utilisation de toutes les images disponibles sur la zone étudiée est possible du fait de l'absence de contraintes pour choisir la ligne de base perpendiculaire et temporelle des interférogrammes. Les réflecteurs sélectionnés sont appelés Permanent Scatterers

Avec la technique des PSI (Permanent Scatterers), la précision de mesure dans l'axe de visée (Line of Sight LOS) est de l'ordre du millimètre. Dans un milieu urbain dense, l'auteur rappelle qu'on peut compter sur 100 à 300 PS/km². Alors qu'en milieu rural, les cibles présentant de grandes surfaces exposées étant plus rares, on peut compter sur plus de 10 PS/ km². Le déplacement et l'altitude mesurés sont ainsi relatifs à un point de référence supposé immobile.

Le principe de la méthode consiste à sélectionner des points particuliers, les PS (Permanent Scatterers) dont la réponse radar est suffisamment forte et continue dans le temps. Ces points radar réflecteurs sont dits « stables » non pas parce que leur comportement de la surface du sol qu'il représente soit immobile ou monotone dans le temps, mais stables dans le sens où ce sont de points suffisamment réflecteurs permettant le calcul du déphasage lié aux mouvements des réflecteurs au cours du temps.¹⁷

5.1.3 Avantages et limites des méthodes par réflecteurs persistants :

La méthode des réflecteurs persistants présente plusieurs avantages :¹⁷

¹⁷ Johann CH. : Caractérisation des déformations tectoniques inter-sismiques de l'île de Taiwan par interférométrie radar, Thèse Doctorat de l'université Paris -est marne- la -vallée, 2011.

- L'utilisation de l'ensemble des images RSO, permettant d'augmenter la résolution temporelle pour le suivi des déformations.
- L'application sur de grandes étendues spatiales (pour l'étude des déformations à grande échelle) mais aussi permettant un suivi des déformations locales (à l'échelle du bâti).
- Une précision sub centimétrique des mesures de déformation (qui dépend de la résolution temporelle des images RSO utilisées).
- La forte densité de points de mesure, surtout dans les zones urbaines (avec parfois plus de 1 000 PS/km²). Cette densité est largement supérieure à la densité de stations GPS installées sur un site, offrant ainsi une analyse plus fine des déplacements de la surface terrestre.
- Elle ne nécessite pas l'installation de matériel car elle utilise les éléments physiques présents sur la surface du sol, qu'ils soient d'origine naturelle ou anthropique.
- Les points de mesure ne sont pas forcément tous voisins, il est possible d'obtenir des points de mesure isolés, la cohérence interférométrique ne rentrant pas en compte dans le choix des couples interférométriques.

Mais comme toute méthode, elle présente aussi certaines limites :

- Les déplacements mesurés le sont suivant la ligne de visée du radar, il n'est donc pas possible d'obtenir directement les composantes Nord, Est et verticale des déplacements. La seule possibilité qu'il existe est l'utilisation de plusieurs jeux de données avec des paramètres d'orbites différentes (ascendantes et descendantes par exemple). Cela s'avère être un problème lors des études PS (Permanent Scatterers) car suivant la géométrie d'acquisition les cibles élémentaires n'ont pas le même comportement, certains pixels seront sélectionnés en tant que PS dans une géométrie donnée et rejetés de la sélection dans une autre.
- Il est impossible de connaître à l'avance la quantité et la position des points PS. Il est clair que si la zone d'étude est un milieu urbain, la densité de points de mesure sera forte.
- Le nombre d'images nécessaire pour obtenir une précision acceptable. D'abord estimé à 25 pour la méthode des "Permanent Scatterers Technique" le nombre

d'images à partir duquel le traitement PS donne des résultats est de 12 pour Stamps

- L'absence de points de mesure sur les zones peu urbanisées ou présentant une végétation luxuriante, sauf avec la chaîne de traitement Stamps.
- l'incapacité à mesurer des déplacements avec un comportement fortement non linéaire.

5.2 Traitement PS InSAR :

5.2.1 Traitement InSAR (SNAP) :

5.2.1.1 Choix de l'image maitresse :

Mais avant choisir l'image maitresse on passe par les 2 étapes le découpage de la zone et les orbites précises. Découpage de l'image (Subset Optionnel).

Si l'ensemble de l'image en ou s'intéresse pas, il est possible de la découper afin de gagner en temps de traitement et en stockage. Pour cela, il faut cliquer le produit qu'on veut découper et aller dans « Raster » → « Subset ». Si on ne sélectionne aucun produit, l'option ne sera pas disponible («grisée»). Ensuite on va faire entrer des coordonnées géographiques dans l'onglet « GéoCoordinates » de « SpatialSubset » - **0.3495, 35.6022, - 0.1330, 35.4692** Comme la fig. 2.8 la montrer.

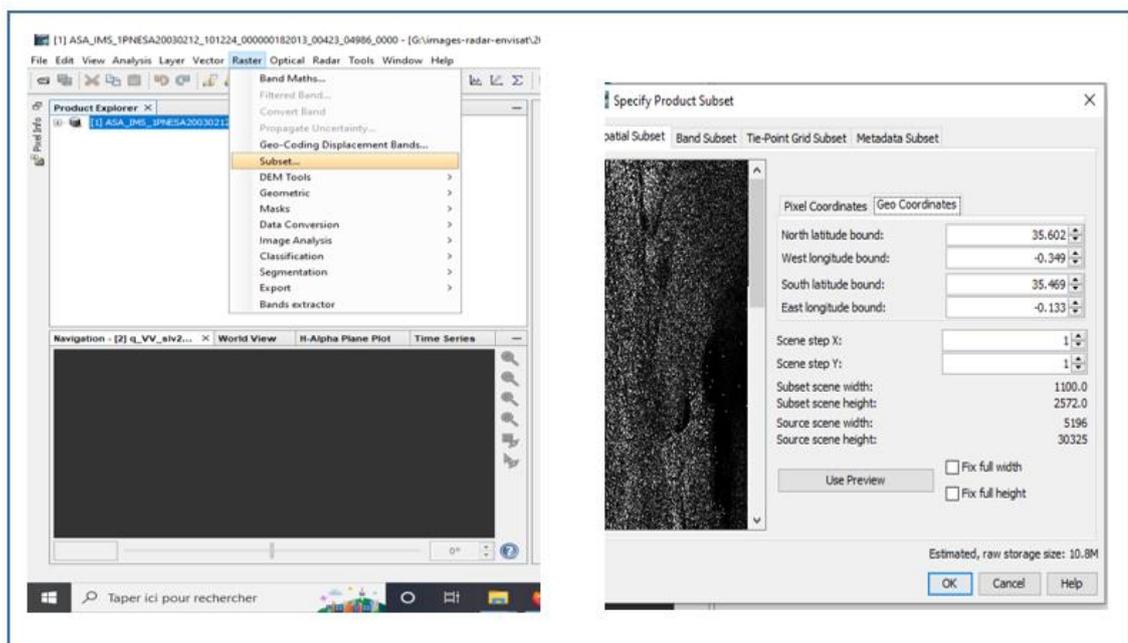


Fig.2.8 : Les étapes de découpage de notre zone sur SNAP

- **Correction de la localisation du satellite (Apply Orbit File) :**

Le premier pré-traitement vise à corriger la localisation du satellite. La localisation sur l'orbite lors de l'acquisition, fournie par défaut dans le fichier meta data, n'est généralement pas très précise. Celle-ci peut être affinée à posteriori en appliquant le traitement « Apply Orbit File » :

« Radar » « Apply Orbit File » sélectionnez l'option « Sentinel Precise (Auto Download) » dans « Orbit State Vectors » (cette option permet d'avoir une position précise du satellite, mais elle n'est disponible que 3 semaines après l'acquisition) cochez l'option « Do not fail if new orbit file is not found » (si on ne coche pas cette option, l'opération peut échouer s'il n'y a pas de nouveau fichier) cliquez sur « Run ».

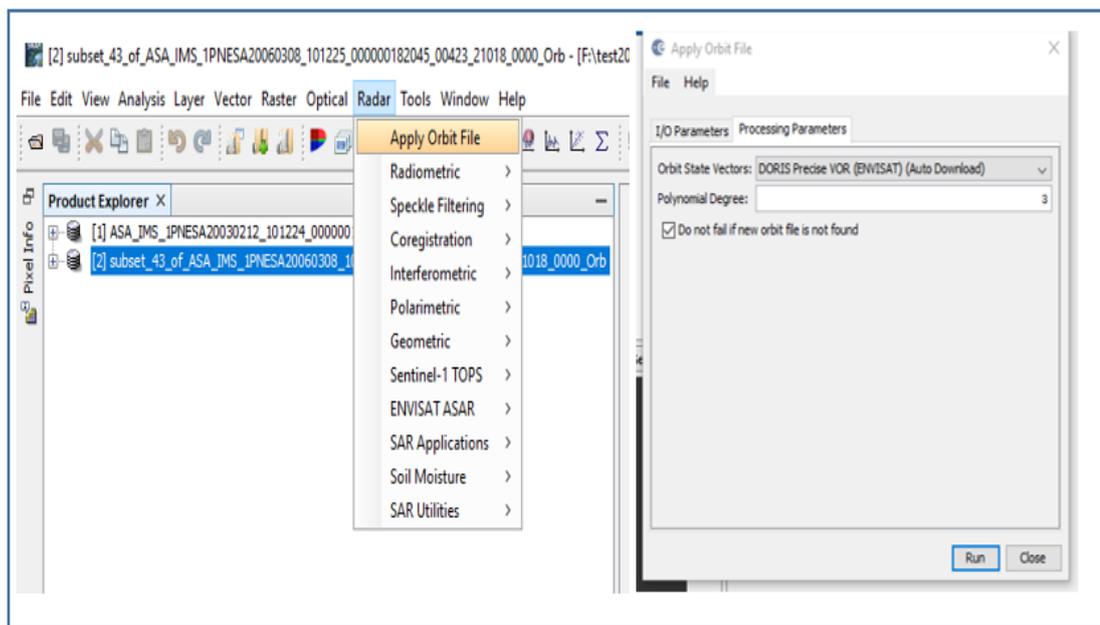


Fig. 2.9 : Les étapes pour établir les orbites précises

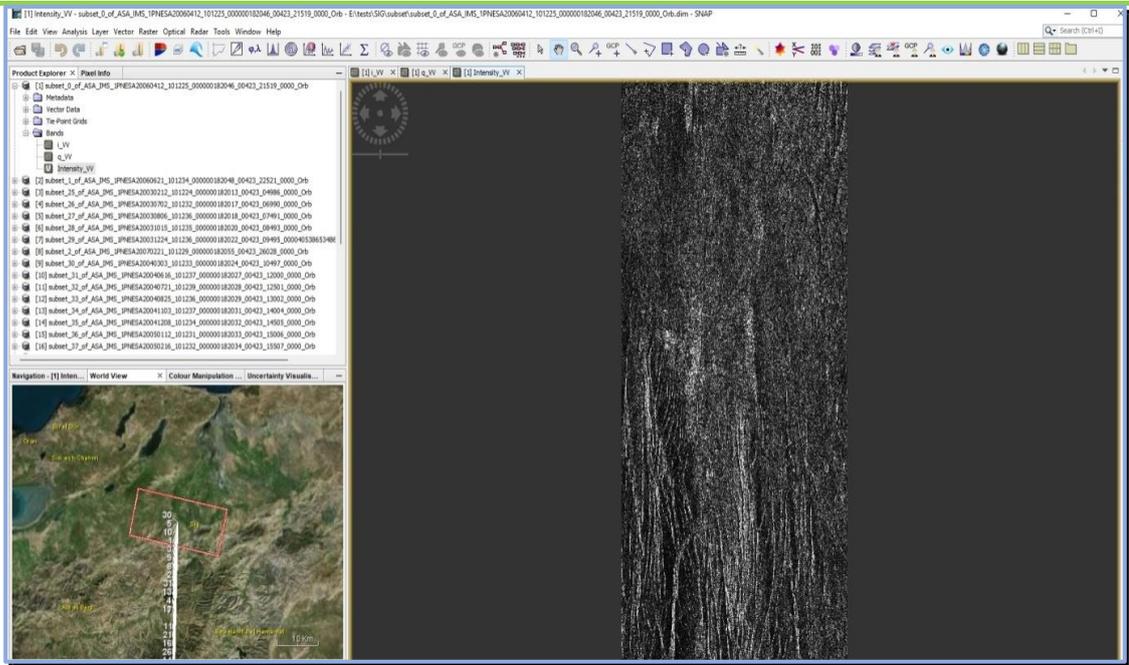


Fig. 2.10 : L'intensité après les orbites précises

- **Préparation de l'image maîtresse :**

L'image maîtresse est sélectionnée de manière à ce que la distribution des valeurs de référence perpendiculaires soit aussi faible que possible ainsi que de maximiser la cohérence (attendue) de la pile interférométrique. Sélection de la Un maître "optimal" devrait améliorer l'interprétation visuelle des interférogramme et améliorer la qualité évaluation. SNAP contient un outil pour effectuer la sélection de maître optimale pour nous tout en fournissant également la vue d'ensemble des lignes de base temporelles et perpendiculaires de tout le produit à son égard. L'image acquise le 8/12/2004 est sélectionnée comme image principale, le réseau d'interférogramme étant affiché sur la Fig. 2.10. Cette image principale est importée dans SNAP.

Aller à **Radar** → **Interferometric** → **InSARStackOverview** puis cliquez sur **AddOpened** pour charger tous nos 31 produits. Cliquez ensuite sur **Overview**.

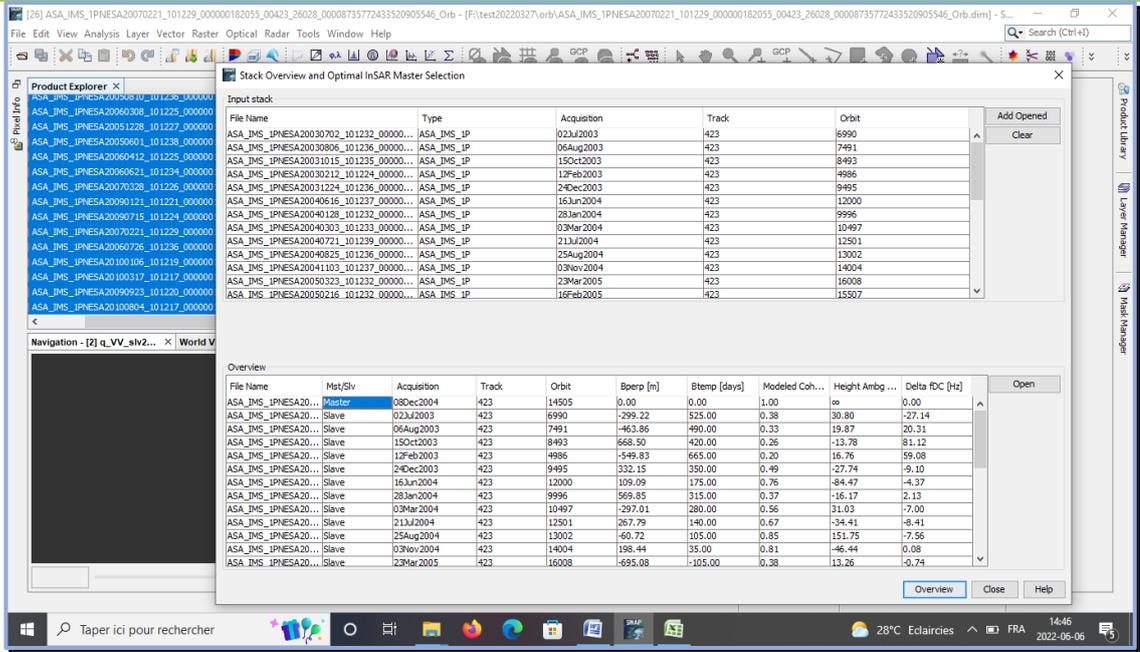


Fig.2.11 : Choix de l'image maîtresse selon la base perpendiculaire

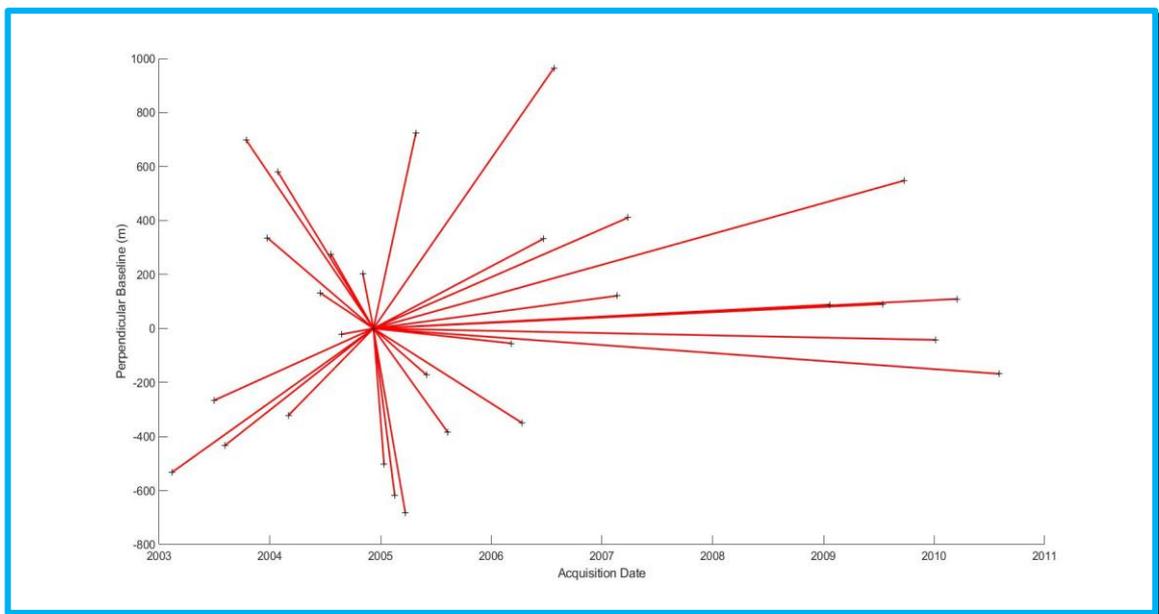


Fig. 2.12 : Réseau interféroglyphique avec l'image acquise le 08/12/2004 choisie comme image maîtresse.

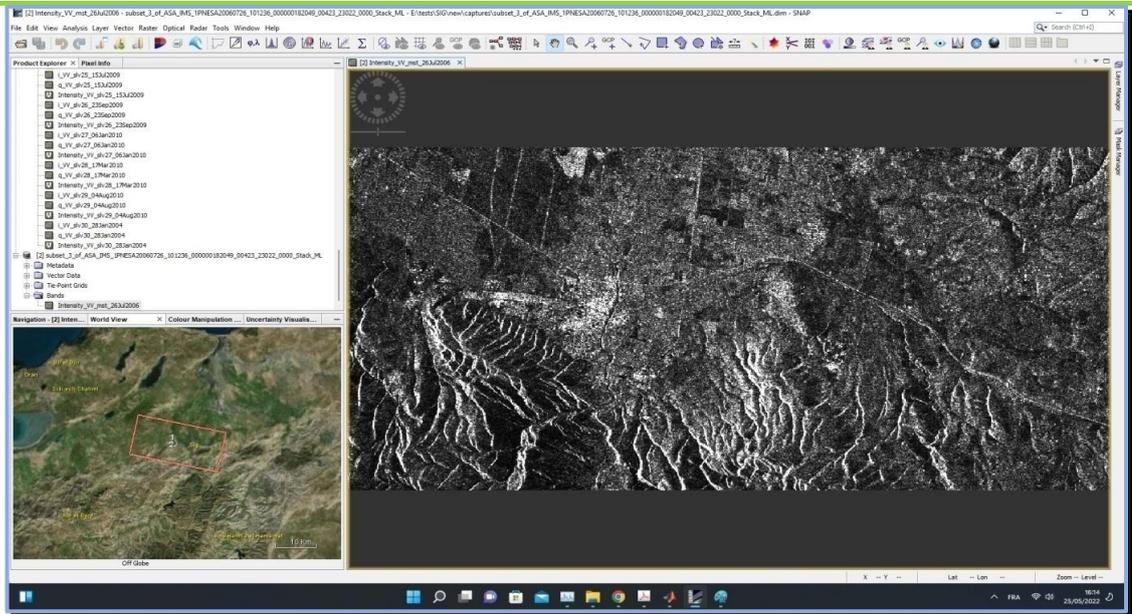


Fig. 2.13 : L'intensité de l'image maitresse.

5.2.1.2 Co registration :

Cette étape conduit le co-alignement entre l'image principale et chacune des images esclaves en séquence, ce qui nécessite beaucoup de calculs.

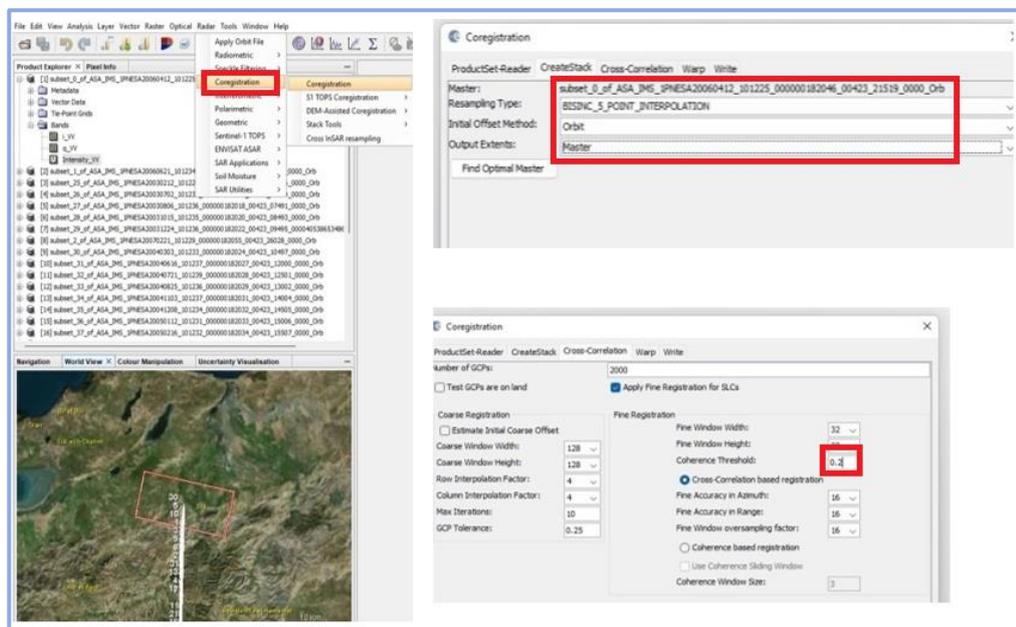


Fig 2.14 : Les étapes de co régistration

- **Correction atmosphérique et estimation de la déformation :**

L'hétérogénéité de l'atmosphère (ionosphère et troposphère) et sa variation dans le temps et dans l'espace provoquent les changements de vitesse du signal dans la direction de l'antenne et de la cible à la surface de la Terre. Il en résulte un délai de phase appelé écran de phase atmosphérique (APS). Dans cette étape, l'APS doit d'abord être enlevé, puis les taux de déformation sont calculés à partir de séries chronologiques de déformation comme suit : Supposons subsidence d'un pixel d'intérêt est défini par $d = [d_1, d_2, \dots, d_n]$, n étant le nombre d'acquisitions d'image avec leurs temps d'acquisition correspondants étant $T [T_1, T_2, \dots, T_n]$. Le taux de déformation est estimé en utilisant les moindres carrés pondérés avec les poids définis par les erreurs quadratiques moyennes de la phase interférométrique. L'équation suivante est utilisée pour estimer le taux de subsidence :

$$\mathbf{v} = (\mathbf{T}^T \mathbf{P} \mathbf{T})^{-1} \mathbf{T}^T \mathbf{P} \mathbf{d}$$

où v est le taux de subsidence, P est le vecteur des poids des interférogrammes M , qui sont définis par :

$$\mathbf{P} = \text{diag} (\sigma_1, \sigma_1, \dots, \sigma_m)$$

Où σ_i est l'erreur quadratique moyenne de l'interférogramme.

$$\mathbf{P} = \text{diag} (\sigma^1, s^2, \dots, s^M) s^k$$

5.2.1.3 Génération des Interférogrammes et élimination de la phase topographique :

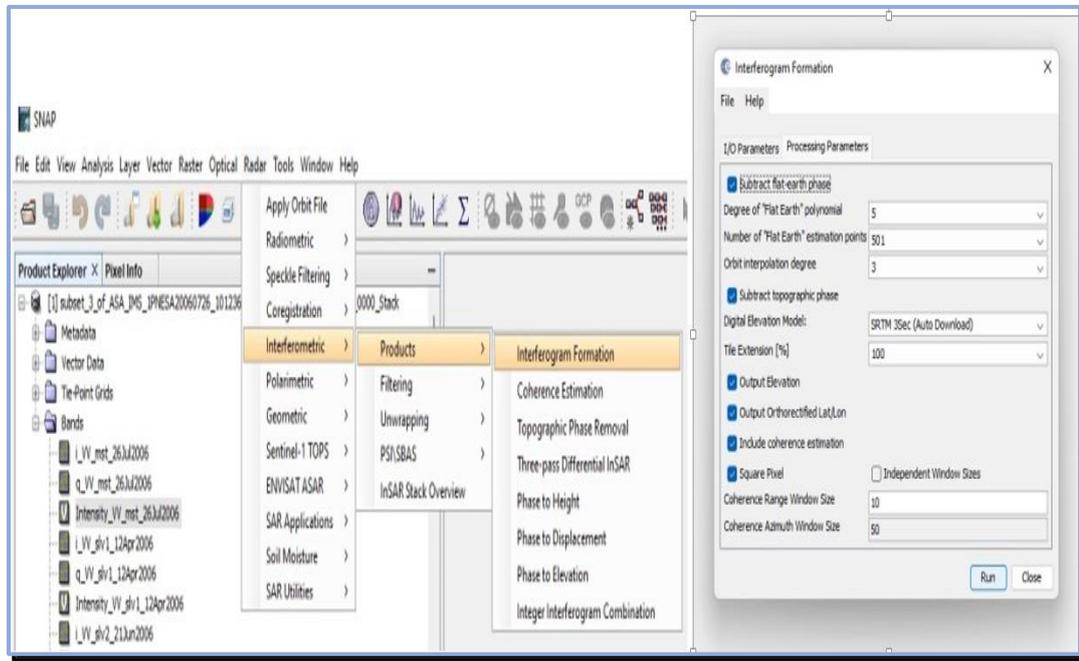


Fig. 2.15 : Les étapes de l'interferogramme.

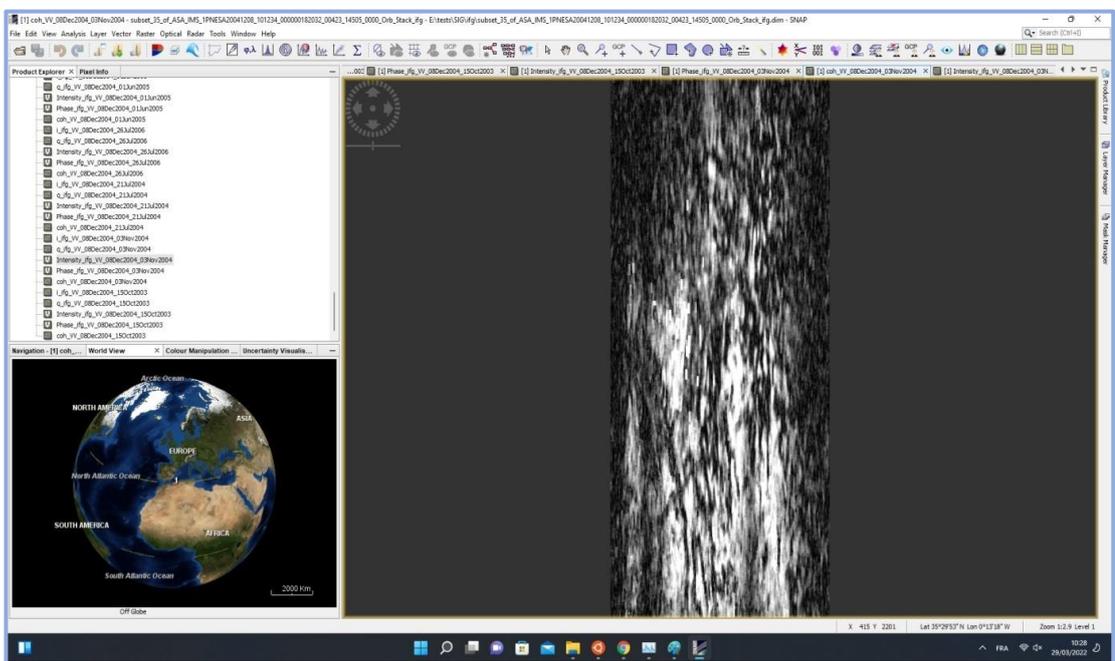


Fig.2.16 : Cohérence des interférogrammes.

Les interférogrammes correspondant à chaque paire d'images maîtres et esclaves sont ensuite générés avant de supprimer la phase de terre plate, c'est-à-dire la phase associée à l'ellipsoïde.. Cet opérateur calcule l'interférogramme (complexe), avec soustraction de la phase de terre plate (référence). La phase de terre plate est la phase présente dans le signal interférométrique en raison de la courbure de la surface de référence (WGS84).

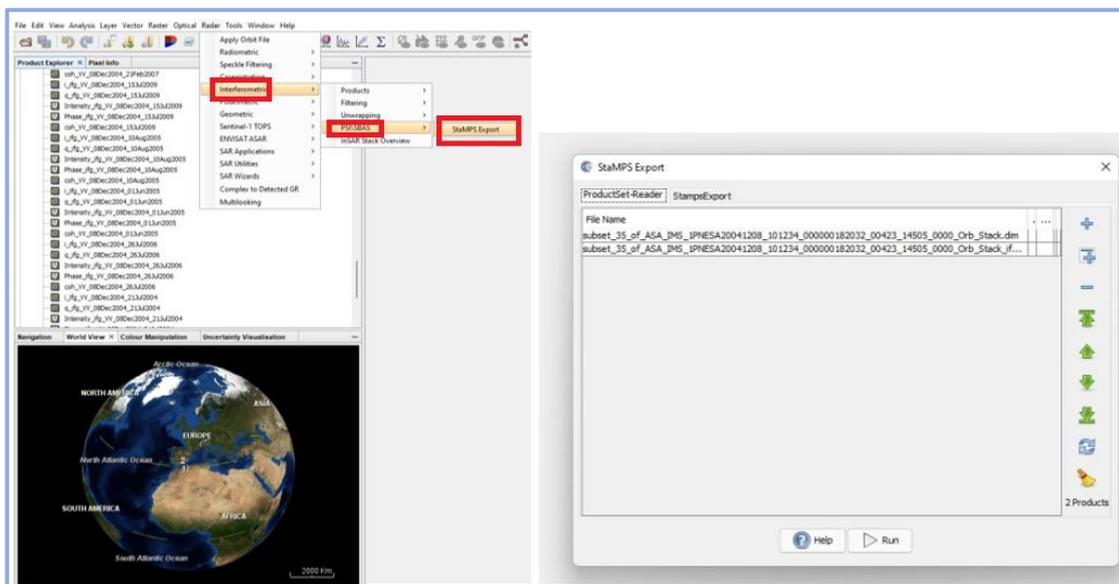
Enfin, des dossiers seront créés pour enregistrer les interférogrammes obtenus. Ils se composent de dépliants utilisés pour stocker des images uniques de vues SLC pour toutes les scènes SAR, de dossiers dans lesquels des interférogrammes sont enregistrés et d'un dossier stockant les coordonnées de l'image principale et du DEM rogné de la zone d'étude.

- **Élimination de la phase topographique :**

Cet opérateur estime et soustrait la phase topographique de l'interférogramme.

5.2.2 Traitement PS (STAMPS) :

5.2.2.1 Exportation des interférogrammes vers STAMPS:



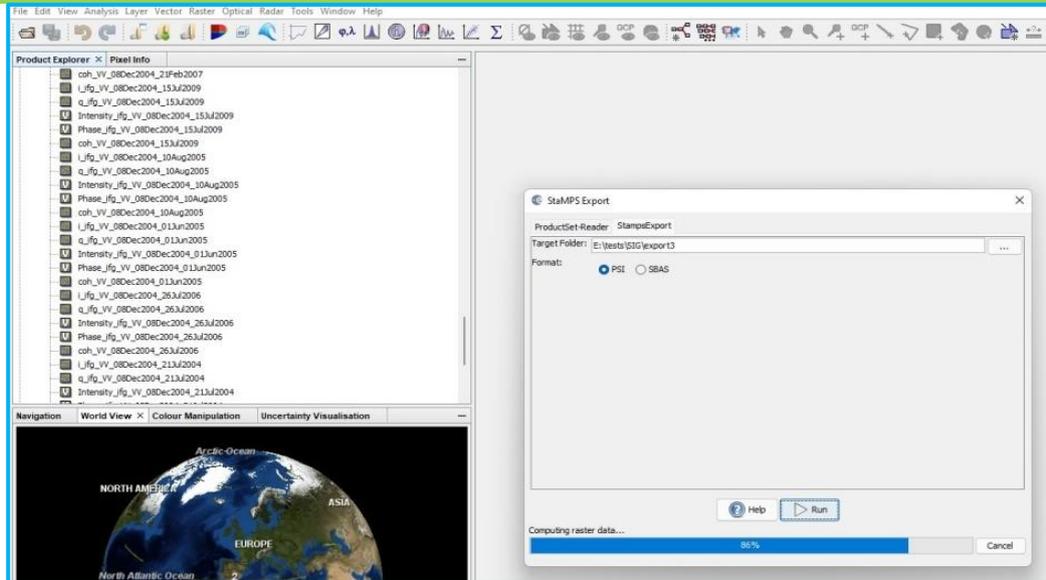


Fig. 2.17 : Les étapes d'exportation vers STAMPS

5.2.2.2 Vérifier les interférogrammes :

Maintenant, avant l'exportation, nous devons vérifier si tous les interférogrammes ont été correctement effectués. Si vous trouvez un interférogramme vide dans votre jeu de données, supprimez-le.

Nous devons préparer les données dans un Stamps format compatible. Pour ce faire, utiliser un outil SNAP pour exportation Stamps.

Les entrées sont :

- La paire maître-esclave Co enregistré
- Son interférogramme correspondant avec l'élévation et latitude ortho rectifiée et bandes de longitude
- Retourner à la fenêtre du terminal et exécuter la commande suivante.
- Puis appuyez sur ENTER pour lancer la commande.

Le traitement prendra à nouveau un temps assez long - environ 12 minutes par image esclave en fonction de votre VM.

5.2.2.3 Estimation de la cohérence :

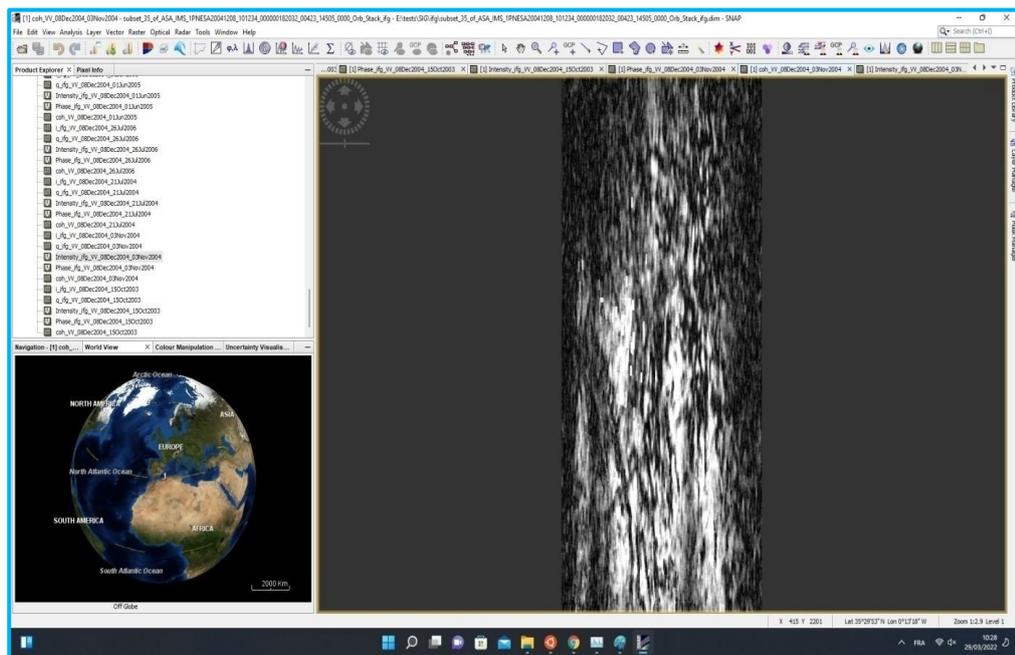


Fig. 2.18 : Cohérence de l'image maitresse.

Avant d'importer des données dans Stamps, les données traitées à partir de SNAP seront préparées. Un facteur important à inclure est la valeur de sélection des pixels PS(Permanent Scatterers) candidats à partir des interférogrammes . Les critères de sélection des pixels PS(Permanent Scatterers) candidats dans les séries chronologiques sont appelés dispersion d'amplitude (DA) a partir de l'équation suivante :

$$D_{\overline{A}} = \frac{\sigma_A}{m_A}$$

Où σ_a est l'écart-type de l'intensité de rétrodiffusion et m_a est la moyenne de l'intensité de rétrodiffusion.

Après avoir converti les données dans le format de MATLAB pour le traitement PS, l'étape suivante consiste à effectuer le calcul de cohérence qui consiste à calculer la corrélation spatiale pour chaque pixel PS (persistent scatters) candidat.

La cohérence est estimée par une opération de corrélation croisée entre les images complexes et est effectuée sur une fenêtre locale entourant chaque pixel. La cohérence complexe (coefficient de corrélation complexe) entre deux images SAR complexes u_1 et u_2 est définie comme.

$$Y = \frac{u_1 u_2}{|u_1|^2 + |u_2|^2}$$

Où u_1 et u_2 sont des valeurs complexes correspondantes de deux images.

Sélection PS (Permanent Scatterers) :

Sélection des PS (Permanent Scatterers) en fonction de la probabilité, en comparant les résultats des données avec la phase aléatoire. Ensuite, les pixels sélectionnés sont éliminés et ceux qui sont dus à la contribution du signal des éléments de résolution au sol voisins et ceux jugés trop bruyants

- **Chaque PS est caractérisé par les informations suivantes :**

- Le numéro FID, attribuée par le SIG qui est un entier permettant de comptabiliser les lignes PS calculées,
- Des coordonnées XY ainsi que son altitude précise déduite de l'erreur du MNT,
- Les valeurs XY images en range et azimuth de chacune des cibles,
- Une vitesse linéaire, noté VL, vitesse représentant le déplacement moyen le long de visée du satellite, obtenu par moindres carrées,
- La cohérence obtenue selon un modèle linéaire de déplacement,
- Les valeurs de déplacements $d(z)$ mesurées dans l'axe du satellite.

5.2.2.4 Déroulement de la phase : (phase unwrapping)

Les interférogrammes traités précédemment par SNAP sont enveloppés, indiquant que leurs valeurs varient de π à π , ils doivent donc être déballés par la phase dite de déballage, qui est l'étape la plus difficile. Dans SATMPS, unwrapping de phase peut être mis en œuvre par la méthode 2D ou 3D Minimum Cost Flow (MCF).

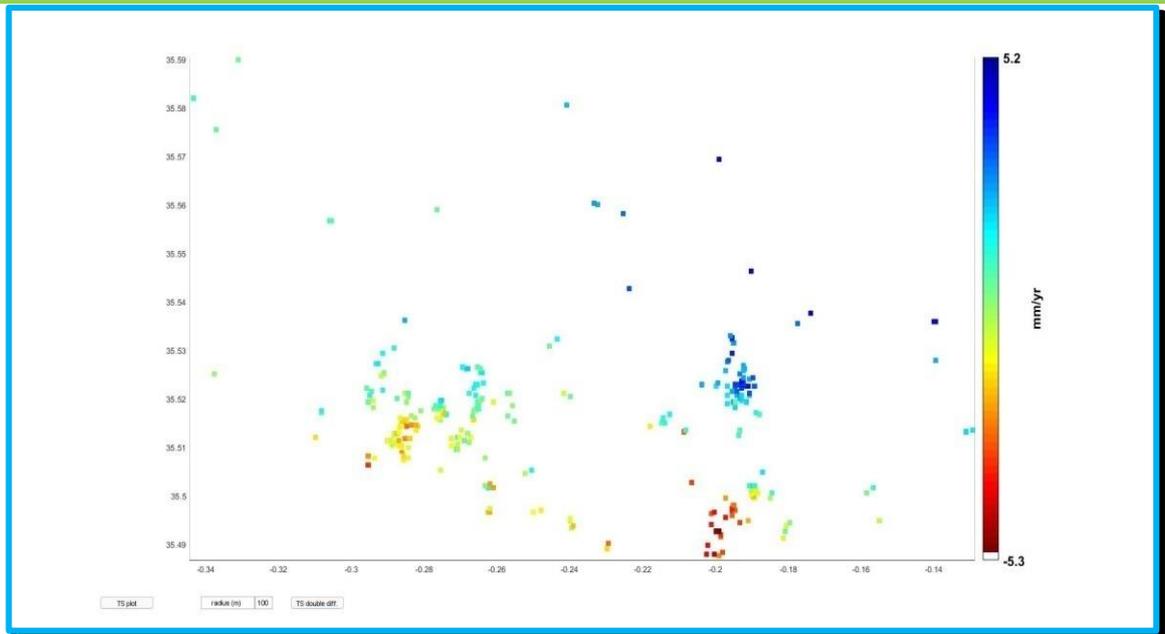


Fig. 2.19 : La localisation des points de déplacements

La Fig. 2.19 représente les affaissements en rouge, les dépôts (remblais) en bleu, la zone stable en jaune.

D'après les points présentés dans la carte avec des coordonnées latitude et longitude notre région est caractérisée par en trois zones selon une fréquence des déplacements qui varie de - 5.3 à 5.2 mm/an.

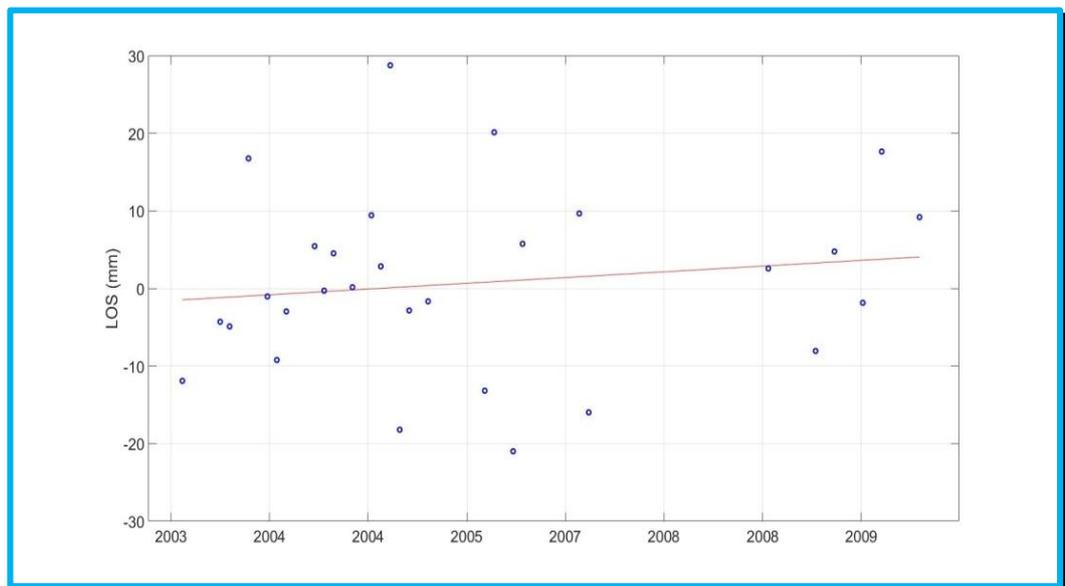


Fig. 2.20 : La droite de régression de déplacement d'un point rouge

Le graphe de la Fig. 2.20 représente LOS (ligne of sight) la ligne de visée du satellite par année, la droite de régression désigne la vitesse de déplacement, les points sont les différents déplacements spéciaux durant la période 2003-2009 d'un seul point, d'où la vitesse est ascendante dans le sens négatif du 5 mm/an à -3 mm/an, avec un déplacement anarchique qui caractérise les points rouges dans la carte de localisation des points de déplacements. Ce qui signifie ou définit un affaissement « Les gradins de la carrière ».

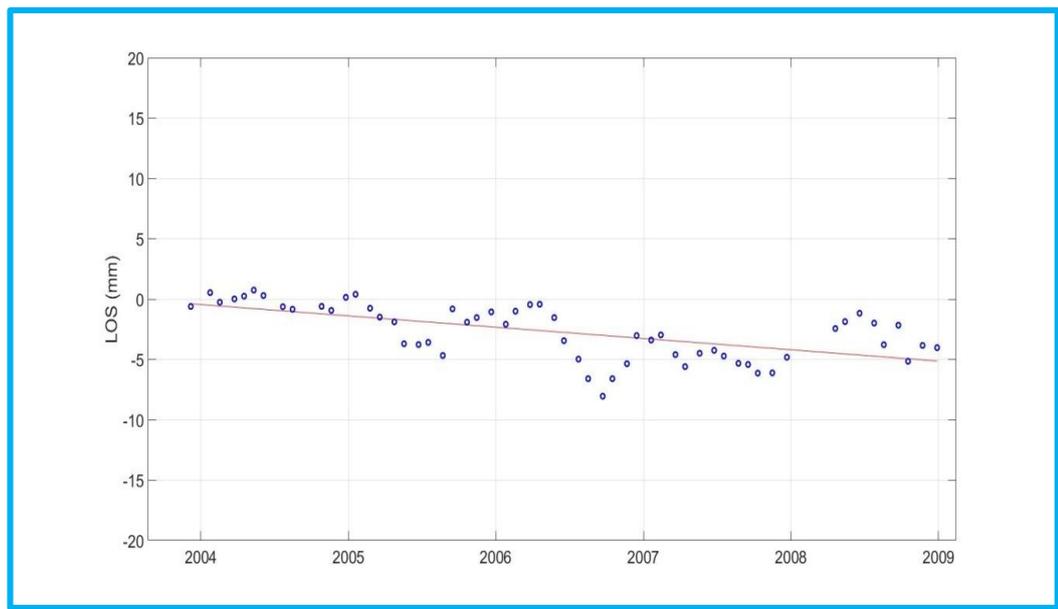


Fig. 2.21 : La droite de régression de déplacement de point bleu

D'après la droite présente dans la Fig2.21 est caractérisé par une vitesse ascendante -5 mm/an à 0 mm/an dans le sens positif avec un déplacement régulier, ce qui détermine ou formes de dépôts les points bleus.

5.3 Résultats et discussion :

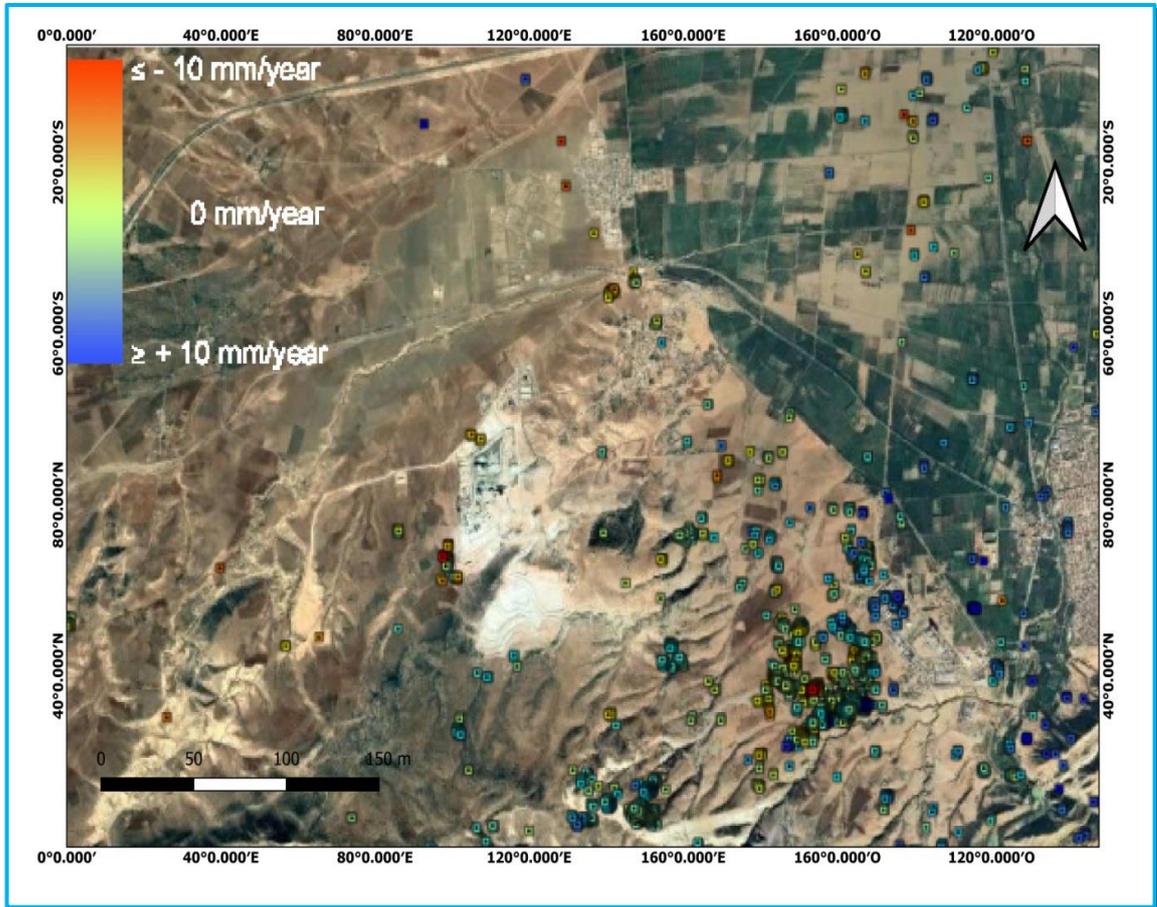


Fig. 2.23 : Carte de sensibilité au risque du déplacement

Selon la carte présentée en haut notre zone d'étude apparaît avec une couleur blanchâtre où s'installe l'usine de LAFARGE des déplacements sont engendrés l'hors de l'exploitation qui sont exprimés avec un ensemble de points caractérisés d'une dégradation de couleur de bleu jusqu'à le rouge selon une vitesse variée de < -10 mm/an à > 10 mm/an. Ainsi c'est points on a ceux qui aillent dans le sens positif comme les points verts (avec une vitesse de 1.8 et 1.97 mm/an au près de l'usine), le bleu (à partir de 1 mm/an et plus) ce qui explique un faible déplacement. Et aussi dans le sens négatif de l'orange (-6.63 mm/an) du rouges (ceux dans l'usine ont -2.-3.-5 mm/an et ceux qui sont près de la zone varient de -9 à -12 mm/an) ce qui signifie des fortes déplacements.

6. Méthode SBAS :

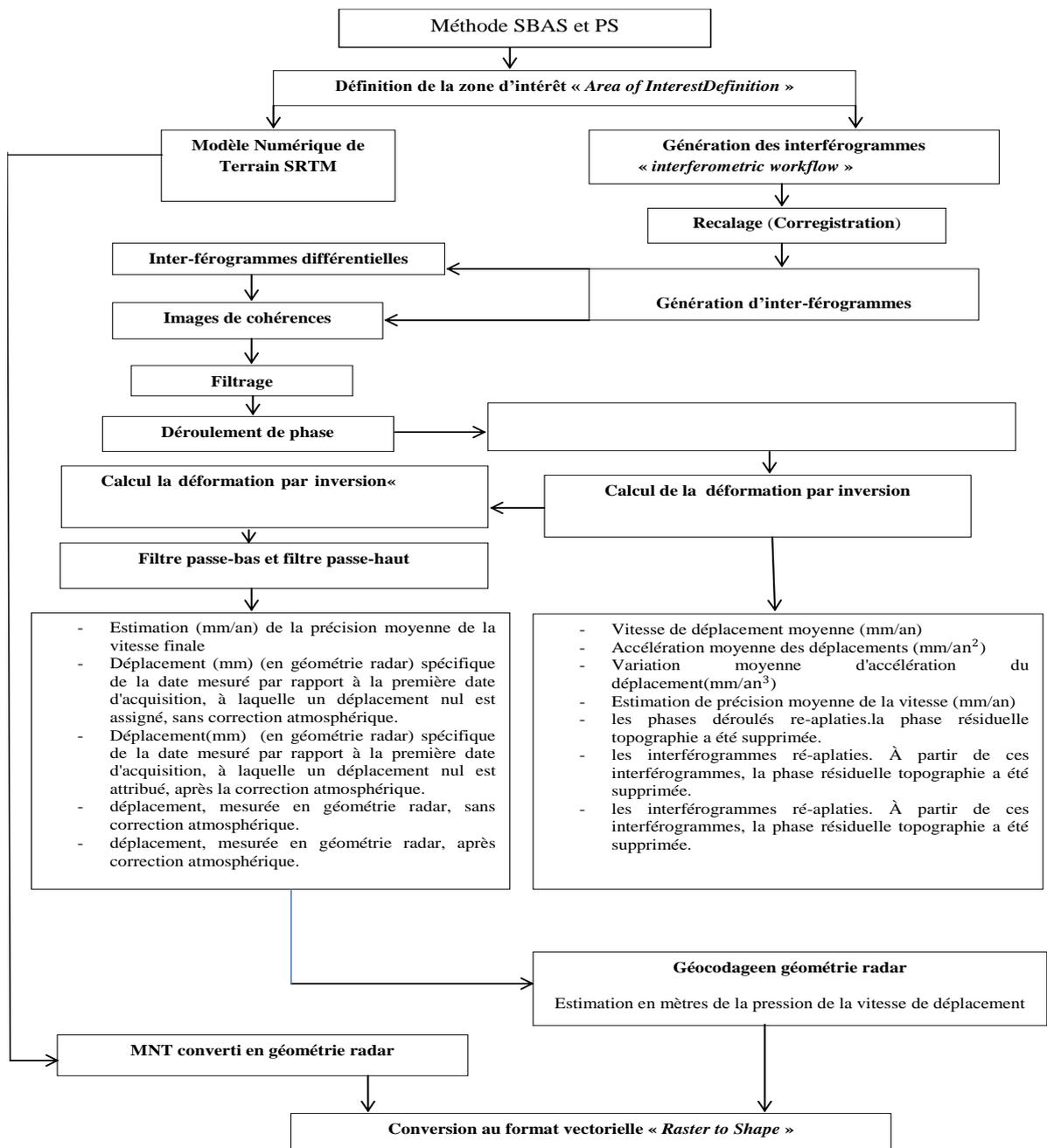
6.1 L'approche SBAS :

S'appuie sur un ou plusieurs ensembles d'interférogrammes dont les bases perpendiculaires et temporelles sont faibles afin de garantir des cohérences interférométriques élevées. Seuls les pixels de bonne cohérence sont considérés dans la suite des traitements. Ces pixels sont associés à des réflecteurs distribués (DS pour Distributed Scatterers) et ne contiennent pas d'éléments prédominants dans la cellule de résolution. Les DS correspondent par exemple aux zones désertiques, aux sols peu végétalisés ou à des zones de débris. Les DS sont donc sensibles aux phénomènes de corrélation temporelle et géométrique, c'est pourquoi les bases géométriques et temporelles ont été limitées lors de la construction des interférogrammes.

Généralement afin de réduire le bruit de phase, la résolution spatiale des images radar est préalablement dégradée. Les phases interférométriques sont de plus déroulées avant l'inversion des termes recherchés. Pour cela, les méthodes récentes de déroulement fonctionnent en 3D, dans les dimensions temporelle et spatiale. Ensuite, les déplacements, les erreurs de MNT et les erreurs orbitales sont inversés par résolution d'équations.

Les mesures des déplacements obtenus sont ensuite nettoyées du terme atmosphérique par filtrage spatio-temporel, sachant que le signal atmosphérique est corrèle spatialement mais non temporellement. Des erreurs orbitales résiduelles sont parfois corrigées par soustraction d'une rampe (variation linéaire de la phase le long de l'axe azimutal).¹⁰

6.2 Méthodologie de travail et données utilisées :



Comme déjà on a mentionné dans la méthode PS (Permanent Scatterers), les mêmes données sont utilisés ainsi dans cette méthode deux images SAR complexes sont nécessaires à la génération d'un Interférogrammes. Les deux images peuvent être commandées sous la forme de données brutes (raw data) ou bien de données complexes dites « single-look complexe » (SLC). Pour obtenir une bonne combinaison interférométrique il est nécessaire de choisir deux images focalisées à l'identique²⁰. Le centroïde du Doppler utilisé dans la focalisation des deux images doit être rigoureusement le même. Ainsi il est fortement recommandé d'utiliser des images SAR brutes (raw data) au lieu des images complexes (SLC) prétraitée.

Afin d'augmenter le rapport signal sur bruit, la taille du pixel est souvent augmentées moyennant avec les pixels avoisinants. Ce traitement est dit « complexe multi-looking » et permet d'obtenir un pixel de forme carrée.¹⁸ Nous avons traité 1 *look* en fauchée (range) et 5 *look* en azimut conduit à une taille du pixel est de 20m×20m. Chaque paire de points d'images SAR doit être alignée précisément à une fraction de largeur de pixel inférieure à 1 dans la direction distale (fauchée) et azimutale. Afin d'y remédier, une des images SAR dite « image esclave » est re-échantillonnée et enregistrée dans la géométrie de l'autre image inchangée dite « image maîtresse » en minimisant la base perpendiculaire (300m) et temporelle (3ans), et en excluant les couplets de redondances (Fig. 2.24).

L'image maîtresse peut être également géo-référenciée en la corrélant avec une image en amplitude générée à partir d'un modèle numérique de terrain.¹⁹

Une fois les deux images Co-enregistrées avec une grande précision, la prochaine étape est de générer l'interférogramme. Cette étape est réalisée en calculant une différence de phase entre chaque pixel de l'image maîtresse et esclave. Dans des conditions théoriques idéales (Ex : Absence d'effets atmosphériques, absence de dé corrélation spatiales et temporelles etc.), la phase obtenue contient des informations sur la topographie et la déformation accumulée entre les deux temps d'observations. En pratique l'interférogramme est influencé par d'autres facteurs tels que les changements de l'état de la surface (Tissus végétal, activités humaines etc.) entre les deux prise de vues et les effets

¹⁸ BELABBES.S. : Caractérisation de la déformation active par l'Interférométrie Radar (InSAR): Failles sismiques aveugles et cachées de l'Atlas Tellien (Algérie) et du Rif (Maroc) le long de la limite des plaques Afrique-Eurasie. Thèse Doctorat. Université Louis Pasteur-Strasbourg, 2008.

¹⁹ Massonnet D., et Feigl, K. L.: Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface, *Reviews of Geophysics*, 36, 441-500, 1998.

atmosphériques qui réduisent la cohérence. Le signal de l'interférogramme ainsi obtenu correspond quasiment à :

Première inversion de la matrice de données, avec l'erreur troposphérique, ce qui permet de corriger les interférogrammes déroulés. Deuxième inversion et estimation de la carte des vitesses moyennes des déplacements annuels ainsi que les déplacements date par date.

Pour l'analyse interférométrique multi-temporelle nous avons utilisé 31 images brutes générés en types Single look Complexe (SLC), un seul Track de 423 acquises par le satellite ENVISAT en mode descendant sur une période de février 2003 jusqu'à Aout 2010. Fig. 2.24 représente la combinaison de 174 paires d'interférogrammes SBAS (Small BASeline Subset), afin de choisir l'image master pour une conversion en image de référence principal SAR ; puis une sélection de distribution des paires des données optimale interférométrique pour arriver à une génération cohérente des interférogrammes différentielles. Le Filtrage du bruit est généré depuis les marges DinSAR²⁰. Les résultats de ces étapes de traitement vont aboutir à une génération de la vitesse de déformation moyenne dans l'image et la correspondance des séries chronologiques pour chaque pixel cohérent de la zone investiguée par l'inversion de la séquence calculé de l'interférogrammes DinSAR. En même temps une possibilité d'estimation des composants résiduel topographique et des contributions atmosphérique. Il faut passer par un géocodage des résultats obtenus et sa projection dans une grille cartographique universelle²¹. La présence de données multi datés permet de reconstruire l'historique du déplacement dans la zone des carrières de Djebel Aoud Asma. Les résultats de déplacement seront validés par la vérité terrain de décembre 2017.

²⁰ BOUGUBINA. N. et MEGHSEL. A.: Utilisation de l'imagerie radar SAR dans l'étude de déformation de la zone de Beni Haroun. Pour l'Obtention du Diplôme d'ingénieur en sciences géodésique et travaux topographique : Petite échelle. Centre des techniques spatiales. Arzew. Algérie, 2017.

²¹ HASNI. K., 2017: Compensation of inosphoric effets in spaceborne differential lasar imaging for earthquake monitoring. Beihang Universiting. Pekin, Chine.

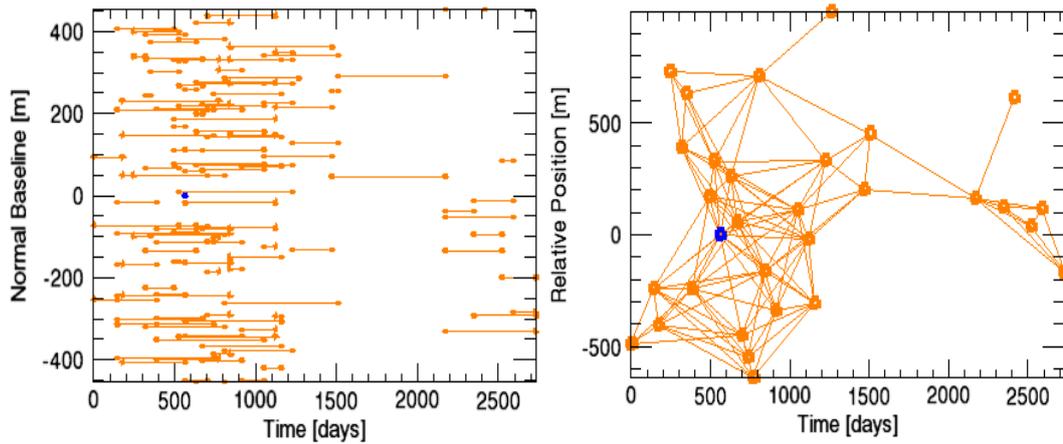


Fig. 2. 24 : Combinaisons des paires d'interférogrammes SBAS.

6.3 Traitement SBAS (Small BASeline Subset) :

6.3.1 Extraction de la zone d'intérêt « *Area of Interest*

Definition » :

La surface du versant de Dj. Aoud Asma est plus petite que l'ensemble de l'image SLC originale. En effet le temps de traitement SBAS sera considérablement réduit avec la diminution de la taille des images utilisées (nombre des pixels inversés (DAVID T. 1998). Ceci nécessite un découpage de toutes les images SLC suivant les coordonnées géographique : Ouest Est : de **-0°36'66"W à -0°11'66"E**. Nord Sud : de **35°58'N à 35°45'S**, le découpage est effectué en se basant sur le MNT Mondial SRTM 30.

Nous allons présenter les résultats de trois couples :

- Le premier couple de 2003/07/02 à 2003/02/12, la période avant l'exploitation de carrière.
- Le deuxième couple de 2006/03/08 à 2007/02/21, la période des premiers mois d'exploitation.
- Le troisième couple de 2010/03/17 à 2010/08/04, la dernière date des données disponibles.

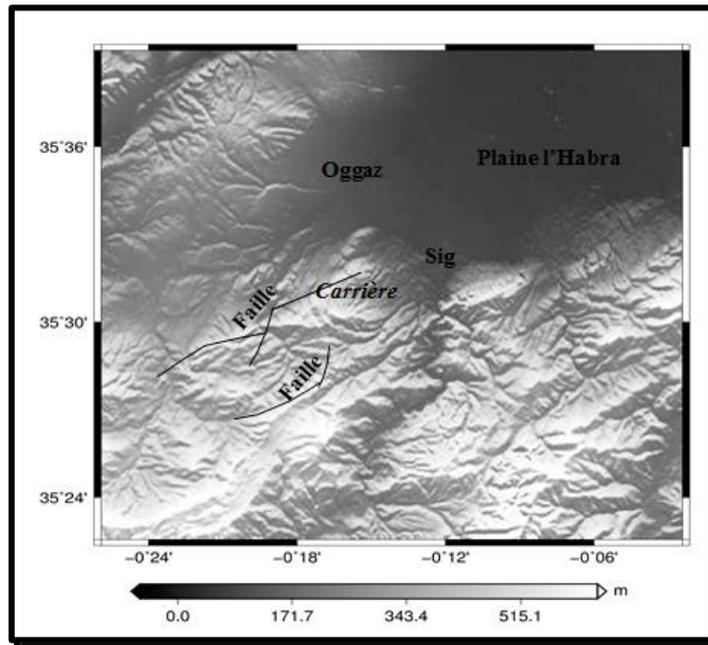


Fig. 2.25 : MNT du versant de Dj. Aoud Asma

6.3.2 Génération des interférogrammes « *interferometric workflow* » :

Nous avons choisi un facteur de multi vue égale à **5** en azimuth et **1** en direction de portée « range » pour obtenir un pixel carré d'une taille de pixel de 20m×20m. La Fig. 2.26 représente un interférogramme différentiel avec une haute cohérence ($\pm\pi$). Cette cohérence correspond à une mesure brute et une fiabilité de la phase.

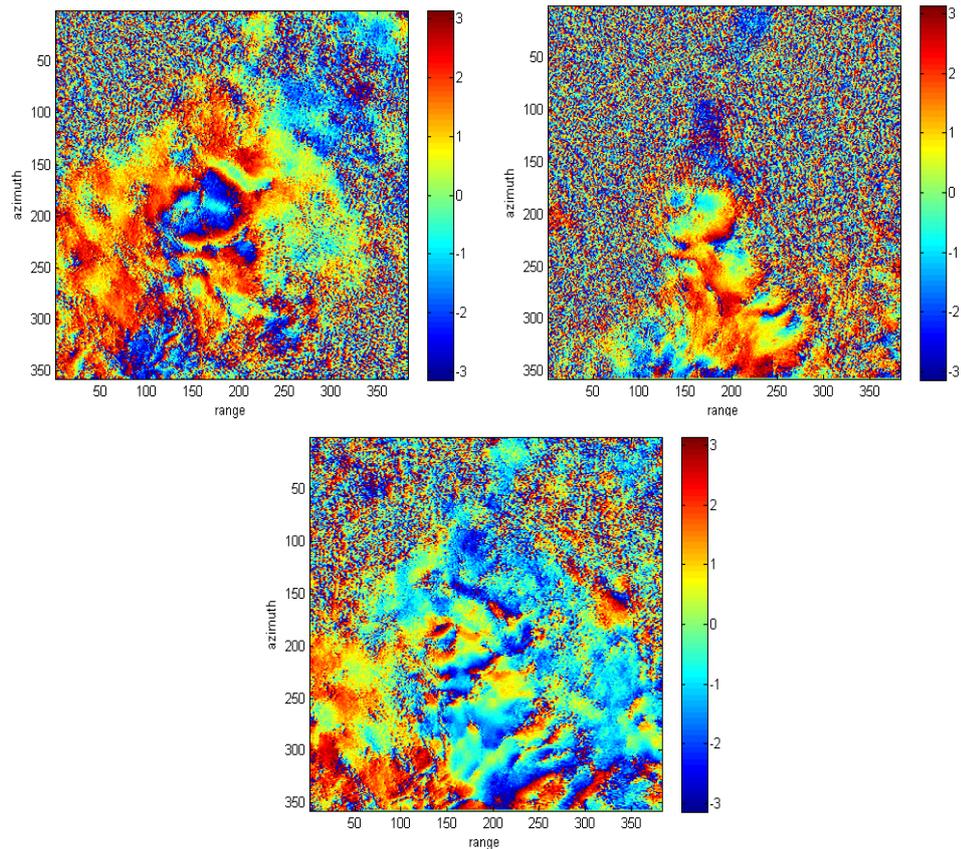


Fig. 2.26 : Interférogrammes différentiels avec une haute cohérence : (a) de 2003/07/02 à 2003/02/12. (b) de 2006/03/08 à 2007/02/21. (c) 2010/03/17 à 2010/08/04

6.3.3 Déroulement de phase :

Les résultats finaux de déplacement dépendent essentiellement de ce déroulement de phase. Fig. 2.27 est le résultat de la contribution de la topographie qui va être soustraite de l'interférogramme pour ne mettre en évidence que la déformation. Pour cela, la phase topographique est simulée à partir du modèle numérique de terrain et des données orbitales, par la suite celle-ci est soustraite à l'interférogramme. Après cette soustraction, le signal de l'interférogramme ainsi obtenu correspond quasiment à une carte de la déformation en surface exprimée en franges de déformation (i.e. un cycle complet de couleur, i.e., du bleu au rouge). Chaque frangere présentant une demi longueur d'onde de déformation ($\lambda/2 = 2.83\text{cm}$) en surface à cause du trajet aller et retour du satellite le long de la visée du satellite [Radar Line of Sight (LOS)].²²

²² Meghraoui, M., Maouche, S., Chemaï, B., Cakir, Z., Aoudia, A., Harbi, A., Alasset, P.-J., Ayadi, A., Bouhadad, Y., et Benhamouda, F.: Coastal uplift and thrust faulting

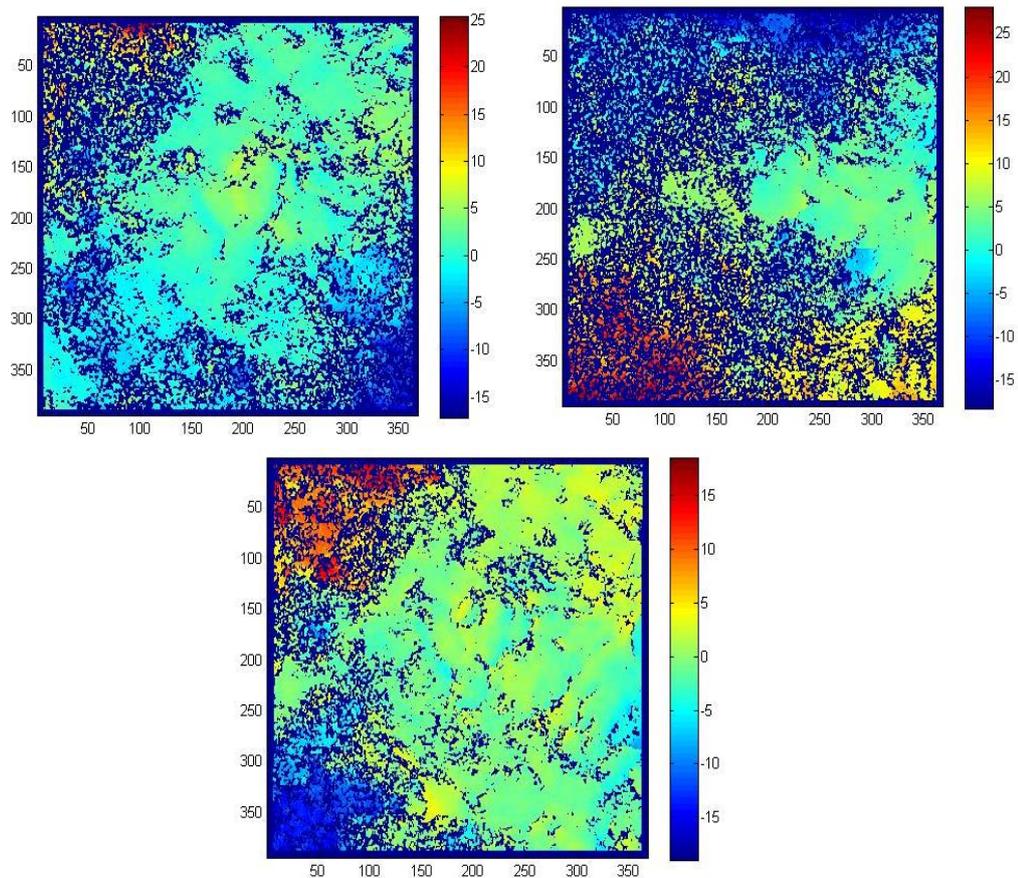


Fig. 2.27 : Déroulement de phase des couples : (a) de 2003/07/02 à 2003/02/12, (b) de 2006/03/08 à 2007/02/21 et (c) de 2010/03/07 à 2010/08/04

Selon la Fig. 2.27 le calcul de la phase déroulée consiste à minimiser la différence entre le gradient de la phase sur l'image et celui de la solution recherchée. Pour éviter les erreurs dans le déroulement, un masque de cohérence est utilisé afin de conserver dans les calculs que les pixels les plus cohérents.

associated with the Mw=6.8 Zemmouri (Algeria) earthquake of 21 may 2003, *Geophys. Res. Letters*, Vol. 31, L19605, doi:10.1029/2004GL020466, 2004.

6.3.4 Détermination de la vitesse annuelle du déplacement et de sa précision :

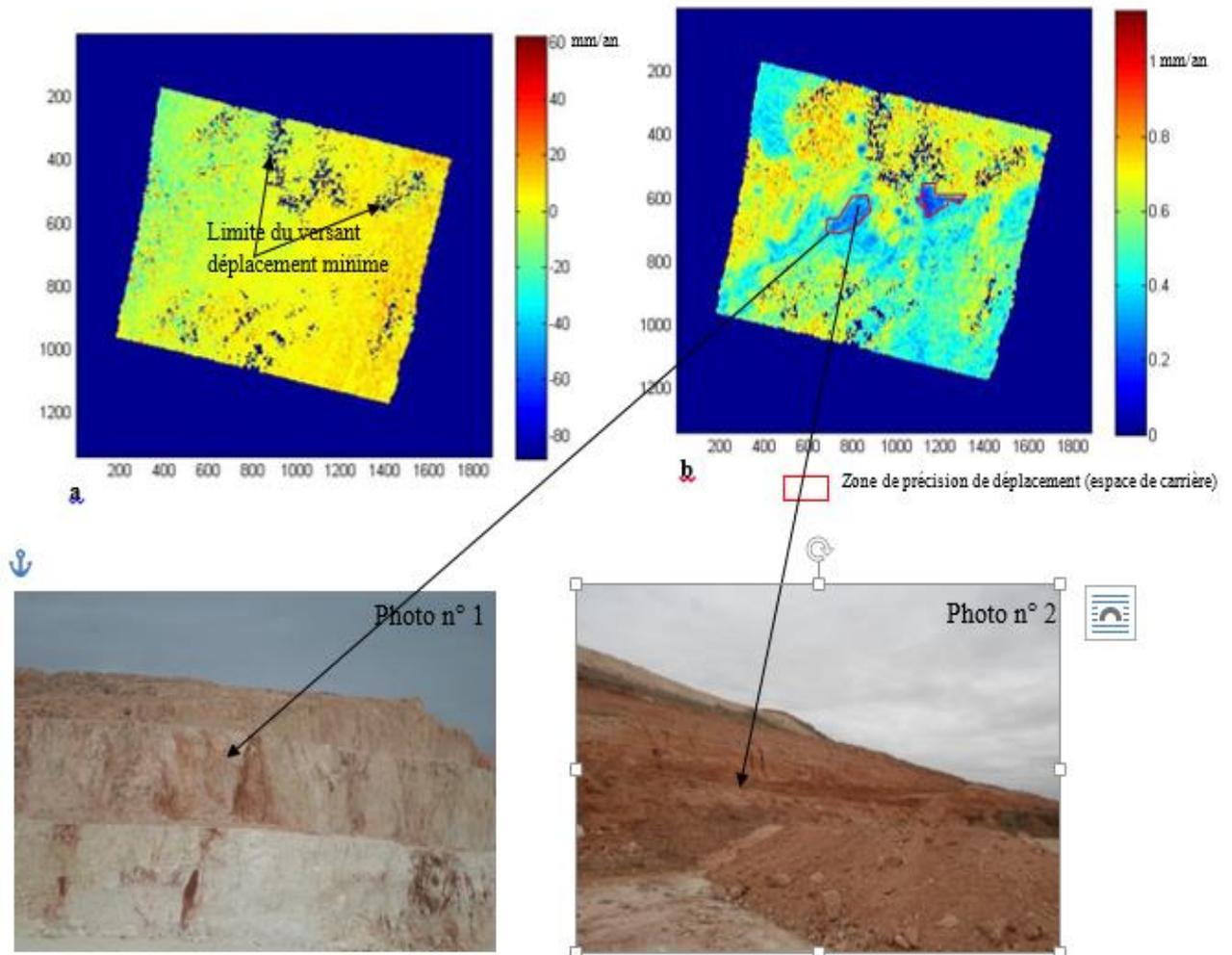


Fig. 2.28: Image géocodée en géométrie radar :

a : vitesse moyenne de déplacement. b : précision de la vitesse de déplacement

La photo n° 1 est prise suite à une sortie de décembre 2017 dans limite nord de la carrière, c'est des gradins de 15m, elle représente le point n° 3 dans la Fig. 2.28. La fissuration des Gradins ainsi que le risque de chute des blocs instable est dû à l'exploitation par explosif, qui doit être achevée en fin 2017.

La photo n°2 montre le point n°4 dans la Fig. 2.28, elle illustre une exploitation des terrasses alluviales. Car l'usine de LAFARGE consomme pour le mélange du ciment gris :

70 % de calcaire ; 15% d'argiles et 15% de marne. Pour le ciment blanc : 80% de calcaire, 09% d'argile, 10.5% de sable et 0.5% de gypse.

D'après les deux photos une érosion linéaire régressive est due à l'exploitation du calcaire et de l'argile. Cette exploitation intense est une cause, et l'absence du couvert végétal est un facteur, pour accélérer la vigueur de l'érosion sur le versant de Djebel Aoud Asma.

L'image de précision de vitesse de déplacement (Fig. 2.28 (b)) confirme un important déplacement dans l'espace de la carrière ou l'erreur d'estimation de la détermination du déplacement est limité entre 0.2 et 0.4mm/an (bonne estimation).

A partir de l'image de la vitesse moyenne de déplacement géocodé en géométrie radar, nous avons sélectionné quelques pixels pour tracer la courbe de l'évolution temporelle de déplacement et la comparé avec la vérité terrain : les déplacements les plus importants sont au point P3 : exploitation des alluvions est de 3.075m/an et P4 exploitation des calcaires est de 2.66m/an arrivé à 15m en 2017. Le point P6 représente les remblais au niveau de la cimenterie.

Fig. 2.28 illustre le déplacement vertical total estimé par la technique SAR, dû à l'exploitation de la carrière. C'est le résultat de cumul des 31 images de déplacements, pendant la période 2003-2010. Après géocodage le cumul de cette période a donné un bleu dans la zone des carrières qui détermine un déplacement supérieure à 3m, exprimé par les courbes des points P1 et P2, au centre de la carrière et la courbe du point P4 sa limite nord Fig. 2.28. Les quelques pixels rouge indique des remblais de la matière première du ciment (le Calcaire et l'Argile) la courbe du point 06 et dont les hauteurs dépassent les 04m. Les déplacements minimes sont P8 et 9 à la limite nord du versant où le terrain est caractérisé par une érosion linéaire régressive.

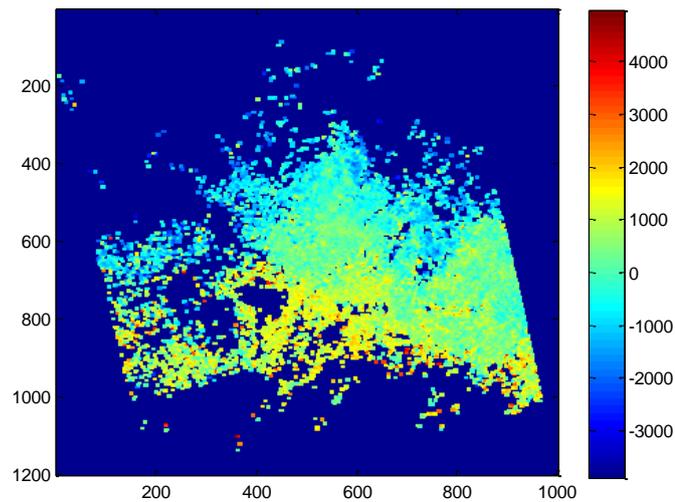


Fig. 2. 29 : Image de déplacement cumulé de la période 2003 à 2010

Les résultats dans des figures 28 et 29 montrent la potentialité de la méthode SBAS en analyse multi-temporelle des images SAR par la comparaison des résultats obtenus avec la vérité terrain.

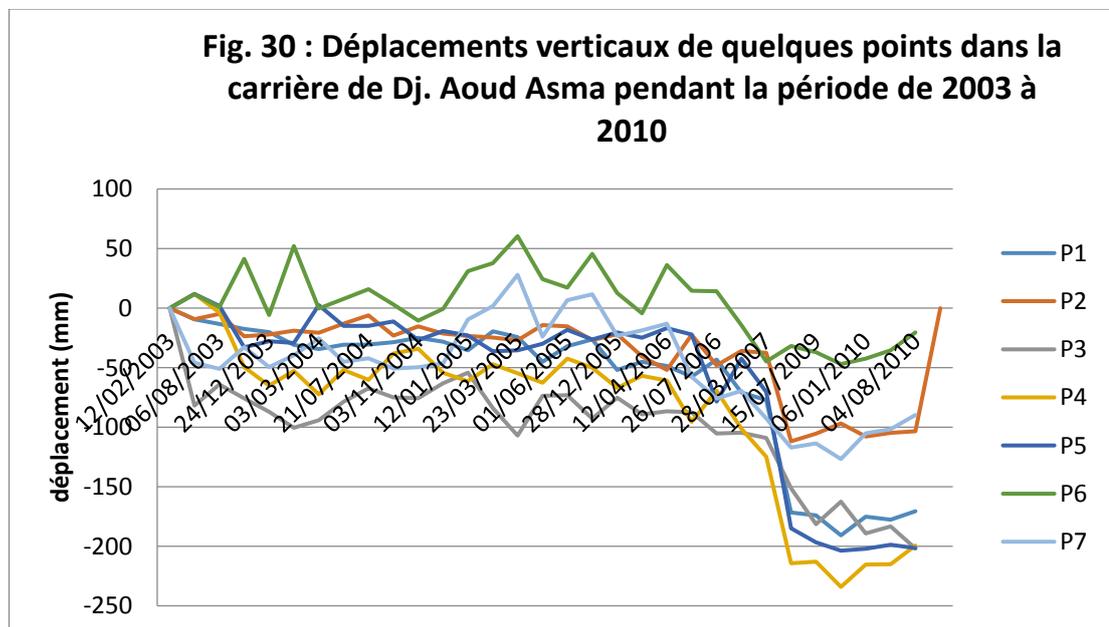


Fig . 2.30 : Illustre les series temporelles des déplacements verticaux des points (P1, P2, ..., P7) dans la carrière de Dj. Aoud Asma, pendant la période de 2003 à 2010.

Nous constatons une variation stable des courbes de l'ordre de 5 cm dans la période 2003-2006 et un déplacement vertical accéléré à partir de la fin 2006 date du début de l'exploitation de la carrière.

Fig. 2.31 l'analyse des résultats a montré que les déplacements les plus importants ont commencé depuis la fin de 2006 la période du début de l'exploitation de carrière. Djebel .Aoud Asma étant formés d'une grande partie par le calcaire qui est un terrain résistant à l'érosion, l'exploitation de carrière le rend vulnérable face au déplacement. D'après Fig.2.31

Le déplacement en 2003 été de l'ordre de -30mm/an, il a atteint un maximum de -300mm/an en 2006 l'année du début de l'exploitation pour arriver à un déplacement très important de -600mm/an en 2010.

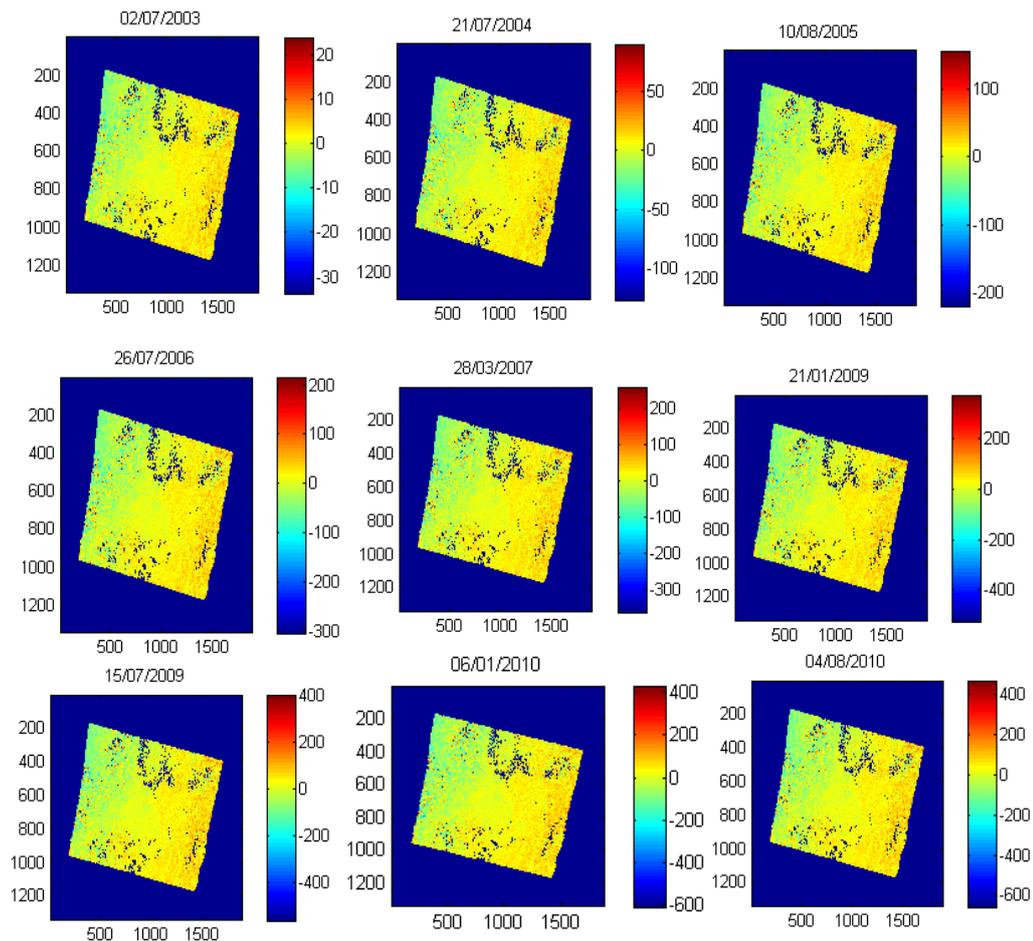


Fig.31: Série temporelle de la vitesse moyenne de déplacement entre 02/07/2003 et 04/08/2010.

7 Etude comparative des deux méthodes SBAS et PS :

Les données ENVISAT ASAR ont été traitées à l'aide des méthodes PS et SBAS InSAR. Pour PS InSAR, nous avons sélectionné l'image de plage oblique (08/12/2004) comme image maîtresse et généré 124 interférogrammes.

PS InSAR est l'une des approches qui améliore la précision des mesures de déplacement InSAR classiques. L'algorithme PS InSAR utilise une série chronologique d'images radar pour détecter des signaux radar cohérents à partir de points PS afin d'obtenir des informations sur le mouvement du relief. Un autre algorithme appelé SBAS InSAR a également été utilisé, qui utilise toutes les images SAR disponibles avec de petites lignes de base pour obtenir un degré élevé de couverture spatiale des diffusions distribuées. Les deux algorithmes peuvent compenser les inconvénients du DInSAR conventionnel, à savoir les erreurs de phase dues au décorrélation géométrique et temporelle ainsi qu'aux perturbations atmosphériques.

La ligne de base perpendiculaire est de 0 m, la ligne de base temporelle est de 3 ans, et les candidats potentiels de la FP (POINTS FIXES.) ont été sélectionnés avec un seuil de cohérence de 0,8.

Pour SBAS InSAR nous avons choisi l'image de la plage oblique (08/12/2004) comme image super master. Pour réduire le décor géométrique et temporel. Les critères de seuil avec une référence temporelle maximale de 3 ans et une référence perpendiculaire maximale de 300 m ont été utilisés, puis 124 interférogrammes ont été générés. Et les candidats potentiels de la FP ont été sélectionnés avec un seuil de haute cohérence

Le SBAS-InSAR récupère les principes des premières générations de traitement InSAR. Une analyse préliminaire d'une série temporelle d'images radar permet de déceler les paires d'images pouvant former les meilleures paires interférométriques. Il s'agit généralement de sélectionner les séries d'images ayant des géométries d'acquisition idéales et des erreurs de positionnement orbital faibles. La particularité du SBAS, tout comme les techniques plus anciennes (comme le D-InSAR), est d'être basée sur l'utilisation d'images dont la résolution a été diminuée, réduisant ainsi la variance locale et lissant ainsi le bruit. À partir des images co-registrées de basse résolution, une carte de différence de phases entre les deux images est produite, appelée interférogrammes. Après une éventuelle filtration de cette carte et l'application de corrections liées à des erreurs de parallaxe, la

phase est 'déroulée'. Cette étape permet de transformer un interférogramme dont les valeurs de différence de phase vont de $-\pi$ à $+\pi$, en une carte de déplacement en millimètres du mouvement entre les deux acquisitions formant les deux images d'un interférogramme.

Le PSI permet de suivre les variations des niveaux de sol renvoyant un signal de phase cohérent et stable. Il a l'avantage d'être utilisable à la résolution des 'cibles' c'est-à-dire des éléments au sol renvoyant le signal, tels les éléments durs (béton, métal) et anguleux (coins de bâtiments par exemple) présents au sol. Dans un premier temps, il est nécessaire d'identifier les points pour lesquels la phase est systématiquement renvoyée de manière puissante et cohérente. Deux critères sont identifiés pour la détection de ces cibles : la stabilité de l'amplitude du signal de retour et la cohérence interférométrique du signal de phase. Une fois les points au sol détectés (appelés 'Persistent Scatterers'), les valeurs de phase sont récupérées pour chaque acquisition et pour chaque point, créant une série temporelle de variations de la phase en chaque point.

Une technique d'inversion est ensuite appliquée, permettant de transformer les variations de la phase dans le temps ($-\pi$ à $+\pi$) en déplacements du niveau du terrain (en mm). À la différence du SBAS-InSAR, aucun lissage n'est appliqué. La résolution finale et la précision verticale est supérieure au SBAS-InSAR si les cibles au sol sont denses, comme c'est le cas en exploitation de carrière.

Conclusion général

L'occupation du milieu naturel par les végétaux suit étroitement le cycle des saisons. Les plantes annuelles, meurent chaque année en laissant des graines qui germeront au printemps suivant, exemple : le coquelicot. Les plantes vivaces, persistent tout au long de l'année, mais changent d'aspect, par exemple les arbres. Cependant, la création d'une exploitation de carrière a des conséquences néfastes sur le milieu naturel et représente un fardeau pour la réhabilitation de l'environnement.

A travers ce travail, nous avons abordé une méthodologie de calcul des déplacements causés par l'exploitation de LAFARGE, dans Djebel. Aoud Asma. Elle repose sur les techniques radars (PS ET SBAS), pour mettre en évidence les changements occasionnés dans cette zone pendant la période de 2003 à 2010 dues à l'exploitation de carrière.

Les données de l'interférométrie radar assurent une couverture cohérente et répétitive, qui peut en faire un moyen économique de surveillance des déplacements en cours d'évolution dans le temps. L'étude bibliographique traitée lors du présent travail a montré que l'interférométrie radar est un domaine où interfèrent deux méthodes (PS et SBAS). Les recherches sont toujours renouvelées par l'apport des satellites et capteurs radar de plus en plus évolués permettant les meilleurs résultats de déplacement.

L'imagerie RSO facilite le calcul de l'expression de la topographie dans le cadre de cette étude, c'est l'exploitation des carrières les résultats obtenus ont permis de connaître, pour la première fois et avec précision, le champ de déplacement induit par les gradins dans l'espace des carrières qui engendrent des évidences de rupture cosmiques claires sur le terrain. Par ailleurs, l'analyse et la modélisation des interférogrammes ont permis d'avoir de meilleures contraintes sur la distribution spatiale des déformations et d'observer des complexités non observées auparavant, et d'identifier les déplacements et leurs vitesses.

L'originalité du travail présenté, réside dans le fait qu'une interprétation plus cohérente et plus précise du déplacement vertical par l'image SAR est obtenue pour l'exploitation de carrière.

La méthode SBAS (Small BASeline Subset) proposée est générale et applicable à tout type de déformation du paysage. Selon l'application envisagée, les images d'entrée sont multi-dates, 31

images pendant la période de 2003 à 2010. Ce nombre de données SAR disponibles augmente la cohérence des interférogrammes.

L'introduction de la technique SBAS (Small BASeline Subset) et PS de l'interférométrie Radar et son application dans le domaine d'analyse de déplacement dû à l'exploitation de carrière a permis d'obtenir des densités de points de mesure très importantes, et d'effectuer un suivi temporel des déplacements du sol : les séries temporelles d'images interférométriques. Les résultats obtenus sont sous formes d'images multi-dates de déplacements verticaux et de leurs vitesses moyennes (de 0 à -30mm/an) avec une précision d'erreur de l'ordre de de 0.2 à 0.4mm/an, dans la carrière de Djebel .Aoud Asma. Des mécanismes de remise en état doivent être définis pour ces zones, exposés aux mouvements de masses. Un réaménagement écologique doit être appliqué ; afin de préserver les fréquentations et la visibilité du flanc du versant exploité. LAFARGE doit appliquer une gestion pérenne pour éviter l'isolement de ce milieu naturel.

La surface importante du changement régressif des versants de Djebel Aoud Asma implique une remise en état qui doit viser le retour à l'équilibre de l'écosystème, en tenant compte du climat, de la nature du substrat minéral et de la nouvelle topographie. Des aménagements pour la remise en état doivent être définis pour ces versants, exposés aux mouvements de masses dues à l'exploitation de carrière. Un réaménagement biologique doit être entrepris par LAFARGE ; afin de préserver la fréquentation et la visibilité du flanc du versant exploité et ceci pour éviter l'isolement de ce milieu naturel.

Bibliographie

- Akliouat H. : Développement d'un processus de formation d'images Radar SAR SLC à partir de données brutes. . Mémoire de Magister, université de Houari Boumediene USTHB, 2008.
- Antoine B : Amélioration et test d'une solution d'auscultation de terrain de champs de déformation complexes par intégration de données InSAR, GNSS et nivellement. MÉMOIRE d'ingénieur 2019.
- Aurélien A : Interférométrie radar : principes et utilisation dans la surveillance de la déformation du sol. Article sur internet publié le 29/01/2020.
- Bachir Belmehdi.f. : Etude comparative de l'érosion hydrique dans les Beni Chougrane, cas de Djebel Aoud Asma à exposition nord et Djebel Sidi Ali Cherif à exposition sud. Mémoire d'ingénieur. Option aménagement des milieux physiques. Université Oran, Senia 1998.
- Belabbes.S : Caractérisation de la déformation active par l'Interférométrie Radar (InSAR): Failles sismiques aveugles et cachées de l'Atlas Tellien (Algérie) et du Rif (Maroc) le long de la limite des plaques Afrique-Eurasie. Thèse Doctorat. Université Louis Pasteur-Strasbourg, 2008.
- Bentahar T. : Modélisation d'un Radar Interférométrique à déroulement de phase et correction des distorsions. Mémoire de Magister, université de Batna, 2006.
- Bougubina N. et Megsel. A: Utilisation de l'imagerie radar SAR dans l'étude de déformation de la zone de Beni Haroun. Pour l'Obtention du Diplôme d'ingénieur en sciences géodésique et travaux topographique : Petite échelle. Centre des techniques spatiales. Arzew. Algérie, 2017.
- C.D.T: Principes d'imagerie radar. Centre de Télédétection. Organisation des Nations Unis pour l'Alimentation et l'Agriculture, Rome, 1991.
- Cakir Z.: Analysis of the crustal deformation caused by the 1999 Marmara earthquake sequence using synthetic aperture radar interferometry, thèse IPGP,2003.

- Francesca C, Deodato T.J TALIAN SPACE AGENCY (ASI), SCIENTIFIC RESEARCH UNIT
Initiation imagerie radar (SAR) , 2019.
- Guillaso S. : Complémentarité polarimétrie/interférométrie pour la détection et la caractérisation de cibles. Thèse de doctorat, Université de Rennes 1, 2003.
- Hasni K. : Intégration de l'Interférométrie Radar (InSAR) et la Technique de positionnement GPS pour les études de déformation. Mémoire de Magister, centre national des techniques spatiales CNTS, 2006.
- Hasni. K. : Compensation of inosphoric effets in spaceborne differential lasar imaging for earthquake monitoring. Beihang Universiting. Pekin, Chine 2017.
- Johann CH. : Caractérisation des déformations tectoniques inter-sismiques de l'île de Taiwan par interférométrie radar, Thèse Doctorat de l'université paris -est marne- la -vallée, 2011.
- Kaveh H. : Apport de l'interférométrie radar (DinSAR et PSI) pour l'étude des effets de la sécheresse géotechniques : applications à l'Est de la région Île-de-France. Université Paris-Est, 2010 .
- Massonnet D., et Feigl, K. L.: Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface, *Reviews of Geophysics*, 36, 441-500, 1998.
- Meghraoui, M., Maouche, S., Chemaa, B., Cakir, Z., Aoudia, A., Harbi, A., Alasset, P.-J., Ayadi, A., Bouhadad, Y., et Benhamouda, F.: Coastal uplift and thrust faulting associated with the Mw=6.8 Zemmouri (Algeria) earthquake of 21 may 2003, *Geophys. Res. Letters*, 2004.
- Naimi M.N : La plate-forme carbonatée messénienne du Djebel Aoud Asma (Monts des Ouled Ali, Bassin du Bas Chélif) : sédimentologie et géochimie. Mémoire de master.
- Pathier E. : Apports de l'interférométrie radar différentielle à l'étude de la tectonique active de Taiwan. Thèse de doctorat, Université de Marne-la-Vallée, 2003.
- Ramont F.H : RADAR INTERFEROMETRY, Data Interpretation and Error Analysis. Print 2001 by Kluwer Academic Publishers.

Simonetto E., Fruneau B. et Raucoules D. : Principes de l'interférométrie d'images radar pour la mesure de la topographie et des déplacements du sol et avancées récentes. Article publié le 2020-01-19, France.

Tinthoin R. : Les monts des Ouled-Ali esquisse morphologique En : Annales de Géographie, t. 46, n°262, 1937. pp. 374-389.