

**UNIVERSITE DE LIEGE**  
**FACULTE DES SCIENCES**



**Phasimétrie par Radar à Synthèse d'Ouverture;  
théorie et applications**



Année académique  
1998-1999

Thèse présentée en vue de  
l'obtention du grade de  
Docteur en Sciences Physiques  
par  
Dominique Derauw



## **REMERCIEMENTS**

Cette thèse, j'ai pu la réaliser dans des conditions de travail que je peux qualifier d'exceptionnelles et que tout doctorant est en droit de m'envier. Je voudrais donc à adresser mes remerciements les plus sincères au Dr. Claude Jamar, Directeur Général du Centre Spatial de Liège, pour m'avoir offert, non seulement, l'opportunité d'effectuer une thèse, mais également le milieu de travail pour la réaliser.

Merci à Pierre Rochus, Directeur du département R&D du CSL, pour avoir maintenu une dynamique de recherche au sein du département.

Je tiens à remercier, tout particulièrement, le Dr. Christian Barbier qui m'a suivi, encouragé et conseillé durant ces quelques années. C'est à lui que je dois d'avoir pu travailler sur ce sujet passionnant qu'est la phasimétrie SAR. Il mérite plus d'une bière spéciale de son choix pour la patience dont il a fait preuve lors de la relecture de nombreux rapports et articles à l'orthographe approximative.

D'autres personnes, par téléphone ou par e-mail interposé, ont dû faire face à un flot de questions ou de demandes de conseils que j'ai pu leur adresser avec une opiniâtreté frisant l'acharnement. Le Dr. Didier Massonnet, du CNES, et le Professeur Howard Zebker, du JPL, sont du nombre. Je les remercie pour m'avoir à chaque fois répondu avec patience et justesse.

Ce travail m'a permis d'aborder des terres qui m'étaient inconnues. J'ai pu, de ma station de travail, visiter la Belgique, les Alpes, la Sardaigne, la Calabre, les abords de la Mer Morte, le sud Soudan, la Tanzanie, les Philippines, la Chine, l'Equateur, le Grand Nord canadien, la Californie, l'Australie et même l'Antarctique. A chacune de ces visites, une bonne âme a guidé mes pas au travers des diverses applications thématiques qui m'ont permis d'explorer la phasimétrie SAR. Que mes nombreux guides soient ici remerciés.

Ce travail a été réalisé dans le cadre de divers projets de recherche et de développement en interférométrie SAR. Ces projets ont été financés soit par les Services Fédéraux des Affaires Scientifiques, Techniques et Culturelles (SSTC), soit par l'ESA, dans le cadre des projets PRODEX et DUP.

Dans ce festival de remerciements, je tiens à décerner la Palme d'Or à mon épouse. Elle a cru en moi, ce qui au vu des premiers résultats obtenus n'était pas évident. Elle a su montrer également un réel intérêt pour le travail que j'ai effectué. On ne saurait trouver meilleur encouragement.

Enfin, je dédie ce travail à mes quatre filles, Lucie, Camille, Elise et Valentine qui n'en feront probablement aucun usage contrairement à celui que je réserve à leurs porte-crayons, porte-clefs et autres colliers de nouilles.

S'il était encore de ce monde, ce serait avec une réelle fierté que je remettrais ce document entre les mains de mon grand-père.

Merci à tous.



## **RESUME**

La phasimétrie SAR regroupe toutes les techniques faisant appel au contenu en information de la phase des images obtenues par les radars à synthèse d'ouverture. Trois domaines de la phasimétrie ont été développés et explorés. Il s'agit de l'interférométrie, l'interférométrie différentielle et les mesures de cohérence.

Dans un premier temps, pour chacun de ces domaines, les algorithmes et logiciels nécessaires ont été développés. L'interféromètre ainsi produit a été testé et validé en utilisant les sites et données de références choisies par le groupe FRINGE de l'Agence Spatiale Européenne (ESA).

Comparativement aux interféromètres présentés dans la littérature, celui développé durant ce travail possède ses spécificités propres. Nous avons notamment développé un interpolateur complexe particulièrement bien adapté à l'interférométrie SAR. De plus, pour augmenter la fiabilité du déroulage de phase, la méthode classique, dite des résidus, a été adaptée de manière à tenir compte de la cohérence locale dans les interférogrammes SAR.

La souplesse de l'interpolateur permet de coregistrer aisément plusieurs paires d'images. Ceci a permis entre autres, de mettre au point l'interférométrie différentielle à quatre images et la combinaison de bases interférométriques.

Nous avons mené ou participé à diverses études qui nous ont permis de qualifier la phasimétrie SAR, ou d'étudier l'apport d'information qu'elle offrait, dans différentes disciplines. Une étude approfondie de la topographie interférométrique a été réalisée. Nous nous sommes attachés à déterminer et à quantifier les sources d'erreurs et à analyser les données annexes indispensables pour palier ou éviter celles-ci.

L'apport de la phasimétrie a également été analysé dans des disciplines variées, telles la tectonique, l'agronomie et la glaciologie. Pour certaines de ces disciplines, l'interféromètre a été modifié, ou des modules spécifiques ont été développés, pour optimiser l'apport d'information offert par la phasimétrie dans la discipline concernée.



## **ABSTRACT**

SAR Phasimetry gathers all the techniques that use the information content of the phase in SAR images. Three fields of SAR phasimetry were developed and explored: interferometry, differential interferometry and coherence measurements.

For each these fields, the required algorithms and software were developed. The implemented interferometer was tested and validated by using the test-sites and data chosen as references by the FRINGE group of the European Space Agency.

Compared to the interferometers presented in the literature, the interferometer developed during this work has its own specificities. In particular, we developed a complex interpolator particularly well adapted to SAR interferometry. Moreover, to increase the reliability of phase unwrapping, the traditional residues method was adapted so as to take into account the local coherence in SAR interferograms.

The flexibility of the interpolator allows to easily coregister several pairs of images. This permitted, amongst other things, to develop four-images differential interferometry as well as the interferometric baseline combination.

We led or took part to various studies which enabled us to qualify SAR phasimetry, or to study the contribution of information it offered, in various application fields. An extensive study of InSAR topographic mapping was carried out. We determined and quantified the sources of errors and we analyzed the ancillary data needed to select the best suited interferometric data for the application under concern.

The contribution of SAR phasimetry was also analyzed in tectonics, agronomy and glaciology. For some of these application fields, the interferometer was modified, or specific software modules were developed, to optimize the information supplied by SAR phasimetry in each application field.



# **TABLE DES MATIERES**

I Introduction .....	1
II Phasimétrie: Principes et état de l'art .....	5
II.1 L'interférométrie par radar à synthèse d'ouverture (InSAR) .....	5
II.1.1 Introduction .....	5
II.1.2 Schéma de principe .....	5
II.1.3 Génération de l'interférogramme .....	7
II.1.3.1 Extraction de l'altitude .....	9
II.1.3.2 Développement en série .....	9
II.1.4 Remarques: .....	11
II.2 L'interférométrie SAR Différentielle (DInSAR) .....	11
II.2.1 Introduction .....	11
II.2.2 Principe.....	13
II.2.3 Interférométrie différentielle à trois images .....	14
II.3 Traitement interférométrique.....	14
II.3.1 Coregistration .....	15
II.3.2 Génération de l'interférogramme .....	15
II.3.2.1 Estimation de la phase interférométrique.....	16
II.3.3 Déroulement de la phase et extraction de l'altitude .....	16
II.3.3.1 Définition du problème .....	16
II.4 Faisabilité .....	17
II.4.1 Estimation de la cohérence .....	18
II.4.1.1 Remarque .....	19
II.4.2 Décorrélation .....	19
II.4.2.1 Décorrélation géométrique.....	19
II.4.2.2 Décorrélation temporelle.....	20
II.4.2.3 Bruit thermique et décorrélation due au traitement .....	21
II.4.3 Remarque.....	21
III Développement et validation d'un processeur InSAR/DInSAR .....	23
III.1 Traitement InSAR.....	23
III.1.1 La coregistration .....	23
III.1.1.1 Prédécoupage .....	23
III.1.1.2 Détermination de la transformation bilinéaire de coordonnées .....	24
III.1.1.3 Interpolation .....	27
III.1.2 Génération de l'interférogramme .....	33
III.1.2.1 Retrait de la phase orbitale.....	33
III.1.2.2 Interférogrammes moyennés.....	34
III.1.2.3 Filtrage.....	36
III.1.3 Déroulement de la phase et extraction de l'altitude .....	38
III.1.3.1 Définition du problème.....	38
III.1.3.2 Méthode des résidus .....	38
III.1.3.3 Connexion de résidus guidée par la cohérence .....	40
III.1.3.4 Génération du MNT.....	47

III.1.4 Calculs d'erreur .....	49
III.1.4.1 Rayon terrestre .....	49
III.1.4.2 Position du satellite.....	49
III.1.4.3 Position en portée dans l'image maîtresse.....	50
III.1.4.4 Phase.....	50
III.1.4.5 Base interférométrique.....	51
III.1.4.6 Conclusion .....	52
III.2 Traitement DInSAR.....	53
III.2.1 Interférométrie différentielle à quatre images .....	53
III.2.2 Procédure.....	53
III.2.2.1 Transposition de géométrie.....	54
III.2.2.2 Remarques.....	54
III.2.2.3 Landers.....	56
III.3 Combinaison de bases interférométriques .....	58
III.3.1 Exemples .....	58
III.4 Conclusions .....	60
 IV Topographie	63
IV.1 Pre-étude .....	63
IV.1.1 Site test.....	63
IV.1.2 Données annexes .....	64
IV.1.2.1 Ouverture de la base interférométrique .....	65
IV.1.2.2 Données météorologiques.....	65
IV.1.2.3 Couvert végétal et caractéristiques des sols.....	68
IV.1.3 Evaluation globale .....	68
IV.2 Validation.....	69
IV.2.1 Référence topographique .....	69
IV.2.2 Traitement interférométrique .....	69
IV.2.3 Comparaisons .....	70
IV.2.3.1 Exemple 1 .....	71
IV.2.3.2 Exemple 2: zones urbaines .....	75
IV.2.4 Analyse de cohérence .....	76
IV.2.4.1 Cartes thématiques .....	77
IV.2.4.2 CORINE .....	77
IV.2.4.3 Photos aériennes.....	77
IV.3 Conclusions .....	78
 V Tectonique	79
V.1 Jordanie: phase différentielle et artefacts atmosphériques.....	79
V.1.1 Interprétation de l'interférogramme différentiel .....	81
V.1.2 Détermination de l'image perturbée.....	82
V.1.3 Origine des franges différentes.....	83
V.1.3.1 Déplacement.....	83
V.1.3.2 Artefacts atmosphériques.....	84
V.1.4 Conséquences .....	85
V.2 Jordanie: MNT .....	86
V.3 Détection de mouvements lents.....	89
V.4 Conclusions .....	92

VI Agronomie	93
VI.1 Objectifs.....	93
VI.1.1 Site test et données utilisées.....	93
VI.2 Traitements.....	94
VI.3 Etude du contenu en information de la cohérence .....	97
VI.3.1 Evaluation du taux d'humidité.....	97
VI.3.2 Hauteur des cultures .....	99
VI.4 Conclusions.....	99
VII Glaciologie	101
VII.1 Principe de mesure .....	101
VII.1.1 Remarque .....	102
VII.2 Shirase .....	102
VII.2.1 Suivi de cohérence .....	104
VII.2.1.1 Mesures de déplacements par suivi de cohérence.....	105
VII.2.1.2 Interférogramme de suivi .....	110
VII.2.1.3 Paires Tandem d'avril et mai .....	111
VII.3 Précision de la coregistration.....	115
VII.4 Conclusions.....	117
VIII Conclusions	119



## **I INTRODUCTION**

La phasimétrie SAR (*Synthetic Aperture Radar*) regroupe toutes les techniques de mesures basées sur le contenu en information de la phase dans les images obtenues par les radars à synthèse d'ouverture. Trois domaines connexes de la phasimétrie SAR ont été développés et étudiés dans le cadre de la présente thèse. Il s'agit de l'interférométrie (InSAR), de l'interférométrie différentielle (DInSAR) et des mesures de cohérence.

L'interférométrie radar a d'abord été utilisée lors d'observations de Vénus, à partir d'antennes au sol, pour séparer l'ambiguïté des échos radar issus des hémisphères nord ou sud [Rogers & Ingalls 1969]. Par la suite, des données d'élévation ont été obtenues sur base d'observations interférométriques de la Lune [Zisk 1971] et de Vénus [Rumsey & al. 1974]. L'interférométrie réalisée à partir d'images acquises par radar à synthèse d'ouverture a, quant à elle, été proposée et démontrée pour la première fois dans les années septante [Graham 1974]. Sur base d'images SAR aéroportées acquises simultanément, des franges d'interférence modulées par la topographie de la scène avaient pu être observées. Par la suite, ce sont des chercheurs du *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) qui ont étudié la faisabilité de la génération de Modèles Numériques de Terrain (MNT) par interférométrie SAR. Cette faisabilité a été démontrée aussi bien à partir d'images acquises par des radars aéroportés que spatioportés [Zebker & Goldstein 1986; Goldstein & al. 1988]. La génération de MNT constitue l'application principale de l'interférométrie SAR.

Comme dans toute technique interférométrique, la cohérence entre les deux signaux utilisés doit être conservée pour pouvoir générer une figure d'interférence. La mesure de la cohérence fut donc initialement utilisée comme indicateur de qualité lié à la précision des modèles numériques de terrain produits [Li & Goldstein 1990]. Actuellement, de nombreuses études tentent de relier la perte ou la conservation de la cohérence à des caractéristiques physiques de la scène observée (type de couvert végétal, humidité du sol, hauteur des cultures, ...). L'interprétation de la mesure de cohérence entre deux scènes SAR est devenue une technique de phasimétrie à part entière.

Lorsque les deux scènes SAR que l'on fait interférer sont issues d'acquisitions non pas simultanées mais différées, outre la topographie, d'autres paramètres tels des mouvements locaux du relief influencent la figure d'interférence. L'interférométrie SAR différentielle a pour but de soustraire la composante de phase topographique de l'interférogramme pour ne conserver que la composante de phase due aux mouvements ou à toute autre variation du chemin optique. Dans son principe, la méthode a été développée par le JPL [Goldstein & Zebker 1987; Goldstein & al. 1989; Gabriel & al. 1989]. Une démonstration magistrale du potentiel de la méthode a été réalisée par le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES). Les chercheurs du CNES ont mis en évidence des franges interférométriques de déplacement résultant du tremblement de Terre de *Landers* (Californie, juin 1992) [Massonnet & al. 1993].

Toutes ces techniques relativement récentes ont connu des développements considérables grâce notamment à la mise sur orbite de satellites scientifiques principalement dédiés à l'imagerie SAR.

SEASAT, lancé le 28 juin 1978 par la NASA et géré par le JPL, fut le premier satellite civil dédié à l'observation des océans et ayant à son bord le premier SAR spatioporté. Malgré une durée de vie très courte (105 jours), le nombre de scènes SAR acquises au-dessus du continent américain fut suffisant pour permettre de démontrer

## *Chapitre I*

la faisabilité de l'interférométrie SAR spatioportée.

Par la suite, les missions SIR-B (1984) et SIR-C/X-SAR (1994) de la navette spatiale américaine ont permis de tester l'imagerie et l'interférométrie SAR selon différents modes d'acquisition. Dans le cas de SIR-B, le SAR embarqué permettait de faire varier l'angle d'incidence de 15 à 60 degrés. Le SAR embarqué pour les missions SIR-C permettait en plus de choisir la bande de fréquence (L, C ou X) et la polarisation d'émission et de réception.

Lancé en juillet 1991 par l'Agence Spatiale Européenne (ESA), le satellite ERS-1 (*European Environmental Remote Sensing Satellite*) contient divers instruments d'observation des terres et des océans dans le domaine des micro-ondes dont un radar à synthèse d'ouverture en bande C. Il fonctionne à une fréquence porteuse fixe, sous un angle d'incidence et une polarisation fixes. La quantité impressionnante de scènes SAR acquises jusqu'à présent a permis à la communauté scientifique d'investiguer de multiples aspects de l'imagerie SAR en général et de la phasimétrie en particulier. La base de données ainsi constituée a justifié la mise sur pied d'un groupe appelé FRINGE et constitué de scientifiques de diverses institutions développant des techniques d'interférométrie SAR. Prévu initialement pour fonctionner durant quatre ans, ERS-1 est actuellement maintenu en état de veille et réactivé trois jours par mois pour maintenance.

Le 20 avril 1995, l'ESA a lancé le satellite ERS-2 dont le SAR est identique à celui d'ERS-1. La longévité exceptionnelle de ERS-1 a permis le fonctionnement en tandem des deux satellites européens lancés l'un derrière l'autre sur la même orbite à un jour d'intervalle. Cette périodicité de revisite qui minimise le risque de décorrélation temporelle a permis de constituer une base de données contenant un nombre impressionnant de paires interférométriques et couvrant la majeure partie du globe. La réactivation mensuelle de ERS-1 permet encore actuellement d'acquérir des paires Tandem sur des sites le justifiant.

La plate-forme ENVISAT, dont le lancement est prévu pour novembre 1999, comportera, entre autres instruments d'observation de la Terre, un SAR multimode. Il pourra notamment fonctionner en mode SCANSAR. En mode SAR «classique», sept faisceaux d'incidences différentes seront disponibles selon 4 modes de polarisation émission/réception distincts. L'un de ces modes est similaire au fonctionnement des SAR embarqués par les satellites ERS, ce qui permettra une couverture SAR quasi complète de la planète sur une durée totale de 15 ans.

Entre autres SAR spatioportés, on peut encore signaler le satellite japonais J-ERS1 lancé en février 1992 et le satellite canadien RADARSAT lancé en novembre 1995.

Dans les premières années de son développement, l'interférométrie et plus généralement la phasimétrie SAR a été utilisée comme outil performant dans de nombreuses applications phares. Cependant, ces applications avaient bien souvent pour but de démontrer le potentiel que constitue la phasimétrie SAR. De ce fait, ces démonstrations ont été réalisées dans des conditions que l'on peut actuellement considérer comme idéales par rapport aux exigences de la technique. Il en a résulté parmi les utilisateurs en télédétection l'impression générale que la phasimétrie SAR constituait la panacée.

Depuis quelques années, la communauté scientifique s'attache à démontrer non seulement le potentiel de la phasimétrie SAR mais aussi ses limites pour permettre de mieux cibler les champs d'applications de cette technique. Les aspects faisabilité et qualité sont explorés de manière à pouvoir transférer la phasimétrie SAR du domaine de la recherche vers le monde industriel et la distribution de services aux utilisateurs potentiels. Petit à petit, la phasimétrie SAR acquiert la place qui est la sienne: une

technique puissante ayant ses avantages et ses inconvénients, venant en complément d'autres méthodes, avec ses champs d'applications propres et nécessitant l'apport d'autres sources d'information pour être opérationnelle et fiable.

C'est dans cet esprit que le présent document a été rédigé. Dans un premier temps, nous avons développé un interféromètre SAR dont nous avons démontré les performances au niveau qualitatif et quantitatif en reproduisant des résultats considérés comme références par le groupe FRINGE.

Ensuite, dans le cadre d'applications diverses, nous avons étudié et analysé le potentiel de la phasimétrie SAR. Nous nous sommes attachés à déterminer et quantifier les sources d'erreurs et à analyser les données annexes indispensables pour palier ou éviter celles-ci. A l'issue de ces travaux, certains aspects de la phasimétrie, notamment la génération de MNT par interférométrie SAR, ont acquis une maturité suffisante pour passer dans le domaine industriel et fournir un service aux utilisateurs. Dans la première partie de ce travail, nous nous attacherons à présenter l'état de l'art de la phasimétrie SAR. La deuxième partie présentera le processeur d'interférométrie SAR que nous avons développé. Nous insisterons plus particulièrement sur les apports personnels et les spécificités de notre interféromètre. La troisième partie présentera quelques applications concrètes de la phasimétrie SAR.

Ce travail a été réalisé dans le cadre de divers projets de recherche et de développement en interférométrie SAR. Ces projets ont été financés soit par les Services Fédéraux des Affaires Scientifiques, Techniques et Culturelles (SSTC), soit par l'ESA:

*Démonstration et évaluation de l'interférométrie par radar à ouverture synthétique.* Contrat N°T3/12/012 financé par les SSTC dans le cadre du programme de recherche TELSAT III.

*Interférométrie radar: MNT et détection des changements de surface; validation dans le cadre d'études sismiques.* Contrat N°T3/12/32 financé par les SSTC dans le cadre du programme de recherche TELSAT III.

*Validation de l'interférométrie SAR appliquée aux images JERS-1 et RADARSAT.* Contrat N°T4/DD/014 financé par les SSTC dans le cadre du programme de recherche TELSAT IV.

*An assessment of SAR phasimetry by case study in tectonics and agronomy* (P.I.). Contrat PRODEX Tandem B302 financé par les SSTC, en réponse à l'appel d'offre Tandem de l'ESA.

*Surface velocities and ice dynamics inferred from ERS-1 and 2 SAR differential interferometry* (Co.I). Contrat PRODEX Tandem B303 financé par les SSTC, en réponse à l'appel d'offre Tandem de l'ESA.

*Geomorphological and tectonic interpretation of a high resolution SAR interferometric DTM* (Co.I.). Contrat PRODEX Tandem B304 financé par les SSTC, en réponse à l'appel d'offre Tandem de l'ESA.

*Spatial organization of hydrological processes in small catchments derived from advanced SAR image processing.* (Co.I.). Contrat PRODEX Tandem B305 financé par les SSTC, en réponse à l'appel d'offre Tandem de l'ESA.

*Quality assessment of InSAR topographic mapping.* Contrat ESRIN N° 12159/96/I-HGE dans le cadre du "Data User Program (DUP)".



## **II PHASIMETRIE: PRINCIPES ET ETAT DE L'ART**

### **II.1 L'INTERFEROMETRIE PAR RADAR A SYNTHESE D'OUVERTURE (INSAR)**

#### **II.1.1 Introduction**

Quel que soit le domaine d'application, l'interférométrie consiste à mesurer des différences de chemin optique relatives entre deux fronts d'ondes cohérents. En interférométrie SAR, le but de cette mesure est l'obtention de la troisième dimension des scènes observées pour générer des modèles numériques de terrain (MNT). Les images SAR focalisées pouvant être considérées comme les fronts d'ondes rétrodiffusés au niveau de la scène éclairée par l'antenne synthétique, deux images d'une même scène sont superposées pour générer un interférogramme [Zebker & Goldstein 1986].

Pour assurer la cohérence des deux fronts d'ondes, les deux images doivent avoir été acquises selon des géométries de prises de vues similaires et les caractéristiques de la scène vis-à-vis de la rétrodiffusion radar ne peuvent avoir changé entre les deux acquisitions [Li & Goldstein 1990].

Dans le cas de l'interférométrie SAR aéroportée, ces deux conditions sont assurées intrinsèquement par le mode d'acquisition: Les images sont acquises simultanément par deux antennes (dont l'une est émettrice réceptrice) placées à quelques mètres l'une de l'autre sur un axe perpendiculaire à la ligne de vol et observant la scène sous des incidences proches.

Par contre, dans le cas de l'interférométrie spatioportée qui nous occupe ici, la première condition nécessite une très bonne répétitivité des orbites. Comme nous le verrons, celles-ci doivent être quasi parallèles et séparées tout au plus de quelques centaines de mètres. La remarquable fiabilité des plates-formes ERS permet de satisfaire cette condition pour de très nombreuses paires d'acquisitions. La seconde condition, quant à elle, n'est a priori jamais satisfaite puisque les acquisitions ne sont pas simultanées mais consécutives. Même la mission Tandem qui assure une période de revisite de 1 jour au-dessus d'une zone donnée ne permet pas de garantir la stabilité de la scène vis-à-vis de la rétrodiffusion radar.

#### **II.1.2 Schéma de principe**

En interférométrie SAR spatiale, deux images d'une même scène sont acquises par le même senseur radar (ou par deux senseurs différents dans le cas de la mission Tandem ERS-1/ERS-2) depuis deux trajectoires voisines lors de deux passages successifs au-dessus de la même zone (figure II.1). Ce procédé de double prise de vue, imposé par des contraintes technologiques autant que par des contraintes de coût, est rigoureusement équivalent au procédé fondamental (deux antennes réceptrices sur le même véhicule), pour autant que la scène n'ait pas changé entre les deux passages.

Les images SAR sont des images complexes au sens mathématique du terme. Pour chaque pixel, on possède une information d'amplitude, directement liée à la réflectivité et à la géométrie de la zone observée, et une information de phase contenant un terme proportionnel au chemin optique parcouru par l'onde radar entre le

### Chapitre III

senseur et le point observé [Zebker & Goldstein 1986] ainsi qu'un terme de phase dû à la rétrodiffusion.

On appelle "Base interférométrique", la distance **B** séparant les deux satellites quand ils imagent le même point. Par convention, l'une des deux images sera considérée comme l'image maîtresse, c'est-à-dire, l'image dont la géométrie de prise de vue sera considérée comme référence. Nous appellerons portée (*range*), la distance entre le senseur et un point observé. C'est suivant les coordonnées portée-azimut de cette image que le MNT sera calculé. L'autre image sera appelée l'image esclave.  $z_1$  est la portée au point observé P dans l'image maîtresse et  $z_2$  est la portée au point P dans l'image esclave.  $R_t$  est le rayon terrestre ou, plus généralement, la distance entre le centre de la Terre et la projection orthogonale du point cible P sur le géoïde. S est la distance entre la position du satellite sur la première trajectoire et le centre de la Terre.  $a_t$  est appelé l'angle terrestre.

Nous avons considéré dans la figure II.1 que les segments de droite S,  $z_1$  et  $z_2$  étaient coplanaires. Ceci n'est plus vrai lorsque les trajectoires ne sont pas parallèles ou lorsque les angles de visées latérales (*squint*) selon lesquels les images sont focalisées ne sont pas identiques. Dans le cas des satellites actuellement en orbite polaire, les acquisitions sont réalisées par un seul senseur. La répétitivité des orbites nous assure que le satellite repasse au-dessus d'une même zone à intervalle régulier et selon la même trajectoire par rapport à la Terre. Dès lors, les deux trajectoires peuvent en général être considérées comme parallèles car il s'agit en fait de la même orbite à des moments différents. Le contrôle d'attitude des plates-formes d'observation de la Terre assure en général une très bonne stabilité des orbites. Dans le cas de la mission Tandem, la répétitivité des orbites est telle que le non-parallélisme peut être négligé en très bonne approximation. Cette source d'erreur sera discutée ultérieurement. De plus, comme les images ERS sont focalisées autour d'une fréquence Doppler nulle de manière à obtenir une image de la scène observée perpendiculairement à la ligne de vol, nous pouvons considérer que la coplanarité de S,  $z_1$  et  $z_2$  est satisfaite.

Lorsque les deux images ne sont pas focalisées autour d'une même fréquence Doppler (*Doppler centroid*), elles devront être refocalisées autour d'une fréquence Doppler médiane. Ceci permettra de générer des images de la scène vue sous un même angle, restaurant ainsi le parallélisme recherché, mais au prix d'une perte de résolution azimutale (seules, les parties communes aux deux spectres azimutaux seront prises en compte pour la refocalisation des images) [Gabriel & Goldstein 1988; Just & Bamler 1994].

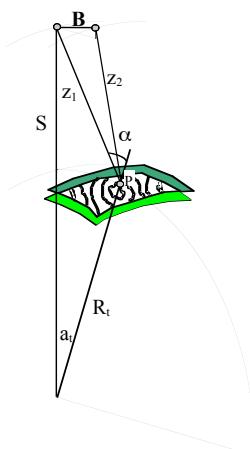


Figure II.1  
Géométrie de prise de vue d'une paire interférométrique spatioportée.

La figure II.2 représente le schéma d'acquisition d'une paire interférométrique dans le plan d'élévation incluant les portées  $z_1$  et  $z_2$ .

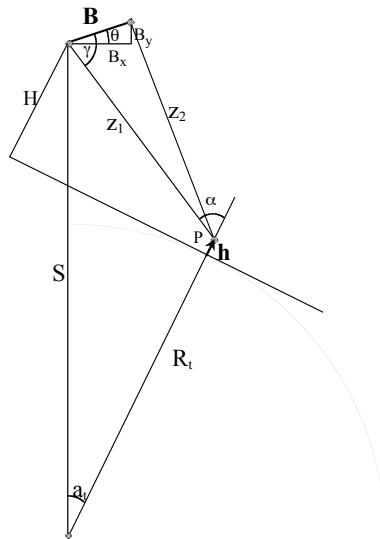


Figure II.2  
Géométrie de prise de vue d'une paire interférométrique dans le plan d'élévation.

### II.1.3 Génération de l'interférogramme

Les données SAR focalisées étant complexes, nous pouvons utiliser le formalisme suivant:

Si on appelle  $P_1(x, z_1)$  la valeur complexe du point P dans la première image, et  $P_2(x, z_2)$  la valeur complexe du point P dans la seconde, alors:

$$\begin{cases} P_1(x, z_1) = |P_1(x, z_1)| e^{-jk_{z_0}z_1} e^{j\psi_1(x, z_1)} \\ P_2(x, z_2) = |P_2(x, z_2)| e^{-jk_{z_0}z_2} e^{j\psi_2(x, z_2)} \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

Où:  $|P_i(x, z_i)|$  est l'amplitude du signal rétrodiffusé dans l'image i.

$k_{z_0}z_i$  est la phase de transport du signal, c'est-à-dire, la phase relative au chemin optique parcouru. Ce terme de phase dépend donc de la distance entre l'antenne et le point observé.  $k_{z_0} = 2\frac{\omega_0}{c} = 2\frac{2\pi}{\lambda}$  est le nombre d'onde du signal (le facteur 2 tient compte du trajet aller-retour), avec  $\omega_0 = 2\pi\nu$ ,  $\nu$  étant la fréquence porteuse du signal radar et  $\lambda$ , la longueur d'onde.

$\psi_i$  est la phase de reconstruction générée par la réponse de chaque diffuseur au sein du pixel considéré. La contribution de chaque diffuseur dépendra à la fois de sa position et du coefficient complexe de rétrodiffusion  $\sigma_0$ .

L'interférogramme, ou figure d'interférence, est l'image d'intensité issue de la superposition des deux fronts d'ondes:

$$|P_1(x, z_1) + P_2(x, z_2)|^2 = |P_1|^2 + |P_2|^2 + P_1 P_2^* + P_1^* P_2 \quad (\text{II.2})$$

### Chapitre III

Dans l'expression précédente, seuls les termes croisés nous intéressent pour la génération d'un MNT. En effet, ce sont eux qui portent l'information de phase relative à la différence de chemin optique:

$$P(x, z_1)P_2^*(x, z_2) = |P(x, z_1)|P(x, z_2)e^{ik_{z_0}(z_2 - z_1)}e^{j(\psi_1(x, z_1) - \psi_2(x, z_2))} \quad (\text{II.3})$$

Le premier terme de phase dépend des variations de chemin optique entre les deux acquisitions. Ces variations ont diverses origines. En l'absence de relief, l'observation de la scène sous deux angles de vue différents, induits par la base interférométrique, générera un terme de phase variant continûment avec la portée. C'est ce qu'on appellera la phase orbitale. Tout relief sur le géoïde perturbera la phase orbitale et induira une composante de phase appelée la phase topographique. Lorsque les deux acquisitions ne sont pas simultanées, d'autres variations de chemin optique peuvent être induites par un déplacement de la cible ou par une variation d'indice de réfraction de l'atmosphère traversée. En toute généralité, nous appellerons le terme de phase induit par ces phénomènes, la phase différentielle.

Le second terme de phase contient les différences entre les phases de reconstruction. Ce second terme n'est a priori pas nul. Les deux observations étant faites sous deux angles d'incidences différents, les positions relatives des diffuseurs au sein du pixel diffèrent, induisant une décorrélation du *speckle*. Cette source de décorrélation sera appelée la décorrélation géométrique. De plus, lorsque les acquisitions ne sont pas simultanées, la distribution des diffuseurs peut varier avec le temps, induisant également une décorrélation des phases de reconstruction. C'est ce qu'on appelle la décorrélation temporelle.

Des variations locales de la constante diélectrique dans la scène observée peuvent également influencer la phase dans l'interférogramme [Massonnet 1994 ; Hanssen & Usai 1997; Rudant & al. 1997]. Ces variations peuvent se traduire soit par un biais de phase local s'il s'agit d'une variation cohérente pour l'ensemble des diffuseurs concernés, soit par une décorrélation des phases de reconstruction si ces variations induisent un changement dans la distribution des diffuseurs. Dans le premier cas, le biais de phase sera interprété erronément comme une variation de chemin optique. Dans le second cas, cette source de décorrélation viendra se rajouter aux autres sources de décorrélation temporelle.

Nous supposerons pour l'instant que les diffuseurs de la scène se comportent de manière identique lors des deux acquisitions. Nous supposerons également que les conditions d'acquisition sont identiques. En d'autres mots, nous supposerons que les deux fronts d'ondes sont parfaitement cohérents et que les phases de reconstruction s'annulent. Dans ces conditions, la phase dans l'interférogramme dépendra uniquement de la différence de chemin optique parcouru lors des deux acquisitions. De plus, pour montrer la dépendance de la phase en fonction du relief, nous supposerons pour l'instant que la phase différentielle est également nulle.

A l'opposé de l'interférométrie "classique", où l'on ne possède que l'image en intensité de la superposition des fronts d'ondes (éq. II.2), en interférométrie SAR, on possède une connaissance complète de chaque terme indépendamment. Dès lors, nous appellerons "interférogramme", l'image de phase seule. Soit:

$$\Delta\varphi = k_{z_0}(z_2 - z_1) \quad (\text{II.4})$$

Etant donné que cette phase est calculée à partir d'un nombre complexe, elle ne peut

être déterminée que modulo  $2\pi$ . L'interférogramme SAR montrera donc des franges d'interférence et ce, même si la scène observée ne montre aucun relief. En effet, on constate dans le cas présenté à la figure II.2 que si on déplace le point P sur une sphère terrestre lisse vers les portées croissantes, la différence de chemin optique  $|z_2 - z_1|$  augmente continûment. Dès lors, en l'absence de relief, l'interférogramme SAR montrera des franges parallèles à la direction azimutale.

### **II.1.3.1 Extraction de l'altitude**

A partir de la géométrie simple définie à la figure II.2, on peut établir la relation qui lie l'altitude d'un point au-dessus de la sphère terrestre et la phase  $\Delta\varphi$  de ce point dans l'interférogramme [Derauw & Moxhet 1996]:

Le triangle de côtés S,  $z_1$  et  $(R_t + h)$  nous donne:

$$(R_t + h)^2 = S^2 + z_1^2 - 2Sz_1 \cos(\alpha - a_t) \quad (\text{II.5})$$

Cette relation nous permet de calculer l'altitude d'un point au-dessus de la sphère terrestre ou au-dessus d'un géoïde.  $z_1$  n'est autre que la coordonnée en portée du point P dans l'image maîtresse.  $R_t$  est connu en fonction de la localisation de la scène. Dans notre cas, nous avons choisi d'utiliser le rayon terrestre au centre de la scène et de calculer le MNT au-dessus d'une Terre sphérique. S est issu des données trajectographiques du satellite. En effet, les fichiers images ERS contiennent, entre autres données orbitales, cinq vecteurs d'état du satellite (position et vitesse) dans un référentiel géocentré.

Pour calculer l'altitude d'un point à partir de l'équation (II.5), il nous faut déterminer l'angle  $(\alpha - a_t)$ . Celui-ci s'obtient par le biais de l'interférométrie. En effet, le triangle de côtés  $z_1$ , B et  $z_2$  nous donne:

$$z_2^2 = z_1^2 + B^2 - 2z_1B \cos(\gamma) \quad (\text{II.6})$$

où:

$$\alpha - a_t = \frac{\pi}{2} - \gamma + \theta \quad (\text{II.7})$$

Si les paramètres de la base interférométrique B et  $\theta$  sont connus et si  $z_2$  peut être déterminé avec précision par rapport à  $z_1$ , alors les relations II.6 et II.7 nous permettent de calculer l'angle que nous recherchons.

L'interférométrie proprement dite intervient dans le calcul de  $z_2$ :

$$z_2 = z_1 + \frac{\Delta\varphi}{k_{z_0}} \quad (\text{II.8})$$

où  $\Delta\varphi$  est la différence de phase mesurée dans l'interférogramme, et  $k_{z_0}$  est le nombre d'onde correspondant au radar utilisé.

### **II.1.3.2 Développement en série**

Si on développe la phase  $\Delta\varphi$  autour de l'angle d'incidence  $\alpha_0$  sous lequel serait observé un point d'altitude nulle, cela correspond à développer la phase autour de la composante due à une sphère terrestre lisse. En se limitant au premier ordre, on

### Chapitre III

obtient le développement suivant:

$$\Delta\varphi \approx k_{z_0} B \sin(\theta - (\alpha_0 - a_t)) - k_{z_0} B \cos(\theta - (\alpha_0 - a_t)) \frac{h}{z_1 \sin(\alpha_0)} \quad (\text{II.9})$$

Les termes d'ordre supérieurs décroissent suivant les puissances de  $(h/z_1 \sin(\alpha_0))$ . Le premier terme de l'équation II.9 n'est autre que la phase due à la sphère terrestre. Les franges qui en résultent sont appelées les franges orbitales. Comme ce terme ne dépend que de paramètres géométriques de prise de vue connus, on peut aisément le soustraire. L'interférogramme SAR ne montrera alors que des franges topographiques. Pour supprimer la phase due à la sphère, il suffit de multiplier l'interférogramme sous sa forme complexe par:

$$e^{-jk_{z_0} B \sin(\theta - (\alpha_0 - a_t))} \quad (\text{II.10})$$

Après retrait des franges orbitales, nous conserverons dans l'interférogramme uniquement la phase topographique dont l'expression en fonction de l'altitude locale est donnée par le second terme de l'équation (II.9). Cette équation peut être réécrite comme suit:

$$\Delta\varphi \approx \Delta\varphi_p + \frac{2\pi}{h_a} h \quad (\text{II.11})$$

$\Delta\varphi_p$  est la phase orbitale et  $h_a$  est l'ambiguïté d'altitude, c'est-à-dire l'altitude induisant un saut de phase de  $2\pi$  [Prati & Rocca 1990; Prati & al. 1990; Massonnet & Rabaute 1993]:

$$h_a = -\frac{\lambda}{2} \frac{z_1 \sin(\alpha_0)}{B \cos(\theta - (\alpha_0 - a_t))} = -\frac{\lambda}{2} \frac{z_1 \sin(\alpha_0)}{B_\perp} \quad (\text{II.12})$$

$B_\perp$  est la composante de la base interférométrique orthogonale à la ligne de visée.

L'angle  $(\alpha_0 - a_t)$  s'obtient à partir de la relation (II.5) en posant  $h = 0$ .

L'angle  $\alpha_0$  s'obtient à partir de la relation suivante:

$$\cos(\alpha_0) = \frac{S^2 - R_t^2 - z_1^2}{2R_t z_1} \quad (\text{II.13})$$

En pratique, pour réduire le nombre d'opérations trigonométriques, nous exprimerons la phase orbitale et l'ambiguïté d'altitude uniquement en fonction de l'angle d'élévation  $(\alpha_0 - a_t)$ :

$$h_a = -\frac{\lambda}{2} \frac{z_1 \sin(\alpha_0 - a_t)}{B \cos(\theta - (\alpha_0 - a_t))} \frac{R_t}{S} \quad (\text{II.14})$$

Après retrait de la phase due à la sphère, l'interfrange dans l'interférogramme correspondra à une variation d'altitude égale à l'ambiguïté d'altitude.

En pratique, le calcul de l'altitude d'un point sur base de la phase dans

l'interférogramme SAR peut se faire soit en inversant la relation (II.9), soit en utilisant les équations (II.5) à (II.8) sans approximations. Etant donné que l'une ou l'autre approche nécessite à peu près le même nombre d'opérations trigonométriques ou trigonométriques inverses, nous avons choisi de mettre en œuvre les relations "exactes".

#### **II.1.4 Remarques:**

La description précédente est basée sur deux hypothèses. Premièrement, nous avons supposé qu'il était possible de générer l'interférogramme à partir de la relation (II.2). Or, pour ce faire, il faut connaître les coordonnées d'un même point dans les deux images de la paire interférométrique. Comme les deux images du couple interférométrique sont prises à partir de deux orbites légèrement différentes, un même point n'est pas vu sous le même angle ni à la même distance du senseur dans l'une et l'autre image. Il est donc nécessaire de rendre la seconde image superposable à la première, une opération connue sous le nom de coregistration. En second lieu, nous avons supposé que la phase en chaque point de l'interférogramme était connue. Or, comme dans toute image complexe, on ne connaît la phase que modulo  $2\pi$ . En d'autres termes, la phase d'un point de l'interférogramme s'exprime par :

$$\Delta\varphi = k_{z_0} \Delta z = 2n\pi + \alpha \quad (\text{II.15})$$

dont nous ne connaissons que la seule partie principale  $\alpha$ . Il est donc nécessaire de retrouver la phase "vraie" en déterminant le multiple de  $2\pi$  qui lui est associé. C'est ce que l'on appelle le déroulement de la phase.

### **II.2 L'INTERFEROMETRIE SAR DIFFERENTIELLE (DINSAR)**

#### **II.2.1 Introduction**

Dans la description que nous avons faite de l'interférométrie SAR, nous avons supposé, dans un premier temps, que la phase dans l'interférogramme ne dépendait que de la différence de chemin optique entre les deux acquisitions. De plus, nous avons lié de manière univoque cette différence de chemin optique à la topographie.

En fait, cette relation univoque n'est valide que si les deux acquisitions que l'on fait interférer sont parfaitement simultanées. Lorsque les acquisitions sont consécutives, la différence de chemin optique peut avoir d'autres origines que la seule topographie.

En particulier, si une zone se déplace par rapport au reste de la scène observée dans l'intervalle de temps séparant les deux acquisitions, une différence de chemin optique directement proportionnelle à la composante du mouvement selon la direction de prise de vue se superposera à la composante topographique [Gabriel & al. 1989; Massonnet & al. 1993; Zebker & al. 1994 (a)] (figure II.3).

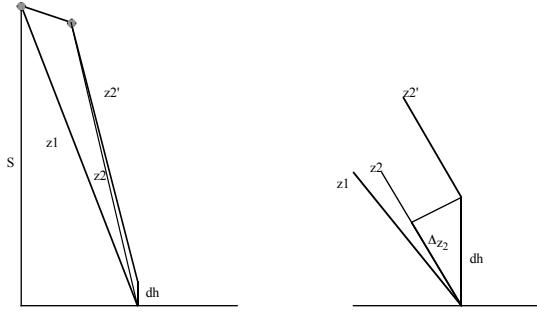


Figure II.3

*Représentation schématique de l'influence d'un déplacement vertical local sur la différence de chemin optique observée.*

De même, s'il y a des variations d'indice de réfraction dans l'atmosphère entre les deux acquisitions, on observera également des variations de chemin optique non topographiques, se manifestant sous une forme communément appelée "artefacts atmosphériques" [Tarayre & Massonnet 1996; Tarayre 1996; Derauw & Moxhet 1996; Zebker & Rosen 1997].

On peut également observer des variations locales de la constante diélectrique dans la scène suite, par exemple, à un changement d'humidité entre les deux acquisitions. Si ces variations sont cohérentes, les variations se répercuteront sur le coefficient complexe de rétrodiffusion moyen  $\sigma_0$ , induisant un biais de phase local qui se superposera aux variations de chemin optique. Ces biais de phase sont en général facilement repérables car ils sont intimement liés à la structure de la scène et correspondent le plus fréquemment aux parcelles agricoles [Massonnet 1994 ; Hanssen & Usai 1997; Rudant & al. 1997].

Dès lors, de manière plus générale, nous exprimerons la phase dans l'interférogramme de la manière suivante :

$$\Delta\varphi \approx \Delta\varphi_p + \frac{2\pi}{h_a} h + \Delta\varphi_d \quad (\text{II.16})$$

où : le premier terme  $\Delta\varphi_p$  est la phase orbitale,  
le second terme est la phase topographique,  
le troisième terme est ce que nous appellerons la phase différentielle, quelle que soit son origine.

S'il s'agit d'effets atmosphériques, la différence de chemin optique contenue dans la phase différentielle tiendra compte des variations locales d'indices de réfraction entre l'une et l'autre acquisition [Zebker & Rosen 1997; Tarayre 1996].

S'il s'agit d'un mouvement, cette différence de chemin optique sera simplement égale à deux fois la composante du mouvement dans la direction de prise de vue du senseur. Dès lors, dans le cas particulier d'un mouvement (figure II.3), on obtient le formalisme suivant :

$$\begin{aligned} \Delta\varphi &= k_{z_0} (z_2' - z_1) = k_{z_0} (z_2 - z_1) + k_{z_0} (z_2' - z_2) \\ &\approx \Delta\varphi_p + \frac{2\pi}{h_a} h + \frac{2\pi}{\lambda} 2\Delta z_2 \end{aligned} \quad (\text{II.17})$$

La relation (II.17) montre clairement que l'interférométrie SAR est beaucoup plus sensible aux mouvements (ou à toute autre variation de chemin optique) qu'à la topographie. En effet, la sensibilité à la topographie dépend de l'ambiguïté d'altitude qui est typiquement de l'ordre de la centaine de mètres, alors que la sensibilité au mouvement est fonction de la longueur d'onde. Dans le cas des satellites ERS, comme la longueur d'onde utilisée est de 56 mm, tout mouvement local de 28 mm dans la direction du satellite générera une frange de déplacement qui viendra se superposer aux franges topographiques.

L'interférométrie différentielle a pour but de découpler ces franges d'origines différentes afin d'obtenir les mouvements relatifs de terrain à partir de deux interférogrammes d'une même zone [Gabriel & al. 1989; Zebker & al. 1994 (a)] ou à partir d'un seul interférogramme et d'un MNT externe [Massonnet & al. 1993].

## II.2.2 Principe

Deux méthodes distinctes ont été proposées pour découpler les franges topographiques et les franges de mouvements. Elles sont toutes deux similaires dans leur principe mais diffèrent dans leur mise en œuvre. Dans les deux cas, il s'agit d'utiliser une référence topographique pour générer la phase topographique à soustraire de l'interférogramme contenant des informations de mouvement. L'interférogramme différentiel ainsi généré laissera apparaître les franges de mouvement seules.

La première méthode, proposée et développée par le *Centre National d'Etudes Spatiales* (CNES), fait appel à un modèle numérique de terrain externe pour générer la phase topographique dans la géométrie de prise de vue de la paire interférométrique considérée. Par cette méthode, le CNES a démontré le potentiel de la technique d'interférométrie différentielle en mesurant les déplacements résultant du tremblement de terre de *Landers* (Californie, juin 1992) [Massonnet & al. 1993]. La référence topographique utilisée était un MNT fourni par l'USGS (*United States Geological Survey*).

La seconde méthode, proposée et développée par le *Jet Propulsion Laboratory* (JPL), fait appel à une troisième image SAR. Sur base de ce triplet, deux paires interférométriques sont constituées. La première paire est constituée d'images acquises avant et après l'événement ayant provoqué des mouvements de terrain. L'interférogramme qui en résulte contient donc des franges topographiques ainsi que des franges de mouvements. La seconde paire interférométrique est constituée d'images acquises avant ou après les mouvements de terrain. L'interférogramme qui en résulte est supposé ne contenir, lui, que la phase topographique.

Chaque méthode a ses avantages et ses inconvénients. Dans le cas de la méthode du CNES, un seul traitement interférométrique est nécessaire. Cependant, il faut qu'un MNT externe existe et qu'il soit de bonne précision de manière à ne pas interpréter les erreurs du MNT qui apparaîtront dans l'interférogramme différentiel comme des mouvements fictifs. De plus, il faut transposer ce MNT en phase topographique dans la géométrie de prise de vue de la paire interférométrique considérée. Dans le cas de la méthode du JPL, l'existence d'un MNT externe n'est pas requise, mais il faut qu'un triplet interférométrique existe. Deux traitements interférométriques sont nécessaires, mais on a l'avantage de travailler directement dans la géométrie de prise de vue du radar. Enfin, il faut s'assurer que la paire interférométrique utilisée pour générer la référence est valide et qu'elle ne contient aucune information de mouvements ni aucun artefact atmosphérique. Dès lors, cette méthode n'est applicable qu'aux mouvements brusques (tremblements de terre, glissements de terrain, effondrements karstiques, ...)

ou aux mouvements lents (subsidence, ...) à condition que la paire interférométrique servant à générer la référence topographique soit acquise sur un intervalle de temps suffisamment court par rapport à l'échelle de temps sur laquelle se déroule le phénomène à mesurer.

### **II.2.3 Interférométrie différentielle à trois images**

La technique d'interférométrie différentielle développée par le JPL nécessite trois images coregistrées entre elles de manière à générer deux interférogrammes dans la même géométrie portée - azimut. L'un des interférogrammes sert à générer une référence topographique, l'autre contient, en plus d'une phase topographique, la phase de mouvement que l'on désire extraire. Avant d'être soustraite, la phase topographique obtenue à l'aide de la paire de référence doit être transposée dans la géométrie de prise de vue de la seconde paire. En effet, la phase dans l'un et l'autre interférogramme s'exprime comme suit:

$$\begin{aligned}\Delta\varphi_{12} &\approx \Delta\varphi_{p_{12}} + \frac{2\pi}{h_{a_{12}}} h \\ \Delta\varphi_{13} &\approx \Delta\varphi_{p_{13}} + \frac{2\pi}{h_{a_{13}}} h + \frac{4\pi}{\lambda} \Delta z\end{aligned}\quad (\text{II.18})$$

où les indices correspondent aux trois images utilisées. L'image 1 est ici considérée comme l'image maîtresse par rapport à laquelle les deux autres sont coregistrées. Les images 1 et 2 constituent la paire de référence. Les images 1 et 3 constituent la paire interférométrique contenant une phase différentielle à mesurer.

Le système d'équations (II.18) nous permet de calculer la composante du mouvement dans la direction de prise de vue du senseur:

$$\frac{4\pi}{\lambda} \Delta z = (\Delta\varphi_{13} - \Delta\varphi_{p_{13}}) - \frac{h_{a_{12}}}{h_{a_{13}}} (\Delta\varphi_{12} - \Delta\varphi_{p_{12}}) \quad (\text{II.19})$$

La phase topographique issue de la paire de référence doit donc être multipliée par le rapport des ambiguïtés d'altitude de manière à générer la phase topographique présente dans la seconde paire. Si on reprend l'expression complète de l'ambiguïté d'altitude (éq. II.14), ce rapport de forme se ramène au rapport des composantes perpendiculaires des bases interférométriques [Zebker & al. 1994 (a)]:

$$\frac{h_{a_{12}}}{h_{a_{13}}} = \frac{B_{\perp_{13}}}{B_{\perp_{12}}} \quad (\text{II.20})$$

## **II.3 TRAITEMENT INTERFEROMETRIQUE**

Qu'il s'agisse d'interférométrie simple ou différentielle, plusieurs étapes de traitement sont nécessaires avant d'obtenir une phase dont on puisse déduire la topographie ou des mouvements locaux.

La première de ces étapes consiste à superposer les deux images SAR que l'on veut faire interférer de manière à ce que les mêmes éléments de terrain se correspondent dans l'une et l'autre image. C'est ce qu'on appelle la coregistration. Celle-ci se déroule

en deux temps. D'abord, il est nécessaire de déterminer la transformation qui permet d'appliquer une image, considérée comme esclave, sur la seconde considérée comme maîtresse. Ensuite, il faut rééchantillonner l'image esclave selon cette transformation. La seconde étape consiste à générer l'interférogramme SAR. La phase dans l'interférogramme n'est connue que modulo  $2\pi$ . Pour lever cette ambiguïté de phase, une troisième étape est nécessaire: le déroulement de la phase.

S'il s'agit d'interférométrie simple, on dispose à l'issue de ces traitements d'une phase topographique qui peut être soit convertie en donnée altimétrique (éq. II.5 et II.11) soit conservée telle qu'elle en vue de son utilisation comme phase topographique de référence pour un traitement d'interférométrie différentielle.

### **II.3.1 Coregistration**

La coregistration consiste en la détermination de la position des pixels de l'image esclave considérée comme mobile, en fonction des coordonnées naturelles de l'image maîtresse, considérée comme fixe [Gabriel & Goldstein 1988]. Cette transformation de coordonnées est en général approchée par une transformation bilinéaire[Prati & Rocca 1990].

Pour déterminer la transformation qui doit être appliquée à l'image esclave afin de la rendre superposable à l'image maîtresse, la méthode reste toujours la même. Il s'agit de coregistrer un maximum de points (points d'ancrages) de l'image esclave. En d'autres mots, pour chaque point d'ancrage dans l'image esclave, cela consiste à trouver les coordonnées des points correspondants dans l'image maîtresse. Une fois en possession d'un nombre suffisant de correspondances, on détermine les coefficients de la transformation bilinéaire par moindres-carrés.

Pour localiser un point, ou une zone, de l'image esclave dans l'image maîtresse, deux critères sont généralement utilisés [Gabriel & Goldstein 1988; Li & Goldstein 1990]: la corrélation d'imagettes en module et la maximisation locale de la cohérence. La corrélation des imagettes en module correspond à localiser les mêmes événements terrains dans l'une et l'autre image. Par contre, la maximisation du coefficient de cohérence consiste à trouver le décalage de l'imagette esclave qui maximise le contraste de frange dans l'interférogramme.

Les images SAR étant numérisées, l'application de la transformation bilinéaire à l'image esclave doit être réalisée par interpolation. De plus, le contexte interférométrique requiert la préservation de l'information de phase par l'interpolateur utilisé. Plusieurs méthodes d'interpolation sont proposées dans la littérature. L'une d'elle consiste à sur-échantillonner l'image esclave en ajoutant un certain nombre d'échantillons nuls dans l'espace de Fourier (*Zero-Padding*). Ceci donne lieu, dans l'espace direct, à une image avec un intervalle d'échantillonnage plus petit. Suite à ce sur-échantillonnage, l'image esclave est rééchantillonnée en fonction de la transformation bilinéaire que l'on veut appliquer [Prati & Rocca 1990].

D'autres méthodes telles que le rééchantillonnage par plus proche voisin [Massonnet & Rabaute 1993] ou l'interpolation quadratique locale [Gabriel & Goldstein 1988] sont également proposées.

### **II.3.2 Génération de l'interférogramme**

La génération de l'interférogramme est l'étape qui suit immédiatement l'interpolation complexe de l'image esclave. Cette étape consiste simplement à multiplier points par points la valeur complexe de chaque pixel de l'image maîtresse par le complexe conjugué de la valeur du pixel correspondant dans l'image esclave. On obtient ainsi un interférogramme brut, pleine résolution qui est en général très bruité.

### **II.3.2.1 Estimation de la phase interférométrique**

A cause des différentes sources de décorrélation, la phase dans l'interférogramme ne donne pas directement la phase due aux différences de chemins optiques. Elle n'en est qu'une estimation. Cette estimation de la phase est évidemment dépendante de la cohérence. Just et Bamler ont étudié et modélisé l'écart-type de la phase interférométrique en fonction de la cohérence pour un interférogramme pleine résolution [Just & Bamler 1994]. Ils montrent que pour un coefficient de cohérence de 0.99, l'écart-type de la phase interférométrique est de l'ordre de 15°.

Il a été démontré que l'estimateur le plus probable de la phase interférométrique provenant d'une distribution de diffuseurs est [Rodriguez & Martin 1992; Seymour & Cumming 1994]:

$$\varphi = \tan^{-1} \left( \frac{\Im \left( \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^M \text{Im}_1(x_i, z_j) \text{Im}_2^*(x_i, z_j) \right)}{\Re \left( \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^M \text{Im}_1(x_i, z_j) \text{Im}_2^*(x_i, z_j) \right)} \right) \quad (\text{II.21})$$

Dès lors, la phase topographique d'un point sera estimée sur une fenêtre de LxM pixels centrée autour du point considéré. L'estimation sera égale à la phase de l'interférogramme moyen sur cette fenêtre de N = LxM pixels. Cet estimateur est non biaisé. On peut également démontrer que l'écart-type de cette estimation de la phase possède une borne inférieure qui vaut:

$$\sigma_\varphi \geq \frac{1}{\sqrt{2N}} \frac{\sqrt{1-\gamma^2}}{\gamma} \quad (\text{II.22})$$

L'écart-type de la phase atteint cette limite asymptotiquement lorsque le nombre d'échantillons croît. Les simulations numériques montrent que lorsque la phase est estimée sur plus de 4 échantillons, l'écart-type sur cette estimation peut être approximé par sa borne inférieure lorsque la cohérence locale est supérieure à 0.6 [Rodriguez & Martin 1992].

Dès lors, l'estimation de la phase sera d'autant meilleure que le nombre de pixels sur lequel on réalise l'estimation est grand. De même, plus la cohérence sera élevée, meilleure sera l'estimation de la phase interférométrique.

### **II.3.3 Déroulement de la phase et extraction de l'altitude**

#### **II.3.3.1 Définition du problème**

L'interférométrie permet de mesurer la valeur principale des différences de phase. La phase dans un interférogramme n'est donc connue que modulo  $2\pi$  (éq. II.15).

Il faut donc, si l'on veut extraire l'altitude d'un point à partir de l'information de phase, retrouver la valeur de la phase "vraie", c'est-à-dire retrouver le multiple de  $2\pi$  qui lui est associé. Ceci constitue le problème du déroulement de la phase.

Les approches les plus généralement utilisées sont basées sur la mesure du gradient de la phase qui est ensuite intégré pour retrouver la phase déroulée. La première méthode mise au point consiste à identifier les chemins d'intégration non valides par détection et connexion de résidus [Goldstein et al 1988]. Plus récemment, des méthodes basées sur des techniques de moindres-carrés ont vu le jour. Certaines de ces méthodes

effectuent des moindres-carrés sur l'ensemble des points de l'interférogramme pour déterminer la phase déroulée [Ghiglia & Romero 1994]. D'autres réalisent des moindres-carrés sur des éléments d'interférogrammes pour lesquels une première estimation de la phase déroulée a déjà été effectuée [Tarayre 1996].

## II.4 FAISABILITE

La faisabilité d'une mesure interférométrique dépend essentiellement de ce que l'on appelle la cohérence. La cohérence est la capacité qu'ont deux fronts d'ondes à rester en phase. On définit le degré complexe de cohérence  $\gamma_c$  comme suit [Born & Wolf 1980]:

$$\gamma_c = \frac{\langle \text{Im}_1 \text{Im}_2^* \rangle}{\sqrt{\langle |\text{Im}_1|^2 \rangle \langle |\text{Im}_2|^2 \rangle}} \quad (\text{II.23})$$

où  $\text{Im}_1$  et  $\text{Im}_2$  sont les deux fronts d'ondes considérés. Le degré complexe de cohérence n'est donc rien d'autre que le terme d'interférence normé issu des deux fronts d'ondes (éq. II.3).

Le degré de cohérence  $\gamma = |\gamma_c|$  est donc un nombre compris entre 0 et 1 directement lié à la visibilité des franges et au rapport signal sur bruit. Si  $\gamma = 1$ , les deux signaux sont parfaitement cohérents, et la visibilité des franges est maximale. Si  $\gamma = 0$ , les deux signaux décohèrent entièrement, il n'y a pas interférence.

On peut également montrer que le degré de cohérence  $\gamma$  s'exprime en fonction du rapport signal sur bruit (SNR) de la manière suivante [Born & Wolf 1980]:

$$\gamma = \frac{1}{1 + \frac{1}{\text{SNR}}} \quad (\text{II.24})$$

Si nous reprenons le formalisme utilisé à l'équation (II.1), le signal reçu par le radar et provenant d'une zone de terrain qui correspond à un pixel s'exprime de la manière suivante:

$$\begin{cases} P_1(x, z_1) = |P_1(x, z_1)| e^{-jk_{z_0} z_1} e^{j\psi_1(x, z_1)} \\ P_2(x, z_2) = |P_2(x, z_2)| e^{-jk_{z_0} z_2} e^{j\psi_2(x, z_2)} \end{cases} \quad (\text{II.25})$$

où:  $(x, z)$  sont les coordonnées en portée et en azimut du centre du pixel,  
 $k_{z_0} z$  est la phase de transport proportionnelle au chemin optique,  
 $\psi(x, z)$  est la phase de reconstruction.

Cette phase de reconstruction est la phase de la résultante des réponses de chacun des diffuseurs au sein du pixel (figure II.4).

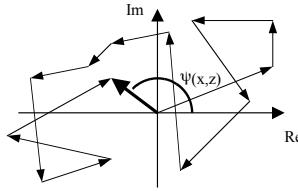


Figure II.4  
Représentation graphique de la phase de reconstruction.

Dans la description que nous avons faite de l'interférométrie, nous avons supposé dans un premier temps que les phases de reconstruction des pixels étaient identiques dans l'une et l'autre image d'une paire interférométrique. Dans ce cas, la phase dans l'interférogramme ne dépend que de la différence de chemin optique parcouru lors des deux acquisitions (éq. II.3). En réalité, les phases de reconstruction ne sont jamais identiques et leurs différences varient d'un pixel à l'autre donnant un aspect bruité aux interférogrammes.

Si les phases de reconstruction diffèrent trop d'une prise de vue à l'autre, la phase dans l'interférogramme ne sera pas simplement proportionnelle à la différence de chemin optique ( $z_2 - z_1$ ) et ne sera donc daucune utilité pour l'obtention d'un modèle numérique de terrain valable ni pour des mesures de mouvements locaux. Les phases de reconstruction sont conservées si les signaux issus de chaque diffuseur restent en phase, c'est-à-dire s'ils restent cohérents. L'interférométrie nécessite donc une bonne cohérence entre les deux images.

#### II.4.1 Estimation de la cohérence

La cohérence dans un interférogramme SAR n'est pas mesurée, mais estimée. Etant donné que les coordonnées azimut et portée correspondent en fait aux coordonnées temporelles de l'échantillonnage du signal, l'estimateur le plus fréquemment utilisé est [Rodriguez & Martin 1992; Zebker & al. 1994 (b)] :

$$\gamma \approx \frac{\left| \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^M \text{Im}_1(x_i, z_j) \text{Im}_2^*(x_i, z_j) \right|}{\sqrt{\left( \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^M |\text{Im}_1(x_i, z_j)|^2 \right) \left( \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^M |\text{Im}_2(x_i, z_j)|^2 \right)}} \quad (\text{II.26})$$

où  $\text{Im}_1$  est le signal complexe dans l'image maîtresse et  $\text{Im}_2$  le signal complexe dans l'image esclave.

Dès lors, tout comme la phase, la cohérence d'un point est estimée par des moyennes sur des fenêtres de  $L \times M$  pixels autour du point considéré.

Seymour et Cumming ont démontré que cet estimateur est très proche de l'estimateur idéal. En pratique, pour l'interférométrie SAR, cet estimateur donne une valeur de la cohérence qui peut être considérée comme la valeur la plus probable [Seymour & Cumming 1994]. Ils ont également montré que l'écart-type  $\sigma_\gamma$  de cet estimateur possède une borne inférieure (borne de Cramer-Rao) donnée par :

$$\sigma_\gamma > \frac{1}{\sqrt{2N}} (1 - \gamma^2) \quad (\text{II.27})$$

où  $N = L \times M$  est le nombre d'échantillons servant au calcul.

Dès lors, plus le nombre de pixels sur lesquels on réalise l'estimation est grand, meilleure sera l'estimation de la cohérence. De même cette estimation est d'autant meilleure que la cohérence à mesurer est proche de la cohérence maximale.

#### **II.4.1.1 Remarque**

Nous avons subdivisé la phase dans une image SAR en deux termes distincts: la phase de transport et la phase de reconstruction. En pratique ces deux termes sont confondus. Si la cohérence est faible, les termes de phase de reconstruction ne s'annulent pas et perturberont la mesure de la différence de chemin optique dans l'interférogramme. De même, la phase due aux différences de chemins optiques peut perturber la mesure de la cohérence. En effet, dans l'équation (II.3), nous avons reporté le problème de la cohérence sur la différence des phases de reconstruction. Or, pour l'estimation de la cohérence, nous utilisons la phase complète du signal interférométrique. Dès lors, la phase due aux différences de chemins optiques sera interprétée comme une perturbation de la cohérence de phase entre les deux signaux. Il en résultera une sous-estimation de la cohérence. En conclusion, pour réaliser une mesure de cohérence fiable, il est nécessaire de soustraire préalablement du signal interférométrique, le terme de phase dû aux différences de chemins optiques entre les deux observations. En pratique, on ne soustrait que la phase due à une sphère lisse puisque la phase topographique est a priori inconnue.

#### **II.4.2 Décorrélation**

##### **II.4.2.1 Décorrélation géométrique**

Les pertes de cohérence ont plusieurs origines. La première source de décorrélation est due à la base interférométrique et à la géométrie de prise de vue. En effet, le changement d'angle d'incidence d'une image à l'autre imposé par la base interférométrique, induit un changement des positions relatives des diffuseurs au sein du pixel. Il y aura donc une décorrélation des phases de reconstruction. Le degré de cohérence sera fonction de l'ouverture de la base interférométrique, du non-parallélisme des orbites, de l'angle d'incidence et de la pente locale.

La dépendance de la cohérence en fonction de l'ouverture de la base interférométrique peut être modélisée comme suit [Li & Goldstein 1990; Zebker & Villasenor 1992]:

$$\gamma_B = 1 - \frac{2 \cos(\alpha) \delta\alpha R_y}{\lambda} = 1 - \frac{2|B_{\perp}|R_y \cos(\alpha)}{\lambda z} \quad (\text{II.28})$$

où:  $\alpha$  est l'angle d'incidence dans l'image maîtresse,

$\delta\alpha$  est la différence d'angle d'incidence entre les deux images pour le point de coordonnée en portée  $z$  considéré,

$R_y$  est la résolution au sol dans la direction de la portée,

$B_{\perp}$  est la composante de la base interférométrique qui est perpendiculaire à la ligne de visée.

Cette modélisation nous apprend qu'il existe une base interférométrique critique  $B_c$  induisant une perte de cohérence totale:

$$|B_{c\perp}| = \frac{\lambda}{2} \frac{z}{R_y \cos(\alpha)} \quad (\text{II.29})$$

Dans le cas des SAR embarqués sur les plates-formes ERS, si on considère un terrain plan et une base interférométrique horizontale, cette base interférométrique critique sera de l'ordre de 1200m. Dès lors, une base interférométrique de l'ordre de 600m induira une perte de cohérence de l'ordre de 50%.

Nous avons vu que l'ambiguïté d'altitude dans un interférogramme SAR dépendait également de la base interférométrique. Plus la base est ouverte et plus le taux de frange est élevé. Dès lors, pour une bonne précision altimétrique, une base fort ouverte est souhaitable. Il y a donc un compromis à faire entre ambiguïté d'altitude et perte de cohérence. On considère en général qu'une base interférométrique comprise entre 100 et 300m est un bon compromis pour l'interférométrie SAR basée sur les images ERS.

En interférométrie différentielle, la décorrélation géométrique induite par la base interférométrique peut être minimisée, puisque dans ce cas, la phase topographique n'est daucune utilité et doit être retirée. On choisira donc, dans ce cas, une paire d'images ayant une base interférométrique la plus petite possible.

La relation (II.28) nous apprend également que la décorrélation dépend de l'angle d'incidence local. La décorrélation est maximale à incidence normale et nulle à incidence rasante. C'est pourquoi des événements terrain qui induisent des distorsions géométriques caractéristiques de l'imagerie SAR tels que recouvrements et raccourcissements induiront des pertes de cohérence. En fait, plus la dimension au sol du pixel est importante, plus il y aura décorrélation due à un changement d'angle de vue.

Un autre effet géométrique induisant une décorrélation est la rotation de la cible par rapport à la ligne de visée. Une telle rotation se produit si les deux orbites ne sont pas parallèles ou si les angles de dérives latérales (*squint*) suivant lesquels les deux images sont acquises et focalisées diffèrent. Dans les deux cas, la différence d'angle de vue induit une rotation d'une scène par rapport à l'autre. H. Zebker et J. Villasenor ont également modélisé la décorrélation due à une rotation d'une scène par rapport à l'autre. Celle-ci peut s'exprimer comme suit [Zebker & Villasenor 1992]:

$$\gamma_{\text{rot}} = 1 - \frac{2 \sin(\theta) \delta\phi |R_x|}{\lambda} \quad (\text{II.30})$$

où  $R_x$  est la résolution azimutale et  $\delta\phi$  est la différence d'angle de vue équivalente à l'angle de rotation entre les deux scènes.

Dans le cas de ERS, la décorrélation totale est atteinte lorsque la différence d'angle de vue atteint  $0.72^\circ$ . Le fonctionnement de ERS en mode de contrôle du pointage (*yaw steering*) nous garantit une très bonne stabilité de l'angle de vue. La différence d'angle de visée induite lorsque les fréquences Doppler centrales (*Doppler Centroid*) sont distantes d'une valeur égale à la fréquence d'échantillonnage en azimut (PRF) est de l'ordre de  $0.4^\circ$ . Une différence des fréquences Doppler centrales égale à la PRF induira donc une perte de cohérence de l'ordre 50%. En pratique, la différence des fréquences Doppler centrales ne dépasse pas quelques centaines de Hertz, ce qui nous garantit une bonne corrélation entre les deux images [Piette & Derauw 1997].

#### **II.4.2.2 Décorrération temporelle**

La seconde source de décorrélation est dite temporelle. Si les positions relatives des diffuseurs au sein du pixel varient au cours du temps, les phases de reconstruction ne seront pas conservées. C'est le cas sur une surface mouvante telle une surface d'eau, ou le feuillage d'un arbre. C'est également le cas s'il y a changement de l'humidité du

sol et du couvert végétal car la profondeur de pénétration varie.

La mesure de la cohérence nous donnera donc accès indirectement à une multitude de processus de surface ayant une base de temps comparable à la répétitivité des orbites tels que: croissance des végétaux, mouvement des glaciers, effets induits par les variations d'humidité.

Dans le cas de l'interférométrie SAR spatioportée, cette source de décorrélation est inévitable puisque les acquisitions sont consécutives et non simultanées. Dès lors, le seul moyen de la minimiser sera d'utiliser des paires d'images acquises sur un intervalle de temps le plus court possible. Pour les applications topographiques, on choisira donc de préférence des paires Tandem ERS-1/ERS-2 acquises à un jour d'intervalle.

#### **II.4.2.3 Bruit thermique et décorrélation due au traitement**

Une troisième source de décorrélation provient du bruit de phase du système radar. Cette source de décorrélation se marque essentiellement dans les zones d'ombrages où, a fortiori, le rapport signal sur bruit est faible.

La dernière source de décorrélation provient du traitement interférométrique lui-même et du traitement SAR [Just & Bamler 1994]. En ce qui concerne le traitement interférométrique, une erreur de coregistration n'induit pas de biais de phase mais augmente la variance de la phase. Une erreur de registration de l'ordre de 1/8 de pixel induit un écart-type de la phase de l'ordre de 23° pour une cohérence maximale sur des images à pleine résolution.

En ce qui concerne le traitement, Just et Bamler ont analysé les biais et la variance de phase interférométrique induits par les aberrations des processeurs. En particulier, ils ont analysé les effets d'une défocalisation (induite par une erreur sur le taux de modulation en fréquence, en azimut ou en portée) et d'une erreur de compensation linéaire et quadratique de la migration en portée. Toutes ces aberrations induisent une augmentation de la variance de phase mais, seule la défocalisation induit un biais de phase. Différents processeurs utilisant des algorithmes différents (Range-Doppler, Chirp Scaling,  $\omega$ -k) ont été testés de manière à mettre en évidence leur capacité à préserver la phase lors de la focalisation des images SAR [Rosich Tell & Laur 1996]. Les tests interférométriques ont révélé que tous les processeurs testés n'induisent quasiment aucun biais de phase (<0,1%) et que la variance de phase résultant du traitement est de l'ordre de 1 à 2°.

#### **II.4.3 Remarque**

La décorrélation du signal peut a priori être considérée comme défavorable. En effet, l'interférométrie SAR simple ou différentielle nécessite idéalement un signal de phase uniquement lié aux différences de chemin optique parcouru pour en déduire une information fiable. Dès lors, toute décorrélation du signal induira une perte de rapport signal sur bruit dans les mesures topographiques ou les mesures de déplacements.

Quelles que soient leurs origines, les pertes de cohérence déterminent la variance du signal de phase. Dès lors, il est essentiel de bien les connaître pour déterminer a priori la faisabilité d'un traitement interférométrique. De plus, la mesure de la cohérence constituera un indicateur de qualité des mesures interférométriques réalisées.

Cependant, une perte de cohérence ne doit pas être uniquement considérée comme une perte d'information. En effet, la décorrélation temporelle des signaux est fonction d'une multitude de processus de surface et de volume qui affectent la stabilité de la scène observée. Dès lors, la mesure de la cohérence constituera une source d'information relative aux processus impliqués.



### **III DEVELOPPEMENT ET VALIDATION D'UN PROCESSEUR INSAR/DINSAR**

Sur base de la littérature existante, nous avons mis au point notre propre processeur d'interférométrie SAR. Certaines adaptations originales ont été apportées aux différentes étapes du traitement. C'est pourquoi nous allons reprendre de manière détaillée tous les aspects nécessaires à la réalisation d'un interféromètre SAR, en mettant en exergue les choix que nous avons fait pour aboutir.

Lors de la mise en oeuvre de notre interféromètre, nous avons utilisé la paire interférométrique choisie comme référence par le groupe de travail FRINGE de l'ESA, afin de valider nos résultats. Il s'agit d'une paire d'images acquises par le satellite ERS-1 les 2 et 8 août 1991 sur le site de Genargentu en Sardaigne (orbites 241 et 327)

#### **III.1 TRAITEMENT INSAR**

##### **III.1.1 La coregistration**

La première étape du traitement interférométrique consiste à trouver la transformation permettant de passer de la géométrie de prise de vue de l'image esclave à celle de l'image maîtresse, puis à rééchantillonner l'image esclave en conséquence. Le but de l'opération consiste à rendre les images maîtresse et esclave exactement superposables de manière que pour de mêmes coordonnées portée-azimut, le pixel dans l'une et l'autre image soit associé au même élément de terrain dans la scène observée.

Nous avons subdivisé la coregistration en trois étapes distinctes. La première, que nous appellerons le prédécoupage, consiste à déterminer, sur base des données orbitographiques des satellites, la partie de la scène commune aux deux images. Les données orbitographiques permettent de déterminer cette partie commune, que nous appellerons la superposition, à quelques pixels près. La seconde étape consiste à déterminer la transformation de coordonnées qu'il faut appliquer à l'image esclave pour la rendre superposable à l'image maîtresse. En général, cette transformation est approximée par une transformation bilinéaire de coordonnées [Prati & Rocca 1990]. La dernière étape consiste simplement à appliquer la transformation précédemment établie à l'image esclave. L'application de cette transformation est réalisée par une interpolation complexe de l'image esclave de manière à conserver l'information de phase.

###### **III.1.1.1 Prédécoupage**

On entend par prédécoupage des images, l'opération qui consiste à déterminer les portions des images qui constituent effectivement la paire interférométrique dans le couple d'images initial. On cherche donc à déterminer le décalage, en portée et en azimut, d'une image par rapport à l'autre, et ce, de manière très grossière (à quelques pixels près). Pour ce faire, on peut considérer que la projection de la base interférométrique suivant l'angle de visée dans le plan horizontal local correspond au décalage en portée  $\Delta R$ , et que le décalage temporel entre les deux prises d'images est directement lié au décalage en azimut  $\Delta Az$  (figure III.1). Les en-têtes des fichiers images ERS contiennent toutes les données nécessaires à ce calcul. En effet, on y trouve, entre autres, cinq vecteurs d'état du satellite (positions et vitesses) équirépartis

sur la période d'acquisition de la scène considérée.

En se basant sur ces données, on peut calculer la base interférométrique en très bonne approximation. Une interpolation polynomiale d'ordre 4 sur les cinq vecteurs d'état nous donne une approximation de la trajectoire du satellite sur son orbite. La base interférométrique est alors définie par un vecteur qui a pour origine un point sur la première orbite et dont l'extrémité est déterminée par l'intersection entre un plan perpendiculaire à la première trajectoire au point origine, et la seconde trajectoire (figure III.1). Nous déterminons ainsi une série de valeurs de la base interférométrique  $B$  pour différentes positions azimutales. Finalement, nous calculons, par moindres-carrés, une approximation linéaire des composantes horizontales et verticales de la base interférométrique en fonction de l'azimut dans l'image maîtresse. Cette méthode, quoique simpliste, donne d'excellents résultats en comparaison des valeurs fournies par l'ESA. Remarquons que le prédécoupage ne doit pas être physiquement réalisé. L'important est de posséder les coordonnées des quatre coins de la superposition dans chacune des images.

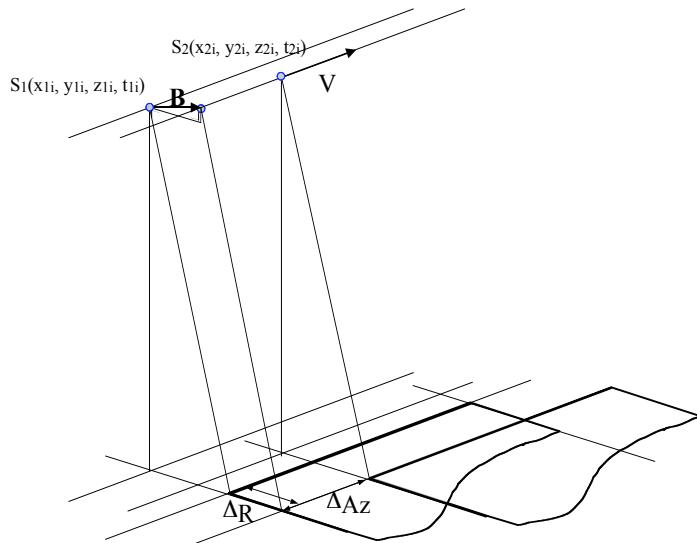


Figure III.1  
Représentation schématique des décalages entre les deux images.

### **III.1.1.2 Détermination de la transformation bilinéaire de coordonnées**

Pour déterminer la transformation qui doit être appliquée à l'image esclave nous coregistrions d'abord un grand nombre de points d'ancre par rapport à l'image maîtresse. Pour un point d'ancre donné dans l'image esclave, on détermine, sur base du prédécoupage, une première estimation de sa position dans l'image maîtresse. On découpe une imagette dans l'image esclave autour du point d'ancre et on recherche l'imagette correspondante dans l'image maîtresse en utilisant soit la maximisation locale de la cohérence, soit la maximisation du coefficient de corrélation en module comme critère de coregistration.

Le coefficient de corrélation ou le coefficient de cohérence sont calculés pour différents décalages en pixels de l'imagette esclave par rapport à l'image maîtresse. L'amplitude maximum de ces décalages dépend de la précision du prédécoupage. On obtient ainsi une cartographie du critère choisi autour du point d'ancre. Cette cartographie se présente comme un pic de corrélation ou de cohérence centré sur le décalage optimum que l'on recherche. La position du maximum de ce pic est ensuite

déterminée à une fraction de pixel par interpolation gaussienne.

La corrélation des imagettes en module correspond à localiser les mêmes événements terrains dans l'une et l'autre image sur base de leur coefficient de rétrodiffusion. Par contre, la maximisation du coefficient de cohérence consiste à trouver le décalage de l'imagette esclave qui maximise le contraste de frange dans l'interférogramme. Nous avons utilisé le premier critère pour effectuer une coregistration "grossière" sur un nombre limité de points d'ancre. Cette première coregistration est affinée en se basant sur le second critère utilisé, cette fois sur un très grand nombre de points d'ancre. La position de ceux-ci est simplement déterminée dans l'image esclave par un maillage dont on peut définir les dimensions.

Nous avons choisi d'utiliser le critère de maximisation locale de la cohérence pour la coregistration fine car ce critère est plus proche physiquement du résultat que l'on désire obtenir.

Dans le module de coregistration que nous avons mis au point, l'utilisateur peut choisir une valeur "seuil" en dessous de laquelle les résultats de coregistration ne sont pas pris en compte. Dans le cas de la coregistration par corrélation, le seuil correspond à une largeur à mi-hauteur du pic de corrélation. Si le pic de corrélation s'avère trop étalé, donc, si la corrélation est trop mauvaise, le point d'ancre est rejeté et son résultat de coregistration ne sera pas pris en compte pour le calcul de la transformation bilinéaire de coordonnées. Dans le cas de la coregistration par maximisation de la cohérence, le seuil correspond simplement à une valeur du maximum de cohérence en dessous de laquelle le résultat de corrélation est rejeté.

Lorsque la coregistration de tous les points d'ancre que l'on s'était fixés a été tentée, nous déterminons la transformation bilinéaire de coordonnée à appliquer à l'ensemble de l'image esclave par moindres-carrés uniquement à partir des points convenablement coregistrés. L'organigramme correspondant à l'ensemble des opérations est représenté à la figure III.2

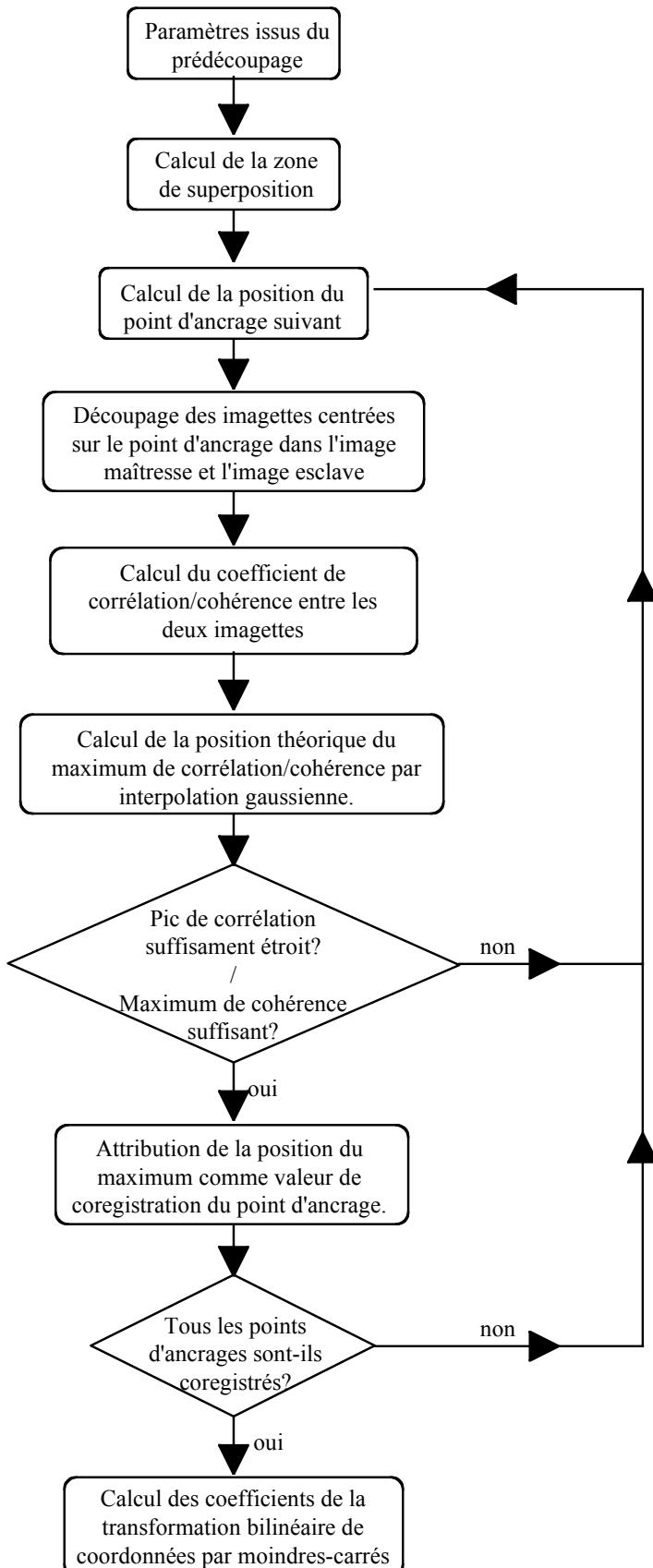


Figure III.2  
Organigramme de la procédure de coregistration

### **III.1.1.3 Interpolation**

En interférométrie SAR spatiale, la transformation à appliquer à l'image esclave peut être approchée par une transformation bilinéaire de coordonnées (éq. III.1). Celle-ci tient compte des translations, des homothéties et des rotations qui sont les effets majeurs dus au changement d'angle de vue et de non-parallélisme des orbites entre l'une et l'autre acquisition:

$$\begin{aligned}x_2 &= A_x x_1 + B_x z_1 + C_x \\z_2 &= A_z x_1 + B_z z_1 + C_z\end{aligned}\quad (\text{III.1})$$

Comme décrit ci-avant, les six coefficients sont obtenus par moindres-carrés sur les valeurs de coregistration obtenues pour un grand nombre de points d'ancrage.

Les images SAR étant numérisées, l'application de la transformation bilinéaire à l'image esclave  $Im_2$ , doit être réalisée par interpolation. De plus, le contexte interférométrique requiert la préservation de l'information de phase par l'interpolateur. Une des méthodes d'interpolation généralement utilisée consiste à sur-échantillonner l'image esclave  $Im_2$  en ajoutant un certain nombre d'échantillons nuls dans l'espace de Fourier (*Zero-Padding*). Ceci donne lieu, dans l'espace direct, à une image ayant un intervalle d'échantillonnage plus petit.

On considère en général qu'une coregistration au 8<sup>ème</sup> de pixel est suffisante pour obtenir un interférogramme où la décorrélation due à une mauvaise coregistration reste faible par rapport aux autres sources de décorrélation [Prati & Rocca 1990; Just & Bamler 1994]. Dès lors, l'interpolation de l'image doit se faire en multipliant par 8 la dimension de sa transformée de Fourier. Par la suite, cette image interpolée doit être rééchantillonnée selon la transformation bilinéaire pour générer l'image interpolée finale.

Nous avons mis au point une méthode d'interpolation héritée de l'algorithme par transformée de Chirp-Z (*Chirp Z-Transform*, en abrégé CZT) [Roose & al. 1993; Rabiner & Gold 1973; Derauw & Roose 1995]. La vitesse d'exécution et les besoins en espace mémoire de cette méthode sont indépendants du sur-échantillonnage. De plus, l'interpolation et le rééchantillonnage sont réalisés en même temps. Cette interpolation est d'abord appliquée suivant la dimension de la portée, puis suivant la dimension azimutale. L'idée de base est d'exprimer l'interpolation sous forme d'une convolution qui, elle, sera calculée dans l'espace de Fourier en utilisant un algorithme de transformée rapide (FFT).

#### **III.1.1.3.1 Interpolation d'un signal à une dimension par transformée en chirp-Z**

Soit un signal  $u(n\Delta x)$  à bande limitée, échantillonné selon le critère de Nyquist sur un intervalle de longueur  $N\Delta x$ , où  $N$  est le nombre d'échantillons et  $\Delta x$  est le pas d'échantillonnage. Soit  $U(k\Delta f_x)$ , le spectre de Fourier de ce signal, où  $\Delta f_x$  est l'intervalle d'échantillonnage en fréquence. Le signal peut être reconstitué à partir de son spectre de Fourier comme suit:

$$u(x) = \sum_{k=0}^{N-1} U(k\Delta f_x) e^{2\pi k \Delta f_x x} \quad (\text{III.2})$$

Dans le cas d'une transformée de Fourier discrète calculée par FFT, on a:  $x_n = n\Delta x$  et  $\Delta f_x \Delta x = 1/N$  (avec  $N$  puissance entière de 2).

Nous recherchons les valeurs du signal  $u(x)$  en des échantillons différents de

### Chapitre III

l'échantillonnage initial. Nous supposons que ce nouvel échantillonnage est une version homothétique et translatée de l'échantillonnage initial:

$$x_n = nA\Delta x + B \quad (\text{III.3})$$

où les paramètres A et B correspondent respectivement au rapport d'homothétie et à la translation.  $\Delta x$  est le pas d'échantillonnage initial.

La substitution de l'équation (III.3) dans l'équation (III.2) nous donne:

$$u(x_n) = \sum_{k=0}^{N-1} U(k\Delta f_x) e^{2i\pi nkA\Delta f_x \Delta x} e^{2i\pi Bk\Delta f_x} \quad (\text{III.4})$$

Comme nous avons affaire à des images discrètes dont l'échantillonnage est exprimé en pixel, nous pouvons poser  $\Delta x = 1$ . Dès lors,  $\Delta f_x$  est un nombre sans dimension et vaut  $1/N$ .

L'idée qui est dérivée de l'algorithme CZT et qui est résumée à la figure III.3 est de réécrire l'équation (III.4) sous forme d'une convolution [Roose & al. 1993]. Pour cela, il suffit de poser:

$$nk = \frac{n^2 + k^2 - (n-k)^2}{2} \quad (\text{III.5})$$

Après quelques manipulations évidentes, l'équation (III.4) peut être réorganisée comme suit:

$$u(x_n) = i(n) \sum_{k=0}^{N-1} g(k) h(n-k) \quad n = 0, \dots, N-1 \quad (\text{III.6})$$

où:

$$\begin{aligned} g(k) &= U(k\Delta f_x) e^{i\pi \left( A\frac{k^2}{N} + 2B\frac{k}{N} \right)} \\ h(k) &= e^{-i\pi A \frac{(n-k)^2}{N}} \\ i(n) &= e^{i\pi A \frac{n^2}{N}} \end{aligned} \quad (\text{III.7})$$

L'expression (III.2) est ramenée au calcul d'une convolution discrète de deux fonctions. Pour optimiser le temps de calcul de l'interpolation complexe de l'image esclave, cette convolution discrète est calculée en passant dans l'espace de Fourier par FFT.

La méthode proposée ici permet une transformation homothétique et une translation de signaux unidimensionnels sans restrictions sur le rapport d'homothétie ou sur la valeur de la translation. La seule restriction se situe sur le signal à interpoler qui doit satisfaire aux conditions d'application des FFT. Dès lors, tout signal complexe à bande limité peut être interpolé par cette méthode.

Cet algorithme est plus rapide que les méthodes utilisant le *zero-padding*. En effet, il a été démontré que pour une interpolation nécessitant un sur-échantillonnage supérieur

à un facteur 4, la méthode basée sur l'algorithme CZT est toujours plus rapide [Roose 1993].

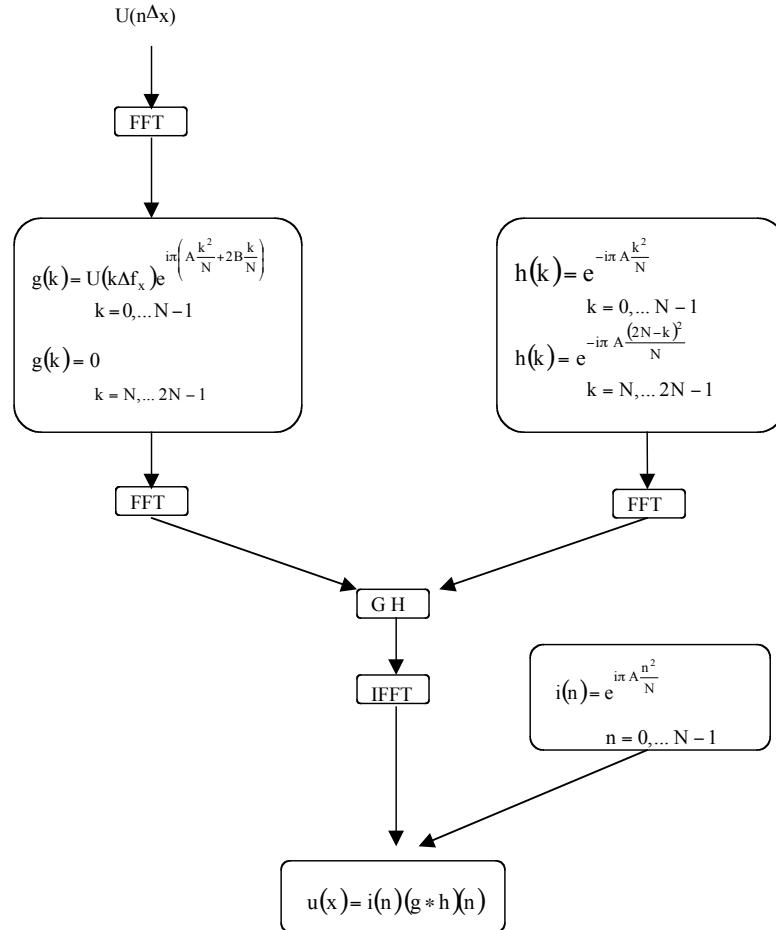


Figure III.3  
Organigramme de l'algorithme d'interpolation d'un signal à une dimension

### III.1.1.3.2 Cas bidimensionnel

La méthode décrite ci-dessus peut aisément être généralisée à des signaux bidimensionnels en considérant successivement chaque dimension comme constante lors de l'interpolation suivant l'autre dimension. Cependant, quelques étapes intermédiaires doivent être mises en oeuvre de manière à tenir compte de la non-séparabilité de la transformation bilinéaire (éq. III.1) [Derauw & Roose 1995].

Nous considérerons ci-après que  $Im_1(z_1 ; x_1)$  est l'image maîtresse et que  $Im_2(z_2 ; x_2)$  est l'image esclave. Lorsqu'on représente les deux images dans le même référentiel, avec leur coin inférieur gauche à la coordonnée  $(0 ; 0)$ , elles ne sont pas superposables car les pixels ayant les mêmes coordonnées ne représentent pas le même élément de terrain. Pour chaque point de l'image  $Im_1$  ayant pour coordonnées  $(z_1 ; x_1)$ , l'information correspondante dans  $Im_2$  est localisée aux coordonnées  $(z_2 ; x_2)$  déterminées en fonction de  $(z_1 ; x_1)$  par l'équation (III.1). Partant de cette situation, nous interpolons  $Im_2$  suivant la dimension de la portée en considérant la coordonnée azimutale comme constante. Nous obtenons alors l'image intermédiaire:

$$\text{Im}_2'(z_1, x_1) = \text{Im}_2\left(A_z' x_1 + B_z' z_1 + C_z', x_1\right) \quad (\text{III.8})$$

où les coefficients  $A_z'$ ,  $B_z'$  et  $C_z'$  doivent être déterminés.

L'image intermédiaire est ensuite interpolée suivant l'azimut, donnant pour résultat:

$$\begin{aligned} \text{Im}_2''(z_1, x_1) &= \text{Im}_2'(z_1, A_x x_1 + B_x z_1 + C_x) \\ &= \text{Im}_2\left(A_z'\left(A_x x_1 + B_x z_1 + C_x\right) + B_z' z_1 + C_z', A_x x_1 + B_x z_1 + C_x\right) \end{aligned} \quad (\text{III.9})$$

Puisque, par définition,  $\text{Im}_2''$  est l'image interpolée que nous recherchons, nous imposons:

$$\text{Im}_2''(z_1, x_1) = \text{Im}_2(z_2, x_2) \quad (\text{III.10})$$

où  $(z_1 ; x_1)$  et  $(z_2 ; x_2)$  sont reliés par la transformation bilinéaire (éq. III.1). Dès lors, les coefficients  $A_z'$ ,  $B_z'$  et  $C_z'$ , nécessaires au calcul de l'image intermédiaire, sont donnés par:

$$\begin{cases} A_z' = \frac{A_z}{A_x} \\ B_z' = B_z - B_x \frac{A_z}{A_x} \\ C_z' = C_z - C_x \frac{A_z}{A_x} \end{cases} \quad (\text{III.11})$$

En conclusion, une interpolation bidimensionnelle récursive peut être utilisée à condition que les coefficients de la transformation bilinéaire de coordonnées à appliquer soient adaptés selon le schéma décrit ci-dessus.

#### III.1.1.3 Résultats expérimentaux

Nous avons utilisé notre interpolateur pour coregistrer la paire interférométrique SAR couvrant le site de Gennargentu en Sardaigne. Nous avons considéré que l'image du 8 août était l'image esclave. Cette image a donc été coregristrée et interpolée par rapport à l'image du 2 août. La figure III.4 représente un échantillon découpé dans l'image maîtresse ainsi que l'interférogramme qui y est associé. La présence de franges montre que cette première coregistration a été effectuée correctement. L'interférogramme paraît bruité et comporte un taux de franges élevé car il s'agit de l'interférogramme pleine résolution sans retrait de la phase orbitale. Aucun filtrage n'a été appliqué.

Pour démontrer l'efficacité de notre interpolateur, nous avons choisi deux cas particuliers de transformations permises par une transformation bilinéaire. Le premier est une rotation pure de  $45^\circ$ , le second est un grandissement d'un facteur trois.

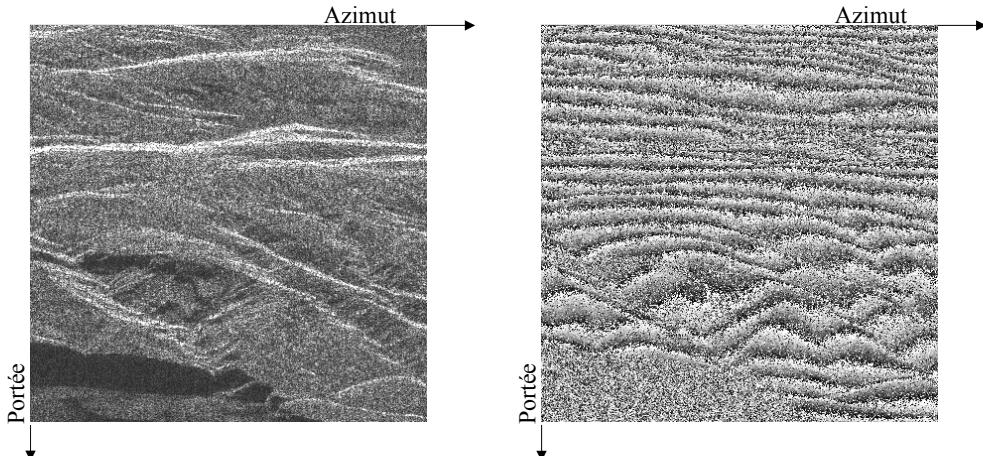


Figure III.4

*Echantillon pleine résolution de l'image maîtresse de la paire interférométrique de référence de l'ESA et interférogramme correspondant*

Nous avons d'abord utilisé notre interpolateur pour appliquer une rotation pure de  $45^\circ$  aux deux imagettes découpées dans les images maîtresse et esclave préalablement coregistrées. La figure III.5 illustre les deux étapes de l'interpolation, c'est-à-dire, d'abord une interpolation suivant la portée puis suivant l'azimut. A l'issue de cette seconde étape, on constate que la rotation a bien été appliquée à l'ensemble de l'imagette. Aucune distorsion géométrique n'a été introduite, tous les éléments de la scène ont subi une rotation de  $45^\circ$  autour du centre de l'imagette. Comme la transformée de Fourier discrète d'un signal représente la transformée de Fourier de ce signal considéré comme cyclique, nous voyons apparaître les répliques de la scène aux quatre coins de l'image.

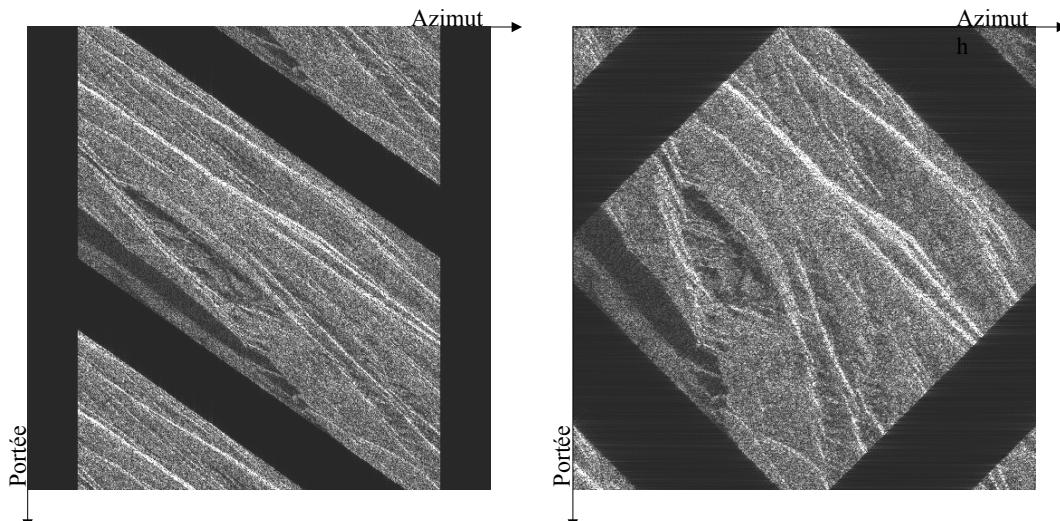


Figure III.5

*Illustration des deux étapes de l'interpolation dans le cas particulier d'une rotation de  $45^\circ$*

Nous avons interpolé de la même manière l'imagette découpée dans l'image esclave et nous avons généré l'interférogramme correspondant, lui aussi tourné de  $45^\circ$ . Cet interférogramme est représenté à la figure III.6. Il faut remarquer que cet interférogramme est obtenu à partir d'une image maîtresse interpolée une fois

(rotation) et d'une image esclave interpolée deux fois (coregistration et rotation). L'interférogramme obtenu est bien la réplique de l'interférogramme initial tourné de  $45^\circ$ . Ceci tend à montrer, comme indiqué par la théorie, que notre interpolateur conserve bien la phase.

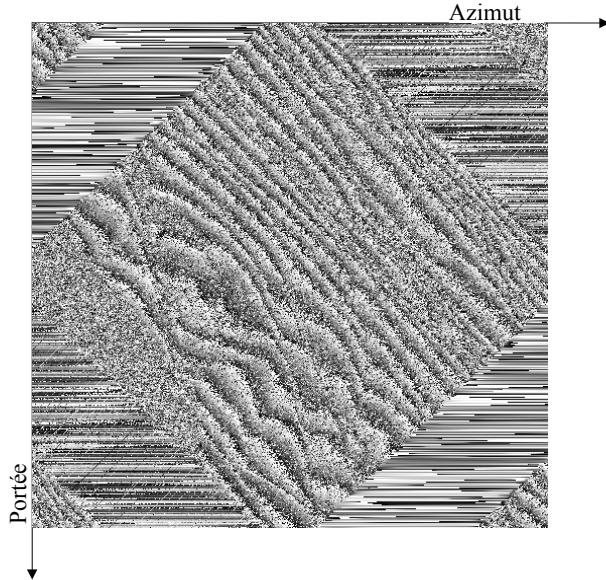


Figure III.6

*Interférogramme issu de la rotation à  $45^\circ$  des imagettes maîtresse et esclave.*

Le second exemple que nous présentons pour montrer l'efficacité de l'interpolateur est un grandissement d'un facteur trois accompagné d'une légère rotation. De nouveau, pour montrer expérimentalement que notre algorithme préserve la phase, nous avons interpolé de la même manière les imagettes maîtresse et esclave préalablement coregistrées. Puis, nous avons généré l'interférogramme correspondant. L'image maîtresse agrandie et l'interférogramme correspondant sont représentés à la figure III.7.

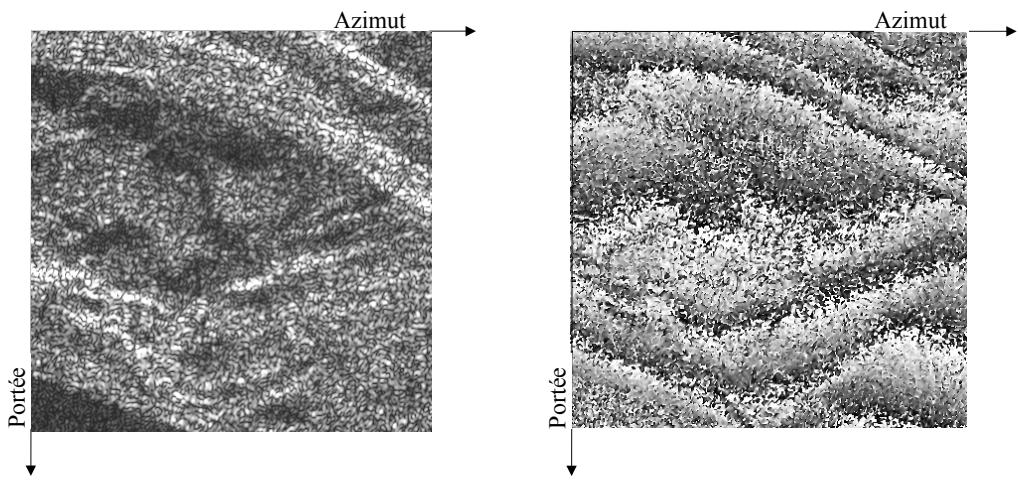


Figure III.7

*Imagette maîtresse ayant subit un grandissement de 3 par interpolation et interférogramme correspondant.*

Comme nous venons de le montrer, même dans le cas de transformations fort éloignées de l'identité, l'algorithme CZT est parfaitement adapté à l'interpolation complexe.

### **III.1.2 Génération de l'interférogramme**

#### **III.1.2.1 Retrait de la phase orbitale**

Lors de la génération d'un interférogramme à partir d'images coregistrées, on peut choisir d'effectuer ou non le retrait de la phase orbitale de manière à ne conserver que la phase topographique. En général, cette opération tend à diminuer le taux de franges moyen, ce qui facilite le déroulement de la phase. Cette composante de phase sera prise en compte à l'issue du traitement pour le calcul de l'altitude (éq. III.5 à III.8).

Dans le cas de la paire interférométrique de référence, la géométrie d'acquisition combinée avec le relief très énergétique de la scène donne lieu à un très grand nombre de zones d'étiirement. Dans ces zones, la pente est telle que la composante topographique seule, montre un taux de franges parfois plus élevé qu'avant retrait de la phase orbitale. Dès lors, ce retrait peut avoir l'effet inverse de celui désiré.

La figure III.8 montre l'interférogramme brut généré à partir des deux échantillons coregistrés de la paire interférométrique de référence du groupe FRINGE avant et après retrait de la phase orbitale.

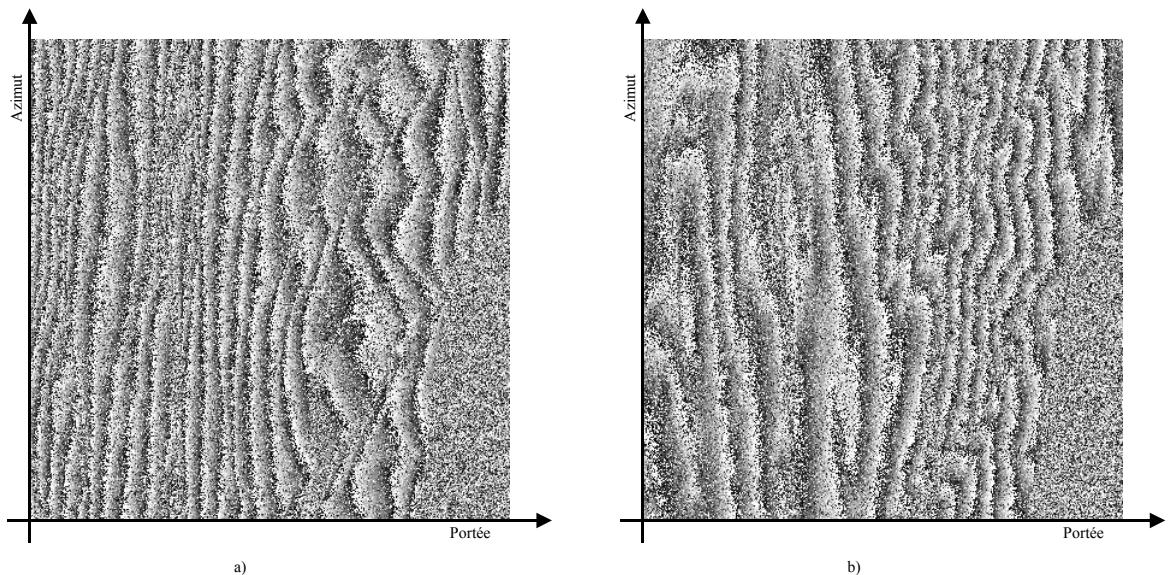


figure III.8

*Echantillon de l'interférogramme issu de la paire interférométrique de référence couvrant la région de Genargentu (Sardaigne), avant (a) et après (b) retrait de la phase orbitale.*

Ces deux échantillons d'interférogramme pleine résolution sont obtenus sans aucun filtrage. La base interférométrique est de l'ordre de 140m. On peut constater que l'un et l'autre sont très bruités. A pleine résolution, un filtrage est en général indispensable pour clairement mettre en évidence les sauts de phase et pour pouvoir réaliser par la suite le déroulement de la phase.

On ne pourra diminuer le taux de franges avec certitude que si on possède une première approximation de la topographie. Dans son état actuel, notre processeur ne permet pas de retirer une première approximation de la phase topographique. Cependant, le formalisme que nous avons développé peut le permettre aisément. En effet, actuellement, notre interféromètre calcule des altitudes au-dessus d'une sphère

terrestre de rayon  $R_t$  (figure II.2). Pour tenir compte d'une première approximation de la topographie dans le processus, il suffira de l'inclure dans la valeur de  $R_t$  en chaque point.

### **III.1.2.2 Interférogrammes moyennés**

La phase dans un interférogramme est non pas calculée mais estimée (§II.3.2.1). L'estimation dans le cas d'un interférogramme pleine résolution n'est réalisée que sur un seul pixel pour chaque point. C'est pourquoi ceux-ci ont un aspect très bruité. Dès lors, nous générerons en général des interférogrammes moyennés pour lesquels la phase est estimée sur un nombre suffisant de pixels pour garantir une bonne variance de phase (éq. II.22).

Dans le cas des images ERS, les dimensions au sol d'un pixel sont approximativement de 4m en azimut par 20m dans la direction de la portée, pour les zones planes. Les dimensions au sol d'un pixel sont donc dans un rapport 5/1. En pratique, dans le but de générer des interférogrammes où les pixels sont carrés, nous estimerons la phase interférométrique sur des zones rectangulaires dont les dimensions sont dans le rapport inverse.

La figure III.9 représente l'interférogramme complet de la paire interférométrique de référence du groupe FRINGE. Il a été moyenné sur des rectangles de 2 pixels en portée X 10 pixels en azimut. Nous obtenons alors des pixels carrés de dimensions 40m X 40m au sol, sur les zones planes.

Lors de la génération de l'interférogramme, les deux images de départ sont également moyennées en module. L'une de ces images est également représentée à la figure III.9. Dans cette image, les effets géométriques classiques de l'imagerie SAR sont très visibles. Le relief très montagneux de la Sardaigne donne lieu à des zones d'étirement, de raccourcissement, de recouvrement et d'ombrage. Les zones d'ombrage sont surtout visibles en bord de mer ou se trouvent de nombreuses falaises. On peut observer l'absence de franges interférométriques sur la mer. En effet, les deux scènes de la paire interférométrique n'étant pas acquises simultanément, les surfaces d'eau décohèrent complètement car les changements de rugosité qu'elles subissent sont largement supérieures à la dimension de la longueur d'onde utilisée.

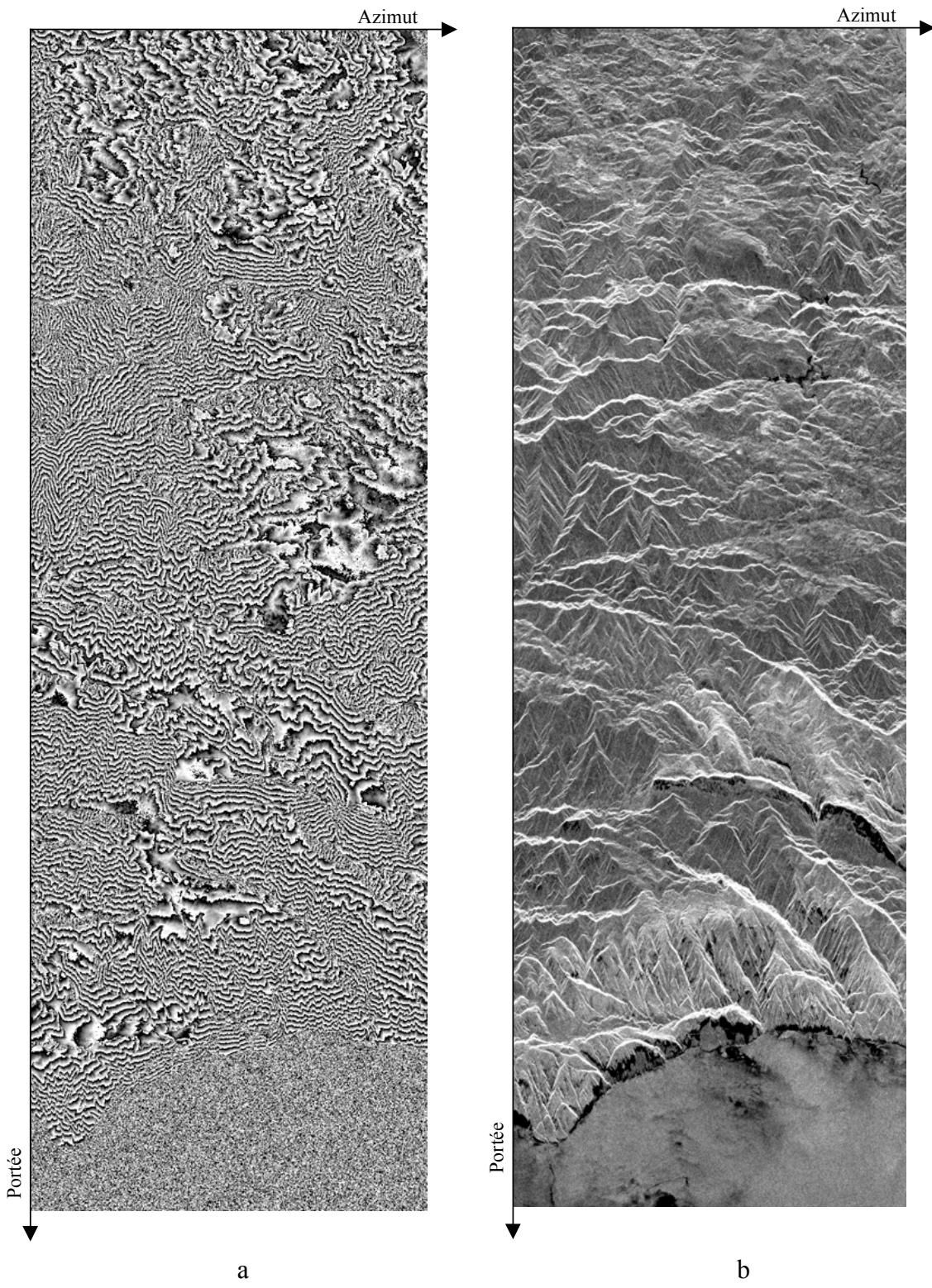


Figure III.9

- a) Interférogramme complet de la paire interférométrique de référence du groupe FRINGE
- b) Module de l'image maîtresse de la paire interférométrique de référence du groupe FRINGE

### **III.1.2.3 Filtrage**

Le moyennage par bloc décrit ci-dessus constitue une forme de filtrage passe-bas tout en conservant les sauts de phase, mais au prix d'une perte de résolution. Si le moyennage permet de réduire la variance de la phase, la diminution de la résolution spatiale qu'il induit augmente nécessairement le taux de franges par pixel. Si ce taux de franges devient localement trop important, le déroulage de la phase peut s'avérer impossible. C'est pourquoi, il est préférable de disposer également d'un autre mode de filtrage n'affectant pas l'échantillonnage. Ce filtre peut alors être appliqué aux images pleine résolution ou en complément du moyennage par bloc. Nous avons développé notre propre filtre qui, comme nous allons le voir, s'avère être aussi efficace que simple.

#### **III.1.2.3.1 Principe**

Le bruit dans un interférogramme étant constitué de hautes fréquences, il est indispensable de réaliser un filtrage passe-bas. Mais ce type de filtrage souffre d'un inconvénient majeur, il érode toute transition brusque, y compris les sauts de phase constituant les franges. Or, ceux-ci sont indispensables pour le déroulement de la phase. Si les sauts de phase sont érodés, on risque de mal interpréter l'interférogramme et de considérer qu'il n'est constitué que d'une seule frange. Dès lors, partant de l'image de phase de l'interférogramme, nous régénérerons l'interférogramme complexe dont nous filtrons indépendamment la partie réelle et la partie imaginaire par une gaussienne bidimensionnelle. Finalement, à partir de cette image complexe filtrée, on recalcule un interférogramme de phase dans lequel on retrouve, bien sûr, des sauts de phase [Derauw 1995 (a)]. L'organigramme du fonctionnement est représenté à la figure III.10. Pour gagner en temps calcul, la convolution par une gaussienne est calculée dans l'espace de Fourier.

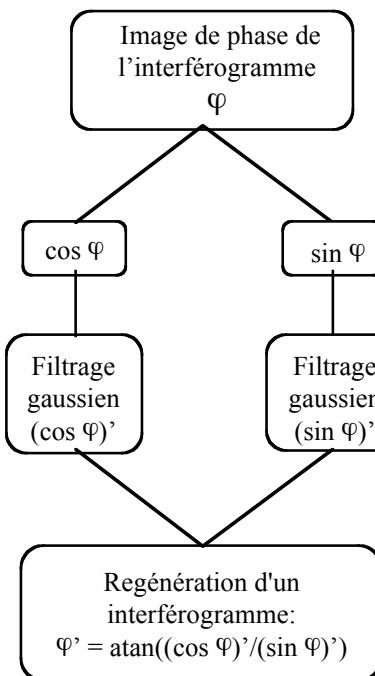


Figure III.10  
*Organigramme reprenant le fonctionnement du filtrage*

### III.1.2.3.2 Résultats

Ce filtre permet de conserver des sauts de phase quelle que soit la largeur de la gaussienne. On peut le constater dans les résultats suivants. La figure III.11 présente l'interférogramme brut de la figure III.8, filtré par une gaussienne symétrique de largeur à mi-hauteur  $\sigma_{\text{portée}} = \sigma_{\text{azimut}} = 1$  pixel. On constate l'efficacité du filtre. Les franges sont bien dessinées, le bruit de phase a été fortement réduit.

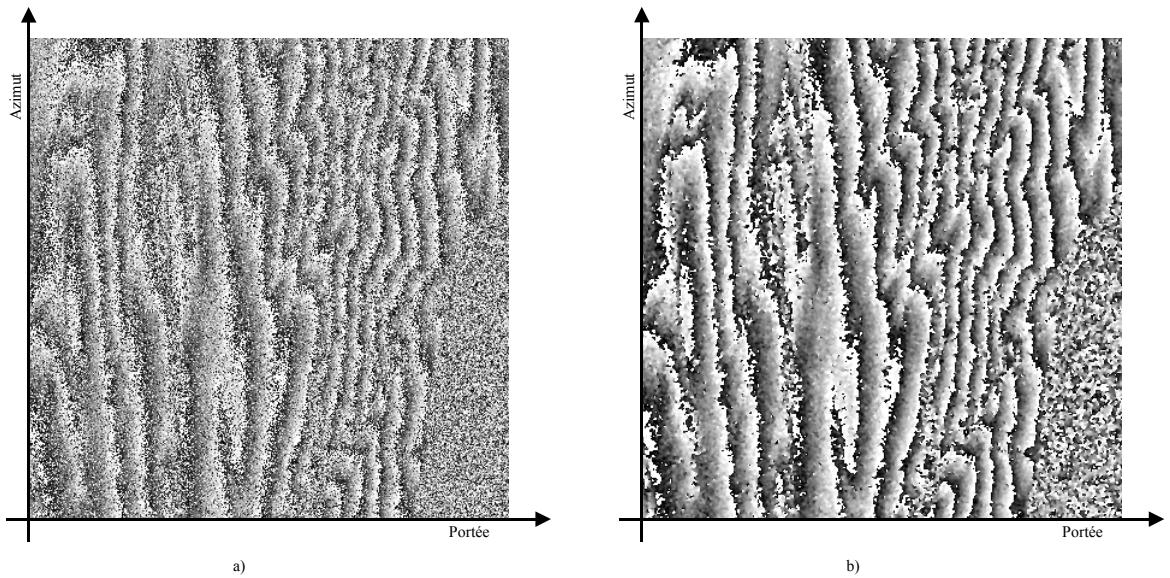


Figure III.11  
*a) Interférogramme brut*  
*b) Interférogramme filtré par une gaussienne symétrique*  
 $(\sigma_{\text{portée}} = 1\text{pixel}, \sigma_{\text{azimut}} = 1 \text{ pixels})$

### III.1.2.3.3 Remarque

L'efficacité d'un filtre ne doit pas faire oublier que tout filtrage induit une perte d'information. Le filtre que nous avons développé agit, sans distinction, aussi bien sur le bruit que sur les fréquences élevées du relief. Pour montrer le danger d'un filtrage excessif, nous avons diminué artificiellement le taux de frange de notre échantillon d'interférogramme en faussant la base interférométrique lors du retrait de la phase orbitale. Ceci nous permet de mettre clairement en évidence un cas de recouvrement (figure III.12).

La figure III.12 montre, d'une part, notre échantillon filtré avec une gaussienne symétrique de largeur à mi-hauteur  $\sigma_{\text{portée}} = \sigma_{\text{azimut}} = 1$  pixel, et d'autre part, le même interférogramme mais filtré avec une gaussienne asymétrique ( $\sigma_{\text{portée}} = 1\text{pixel}$ ,  $\sigma_{\text{azimut}} = 5$  pixels) de manière à respecter le rapport entre la dimension en portée et la dimension en azimut d'un pixel au sol.

En pratique de tels filtrages ne sont pas utilisés car ils peuvent rendre le déroulage plus difficile au lieu de le faciliter. Le premier filtrage, bien que déjà fort important, met bien en évidence le cas de recouvrement (à gauche de la ligne pointillée). Lors du filtrage par une gaussienne asymétrique, celui-ci a été fortement estompé. De ce fait, le sommet de la montagne induisant le recouvrement est confondu par endroits avec le flanc de montagne qui précède. De plus, un filtrage trop intense peut faire apparaître des pseudo-franges dans les zones très bruitées, comme c'est le cas dans la portion de mer à l'extrême droite des figures. Ces fausses franges seront alors interprétées

comme des reliefs fictifs. En pratique, ce filtre sera utilisé avec des gaussiennes très étroites (quelques dixièmes de pixel) de manière à ne filtrer que les très hautes fréquences dans le bruit de phase. Le moyennage par bloc sera préféré au filtrage gaussien. Celui-ci pourra venir en complément lorsque l'importance du bruit le justifiera.

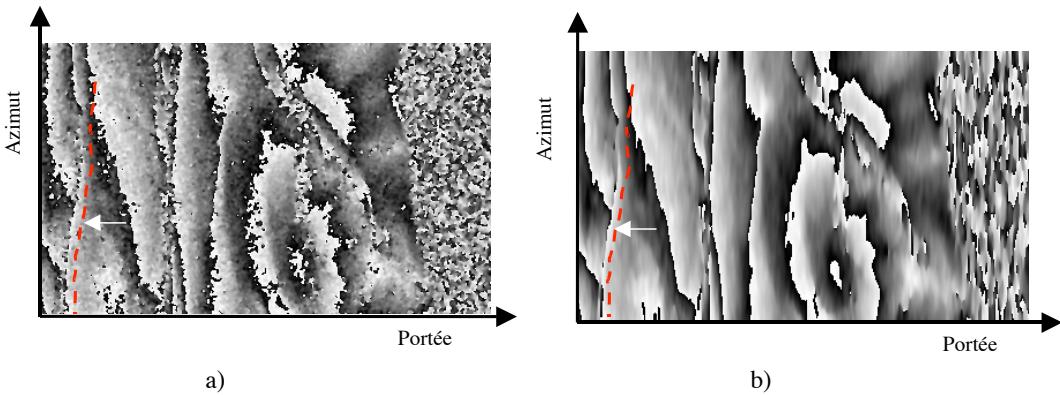


Figure III.12

*Interférogramme filtré par*

a) une gaussienne symétrique ( $\sigma_{\text{portée}} = \sigma_{\text{azimut}} = 1 \text{ pixel}$ )

b) une gaussienne asymétrique ( $\sigma_{\text{portée}} = 1 \text{ pixel}$ ,  $\sigma_{\text{azimut}} = 5 \text{ pixels}$ )

*Un cas de recouvrement le long de la ligne pointillée est indiqué par une flèche*

### III.1.3 Déroulement de la phase et extraction de l'altitude

#### III.1.3.1 Définition du problème

L'interférométrie ne permet de mesurer que la valeur principale des différences de phase entre deux fronts d'onde. La phase dans un interférogramme n'est donc connue que modulo  $2\pi$  (éq. II.15). Il faut donc, si l'on veut extraire l'altitude d'un point à partir de l'information de phase, retrouver la valeur de la phase "vraie", c'est-à-dire retrouver le multiple de  $2\pi$  qui lui est associé. Ceci constitue le problème du déroulement de la phase. Nous avons choisi d'utiliser la méthode dite des résidus à laquelle nous avons apporté quelques modifications.

#### III.1.3.2 Méthode des résidus

A la base, cette méthode consiste à intégrer la valeur principale de la phase sur un chemin quelconque dans l'interférogramme, en ajoutant ou soustrayant  $2\pi$  chaque fois qu'un saut de phase est détecté. Pour que cette intégration soit possible, il faut supposer que les données sont convenablement échantillonnées. Pour satisfaire au critère de Nyquist, nous ne pouvons avoir de sauts de phase de plus d'un demi cycle entre deux pixels voisins. On considère, dès lors, que la différence des phases déroulées entre deux pixels adjacents est toujours comprise dans l'intervalle  $[-\pi ; \pi]$ .

Si on appelle  $\psi$ , la phase dans l'interférogramme et  $\psi_d$  la phase déroulée que l'on recherche, alors, la phase déroulée d'un pixel peut toujours s'exprimer en fonction de la phase déroulée du pixel qui la précède de la manière suivante:

$$\psi_{d_{j+1}} = \psi_{d_j} + (\psi_{d_{j+1}} - \psi_{d_j}) = \psi_{d_j} + \Delta\psi_{d_{j+1}} \quad (\text{III.12})$$

où  $j$  est un indice de position du pixel dans l'image.

Si les conditions d'échantillonnage sont adéquates, alors la différence des phases déroulées entre pixels adjacents  $\Delta\psi_d$  peut toujours s'exprimer en fonction de la différence des phases  $\Delta\psi$  dans l'interférogramme non déroulé. En effet, si les deux pixels se trouvent dans la même frange alors:  $\Delta\psi_d = \Delta\psi$ . Par contre, si les deux pixels considérés se situent dans deux franges adjacentes, la différence de phase mesurée dans l'interférogramme sera supérieure à  $\pi$  en valeur absolue. Un saut de phase sera donc détecté lorsque  $|\Delta\psi| \geq \pi$ . En se basant sur la figure III.13, une simple étude de cas nous permet d'établir la relation qui existe entre  $\Delta\psi_d$  et  $\Delta\psi$  [Prati & al. 1990]:

$$\begin{aligned} S &= \Delta\psi && \text{si } |\Delta\psi| < \pi \\ &= \Delta\psi + 2\pi && \text{si } \Delta\psi \leq -\pi \\ &= \Delta\psi - 2\pi && \text{si } \Delta\psi \geq +\pi \end{aligned} \quad (\text{III.13})$$

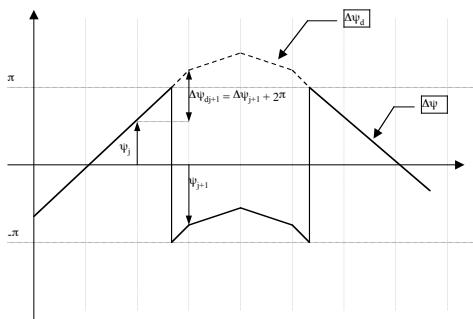


Figure III.13

*Schéma de principe du déroulement de la phase par intégration du gradient de phase*

En se basant sur ce schéma, il suffit de se donner un point de départ pour lequel on suppose que la phase dans l'interférogramme équivaut à la phase déroulée et d'intégrer les différences de phase sur l'entiereté de l'interférogramme.

Cependant, si on examine un interférogramme SAR, on constate, outre le bruit, qu'il existe en général des discontinuités de phase dues aux effets géométriques de recouvrement et d'ombrage. De plus, dans certains cas de raccourcissement trop important, la condition de Nyquist d'échantillonnage de la phase dans l'interférogramme peut ne plus être satisfaite. Dès lors, le schéma d'intégration simple décrit ci-dessus n'est plus valide. On ne peut donc choisir n'importe quel chemin d'intégration pour dérouler la phase. La méthode des résidus consiste en la détection des discontinuités de phase de manière à interdire certains chemins d'intégration.

Lorsqu'on intègre le gradient de phase sur un chemin d'intégration fermé, le résultat doit être nul, pour autant que le chemin d'intégration soit valide. Si ce n'est pas le cas, cela signifie que le chemin d'intégration choisi a encerclé un ou plusieurs résidus. Un résidu, au sens analytique du terme, est un point de rotationnel non nul. Si le chemin d'intégration n'encercler qu'un seul résidu, le résultat de l'intégration sera  $+2\pi$  ou  $-2\pi$ . La méthode consiste donc à détecter tous les résidus et à connecter entre eux autant de résidus positifs que négatifs. De cette manière, on obtient une connexion de charge nulle qui ne pourra être traversée lors du déroulement de la phase par intégration. Tout chemin d'intégration encerclant une connexion de charge nulle sera dès lors valide.

Dans la méthode des résidus telle que proposée par Goldstein et al., les résidus sont connectés par plus proches voisins jusqu'à obtention d'une connexion de charge nulle.

La détection des résidus se fait en intégrant le gradient de phase dans l'interférogramme sur des chemins d'intégration fermés les plus petits possibles. Nous

balayons donc l'interférogramme en intégrant le gradient de phase toujours dans le même sens sur un chemin carré de quatre pixels. De cette manière, nous localisons les résidus entre les pixels (figure III.14). Dès lors, le réseau de connexions généré est également localisé entre les pixels de l'interférogramme à dérouler.

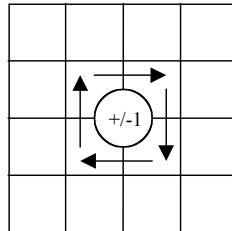


Figure III.14

*Détection des résidus par intégration du gradient de la phase sur le parcours fermé le plus petit possible*

La méthode des résidus souffre de deux inconvénients majeurs. Premièrement, une connexion est constituée d'un ensemble de segments de droites ne suivant pas nécessairement la discontinuité de phase réelle. Deuxièmement, la manière dont on connecte les résidus varie en fonction du résidu d'où l'on démarre. Une connexion peut ne pas respecter la discontinuité de phase réelle même si le déroulement de la phase se fait mathématiquement sans erreurs. Des erreurs de connexion sont également possibles si le correspondant d'un résidu se trouve en dehors de l'image. Dans ces cas, la phase déroulée pourra être fausse dans certaines zones.

### **III.1.3.3 Connexion de résidus guidée par la cohérence**

Pour palier aux inconvénients décrits ci-dessus, nous avons choisi de connecter les résidus en tenant compte d'une estimation de la cohérence. En effet, une discontinuité de phase est une zone où il y a perte de cohérence. De ce fait, les résidus appartenant à une même discontinuité sont localisés dans un même îlot de faible cohérence. Dès lors, l'estimation de la cohérence peut être avantageusement utilisée pour guider le processus de connexion des résidus. De cette manière, chaque connexion suit correctement la discontinuité de phase de laquelle sont issus les résidus qui la composent, et ce, même si une discontinuité sort de l'image.

Cependant, comme nous l'avons vu, l'estimation de la cohérence est perturbée par la phase topographique. De ce fait, la cohérence estimée sur une zone de raccourcissement par exemple, peut s'avérer plus faible que celle estimée sur une zone d'étirement montrant pourtant un rapport signal sur bruit équivalent. Une telle estimation de la cohérence utilisée comme guide pour la connexion des résidus peut induire des erreurs dans le processus de connexion. C'est pourquoi nous avons mis au point un estimateur de cohérence dans lequel une approximation de la phase topographique locale est retirée préalablement à la mesure. Cette procédure nous permet d'obtenir une carte de cohérence dans laquelle les discontinuités de phase sont clairement localisées [Derauw 1995 (b)].

Après retrait des franges orbitales, nous estimons la phase topographique locale de la manière suivante. Pour chaque point, nous utilisons un interférogramme filtré pour trouver le meilleur plan de phase local. Pour ce faire, nous déroulons la phase sur une spirale partant du point considéré. Ensuite, le meilleur plan de phase est déterminé par moindres-carrés sur les phases ainsi déroulées (figure III.15).

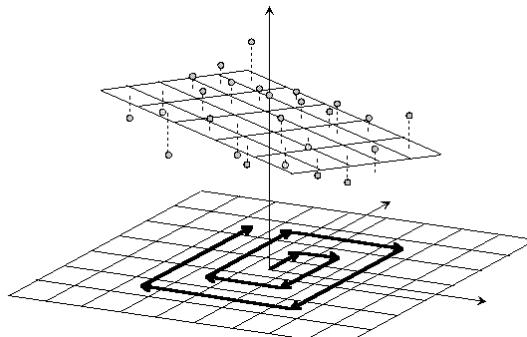


Figure III.15

*Calcul du plan de phase local par moindres-carrés sur les phases déroulées en spirale*

Ce plan de phase local est soustrait de l'interférogramme au point considéré. On procède de la même manière pour chaque point, avant estimation de la cohérence (éq. II.26).

Cette méthode peut sembler lourde à mettre en oeuvre. Cependant, si dans son principe, la méthode est bien celle décrite ci-dessus, le retrait du meilleur plan de phase calculé par moindres-carrés équivaut simplement à déduire la moyenne des phases déroulées en spirale (il s'agit du terme constant d'une régression linéaire).

Lorsqu'un résidu est rencontré durant le déroulage de phase en spirale, les phases déroulées ainsi que le plan local de phase qui en résulte seront faussés. Ceci donnera lieu à une sous-estimation de la cohérence locale. Cet estimateur de cohérence est donc biaisé et ne peut être utilisé pour réaliser une mesure de cohérence précise et fiable. Cependant, il permet d'obtenir une carte de cohérence ou les discontinuités de phase sont très contrastées. Une telle estimation de la cohérence est donc parfaitement adaptée pour guider la connexion de résidus.

La figure III.16 représente la carte de cohérence de la paire interférométrique de référence du groupe FRINGE obtenue en utilisant notre estimateur (la cohérence est estimée sur des fenêtres de 5X5 pixels et la pente locale de phase est estimée sur une spirale de 5 pixels de "côté").



Figure III.16  
*Carte de cohérence de la paire interférométrique de référence estimée après retrait d'une phase topographique approchée*

Le processus de connexion démarre du résidu ayant la cohérence la plus élevée. La cohérence du résidu de départ est considéré comme un seuil en-dessous duquel la zone de recherche des résidus suivants peut s'étendre. Nous avons en quelque sorte considéré la carte de cohérence comme étant tridimensionnelle. La cohérence du point de départ est alors considérée comme un niveau de remplissage. De cette manière, la zone de recherche est limitée à ce qui est "noyé" (figure III.17).

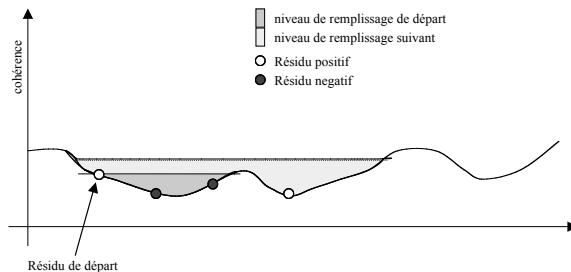


Figure III.17  
Schéma de principe de la recherche de résidus guidée par la cohérence

Pour également connecter les résidus par plus proche voisin, la recherche dans la zone autorisée s'effectue par cercles (ou par ellipses) concentriques autour du résidu de départ, puis autour de chaque résidu trouvé. Si à l'issue de ce processus, la chaîne de résidus établie n'est pas de charge nulle, le niveau de remplissage est augmenté d'un pas de manière à étendre la zone de recherche. Le processus de recherche est arrêté dès qu'une chaîne de résidus de charge nulle a pu être établie après avoir fouillé l'ensemble de la zone de recherche autorisée, ou bien lorsqu'un bord de l'image est rencontré.

Dans le module de connexion mis au point, nous avons laissé les paramètres suivants au choix de l'utilisateur:

- Un rayon minimum de recherche (plus généralement, le demi grand axe et le demi petit axe de l'ellipse minimum):  
En général, les résidus dans les zones de haute cohérence vont par paires et sont très proches de leur "conjoint". Comme le processus de connexion démarre du résidu de plus haute cohérence, on commence par vérifier si dans le cercle ou l'ellipse minimum, ne se trouve pas une paire de résidus de signe opposé. Si c'est le cas, une connexion est établie et le processus redémarre à partir du résidu suivant dans l'ordre décroissant de cohérence. Ceci permet d'éliminer et de connecter rapidement un grand nombre de paires de résidus.
- Le pas d'augmentation du rayon du cercle de recherche (ou le pas d'augmentation du demi grand axe et du demi petit axe de l'ellipse de recherche):  
En général, ce pas est maintenu à 1 pixel. Cependant, dans des cas particuliers où la densité de résidus à connecter est faible et la cohérence moyenne élevée, il peut être intéressant d'étendre plus rapidement le cercle de recherche pour accélérer le processus.
- L'échelle de cohérence:  
La cohérence estimée est convertie en un nombre entier codé sur 16 bits. On peut dès lors choisir l'échelle de cohérence entre 1 et 32768, c'est-à-dire, le nombre

entier qui correspond à une cohérence unitaire. Le choix de cette échelle détermine le "pas" de cohérence utilisé pour étendre la zone de recherche quand aucune connexion valide n'a pu être trouvée à partir du seuil de cohérence précédent.

- **Le mode de fonctionnement:**

On peut choisir d'interrompre le processus lorsqu'une chaîne de résidus valide a été établie avant que la zone de recherche ait été complètement fouillée. Le mode de fonctionnement est caractérisé par un nombre entier qui correspond au nombre de fois que le rayon de recherche sera encore augmenté avant d'interrompre le processus lorsqu'une chaîne valide est déjà établie mais que la zone de recherche n'a pas encore été complètement fouillée. Le mode 0 consiste à fouiller l'intégralité de la zone de recherche même si une chaîne valide a déjà été constituée. Il s'agit là du mode "normal" de fonctionnement .

Le mode 1 consiste à établir les chaînes de résidus les plus petites possibles. Lorsque la densité de résidus est fort élevée, le mode 1 a tendance à laisser des résidus orphelins car la zone de faible cohérence correspondant à la discontinuité de phase n'est pas parcourue entièrement. La grande connexion qui aurait alors dû être constituée se retrouve sectionnée en petits tronçons de charge nulle en laissant en général des résidus orphelins de signes opposés aux extrémités. Ces résidus orphelins seront alors connectés à un bord ou à des chaînes de résidus auxquels ils n'appartiennent pas et dont ils fausseront la charge. En pratique, c'est le mode 3 qui semble donner les résultats les plus adéquats.

- **Un seuil de nettoyage:**

Le seuil de nettoyage est un seuil de cohérence laissé au libre choix de l'utilisateur, qui permet de déplacer les bords de l'image vers l'intérieur de la scène. Partant du bord, et en avançant de proche en proche, on invalide la recherche dans toute zone ayant une cohérence inférieure à ce seuil. Cet artifice très simple permet d'éviter la connexion de résidus dans des zones correspondant à de grandes étendues d'eau, ou à toute autre surface décorrélant le signal interférométrique, pour autant que celle-ci soit interceptée par un bord de l'image.

- **Le seuil de suivi:**

Il s'agit du seuil de cohérence en dessous duquel, tout point rencontré lors du processus de recherche est considéré comme un résidu de charge nulle qui sera connecté comme les autres résidus de la chaîne. Ceci permet d'établir des connexions qui suivent mieux les discontinuités réelles sans en influencer la charge.

La figure III.18 représente l'image des connexions obtenue à partir des résidus de l'interférogramme de la paire interférométrique de référence. Ces connexions ont été établies en utilisant la carte de cohérence obtenue précédemment (figure III.16).

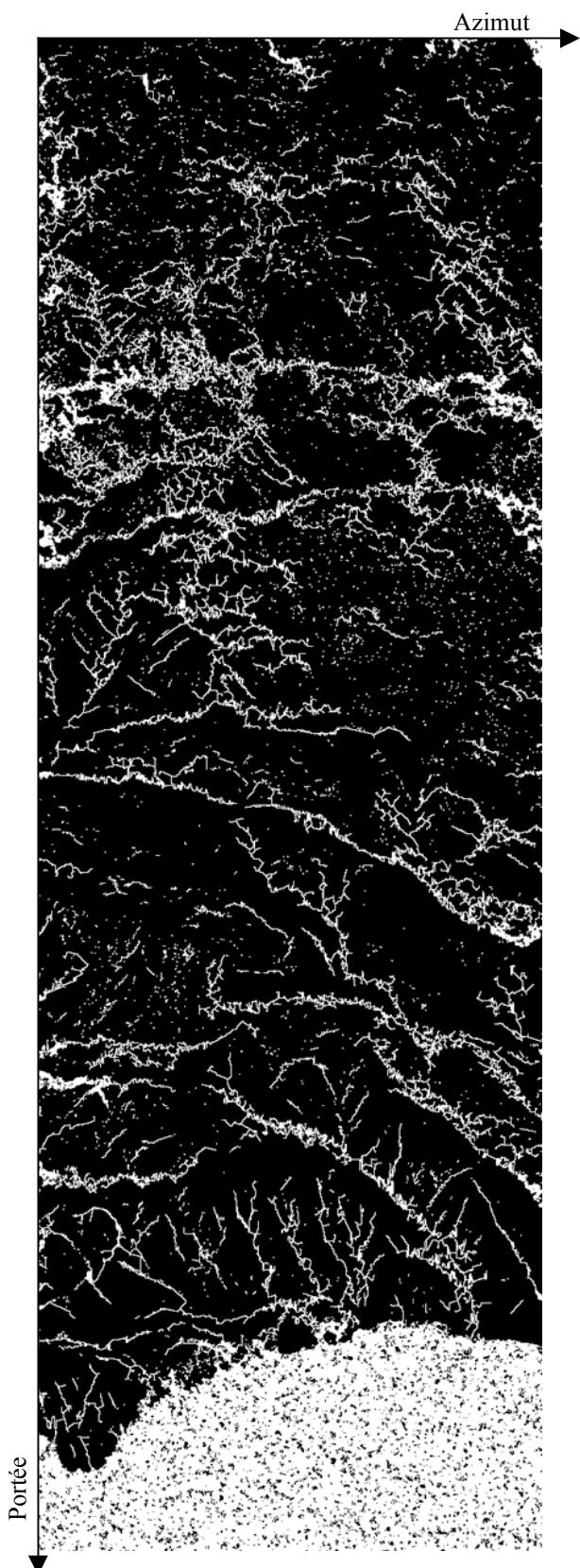


Figure III.18  
Image des connexions des résidus de la paire interférométrique de référence

### *Chapitre III*

Pour montrer l'efficacité du guidage par la cohérence, l'image des connexions et la carte de cohérence ont été superposées (figure III.19).

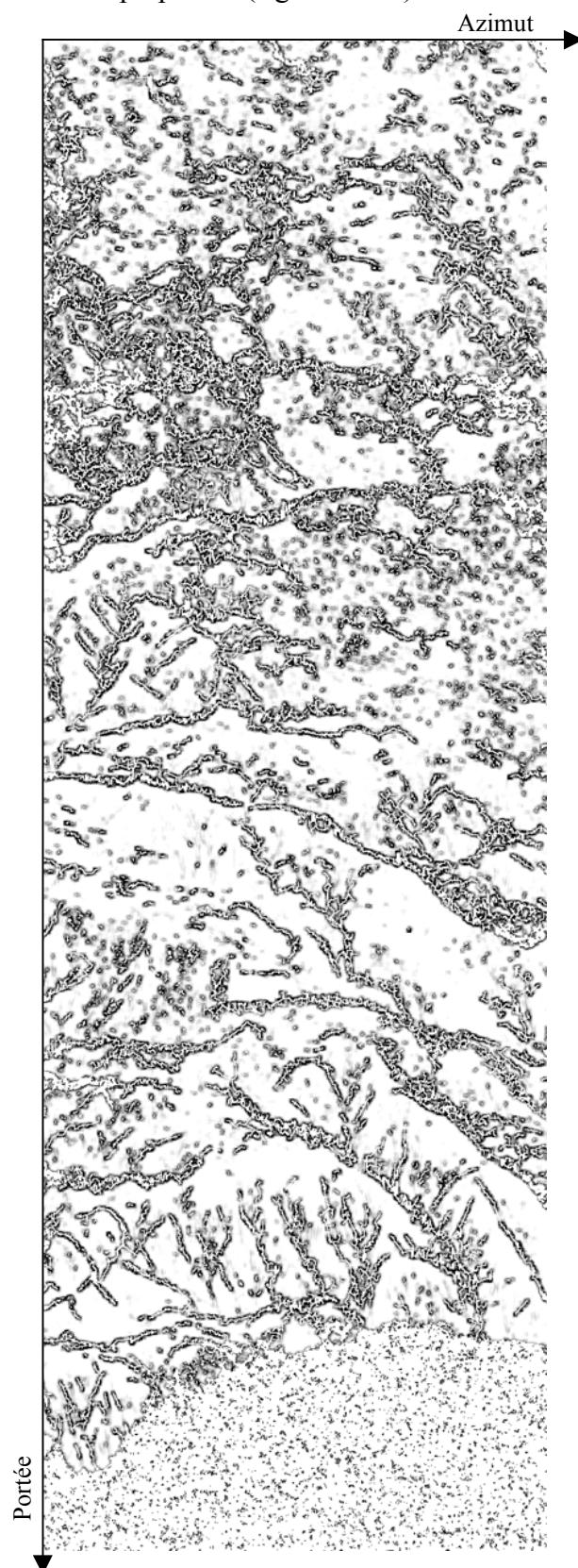


Figure III.19  
*Superposition de l'image des connexions et de la carte de cohérence*

### **III.1.3.4 Génération du MNT**

Une fois en possession d'un réseau de connexions valide, la phase de l'interférogramme peut être déroulée par intégration du gradient de la phase suivant n'importe quel chemin contournant les connexions établies. Le point de départ de l'intégration sera considéré comme connu. En d'autres mots, la phase du point de départ sera considérée comme déjà déroulée. En conséquence, le déroulage de phase n'est réalisé qu'à une constante d'intégration  $2n\pi$  près. Comme nous le discuterons ultérieurement, ceci générera une erreur sur le calcul du MNT. Après déroulage, la phase est convertie en donnée altimétrique. Pour ce faire, la phase orbitale précédemment retirée pour diminuer le taux de franges et faciliter le déroulage, est additionnée à la phase déroulée et les altitudes locales sont calculées directement en utilisant les équations II.5 à II.8.

Le réseau de connexions peut s'avérer très complexe et donner lieu à des zones complètement encerclées et isolées du restant. Pour chacune de ces zones indépendantes, un nouveau point de départ devra être choisi pour y dérouler la phase. Le MNT final sera alors constitué de zones indépendantes. Entre chaque zone, il existera un piston qu'il est impossible de déterminer avec certitude, sauf si pour chaque zone, on possède un point au sol dont on connaît l'altitude.

La figure III.20 représente le MNT issu de la paire interférométrique de référence. On y constate qu'un certain nombre de régions ont été déroulées indépendamment. Certaines de ces zones ne couvrent que quelques pixels. Ces petites zones sont en général présentes dans les régions de faible cohérence. La figure III.21 est une représentation tridimensionnelle d'une partie du MNT obtenu sur lequel nous avons drapé le module de l'image maîtresse. Cette image en module s'adapte parfaitement au MNT généré. Ceci montre que dans cette zone où sont présents plusieurs cas de recouvrements, le déroulage de la phase a été réalisé avec succès. Les résidus ont été connectés correctement en suivant les discontinuités réelles présentes.

C'est sur cet élément de MNT que nous avons réalisé une toute première analyse quantitative de la qualité des MNT générés par notre processeur. Une étude sommaire nous a permis de déterminer que l'erreur quadratique moyenne entre notre MNT interférométrique et les cartes topographiques au 50 millième était de l'ordre de 36m [Derauw 1995]. Ce résultat plutôt médiocre a été obtenu sans aucune correction des erreurs systématiques. Notamment, aucune rampe de phase consécutive à une erreur sur la base interférométrique, n'a été retirée. Nous verrons au chapitre suivant, dans le cadre d'une étude réalisée sur la Belgique, que si le MNT interférométrique peut être corrigé en tenant compte de l'altitude d'au moins trois points de la scène, alors, la précision est bien meilleure et peut aisément atteindre quelques mètres.

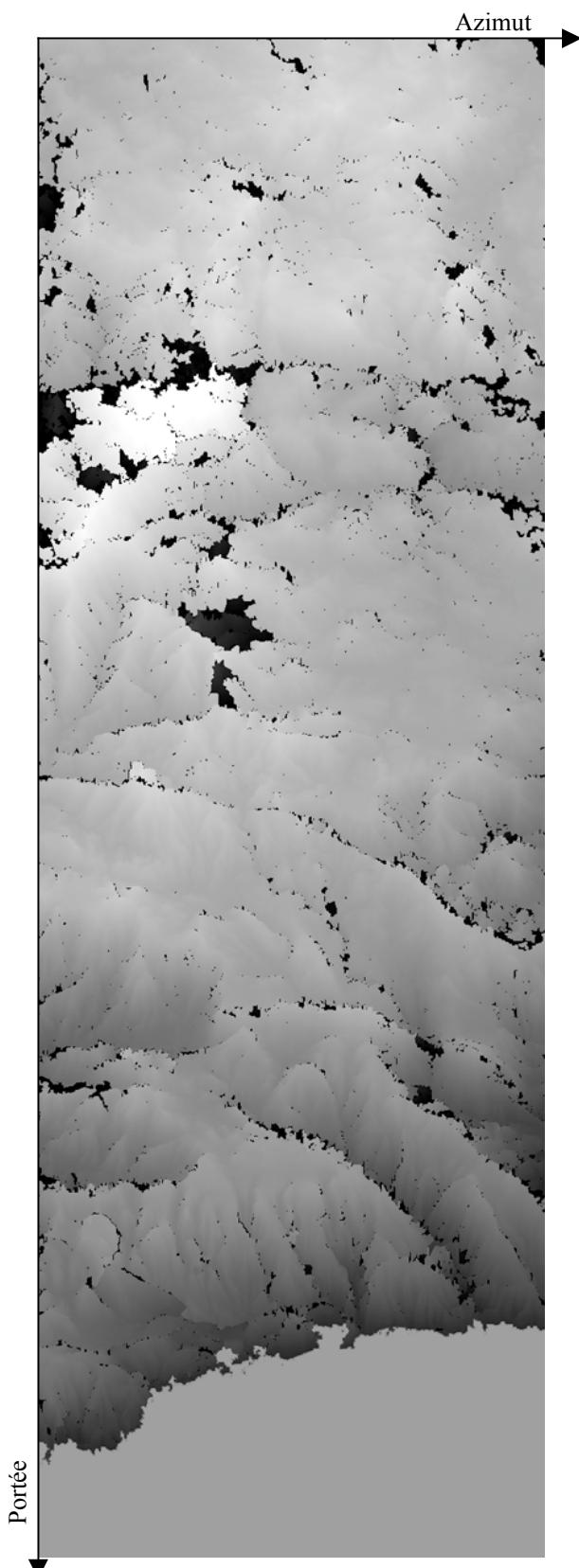


Figure III.20

*Modèle Numérique de Terrain de la paire interférométrique de référence du groupe FRINGE. (Région de Gennargentu, Sardaigne. Images ERS-1 du 2 et du 8 août 1991, orbites 241 et 327)*

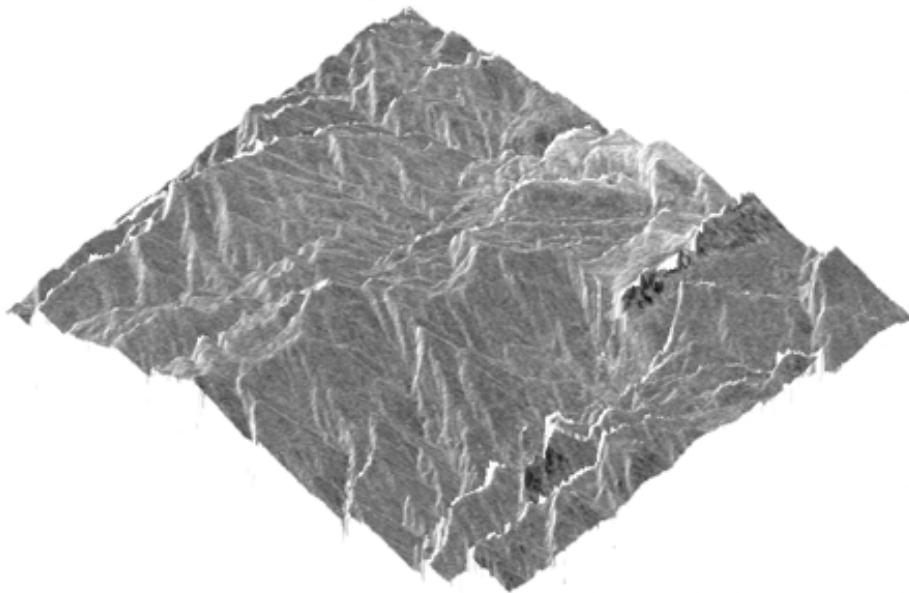


Figure III.21

*Représentation tridimensionnelle d'une portion du MNT de Sardaigne drapé par l'image SAR en module*

### **III.1.4 Calculs d'erreur**

Nous avons effectué un calcul d'erreur sur chaque paramètre entrant dans le calcul de l'altitude d'un point (éq. II.5 à II.8). Les développements mathématiques fastidieux mais sans difficultés ne sont pas repris ici. Les simplifications des expressions parfois complexes, ont toutes été réalisées en se basant sur les relations géométriques évidentes liant les différentes grandeurs reprises à la figure II.2.

#### **III.1.4.1 Rayon terrestre**

L'erreur sur l'altitude est simplement proportionnelle à une erreur sur le rayon terrestre. En effet:

$$\frac{\partial h}{\partial R_t} = 1 \quad (\text{III.14})$$

Dès lors, comme les mesures d'altitude sont relatives, une erreur sur le rayon terrestre n'a aucune influence.

#### **III.1.4.2 Position du satellite**

$$\frac{\partial h}{\partial S} = \frac{S - z_1 \cos(\alpha - a_t)}{\sqrt{S^2 + z_1^2 - 2Sz_1 \cos(\alpha - a_t)}} \approx \frac{S - z_1 \cos(\alpha - a_t)}{R_t} = \cos(a_t) \quad (\text{III.15})$$

L'angle terrestre  $a_t$  est de l'ordre de  $3^\circ$  et varie très peu, même pour une scène de

100x100 km. Dès lors,  $\frac{\partial h}{\partial S}$  peut être considéré comme constant ( $\cos(a_t) \approx 1$ ), et comme précédemment, si l'erreur sur  $S$  est constante, cette source d'erreur n'est d'aucune influence sur des mesures relatives (éq. III.16).

$$\Delta h = \frac{\partial h}{\partial S} \Delta S \approx \Delta S \quad (\text{III.16})$$

#### III.1.4.2.1 Remarque

Si  $S$  varie peu, cette distance ne peut être considérée comme constante. Sur base des données orbitographiques, nous avons pu constater, au cours des multiples traitements que nous avons réalisés, que  $S$  variait typiquement de quelques centaines de mètres sur la distance azimutale couvrant une scène ERS de 100 X 100 km. Dès lors, on ne peut considérer  $S$  comme constant sinon, on introduit volontairement une rampe d'altitude en azimut. Il faut encore remarquer que comme la dépendance linéaire de  $S$  est connue, la rampe d'altitude introduite en la négligeant, peut être retirée a posteriori.

#### III.1.4.3 Position en portée dans l'image maîtresse

L'interférométrie nous permet d'obtenir la portée  $z_2$  d'un point dans l'image esclave de manière très précise (une fraction de longueur d'onde) par rapport à la portée dans l'image maîtresse (éq. II.8). La distance  $z_1$  n'est, elle, connue qu'à la précision de la télémétrie du satellite.

$$\frac{\partial h}{\partial z_1} \approx \frac{z_1 - S \cos(\alpha - a_t)}{R_t} = -\cos(\alpha) \quad (\text{III.17})$$

Remarquons que l'incertitude sur la portée ne concerne pas la résolution en portée du système SAR, mais bien l'incertitude sur la distance entre le senseur et un pixel donné. L'erreur sur  $z_1$  peut être issue d'une erreur d'horloge ou plus simplement d'une variation d'indice de réfraction locale du milieu de propagation. Une telle anisotropie engendre un échantillonnage non constant suivant la portée. Hormis ce cas spécifique, la stabilité de l'horloge interne du satellite nous permet de considérer que l'erreur sur  $z_1$  reste très faible. De plus, comme la variation de l'altitude en fonction de la portée (éq. III.17) peut être considérée comme linéaire en première approximation ( $\alpha \in [19^\circ; 26^\circ]$ ), cette source d'erreur induira une rampe d'altitude en portée qui se traduira par un plan si l'erreur sur  $z_1$  est constante pour l'ensemble de l'image.

#### III.1.4.4 Phase

$$\frac{\partial h}{\partial \Delta \varphi} \approx -\frac{1}{k_{z_0}} \frac{\sin(\alpha - a_t)}{\cos(\theta - (\alpha - a_t))} \frac{z_2}{B} \frac{S}{R_t} = -\frac{1}{k_{z_0}} \frac{z_2 \sin(\alpha)}{B_\perp} \quad (\text{III.18})$$

Comme on pouvait s'y attendre, une augmentation de l'ouverture de la base interférométrique ( $B_\perp$  est la composante de la base perpendiculaire à la ligne de visée) induit une diminution de la variation de l'altitude pour une même variation de la phase

mesurée. En d'autres mots, plus la base est ouverte et plus la densité de franges est élevée. L'équation (III.18) n'est autre que l'expression de l'ambiguïté d'altitude. Cette source d'erreur dépendra essentiellement de la cohérence locale (éq. II.22).

#### *III.1.4.4.1 Remarque*

Par le principe même de déroulement de la phase, celle-ci n'est connue qu'à une constante  $2n\pi$  d'intégration près. Dès lors, l'erreur sur l'altitude induite par une incertitude sur la phase doit s'écrire:

$$\Delta h = \frac{\partial h}{\partial \Delta \varphi} (2n\pi + \Delta(\Delta\varphi)) \quad (\text{III.19})$$

où  $\Delta(\Delta\varphi)$  est l'incertitude de mesure sur la phase interférométrique.

Etant donné que l'ambiguïté d'altitude varie quasi linéairement avec la portée, le terme constant  $2n\pi$  induira une erreur sur l'altitude qui correspondra approximativement à une rampe d'altitude, de pente indéterminée, suivant la portée. Le seul moyen d'éviter cette source d'erreur consiste à connaître l'altitude du point de départ du déroulement de la phase, de manière à pouvoir déterminer cette constante d'intégration avec précision. Dans notre cas, le point ayant l'altitude la plus basse est choisi comme point de départ pour le déroulement de la phase et son altitude est supposée nulle. Cette procédure simple nous permet non pas d'annuler cette source d'erreur, mais du moins de la minimiser.

A titre d'exemple, si on considère une base interférométrique horizontale de 200m et si on suppose que la constante d'intégration correspond à une frange, la rampe d'altitude induite variera de -40 à -60m en fonction de la portée, soit de 20m pour 100km.

Cette erreur résiduelle est inévitable. Cependant, comme il s'agit d'une variation (quasi) linéaire, la connaissance de l'altitude de deux points suffisamment distants en portée permettra une correction a posteriori. Cette correction doit être appliquée pour chaque zone déroulée indépendamment.

#### *III.1.4.5 Base interférométrique*

Nous allons étudier l'erreur sur la base interférométrique de deux manières différentes : Premièrement, en la décomposant en ses deux composantes parallèle ( $B_{//}$ ) et orthogonale ( $B_{\perp}$ ) à la ligne de visée, ce qui nous donnera une erreur par rapport à des composantes variables en fonction du point observé.

Deuxièmement, nous allons calculer l'erreur induite sur l'altitude par rapport à une incertitude sur les composantes de la base interférométrique, orthogonale ( $B_x$ ) et parallèle ( $B_y$ ) à la direction satellite - centre de la Terre.

#### *III.1.4.5.1 $B_{\perp}$ et $B_{//}$*

$$\frac{\partial h}{\partial B_{\perp}} \approx -\sin(\alpha) \quad (\text{III.20})$$

L'angle d'incidence ne variant qu'assez peu, cette source d'erreur peut être considérée comme linéaire. Elle induira donc également une rampe d'altitude suivant la portée.

$$\frac{\partial h}{\partial B_{//}} \approx \frac{z_1 \sin(\alpha)}{B_{\perp}} \quad (\text{III.21})$$

Il s'agit ici incontestablement de la source d'erreur la plus importante. Elle est approximativement 220 fois plus importante que l'erreur issue d'une incertitude sur la phase (éq. III.18). En effet, pour les plates-formes ERS, le nombre d'onde  $k_{z0}$  vaut :  $220.483 \text{ m}^{-1}$ . Ceci signifie que, toujours dans le cas d'une base horizontale de 200m, si l'on désire atteindre une erreur sur l'altitude relative d'un point de l'ordre du mètre, d'un bout à l'autre de l'image, il faut connaître la composante parallèle de la base interférométrique avec une précision de l'ordre de 1,5mm, ce qui est utopique. De nouveau, il faut remarquer que du fait de la linéarité de la variation de l'erreur et comme l'incertitude sur  $B_{//}$  peut être considérée comme constante, la connaissance de l'altitude de deux points suffisamment distants en portée suffit pour permettre une correction a posteriori.

#### *III.1.4.5.2 $B_x$ et $B_y$*

$$\frac{\partial h}{\partial B_x} \approx z_1 \sin(\alpha) \frac{\sin(\alpha - a_t)}{B_x \cos(\alpha - a_t) + B_y \sin(\alpha - a_t)} \quad (\text{III.22})$$

$$\frac{\partial h}{\partial B_y} \approx z_1 \sin(\alpha) \frac{\cos(\alpha - a_t)}{B_x \cos(\alpha - a_t) + B_y \sin(\alpha - a_t)} \quad (\text{III.23})$$

En reprenant les valeurs relatives à une base interférométrique horizontale ( $B_y = 0$ ) de 200m, on déduit que la précision sur  $B_x$  doit être de l'ordre de 24 cm et celle sur  $B_y$  de 17 cm pour que l'erreur sur l'altitude relative reste inférieure au mètre par kilomètre en portée. Rappelons, de nouveau, que l'erreur induite varie approximativement linéairement en fonction de la portée, pour autant que l'erreur sur la base soit constante.

#### *III.1.4.6 Conclusion*

On peut distinguer deux types d'erreurs, les erreurs "aléatoires" et les erreurs constantes ou linéaires. Les erreurs de type aléatoire sont issues de l'incertitude sur la position en portée  $z_1$  (erreurs d'horloge) et de l'incertitude sur la phase mesurée dans l'interférogramme. Les autres sources d'erreurs impliquent les paramètres géométriques de prise de vue ( $R_t, S, B_x, B_y, \alpha$ ). En règle générale, les incertitudes sur ces paramètres peuvent être considérées comme constantes sur la durée d'acquisition. De plus, les erreurs qu'ils induisent, même si elles sont importantes, varient linéairement au premier ordre avec la portée ou l'azimut, ce qui se traduit par une erreur d'altitude qui suit un plan. De ce fait, une correction a posteriori est tout à fait possible. Il suffit de connaître l'altitude d'au moins trois points par zone déroulée indépendamment pour déterminer l'équation du plan à retirer.

## **III.2 TRAITEMENT DINSAR**

La phase dans l'interférogramme peut contenir, outre l'information topographique, une information relative à des mouvements locaux, des effets atmosphériques ou à des variations cohérentes du coefficient de rétrodiffusion. Ces informations seront contenues dans un terme de phase que nous appelons la phase différentielle (éq. II.16).

L'interférométrie SAR différentielle a pour but de séparer phase topographique et phase différentielle. Deux méthodes ont été proposées pour déterminer la phase topographique à soustraire de l'interférogramme : le CNES propose l'utilisation d'un MNT externe [Massonnet & al. 1993], le JPL propose l'utilisation d'une troisième image SAR formant une seconde paire interférométrique avec l'image maîtresse [Zebker & al. 1994 (a)]. Comme nous l'avons vu, chaque méthode a ses avantages et ses inconvénients.

Pour nous affranchir d'un certain nombre de ces inconvénients, nous avons développé un processus d'interférométrie différentielle à quatre images.

### **III.2.1 Interférométrie différentielle à quatre images**

L'interférométrie différentielle à quatre images procède des deux méthodes existantes. Nous générerons une phase topographique indépendamment de la paire interférométrique contenant une phase différentielle en utilisant une seconde paire interférométrique coregistrée à la première. Ce second interférogramme est généré à partir d'une paire d'images, prises sur un laps de temps suffisamment court, pour pouvoir être considéré comme référence topographique. Cette référence est ensuite transposée dans la géométrie de prise de vue de l'interférogramme contenant la phase différentielle de manière à être soustraite de celui-ci. On obtient alors l'interférogramme différentiel proprement dit. Cette méthode a l'avantage d'étendre les champs d'application de l'interférométrie différentielle. En effet, il est beaucoup plus facile de trouver deux paires interférométriques cohérentes qu'un triplet nécessitant la préservation de la cohérence entre trois acquisitions. De plus, la mission Tandem offre la possibilité d'obtenir des références topographiques pour la majeure partie du globe terrestre, et ce, même pour des régions dont la topographie est peu ou mal connue.

### **III.2.2 Procédure**

1. L'interférogramme contenant les informations de mouvement ou toute autre information donnant lieu à une phase différentielle, est généré comme d'habitude. Une image est coregistrée par rapport à l'autre choisie comme image "maîtresse".
2. Une image de la paire de référence est également coregistrée par rapport à l'image maîtresse sur base d'une corrélation des modules.
3. La seconde image de la paire de référence est alors coregistrée par rapport à la première en se basant sur une maximisation de la cohérence locale.
4. On génère ensuite l'interférogramme de référence qui se trouve dès lors dans la géométrie de prise de vue de l'image maîtresse.
5. L'interférogramme de référence est déroulé et transposé dans la géométrie de prise de vue du premier interférogramme (transposition d'une base interférométrique à l'autre).
6. On calcule la différence entre les deux interférogrammes de manière à obtenir l'interférogramme différentiel proprement dit.

7. L'interférogramme différentiel est déroulé et la composante du mouvement dans la direction de visée est calculée.

### **III.2.2.1 Transposition de géométrie**

Si, à l'issue de la coregistration des quatre images, celles-ci sont bien échantillonnées dans le même système de coordonnées portée – azimut, les phases dans chaque interférogramme sont toujours relatives à des bases interférométriques distinctes. Il faut donc transposer la phase topographique de référence dans la géométrie d'acquisition de la première paire interférométrique.

Pour comprendre cette transposition, il faut reprendre le développement en série de la phase au premier ordre autour d'une altitude nulle :

$$\begin{aligned}\Delta\varphi_i &= k_{z_0} B_i \sin(\theta_i - (\alpha_0 - a_t)_i) - k_{z_0} \frac{B_i \cos(\theta_i - (\alpha_0 - a_t)_i)}{\sin((\alpha_0 - a_t)_i)} \frac{R_t}{S} \frac{h}{z_{lp_i}} + \Delta\varphi_{di} \\ &= \Delta\varphi_{pi} + \frac{2\pi}{ha_i} h + \Delta\varphi_{di}\end{aligned}\quad (\text{III.24})$$

où :  $i$  est l'indice correspondant à la  $i^{\text{ème}}$  paire interférométrique,

$z_{lp_i}$  et  $(\alpha_0 - a_t)_i$  sont respectivement la portée dans l'image maîtresse de chaque paire et l'angle d'élévation en l'absence de relief,

$\Delta\varphi_{pi}$  est la phase orbitale,

$ha_i$  est l'ambiguïté d'altitude,

$\Delta\varphi_{di}$  est la phase différentielle. Celle-ci est supposée nulle dans la paire interférométrique de référence. Si seuls des mouvements locaux sont en cause, la phase différentielle sera simplement proportionnelle à la composante des déplacements selon la portée dans l'image maîtresse ( $\Delta\varphi_{di} = -k_{z0} \delta z_1$ ).

Pour transposer le second interférogramme dans la géométrie d'acquisition du premier, il faudra lui soustraire sa composante plane, puis multiplier le terme topographique par un facteur de forme  $\kappa$  donné par :

$$\kappa = \frac{B_1 \cos(\theta_1 - (\alpha_0 - a_t)_1)}{B_2 \cos(\theta_2 - (\alpha_0 - a_t)_2)} \frac{\sin((\alpha_0 - a_t)_2)}{\sin((\alpha_0 - a_t)_1)} \frac{z_{lp_2}}{z_{lp_1}} = \frac{ha_2}{ha_1} \quad (\text{III.25})$$

De cette manière, la phase topographique de référence deviendra équivalente à celle obtenue lors d'une observation dans la géométrie de prise de vue de la première paire interférométrique. Finalement, la phase différentielle sera obtenue de la manière suivante :

$$\Delta\varphi_{d1} = (\Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_{pi}) - \kappa(\Delta\varphi_2 - \Delta\varphi_{pi}) \quad (\text{III.26})$$

### **III.2.2.2 Remarques**

1. A priori, une phase différentielle d'origine quelconque peut également être présente dans la paire considérée comme référence. Dans ce cas, la référence

topographique doit être considérée comme perturbée. L'interférogramme différentiel qui en résultera correspondra aux phases différentielles cumulées et pondérées qui auront eu lieu durant chacune des acquisitions interférométriques. Si nous considérons que nous n'avons affaire qu'à des déplacements, la phase différentielle ainsi mesurée vaudra :

$$\delta z_{11} - \kappa \delta z_{21} = \frac{(\Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_{p_1}) - \kappa(\Delta\varphi_2 - \Delta\varphi_{p_2})}{k_{z_0}} \quad (\text{III.27})$$

2. Il est évidemment préférable d'avoir  $|\kappa| \leq 1$  de manière à ne pas multiplier les erreurs de phase. En d'autres mots, la transposition de géométrie doit préférentiellement se faire de l'interférogramme à plus forte densité de franges vers celui à plus faible densité de franges.
3. Le raisonnement précédent est applicable à l'interférométrie à trois images. Dans ce cas, le facteur de forme  $\kappa$  se simplifie [Gabriel & al. 1989 ; Zebker & al. 1994 (a)]:

$$\kappa = \frac{B_1 \cos(\theta_1 - (\alpha_0 - at)_1)}{B_2 \cos(\theta_2 - (\alpha_0 - at)_2)} = \frac{B_{1\perp}}{B_{2\perp}} \quad (\text{III.28})$$

4. L'interférométrie à quatre images nécessite la coregistration d'images selon deux critères : la maximisation locale de cohérence et la maximisation locale de corrélation en module. D'une part, chaque image esclave au sein d'une paire interférométrique est coregistrée à son image maîtresse sur base d'une maximisation de cohérence pour s'assurer un bon rapport signal sur bruit dans l'interférogramme. D'autre part, les deux images maîtresses sont coregistrées l'une par rapport à l'autre par maximisation de la corrélation des images en module puisque, a priori, ces deux images ne constituent pas nécessairement une paire interférométrique.
5. Les deux images constituant la paire considérée comme référence topographique sont interpolées toutes deux à l'issue de la coregistration de manière à pouvoir générer un interférogramme de référence dans le même système de coordonnées portée - azimut que l'interférogramme contenant la phase différentielle à mesurer. La génération de cet interférogramme de référence doit être réalisée en tenant compte de la transformation bilinéaire utilisée pour l'interpolation complexe de son image maîtresse de manière à retirer en tout point la phase orbitale qui correspond bien à la géométrie initiale de la paire de référence. Il faut également tenir compte de la transformation bilinéaire de coordonnées appliquée à l'image maîtresse de la paire de référence lors du calcul du coefficient de transposition.

### **III.2.2.3 Landers**

Le 28 juin 1992, un tremblement de terre de magnitude 7,3 s'est produit près de Landers en Californie. Cet événement a fait l'objet d'une étude par interférométrie différentielle qui a révélé les potentialités de la méthode. Deux équipes ont étudié ce site séparément ; le CNES [*Massonnet & al. 1993*], puis le JPL [*Zebker & al. 1994 (a)*], chacun suivant une procédure qui leur était propre. Nous avons dès lors choisi de valider notre processeur d'interférométrie différentielle à quatre images sur le même événement.

La paire interférométrique contenant les informations de déplacement relatives au tremblement de terre du 28 juin 1992 est constituée des images ERS1 acquises sur le site de Landers le 24 avril et le 7 août 1992. Pour générer une référence topographique, nous avons utilisé une paire Tandem des 7 et 8 janvier 1996. Ces images ont toutes été coregistrées par rapport à celle d'avril 1992.

La figure III.22 représente les interférogrammes issus de chaque paire. Les bases interférométriques sont à peu près équivalentes (110m pour la paire ERS1 de 1992 et 119m pour la paire Tandem). Dès lors, si seule la topographie influençait la phase, nous aurions dû obtenir deux interférogrammes similaires. Or, ce n'est pas le cas, la structure des franges n'est pas conservée. On peut donc déjà supposer que l'un des deux interférogrammes au moins contient une phase différentielle importante. Comme le second interférogramme est issu d'une paire Tandem acquise sur une zone aride durant une période où aucun événement sismique n'a été relevé, nous avons supposé qu'il constituait une référence topographique valide. L'interférogramme de référence a été déroulé et transposé dans la géométrie d'acquisition du premier pour en être soustrait et révéler la phase différentielle (figure III.23). Le résultat que nous avons ainsi obtenu est semblable à celui obtenu par le CNES. Ceci signifie que le processus d'interférométrie à quatre images s'avère aussi efficace que l'utilisation d'un MNT externe, la topographie a été soustraite de manière adéquate. On peut donc en déduire a posteriori que le MNT, issu de la paire Tandem utilisée pour générer la phase topographique de référence, est au moins aussi valable que celui provenant du U.S. Geological Survey (U.S.G.S.) utilisé par le CNES.

Comme nous l'avons déjà signalé, l'avantage de la méthode réside dans le fait qu'aucun MNT externe n'est nécessaire au traitement. La référence topographique est générée à partir d'une paire Tandem directement dans la géométrie de prise de vue de la paire interférométrique ayant vu le mouvement. De plus, l'utilisation d'une paire Tandem nous garantit un bon rapport signal sur bruit du fait de la très faible décorrélation temporelle entre les images constituant la référence.

Il faut encore remarquer que nous avons générée la référence topographique à partir d'images acquises trois ans et demi après le tremblement de terre. On peut dès lors considérer que l'énorme base de données générée par la mission Tandem peut permettre de constituer des références topographiques sur la majeure partie du globe.

Le processus d'interférométrie différentielle à quatre images est plus complexe à mettre en œuvre que les deux méthodes classiques mais il étend largement les possibilités d'application de cette technique.

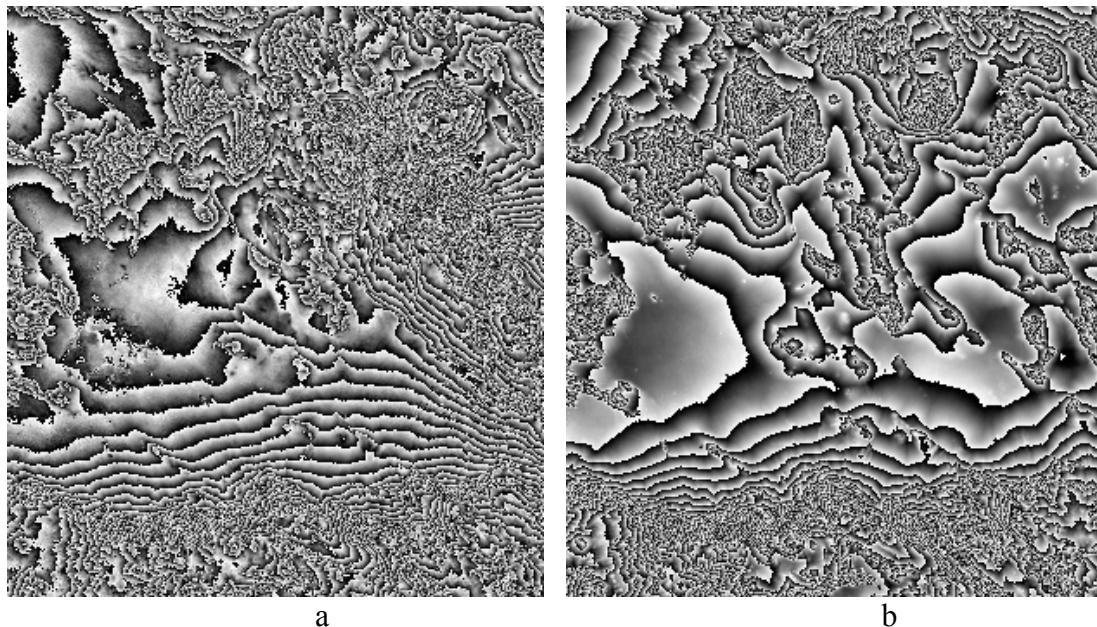


Figure III.22

- a) Premier interférogramme de Landers (24 Avril 1992 - 7 Août 1992).  
Superposition des franges topographiques et des franges de mouvement.  
b) Interférogramme Tandem de Landers (7 - 8 janvier 1996) considéré  
comme référence topographique

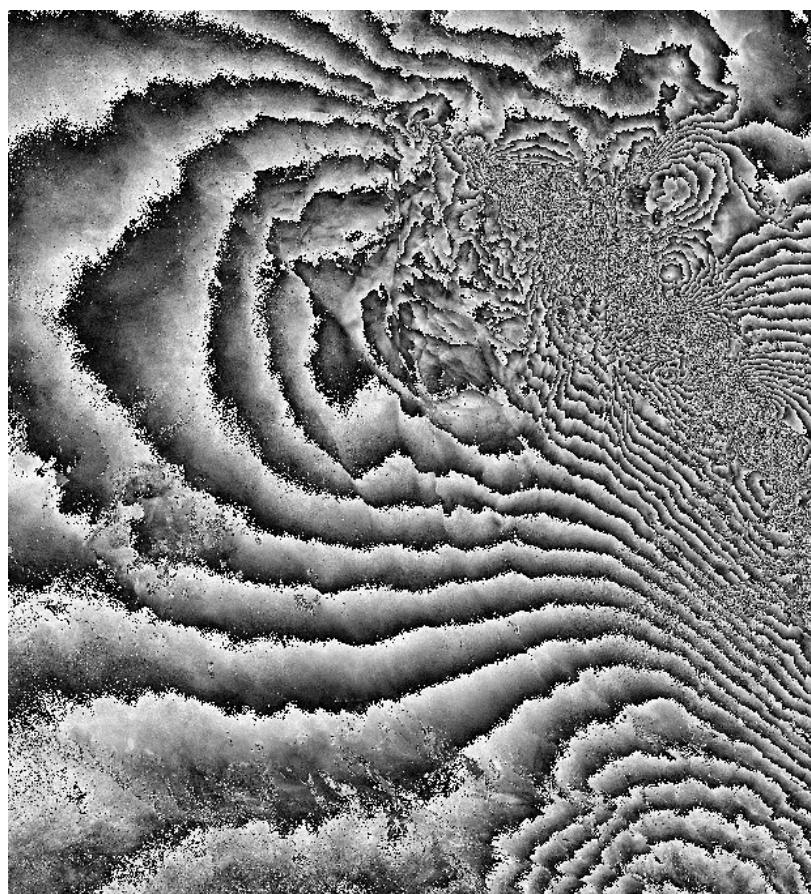


Figure III.23

- Interférogramme différentiel de Landers ne montrant que les franges  
de déplacement consécutives au tremblement de terre du 24 Juin 1992

### **III.3 COMBINAISON DE BASES INTERFEROMETRIQUES**

La procédure de coregistration de quatre images SAR décrite ci-dessus permet d'envisager d'autres domaines d'application que la seule interférométrie différentielle pour laquelle elle a été conçue.

Si plusieurs interférogrammes sont générés dans le même système de coordonnées portée - azimut, ils peuvent être combinés, c'est-à-dire additionnés ou soustraits, pour générer un pseudo-interférogramme mieux adapté à l'application à laquelle il est destiné.

Si on possède N paires interférométriques d'une même scène, qui ne contiennent que des informations topographiques, elles peuvent être combinées pour donner un interférogramme ayant une ambiguïté d'altitude équivalente, plus adéquate pour la génération d'un MNT. En se basant sur le développement en série de la phase au premier ordre (éq. III.25) on peut combiner ces N interférogrammes pour en générer un dont l'ambiguïté d'altitude sera donnée par [*Massonnet & Feigl 1995 (a); Derauw & Moxhet 1996*]:

$$\frac{1}{ha_{eq}} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{ha_i} \quad (\text{III.29})$$

Ceci permet entre autres d'additionner deux interférogrammes ayant une très grande ambiguïté d'altitude, et donc donnant des MNT peu précis, pour en obtenir un dont l'ambiguïté d'altitude est plus petite. De même, en sommant deux interférogrammes ayant des altitudes d'ambiguïté faibles mais de signes opposés, on obtient un interférogramme ayant une ambiguïté d'altitude plus grande. Ceci peut s'avérer utile dans des zones où la densité de franges est initialement trop élevée. De plus, comme le bruit de phase d'un interférogramme à l'autre peut être considéré comme statistiquement indépendant, la sommation des termes d'erreur tend vers 0 avec N. En particulier, si on utilise deux interférogrammes ayant un bon rapport signal sur bruit pour obtenir un interférogramme combiné ayant une ambiguïté d'altitude plus petite, nous aurons un interférogramme conservant un bon rapport signal sur bruit même si cette ambiguïté d'altitude équivalente correspond à une base interférométrique supérieure à la limite imposée par la décorrélation géométrique (éq II.29).

#### **III.3.1 Exemples**

En collaboration avec le Laboratoire de Géomorphologie et Télédétection (LGT) de l'Université de Liège, nous avons réalisé un projet ayant pour but la validation de l'interférométrie différentielle dans le cadre d'étude sismique. Pour les besoins de ce projet, les géographes du L.G.T. ont choisi entre autres sites, la Calabre et les abords de la Mer Morte pour leur forte activité sismique. Pour chacun de ces sites, nous possédons deux paires Tandem. En ce qui concerne la Calabre, les bases interférométriques sont très courtes donnant des altitudes d'ambiguïté très grandes (~700 et ~400 mètres) et donc très défavorables à la génération de MNT. En ce qui concerne les abords de la Mer Morte, c'est exactement l'inverse. Les bases sont très grandes, donnant des altitudes d'ambiguïté très faibles (~28 et ~31 mètres), ce qui combiné à un relief très fort rend la génération de MNT quasiment irréalisable sur de nombreuses zones de la scène. Nous avons donc pu tester la méthode de combinaison

de bases interférométriques dans les deux cas décrits ci-dessus.

La combinaison des deux paires Tandem de Calabre permet de générer un interférogramme ayant une ambiguïté d'altitude équivalente de l'ordre de 260 mètres (figure III.24). Cette valeur, quoique plus favorable, n'est pas idéale. Nous avons générés les trois MNT issus des deux interférogrammes Tandem et de l'interférogramme combiné. Ceux-ci ont fait l'objet d'une analyse par le LGT. Cette analyse montre que le MNT obtenu par combinaison de base interférométrique semble plus proche de la vérité terrain que les deux autres.

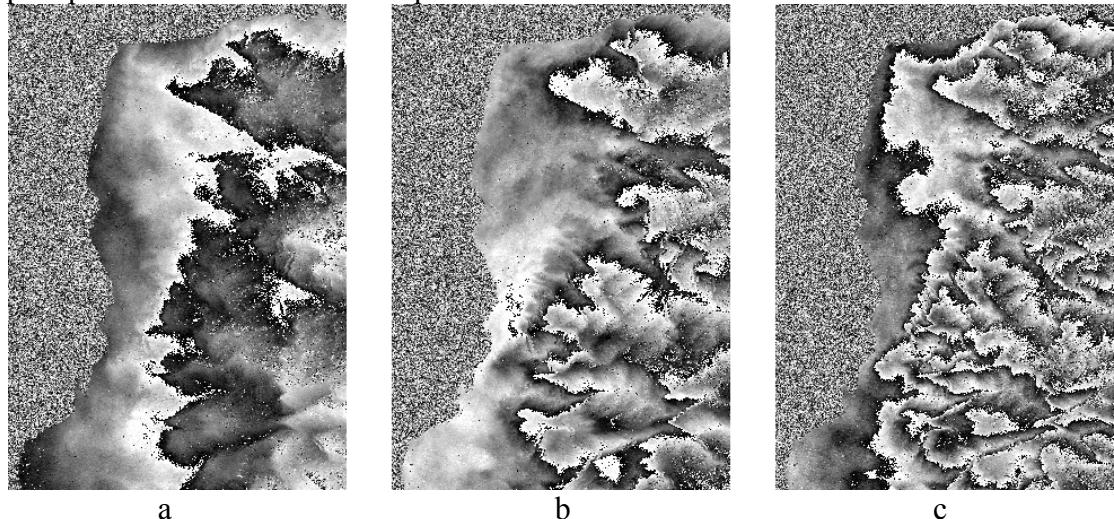


Figure III.24

*Interférogrammes de Calabre*

- a) *Interférogramme Tandem: Altitude d'ambiguïté de 720 mètres*
- b) *Interférogramme Tandem: Altitude d'ambiguïté de 415 mètres*
- c) *Interférogramme combiné: Altitude d'ambiguïté équivalente de 263 mètres*

La combinaison des deux paires Tandem couvrant les abords de la Mer Morte permet de générer un interférogramme ayant une ambiguïté d'altitude équivalente de l'ordre de 260 mètres. La figure III.25 reprend un des deux interférogrammes Tandem et l'image des connexions qui lui est associée. L'image des connexions montre bien l'impossibilité qu'il y a à générer un MNT lorsque l'ambiguïté d'altitude est trop petite et inadéquate par rapport au relief à mesurer. La figure III.26 montre l'interférogramme combiné, et le MNT qui en résulte. Bien sûr, celui-ci est peu précis puisque l'ambiguïté d'altitude est très élevée, mais sans la combinaison de base interférométrique, aucun résultat n'aurait pu être obtenu.

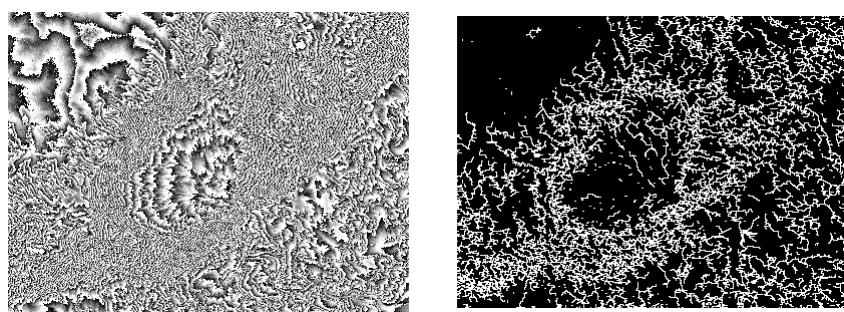


Figure III.25

*Interférogramme Tandem (ambiguïté d'altitude de 28 mètres) couvrant une zone israélienne au sud-ouest de la Mer Morte et image des connexions associée*

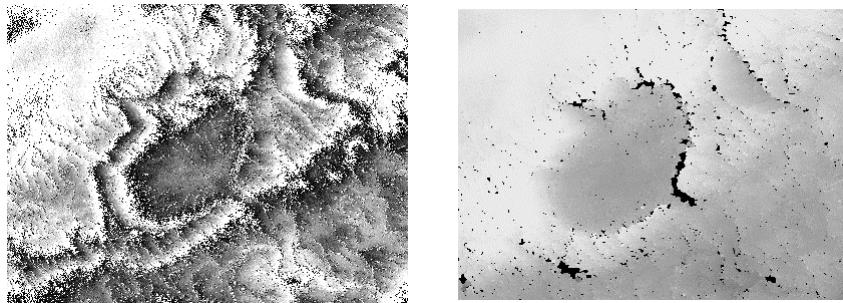


Figure III.26

*Interférogramme combiné ayant une ambiguïté d'altitude de 260 mètres et MNT qui en résulte*

### **III.4 CONCLUSIONS**

Nous avons développé et validé un interféromètre SAR complet, auquel nous avons apporté plusieurs spécificités.

En ce qui concerne la génération de modèles numériques de terrain par interférométrie, la géométrie permettant de déduire l'altitude d'un point a été adaptée de manière à mesurer les altitudes locales, non pas au-dessus d'un plan, mais au-dessus d'un géoïde quelconque. Dans son état actuel, le processeur développé calcule les altitudes au-dessus d'une sphère.

L'interpolation des images complexes, basée sur la transformée en Chirp-Z, quoique limitée aux transformations bilinéaires de coordonnées, est très souple. L'interpolateur développé a un champ d'application non limité à la seule phasimétrie SAR.

Le déroulage de phase basé sur la méthode classique des résidus n'est jamais exempt d'erreurs. Cependant, le guidage du processus de connexion par une estimation de la cohérence permet d'obtenir des résultats d'une remarquable fiabilité.

La souplesse de l'interpolateur nous permet de coregistrer aisément plusieurs paires d'images entre elles. Ceci nous a permis entre autres, de mettre au point l'interférométrie différentielle à quatre images et la combinaison de base interférométrique.

La mission ERS Tandem offre, pour la majeure partie du globe, un très grand nombre de paires pouvant servir de références topographiques. L'interférométrie différentielle à quatre images permet d'utiliser ces références quelle que soit la paire interférométrique contenant une phase différentielle à mesurer. Etant donné qu'il est plus facile de constituer un doublet de paires interférométriques qu'un triplet d'images cohérentes entre elles, nous pouvons considérer que l'interférométrie différentielle à quatre images élargit le champ d'application de cette technique.

De son côté, la combinaison de base interférométrique offre la possibilité d'augmenter la précision de la topographie interférométrique. Lorsque des artefacts atmosphériques sont inévitables, cette technique permet de diminuer, par moyennage, l'influence de ceux-ci. Finalement, lorsque cela s'avère nécessaire, la combinaison de base offre la possibilité d'obtenir une ambiguïté d'altitude équivalente mieux adaptée à la topographie interférométrique.

Dans les chapitres suivants, nous allons passer en revue différentes études que nous avons menées ou auxquelles nous avons participé pour analyser l'apport de la phasimétrie SAR dans le cadre d'applications thématiques variées.

Les thèmes abordés sont la topographie, la tectonique, l'agronomie et la glaciologie.

## *Développement et validation d'un processeur InSAR/DInSAR*

Pour chacun de ces thèmes, nous présentons les aspects de la phasimétrie SAR qui constituent un apport novateur d'information. Nous ne présentons donc pas la finalité de la thématique en question, mais bien l'approche que nous avons suivie pour extraire, par phasimétrie, l'information requise ainsi que la procédure de validation de nos résultats.



## **IV TOPOGRAPHIE**

De toutes les applications issues de la phasimétrie SAR, c'est sans conteste, la cartographie topographique qui est la plus mature. Cependant, il serait erroné de croire que cette technique a acquis un statut opérationnel. A l'heure actuelle, des logiciels d'interférométrie SAR sont disponibles sur le marché et c'est à l'utilisateur d'avoir la connaissance requise pour en faire usage de manière adéquate. Il est très difficile d'évaluer a priori la faisabilité d'un traitement interférométrique ou d'en garantir la qualité. De plus, il n'existe pas d'analyse de qualité standardisée des produits interférométriques, comme c'est le cas en imagerie SAR classique où un rapport de qualité de l'image SAR focalisée, basé sur des figures de mérite prédéfinies, accompagne chaque produit délivré par le distributeur. C'est pour combler partiellement ces lacunes que nous avons mené à bien un projet, basé sur ces deux aspects essentiels pour la mise en œuvre d'un service aux utilisateurs : l'analyse de la faisabilité d'un traitement interférométrique et l'évaluation a posteriori de la qualité du produit délivré. Ce projet intitulé « *Quality Assessment of InSAR Topographic Mapping : The example of Belgium* » a été réalisé dans le cadre du « *Data User Program* » de l'ESA.

Cette étude, réalisée dans le cas particulier de la Belgique, a été subdivisée en deux étapes distinctes. Nous avons d'abord réalisé une pré-étude durant laquelle l'aspect faisabilité du traitement interférométrique a été abordé. Cette étape a pour but de sélectionner les paires interférométriques les plus adéquates pour la génération d'un MNT et d'évaluer a priori, sur base de données annexes, la qualité que l'on peut en espérer. Le but final de cette pré-étude est de définir les critères de choix permettant d'optimiser la génération de MNT interférométriques de qualité.

La seconde étape consiste, après traitement, à évaluer quantitativement la qualité du modèle numérique de terrain produit. Comme nous le verrons, l'analyse des images de cohérence offre la possibilité d'évaluer précisément la qualité du MNT généré. Cependant, des données annexes, essentiellement météorologiques, ont également été requises pour localiser les risques d'artefacts interférométriques.

Nous décrivons ci-après, la procédure que nous avons suivie et la manière suivant laquelle nous avons abordé le problème. Pour de plus amples détails, le lecteur trouvera en annexe, les rapports détaillés rédigés dans le cadre de ce projet.

### **IV.1 PRE-ETUDE**

#### **IV.1.1 Site test**

Nous avons choisi d'effectuer ce projet d'évaluation de la cartographie topographique par interférométrie SAR dans le cas particulier de la Belgique [Derauw & Barbier 1998]. La Belgique peut être considérée comme un bon exemple car elle offre une grande diversité de paysages et de couvert végétal sur un territoire très restreint. Les conditions météorologiques sont très variables, ce qui permet de valider la technique dans diverses conditions d'acquisition des paires interférométriques. De plus, il existe un MNT, élaboré et distribué par l'Institut Géographique National (IGN), pouvant servir de référence pour la validation. Enfin, de nombreuses scènes SAR ont été acquises au-dessus de la Belgique et sont disponibles auprès de l'ESA. Le territoire belge peut être intégralement couvert par seulement 5 paires interférométriques ascendantes.

## Chapitre IV

De manière à limiter la décorrélation temporelle, nous avons choisi d'utiliser des paires Tandem. Ce premier choix limite à quinze, le nombre des acquisitions de paires candidates parmi lesquelles les cinq meilleures ont été sélectionnées à l'issue de la pré-étude.

Le logiciel DESCW permet de localiser les paires Tandem ascendantes couvrant la Belgique et archivées par l'ESA (figure IV.1).

Le tableau IV.1 reprend la liste des paires Tandem disponibles. Les numéros d'identification des zones sont ceux donnés par le logiciel de recherche DESCW fourni par la société EURIMAGE.

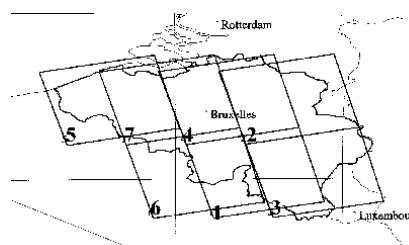


Figure IV.1

*Localisation des paires Tandem ascendantes disponibles pour la Belgique*

N° id.	Date d'acquisition	N° du quadrant	N° de l'orbite E1	N° de l'orbite E2	Ambiguïté d'altitude [m]
1	10&11/11/95	999	22605	2932	36
	29&30/3/96		24609	4936	194
	7&8/6/96		25611	5938	216
2	13&14/8/95	1017	21331	1658	-103
	14&15/4/96		2483	516	17
	23&24/6/96		25840	6167	170
3	13&14/8/95	999	21331	1658	-102
	14&15/4/96		24838	5165	170
	23&24/6/96		25840	6167	164
4	29&30/3/96	1017	24609	4936	198
	7&8/6/96		25611	5938	221
5	13&14/11/95	1017	22648	2975	-5
	1&2/4/96		24652	4979	110
6	17&18/4/96	999	24881	5208	89
7	17&18/4/96	1017	24881	5208	90

Table IV.1

*Liste des paires Tandem ascendantes disponibles pour la Belgique.*

### IV.1.2 Données annexes

Pour mener à bien la pré-étude et sélectionner les paires interférométriques les plus adéquates vis à vis de la cartographie topographique, diverses données annexes ont été utilisées :

- L'ouverture de la base interférométrique.
- Des données météorologiques incluant :
  - le couvert nuageux,
  - la pluviométrie,
  - la température,
  - la pression,

- l'humidité relative.
- Le couvert végétal, le type de sol et le relief approximatif.

Les données météorologiques nous ont été fournies par l'Institut Royal Météorologique de Belgique (IRM). Ces données se présentent sous la forme de relevés horaires des différents paramètres susmentionnés pour six stations météorologiques réparties à travers le territoire belge.

Le Laboratoire de Géomorphologie et de Télédétection (LGT) de l'Université de Liège nous a fourni diverses cartes thématiques dont, notamment, une carte des forêts, une carte géologique, une carte pédologique et une carte de répartition des diverses productions agricoles.

L'Institut Géographique National nous a fourni une carte digitale de classification du couvert végétal en Belgique. Cette carte, appelée *Corine Land Cover* (CLC) a été réalisée dans le cadre d'un projet européen de classification des sols.

Nous avons également utilisé un modèle numérique de terrain très grossier pour évaluer la décorrélation géométrique locale due au relief. Ce MNT grossier a été obtenu à partir de l'image en niveau de gris (256 niveaux) d'un modèle numérique de terrain dont l'échantillonnage au sol est de 75X75m.

Pour chaque acquisition Tandem, nous avons analysé l'influence de chacun de ces paramètres sur la cohérence ainsi que l'importance des artefacts interférométriques, s'il y a lieu d'en suspecter. Cette analyse, essentiellement qualitative, a pour but d'évaluer si les conditions sont favorables, moyennes ou défavorables à la cartographie topographique par interférométrie SAR. Cette classification très simple permet une sélection efficace des paires interférométriques les plus adéquates.

#### **IV.1.2.1 Ouverture de la base interférométrique**

L'ouverture de la base interférométrique est définie comme la composante de la base qui est perpendiculaire à la ligne de visée. De cette ouverture dépend la décorrélation géométrique et l'ambiguïté d'altitude. Sur base d'un MNT grossier, nous avons calculé la décorrélation géométrique locale (annexe 1). Pour la majeure partie des paires disponibles, cette décorrélation est inférieure à 10%. La décorrélation géométrique n'a pas été prise en tant que telle comme critère de sélection vis-à-vis de l'ouverture de la base interférométrique. Les différentes sources de décorrélation ont été considérées dans leur ensemble et utilisées comme critère de sélection séparé.

Le critère de choix retenu vis-à-vis de l'ouverture de la base interférométrique est simplement l'adéquation entre l'ambiguïté d'altitude et l'intensité du relief à mesurer.

#### **IV.1.2.2 Données météorologiques**

L'influence de la météo est double. Premièrement, les variations climatiques peuvent provoquer des décorrélations temporelles par les changements qu'elles induisent sur les caractéristiques de la scène. Un simple changement de l'orientation ou de l'intensité du vent peut provoquer des variations de rugosité du couvert végétal. Les variations de la pluviométrie induisent des variations d'humidité du sol qui, à leur tour, induisent une décorrélation temporelle des acquisitions SAR.

Deuxièmement, des changements de conditions atmosphériques peuvent induire des artefacts. Ceux-ci, par le biais de l'ambiguïté d'altitude, génèrent des erreurs plus ou moins importantes dans le MNT produit.

Ces deux effets sont complètement différents. Le premier peut être considéré comme aléatoire par le fait qu'il induit une augmentation de la variance de phase. Le second effet peut être considéré comme déterministe, car les artefacts atmosphériques

n'induisent pas une augmentation de la variance de phase, mais bien un biais de phase qui se traduit par un biais local d'altitude dans le MNT.

*IV.1.2.2.1 Couvert nuageux*

En plus des données fournies par l'IRM, nous avons utilisé, pour évaluer l'importance du couvert nuageux, des images météo *quick look* distribuées gratuitement sur INTERNET par les services météorologiques de l'Armée américaine (*U.S. Defense Meteorological Satellite Program*). Ces deux sources d'information nous ont permis de sélectionner les images acquises avec le couvert nuageux le plus faible, pour minimiser le risque d'artefacts atmosphériques. Lorsqu'un couvert nuageux était malgré tout présent, nous avons qualifié de "moyennes" les paires montrant un couvert nuageux similaire pour les deux acquisitions.

*IV.1.2.2.2 Température, pression et humidité relative*

Nous avons compilé les données de température, de pression et d'humidité relative provenant des six stations météorologiques, pour les quatre heures entourant chaque acquisition SAR. Partant de ces données et en se basant sur le modèle atmosphérique développé par Zebker et Rosen [*Zebker & Rosen 1996*], nous avons évalué le déphasage théorique induit par les changements de conditions atmosphériques au-dessus de chacune des six stations. Nous avons ensuite traduit, par interpolation polynomiale, ces six déphasages sous forme d'un interférogramme théorique (annexe 1). Nous n'utilisons donc que six points de mesure pour générer cet interférogramme théorique sur l'ensemble du territoire belge. Comme il s'agit là d'un échantillonnage très faible, l'interpolation polynomiale peut être considérée comme correcte aux points de mesure et comme une bonne première approximation entre ceux-ci. Par contre, l'interpolation diverge dès que l'on s'éloigne des six stations météorologiques. Dès lors, l'interférogramme théorique généré ne peut en aucun cas être considéré comme une mesure exacte de l'étendue des artefacts interférométriques. Par contre, cette simulation réalisée pour les quatre heures entourant chaque acquisition nous permet d'évaluer qualitativement l'importance des artefacts à grande échelle et surtout la stabilité des conditions atmosphériques d'une heure à l'autre.

La figure IV.2 représente la simulation réalisée pour la paire Tandem des 17 et 18 avril 1996. Nous avons également reproduit l'interférogramme réel qui a été obtenu sur cette zone à très faible relief lors du traitement interférométrique. On peut remarquer une étonnante similitude entre simulation et mesure. Pour les deux autres zones du territoire belge ayant également un relief très peu énergétique, nous n'obtenons pas une similitude aussi prononcée, ce qui montre qu'il ne s'agit pas d'une mesure mais bien seulement d'un moyen d'évaluation qualitatif de l'importance des artefacts et de la stabilité atmosphérique (annexe 1 & 2).

Le critère de sélection retenu, en rapport avec les données de pression, de température et d'humidité relative, est l'importance des artefacts atmosphériques attendus, combinés avec l'importance du couvert nuageux. Lorsque la stabilité est acquise et que les artefacts attendus sont faibles, la paire interférométrique concernée est qualifiée de favorable. Lorsque la stabilité n'est pas acquise ou que les artefacts attendus semblent fort importants, la paire est qualifiée de moyenne. Nous considérons que les artefacts atmosphériques sont importants lorsqu'ils ne sont pas assimilables à un plan de phase et que le nombre de franges induites est supérieur à deux pour une scène de 100X100 km.

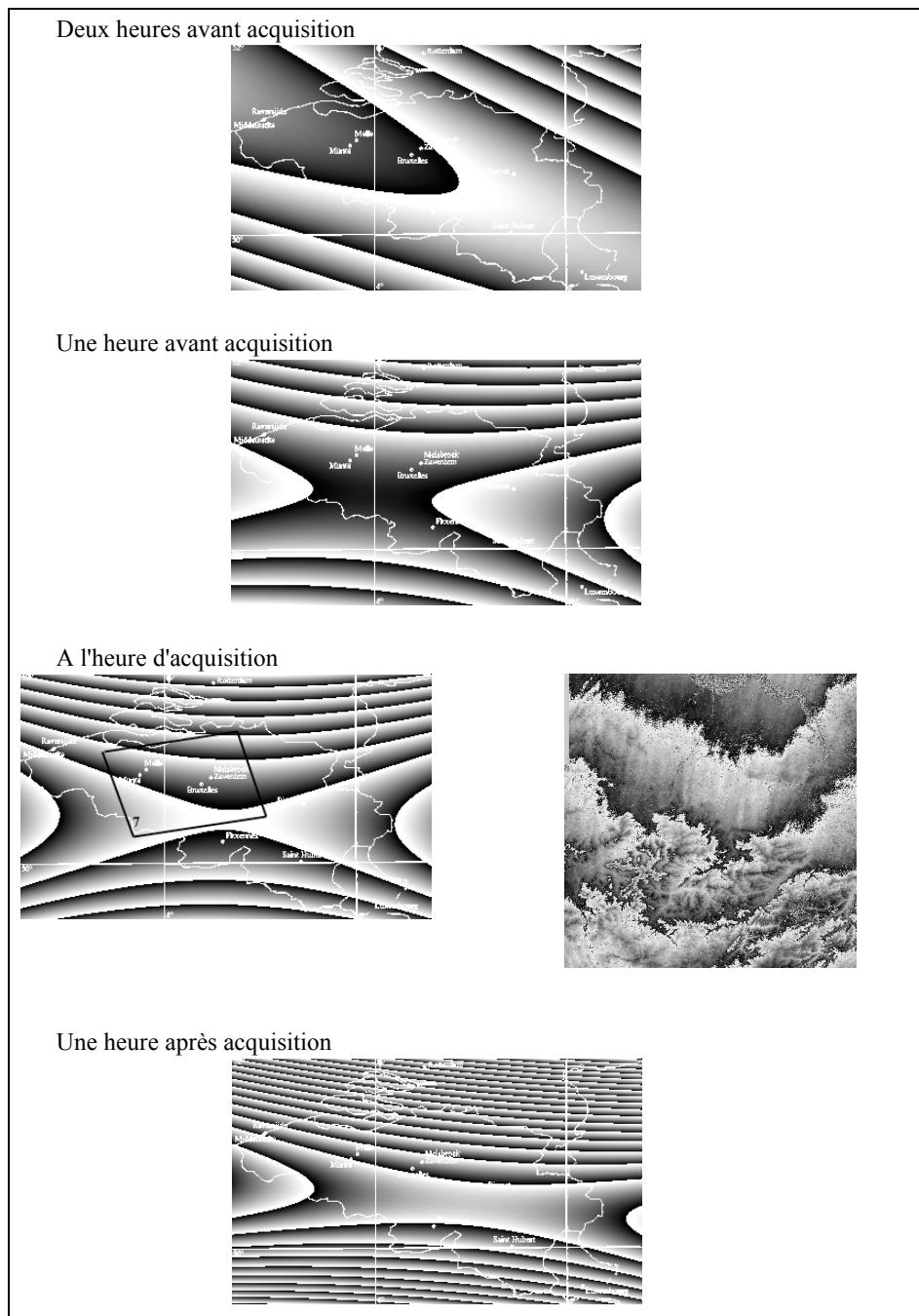


Figure IV.2

*Simulations des artefacts atmosphériques sur base des données de pression, de température et d'humidité relative mesurées au sol dans six stations météorologiques pour les quatre heures entourant les acquisitions SAR des 17 et 18 avril 1996. L'interférogramme réellement obtenu est représenté en vis-à-vis de l'interférogramme simulé pour l'heure d'acquisition Tandem.*

#### IV.1.2.2.3 Pluviométrie

Les données pluviométriques permettent d'avoir une idée de la stabilité de l'humidité du sol entre les deux acquisitions de chaque paire Tandem. Pour évaluer cette stabilité qui est choisie comme critère de sélection, nous avons simplement compilé le nombre de jours secs précédent chaque acquisition. Dès lors, lorsqu'il a plu entre deux acquisitions Tandem, la paire concernée est immédiatement qualifiée de moyenne, voire défavorable au traitement interférométrique.

#### ***IV.1.2.3 Couvert végétal et caractéristiques des sols***

Sur base d'études existantes rapportées dans la littérature [Dammert 1996; Wu & al. 1996], nous avons déterminé quelle était la cohérence que l'on pouvait attendre au-dessus de zones urbaines, de forêts et de zones rurales. Il a été montré que les zones urbaines avaient tendance à conserver la cohérence. Les forêts et les zones agricoles ont plutôt tendance à détruire cette cohérence plus ou moins fort en fonction de la densité du couvert végétal. Dès lors, le pourcentage relatif de l'importance entre zone urbaine, zone agricole et forêt nous a permis de réaliser une classification grossière des scènes.

La décorrélation géométrique combinée à la décorrélation temporelle est choisie comme critère de sélection de première importance.

#### ***IV.1.3 Evaluation globale***

Après avoir estimé qualitativement l'influence de chaque paramètre, nous avons donné une appréciation globale pour chaque paire Tandem disponible. Comme on peut le constater dans le tableau IV.2 où est repris l'ensemble de l'évaluation, aucune paire Tandem n'émerge comme réellement meilleure que les autres. Certaines peuvent être considérées comme valables relativement à certains paramètres mais inadéquates relativement à d'autres paramètres. Certaines paires sont simplement mauvaises relativement à tous les critères de sélection.

Trois paires Tandem se révèlent légèrement meilleures que les autres. Il s'agit des paires des 1 et 2 avril 1996 et des 14 et 15 avril 1996. Pour couvrir l'entièreté du territoire belge, nous avons choisi de traiter également les deux paires Tandem acquises les 17 et 18 avril 1996.

Comme nous allons le voir ci-après, cette classification très simple s'est avérée excellente.

D'après la classification obtenue, nous devons nous attendre à obtenir des résultats moyens sur base des deux paires Tandem acquises les 17 et 18 avril 1996 car ces acquisitions sont suspectées de contenir d'importants artefacts atmosphériques.

Date d'acquisition	N° id.	Couvert nuageux & artefacts atmosphériques	Pluviométrie & humidité	Relief par rapport à l'ambiguité d'altitude	Cohérence attendue	Appréciation global
13&14/08/95	2	Défavorable	Petites variations	Favorable	[0.5; 0.7]	Moyen
	3			Modéré(favorable sur de petites surfaces)	<0.4 en zones forestières	Défavorable
10&11/11/95	1	Couvert nuageux variable mais faible artefacts	Stable	Défavorable (favorable sur de petites surfaces)	~0.5 <0.3 en zones forestières	Défavorable
13&14/11/95	5	Favorable. Sujet à local artefacts	Petites variations	Très favorable	[0.5; 0.7]	Moyen
29&30/03/96	1	Couvert nuageux variable mais faible artefacts	Fortes variations temporelles	Moyen	[0.5; 0.7]	Très défavorable
	4			Moyen	<0.3 en zones forestières	Très défavorable
1&2/04/96	5	Favorable	Stable	Défavorable	[0.5; 0.8]	Favorable à moyen
14&15/04/96	2	Favorable	Stable	Moyennement favorable	[0.5; 0.7]	Favorable à moyen
	3				<0.5 en zones forestières	
17&18/04/96	6	Très variable mais faible artefacts	Stable	Moyen	[0.5; 0.7]	Moyen
	7			Favorable		Favorable à moyen
7&8/06/96	1	Variable &important artefacts	variations Importantes	Moyen	[0.5; 0.7]	Très défavorable
	4			Défavorable	<0.3 en zones forestières	Très défavorable
23&24/06/96	2	Moyennement favorable	petites variations	Moyen	[0.5; 0.7]	Défavorable à moyen
	3			Moyen	<0.5 en zones forestières	

Table IV.2  
*Classification des paires Tandem ascendantes disponibles pour la Belgique*

## IV.2 VALIDATION

La phase de validation de la topographie interférométrique consiste à générer un MNT complet du territoire belge et à comparer celui-ci avec un MNT pouvant servir de référence afin de réaliser une étude de qualité du produit.

### IV.2.1 Référence topographique

L'IGN nous a fourni cinq éléments du MNT de Belgique que nous avons considéré comme référence pour les besoins de l'étude. Ces cinq éléments sont projetés sur WGS84 (*World Geodetic System*) et couvrent chacun une surface de 15'X15', soit approximativement 27X27 km<sup>2</sup>. Au-dessus du 50<sup>ème</sup> parallèle, l'échantillonnage au sol est de 2" en longitude et de 1" en latitude (approximativement 40m X 31m). En-dessous du 50<sup>ème</sup> parallèle, l'échantillonnage est de 1" en longitude et de 1" en latitude (approximativement 20m X 31m).

Nous avons choisi les cinq éléments du MNT de référence de manière à couvrir une grande diversité de paysage, de couvert végétal et de type de sol. De plus, nous avons choisi ces cinq éléments pour qu'il y ait au moins un élément par date d'acquisition Tandem sélectionnée, ce qui permet également de couvrir différentes situations climatiques (annexe 2).

Les précisions annoncées pour ces différents éléments du MNT de référence varient en fonction de l'intensité du relief et de l'occupation du sol.

Pour la basse Belgique, la précision annoncée est de 3.8m avec une probabilité de 90%, ce qui correspond à un écart-type sur les altitudes de 2.3m. Pour la moyenne Belgique, la précision annoncée est de 7.9m, soit un écart-type de 4.8m. Pour la haute Belgique, la précision annoncée est de 10.3m, soit un écart-type de 6.3m.

En région bruxelloise où l'urbanisation est très forte, la précision annoncée est de l'ordre de 18m, soit un écart-type de plus de 11m. Nous avons donc choisi entre autres, l'élément du MNT de référence qui couvre cette région de manière à analyser l'apport de la topographie interférométrique dans ce cas précis.

La figure IV.3 montre la localisation de chacune des paires Tandem sélectionnées ainsi que la localisation des éléments du MNT de référence que nous avons choisis.

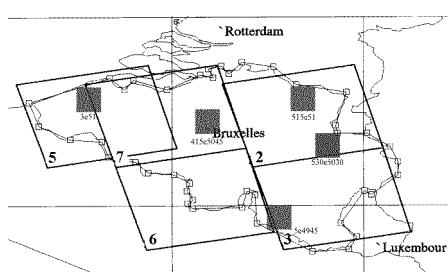


Figure IV.3

*Localisation des paires Tandem sélectionnées*

*Les carrés gris correspondent à la localisation des éléments du MNT de référence*

### IV.2.2 Traitement interférométrique

A partir des cinq paires Tandem sélectionnées, nous avons généré un MNT interférométrique complet du territoire belge. A l'issue de ce traitement interférométrique classique, nous obtenons pour chaque paire Tandem, les images en module, l'interférogramme, l'image de cohérence et le MNT. Nous avons choisi

d'utiliser un moyennage de 10 X 2 pixels (azimut X portée), ce qui nous donne des produits interférométriques ayant un échantillonnage au sol de 40 X 40m sur terrain plan.

L'échantillonnage au sol des éléments du MNT de référence ne justifie pas de produire un MNT interférométrique avec un échantillonnage plus fin. En effet, le MNT de référence de l'IGN est en fait issu de la digitalisation des courbes de niveau des cartes topographiques au 50000<sup>ème</sup>, elles-mêmes obtenues par sous-échantillonnage des cartes au 10000<sup>ème</sup>. Ces cartes topographiques au 10000<sup>ème</sup> ont été produites par interpolations des relevés de terrains effectués selon un maillage de 100 X 100m. Cet échantillonnage de 100m est atteint en portée dans les MNT interférométriques lorsque la pente locale est orientée vers le satellite et est supérieure à 14°. Les zones ayant une telle pente se situent uniquement dans le sud du pays et ne représentent que 3% du territoire. Dès lors, on peut considérer qu'un échantillonnage de 40 X 40m est largement suffisant pour réaliser des comparaisons valides entre MNT interférométrique et MNT de référence.

Les MNT interférométriques, ainsi que les images en module et les images de cohérence ont été projetés sur le géoïde de référence WGS84 en utilisant le programme de projection développé par le "*Signal and Image Center*" (SIC) de l'Ecole Royale Militaire de Belgique (ERM).

### **IV.2.3 Comparaisons**

Pour valider notre MNT interférométrique de la Belgique, nous l'avons comparé avec les cinq éléments du MNT de référence fourni par l'IGN. Nous avons utilisé une procédure d'interpolation en deux temps pour rendre chaque MNT interférométrique superposable au MNT de référence correspondant. D'abord, le logiciel de l'ERM interpole les données sur base des altitudes locales obtenues par interférométrie pour projeter MNT et images de cohérence sur WGS84. Ensuite, après cette première correction, les MNT interférométriques sont coregistrés manuellement aux éléments du MNT de référence et interpolés en utilisant notre interpolateur. Finalement, on interpole les images de cohérence, déjà projetées sur WGS84, de la même manière que les MNT interférométriques.

A l'issue de ce processus, nous obtenons des éléments de MNT interférométriques et des éléments des images de cohérence superposables aux différents éléments du MNT de référence.

De manière à supprimer les inévitables erreurs résiduelles provenant de l'imprécision sur les différents paramètres géométriques d'acquisition (voir § III.1.4) qui, en première approximation, génèrent un plan sur lequel est posé le MNT interférométrique, nous calculons la différence entre MNT interférométrique et référence. Cette différence se présente bien à chaque fois comme un ensemble de valeurs dispersées autour d'un plan. Nous obtenons alors l'équation de ce plan par moindres-carrés et nous le soustrayons du MNT interférométrique auquel il se rapporte.

Après cette correction linéaire, nous avons réalisé la comparaison entre MNT interférométrique et référence en utilisant la cohérence comme indicateur de qualité. Pour ce faire, nous avons subdivisé la cohérence en 20 intervalles ayant chacun une largeur de 5%. Ensuite, pour chacune de ces classes de cohérence, nous avons calculé l'écart-type entre MNT interférométrique et référence. Nous obtenons ainsi l'écart-type des mesures d'altitudes par interférométrie, en fonction de l'estimation de la cohérence (à condition de pouvoir effectivement considérer les éléments du MNT de Belgique fournis par l'IGN comme des références).

Les comparaisons réalisées pour chaque élément du MNT de référence sont reprises en détails dans l'annexe 2.

#### ***IV.2.3.1 Exemple 1***

Nous montrons ici, à titre d'exemple, les comparaisons effectuées entre les MNT interférométriques et la référence dans la région de Bruges. Pour cette zone, deux MNT interférométriques ont pu être obtenus. En effet, la paire Tandem acquise le 1 et le 2 avril 1996 ainsi que celle acquise le 17 et le 18 avril 1996 recouvrent toutes deux, au moins partiellement, la zone couverte par l'élément de référence (figure IV.3).

##### ***IV.2.3.1.1 Acquisition Tandem du 1 et 2 avril 1996***

La figure IV.4 représente le MNT de référence en comparaison du MNT Interférométrique obtenu à partir de la paire Tandem du 1 et du 2 avril 1996.

Les altitudes dans cette zone sont comprises entre 0 et 50m et l'IGN annonce, pour cet élément de référence, un écart-type de l'ordre de 3,8m avec une probabilité de 90%.

Nous constatons d'emblée que les deux MNT sont très similaires. Le MNT interférométrique apparaît cependant très bruité. Ceci est dû au fait que les altitudes sont faibles. Dès lors, dès qu'une erreur de quelques mètres apparaît, elle est très visible. De plus, nous avons pu observer qu'en certains endroits correspondant souvent à de petites parcelles agricoles, la perte de cohérence est quasi totale. Ceci donne lieu à de toutes petites zones déroulées indépendamment, pour lesquelles nous obtenons un élément de MNT entièrement erroné non raccordé au restant. Ce sont surtout ces "trous" dans le MNT qui lui donnent son aspect bruité. Cependant, ils représentent moins de 1% de la surface totale.

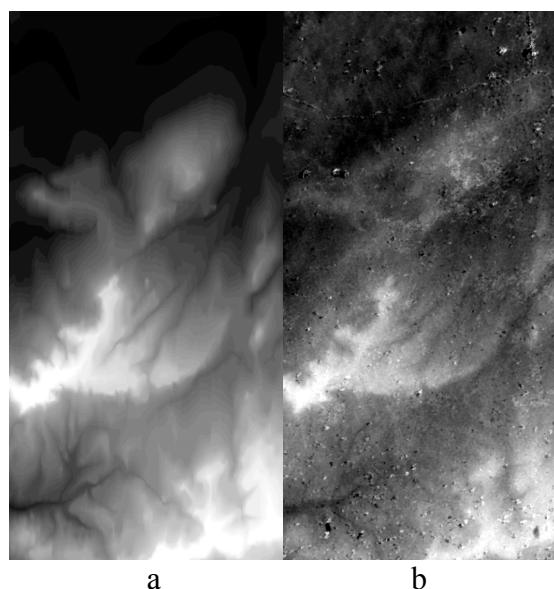


Figure IV.4

- a) *Elément du MNT de référence couvrant la zone de Bruges et environs*
- b) *MNT interférométrique obtenu sur cette zone à partir de l'acquisition Tandem du 1 et 2 avril 1996*

La figure IV.5 représente l'image de cohérence obtenue sur cette zone ainsi que l'histogramme de cohérence. Celui-ci montre un pic fort étroit centré sur une valeur de 0.75 alors que la cohérence attendue à l'issue de la pré-étude était comprise dans un intervalle de cohérence de 0.5 à 0.8. Le maximum de cohérence se situe au-delà de

0.9. Nous nous trouvons donc en présence d'une paire Tandem hautement cohérente.

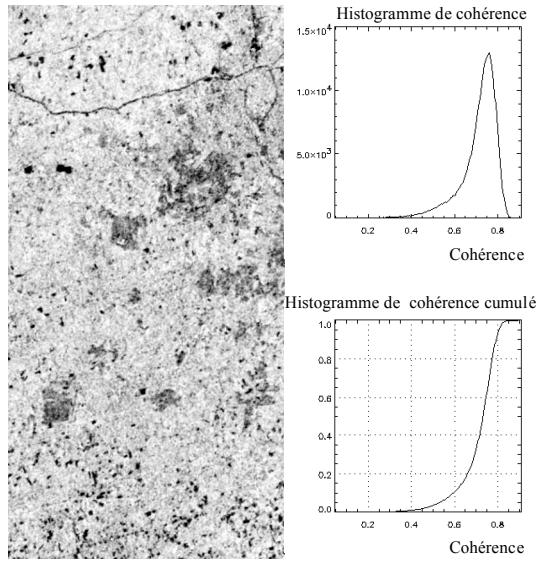


Figure IV.5  
*Image de cohérence issue de la paire Tandem du 1 et 2 avril 1996  
et histogrammes correspondants*

L'histogramme cumulé nous apprend que plus de 60% de ce MNT est obtenu à partir d'une phase interférométrique ayant une cohérence supérieure à 0.7. Or, une telle cohérence donne lieu théoriquement à un écart-type de la phase de  $\sim 10^\circ$  (éq. II.22). Comme l'ambiguïté d'altitude pour cette paire Tandem est de 110 mètres, cet écart-type sur la phase se traduit par un écart-type sur l'altitude de l'ordre de 3 mètres. Cela signifie donc que plus de 60% de ce MNT interférométrique est obtenu avec une précision meilleure que 3 mètres. Cette estimation théorique est confirmée en pratique. En effet, la figure IV.6 représente l'écart-type mesuré pour cet élément de MNT en fonction de la classe de cohérence. On observe bien que pour une cohérence supérieure à 0.7, l'écart-type mesuré est de l'ordre de 3 mètres.

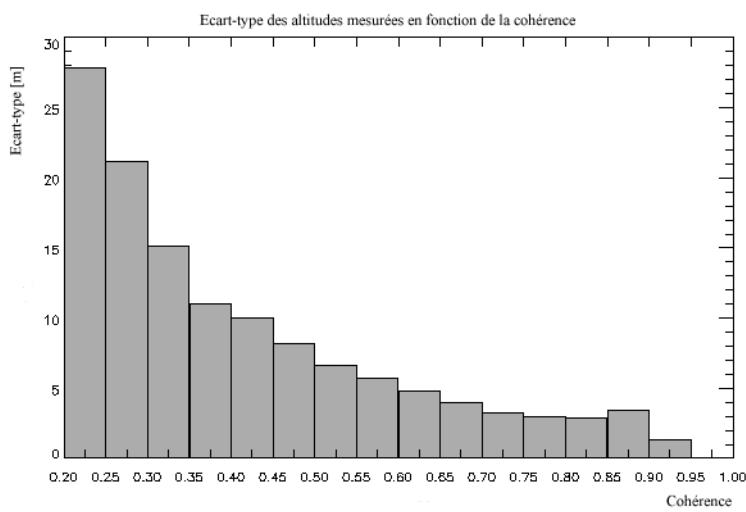


Figure IV.6  
*Ecart-type des altitudes mesurées en fonction de la cohérence  
de la paire Tandem acquise le 1 et 2 avril 1996*

Lorsqu'on divise l'écart-type sur l'altitude par l'ambiguïté d'altitude, on obtient l'écart-type sur la phase interférométrique. La courbe ainsi obtenue est alors en très bon accord avec la courbe théorique pour les points de cohérence élevée (éq. II.22). Aux basses cohérences, la courbe théorique donne une sous estimation de l'écart-type mesuré (figure IV.7).

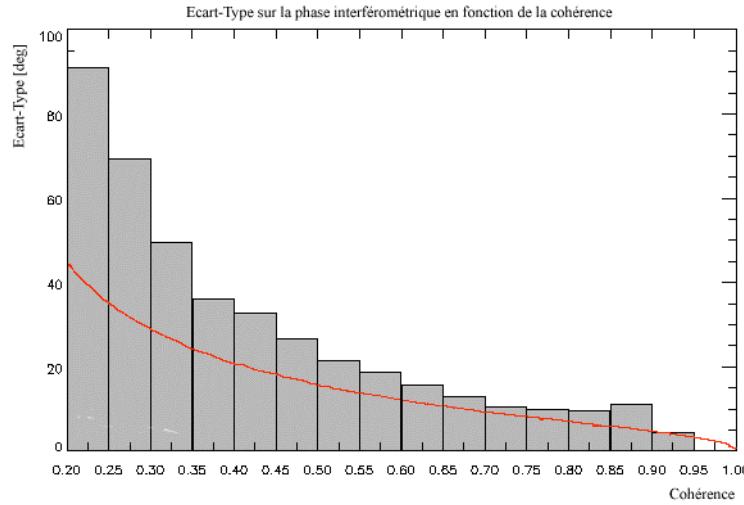


Figure IV.7  
*Ecart-type sur la phase interférométrique en fonction de la cohérence de la paire Tandem acquise le 1 et 2 avril 1996 : Mesure expérimentale et courbe théorique*

L'image de cohérence ainsi que la courbe des écarts-types sur les altitudes fournit une analyse complète de la qualité du MNT interférométrique produit et peut être utilisée comme figure de mérite pour la topographie interférométrique.

#### IV.2.3.1.2 Acquisition Tandem du 17 et 18 avril 1996

L'acquisition Tandem du 17 et 18 avril 1996 couvre également, au moins partiellement, la zone de Bruges couverte par l'élément de référence. Malgré la couverture seulement partielle de la zone, il nous a paru intéressant de comparer les deux MNT interférométriques obtenus sur cette zone, car nous suspectons que la paire Tandem du 17 et 18 avril 1996 contient des artefacts atmosphériques.

La figure IV.8 représente le MNT interférométrique obtenu avec cette acquisition Tandem, la différence entre MNT interférométrique et référence ainsi que la différence entre les deux MNT interférométriques. Dans chacune de ces images, nous observons une structure en vaguelettes orientées selon un axe sud-ouest – nord-ouest. Le MNT interférométrique issu de la paire Tandem du 17 et 18 avril 1996 apparaît donc fortement perturbé. Sur la troisième image de la figure IV.8, nous avons complété la partie non couverte par l'acquisition Tandem avec le MNT interférométrique issu de la paire interférométrique du 1 et 2 avril 1996. Cette représentation côte à côte nous permet de voir qu'il n'y a aucun lien entre la topographie locale et la structure en vaguelettes. Dès lors, la perturbation observée ne peut pas être attribuée à un résidu topographique.

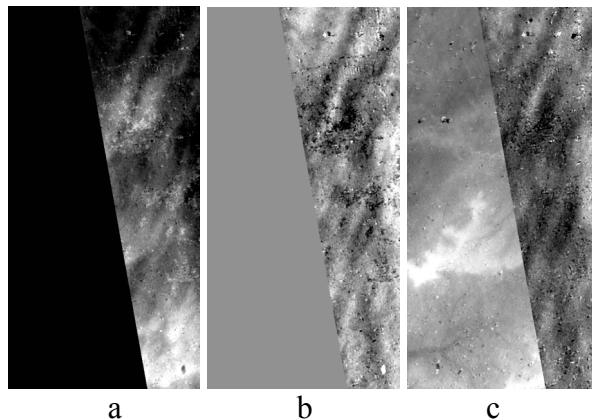


Figure IV.8

- a) MNT interférométrique issu de la paire Tandem du 17 et 18 avril 1996
  - b) Différence entre MNT interférométrique et référence topographique
  - c) Différence entre les deux MNT interférométriques obtenus pour cette zone
- La partie gauche de cette figure a été complétée par le MNT interférométrique obtenu à partir de l'acquisition Tandem du 1 et 2 avril 1996

Nous avons demandé à l'ESA de nous fournir les images METEOSAT acquises le 17 et le 18 avril au-dessus de la zone d'intérêt, aux heures d'acquisition des images SAR. La structure en vaguelettes que l'on observe possède la même orientation que le front nuageux observé le 18 avril à l'heure d'acquisition. Il semble donc fort probable que le couvert nuageux soit suffisamment dense pour induire des variations locales de chemin optique qui se traduisent, à l'issue du traitement, en variations locales de l'altitude mesurée. Dès lors, la différence entre les deux interférogrammes Tandem nous donne une mesure de la densité ou de l'épaisseur de la couche nuageuse en terme de retard de phase.

La figure IV.9 montre l'image de cohérence et l'histogramme qui lui est associé. Cet histogramme est très similaire à celui observé pour la paire Tandem du 1 et 2 avril 1996. On remarque cependant que les valeurs de basse cohérence sont quelque peu plus peuplées. En fait, la perte de cohérence sur les zones forestières est plus prononcée. Ceci semble dû au fait qu'à cette époque de l'année, le feuillage refait son apparition. Nous observons donc la perte de cohérence inhérente à l'émergence du couvert végétal.

Sur base de l'histogramme et de l'histogramme cumulé, on constate que la majeure partie de ce MNT est issu d'une phase interférométrique ayant une cohérence supérieure à 0.7. Comme l'ambiguïté d'altitude est cette fois de 90m, nous nous trouvons donc, théoriquement, dans une situation plus favorable à la topographie interférométrique que précédemment et, à variance de phase égale, nous devrions obtenir un écart-type plus petit sur les altitudes mesurées. Or, ce n'est pas le cas, la courbe de l'écart-type des altitudes mesurées en fonction de la cohérence montre des valeurs supérieures à celles attendues (figure IV.10). En effet, en l'absence de perturbation, nous aurions dû obtenir un écart-type de l'ordre de 3 mètres pour une cohérence de 0.6 et d'approximativement 1 mètre pour une cohérence de 0.9. Au lieu de cela, nous observons un écart-type à peu près constant et de 5 mètres pour toute cohérence supérieure à 0.6.

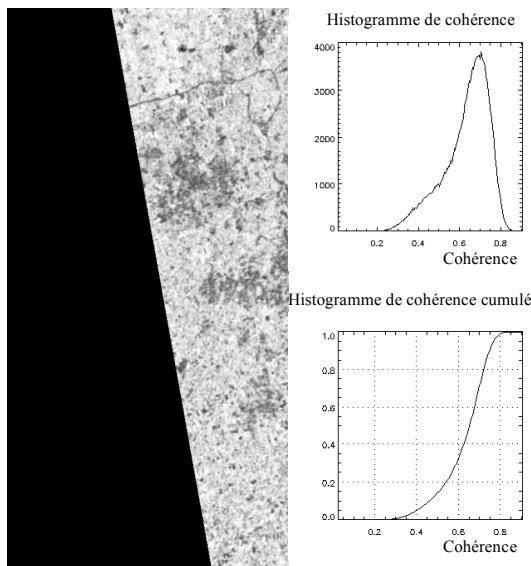


Figure IV.9

*Image de cohérence et histogrammes associés relatifs à l'acquisition Tandem du 17 et 18 avril 1996*

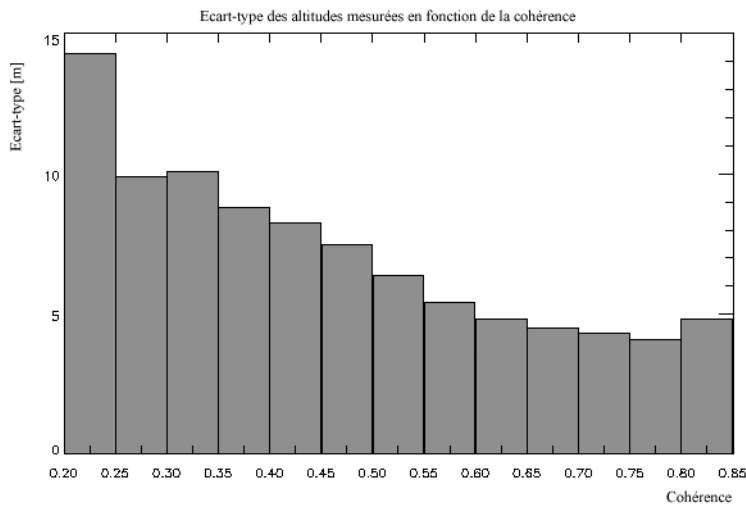


Figure IV.10

*Ecart-type des altitudes mesurées en fonction de la cohérence de la paire Tandem acquise le 17 et 18 avril 1996*

Il est donc clairement confirmé que cette paire Tandem est perturbée. Etant donné la corrélation qui existe entre la structure de la perturbation observée et la structure du couvert nuageux lors de l'acquisition du 18 avril 1996, il apparaît hautement probable que les paramètres atmosphériques et météorologiques influencent fortement la phase interférométrique.

Dans le cas présent, il est clair que la carte de cohérence et la courbe de l'écart-type en fonction de celle-ci ne constituent pas des figures de mérite suffisantes pour qualifier la topographie interférométrique. Un rapport de qualité complet doit impérativement être accompagné d'informations météorologiques permettant d'estimer et de localiser les risques d'artefacts atmosphériques.

#### **IV.2.3.2 Exemple 2: zones urbaines**

Dans plusieurs cas, nous avons pu observer certains désaccords flagrants mais

généralement très localisés entre MNT interférométrique et MNT de référence (annexe 2). Nous avons par exemple pu localiser certains terrils qui n'étaient pas présents dans le relevé topographique de l'IGN. Mais, les écarts les plus importants ont été constatés sur les zones urbaines et plus précisément sur la région Bruxelloise (figure IV.11). On observe que le MNT de référence est plus lisse et moins bien défini sur cette zone que le MNT interférométrique.

Pour cette région très fortement urbanisée, l'IGN annonce une précision de son MNT de l'ordre de 18m alors que, en accord avec la théorie, nous mesurons un écart-type de l'ordre de 7m en fonction de la cohérence pour l'ensemble de cet élément du MNT de référence. Nous pouvons donc en conclure que, en l'occurrence, notre MNT interférométrique est plus précis que celui de l'IGN. La topographie interférométrique se révèle donc particulièrement intéressante pour les zones urbaines.

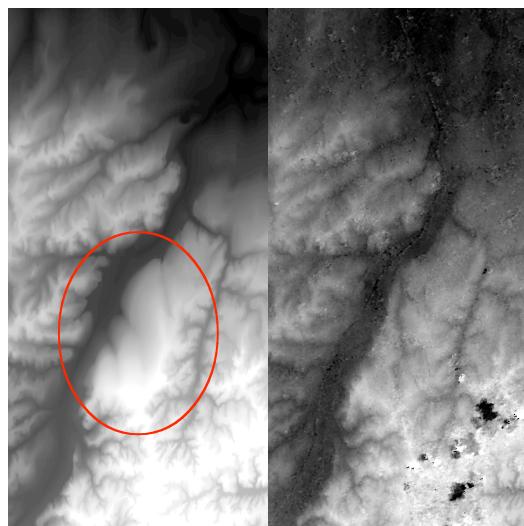


Figure IV.11

- a) *Elément du MNT de référence couvrant la région bruxelloise*
- b) *MNT interférométrique obtenu sur cette zone à partir de l'acquisition Tandem du 17 et 18 avril 1996*

#### **IV.2.4 Analyse de cohérence**

Il est bien connu que les surfaces d'eau détruisent la cohérence et que les zones urbaines ont tendance à la préserver. Ce type d'occupation du sol est donc en général facilement repérable sur les images de cohérence. Mais les images de cohérence montrent également de nombreuses nuances, différentes de celles observables dans les images d'amplitude. La cohérence constitue donc un canal d'information supplémentaire qui ne doit pas être négligé.

Nous avons tenté de corrélérer la cohérence avec divers types de données pour analyser son contenu en information. Pour ce faire, nous avons utilisé diverses cartes thématiques, des photos aériennes et la banque de données CORINE (Coordination des Informations sur l'Environnement).

La banque de données CORINE est une carte de l'occupation du sol répartie en 32 classes différentes pour l'ensemble de l'Europe (voir l'annexe 2 pour une description détaillée de cette banque de données).

Nous avons également utilisé les photos aériennes acquises au-dessus du territoire belge aux dates les plus proches possibles de celles des acquisitions, c'est-à-dire le 27 mars et le 15 avril 1996.

Les photos aériennes, comme la banque de données CORINE, nous ont été fournies par l'IGN.

#### ***IV.2.4.1 Cartes thématiques***

Nous n'avons pu établir aucune corrélation entre les cartes pédologiques donnant les types de sols et les images de cohérence. Les cartes d'occupation agricole, elles, ne sont pas suffisamment détaillées. Elles ne donnent qu'un aperçu à grande échelle de la répartition des différentes activités agricoles sur l'ensemble du territoire belge. Les images de cohérence par contre montrent d'évidence des nuances liées aux parcelles agricoles.

Seules les cartes de répartition des forêts sont fortement corrélées aux images de cohérence. Nous avons pu constater entre les trois acquisitions Tandem, de début à mi-avril, une dégradation progressive de la cohérence sur les zones forestières et sur l'ensemble du territoire en général. Ces pertes de cohérence sont dues à l'émergence de la végétation à cette période de l'année.

#### ***IV.2.4.2 CORINE***

Nous avons tenté de corrélérer les images de cohérence avec la banque de données CORINE. Pour ce faire, nous avons choisi de superposer l'image de cohérence de la paire Tandem du 1 et 2 avril 1996 à la banque de données CORINE (annexe 2). Nous avons choisi cette paire Tandem parce qu'elle a été acquise au-dessus de la région la plus plane du pays, ce qui nous rend indépendant des décorrélations géométriques induites par le relief.

Après superposition de ces deux sources d'information, nous avons calculé les histogrammes de cohérence correspondant à chaque classe d'occupation du sol définie dans la banque de données CORINE. De cette analyse, il ressort qu'aucune classe d'occupation du sol ne peut clairement être discernée à partir de la seule image de cohérence. Nous avons pu remarquer cependant, que les classes correspondant aux forêts et celles répertoriant les zones de végétation naturelle, peuvent ensemble être discernées des autres classes.

#### ***IV.2.4.3 Photos aériennes***

Les photos aériennes nous ont permis de constater clairement qu'entre le 27 mars et le 15 avril, le couvert végétal varie énormément, justifiant par là les pertes de cohérence au cours du temps. Le 27 mars, le sol est encore observable au travers du couvert végétal. Le 15 avril, l'émergence du feuillage dans les zones forestières rend cette observation quasiment impossible.

Il est intéressant de remarquer que certaines parcelles agricoles dont on distingue plus ou moins bien les contours dans les photos aériennes apparaissent très clairement dans les images de cohérence, alors que d'autres, visuellement semblables, ne sont absolument pas discernables dans l'image de cohérence.

Nous en concluons de prime abord, que la cohérence peut difficilement être corrélée avec des cartes ou des bases de données qui donnent une description figée d'une situation. Ceci ne signifie nullement que la cohérence ne peut être utilisée comme un outil de classification. Cela signifie simplement que la cohérence permet un autre type de classification. La cohérence offre une mesure très dépendante de la période d'acquisition et évolue fortement au cours du temps. Elle apporte en quelque sorte une troisième dimension aux cartes bidimensionnelles classiques.

### **IV.3 CONCLUSIONS**

La comparaison entre MNT interférométrique et référence topographique donne des résultats remarquables, en très bon accord avec les prévisions réalisées durant la pré-étude. Dans tous les cas, la cohérence attendue dans les zones boisées a été sous-estimée, car nous n'avions pas tenu compte de la maturation du feuillage en fonction de la période d'acquisition des données SAR. L'état phénologique du couvert végétal apparaît donc comme un facteur qui doit absolument être pris en considération lors de la présélection de paires interférométriques.

La topographie interférométrique est très sensible aux conditions climatiques [*Tarayre & Massonet 1996; Tarayre 1996; Zebker & Rosen 1997*]. De plus, le couvert nuageux, seul, peut se révéler suffisant pour induire des biais locaux d'altitude importants [*Derauw & Moxhet 1996; Derauw & Barbier 1998*]. Les images météorologiques sont donc indispensables aussi bien lors de la phase de présélection des images que pour l'établissement d'un rapport circonstancié de la qualité du produit délivré.

Lorsque les éléments du MNT fournis par l'IGN peuvent sans ambiguïté être considérés comme des références topographiques et que nous ne sommes pas en présence d'artefacts atmosphériques, la mesure de l'écart-type des altitudes mesurées est en excellent accord avec les courbes théoriques. Nous en déduisons que l'image de cohérence associée à la courbe de l'écart-type exprimé en fonction de la cohérence sont des figures de mérite parfaitement adaptées à l'analyse de qualité d'un MNT interférométrique.

## **V TECTONIQUE**

L'interférométrie SAR et surtout l'interférométrie différentielle ont éveillé l'intérêt des géologues et géographes. En effet, l'utilisation de l'interférométrie différentielle dans le cadre d'une étude post-sismique du tremblement de terre de Landers [Massonnet & Feigl 1995 (b); Massonnet & al. 1996] ainsi que pour l'étude des déflations de l'Etna [Massonnet & al. 1995] a démontré le potentiel de cette technique pour la surveillance des sites sismiques à haut risque.

Même si d'autres techniques tels les nivelllements ou les mesures au GPS différentiel s'avèrent parfois plus précises que les mesures par interférométrie différentielle, cette technique à l'énorme avantage d'offrir une cartographie des mouvements mesurés.

C'est dans le cadre d'une étude menée en collaboration avec le Laboratoire de Géographie et Télédétection (LGT) de l'Université de Liège que nous avons étendu les capacités de notre interféromètre SAR en vue de son utilisation comme outil de mesure dans le cadre d'études tectoniques et sismiques.

### **V.1 JORDANIE: PHASE DIFFERENTIELLE ET ARTEFACTS ATMOSPHERIQUES**

L'un des sites teste, choisi par le LGT, se situe sur les rives jordaniennes de la Mer Morte. Cette zone a été choisie pour sa forte séismicité, les tremblements de terre de moyenne amplitude y sont fréquents [Cornet & al. 1997]. De plus, un tremblement de terre de magnitude 7 s'est produit durant la phase Tandem, au sud de cette zone, à Eilat sur la Mer Rouge, le 27 novembre 1995. Les deux paires Tandem encadrant cette date ont donc été choisies pour valider le processeur d'interférométrie différentielle du CSL. Malheureusement, la perte de cohérence sur 35 jours est telle qu'aucun résultat significatif n'a pu être obtenu. Cependant, nous avons malgré tout utilisé ces deux paires Tandem pour tester les modules d'interférométrie différentielle à quatre images. La validation du module consistait à considérer une paire comme référence topographique et à la soustraire de l'autre de manière à générer un interférogramme différentiel plat. D'autre part, comme nous allons le voir ci-après, ce traitement nous a permis de choisir la paire la plus adéquate pour générer un MNT fiable.

La première paire a été acquise les 10 et 11 novembre 1995. La seconde paire a été acquise les 15 et 16 décembre 1995. La figure V.1 représente les positions respectives des senseurs dans le plan d'élévation.

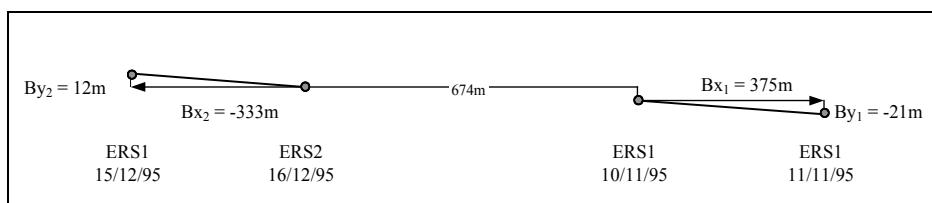


Figure V.1

*Représentation schématique des localisations relatives des bases interférométriques des deux paires Tandem de Jordanie*

L'image acquise le 10 novembre a été considérée comme image maîtresse, c'est-à-dire celle par rapport à laquelle toutes les autres images ont été coregistrées. Nous avons

considéré que la paire de référence était la paire 16/12 - 15/12. La cohérence entre les deux images les plus proches de chacune des paires Tandem n'est que faiblement conservée.

Comme on peut le constater, les deux bases interférométriques sont presque identiques mais de signe opposé. Il en est de même pour les ambiguïtés d'altitudes :  $ha_1 = 28.2m$  et  $ha_2 = -31.5m$ . Dès lors, le facteur de forme à appliquer pour transposer la référence dans la géométrie de prise de vue de la première paire vaut approximativement  $\kappa \approx -1.1$  (éq. III.15).

Malgré le fait que les deux bases soient très ouvertes, les interférogrammes Tandem sont de très bonne qualité (figure V.2) mais montrent un taux de frange extrêmement élevé. De ce fait, l'interférogramme de référence a été déroulé en plusieurs zones non connectées entre elles. On peut remarquer que les deux interférogrammes montrent une structure de franges similaire mais avec des niveaux de gris inversés, l'un par rapport à l'autre. Cela correspond bien à des interférogrammes issus de bases interférométriques similaires mais de signes opposés.

L'interférogramme de référence a été déroulé et transposé dans la géométrie d'acquisition de l'interférogramme Tandem de novembre avant d'être soustrait de ce dernier. La figure V.3 représente la différence entre l'interférogramme de novembre et la référence. Il s'agit donc bien d'un interférogramme différentiel à quatre images (deux quadrants de 50X50km sont représentés).

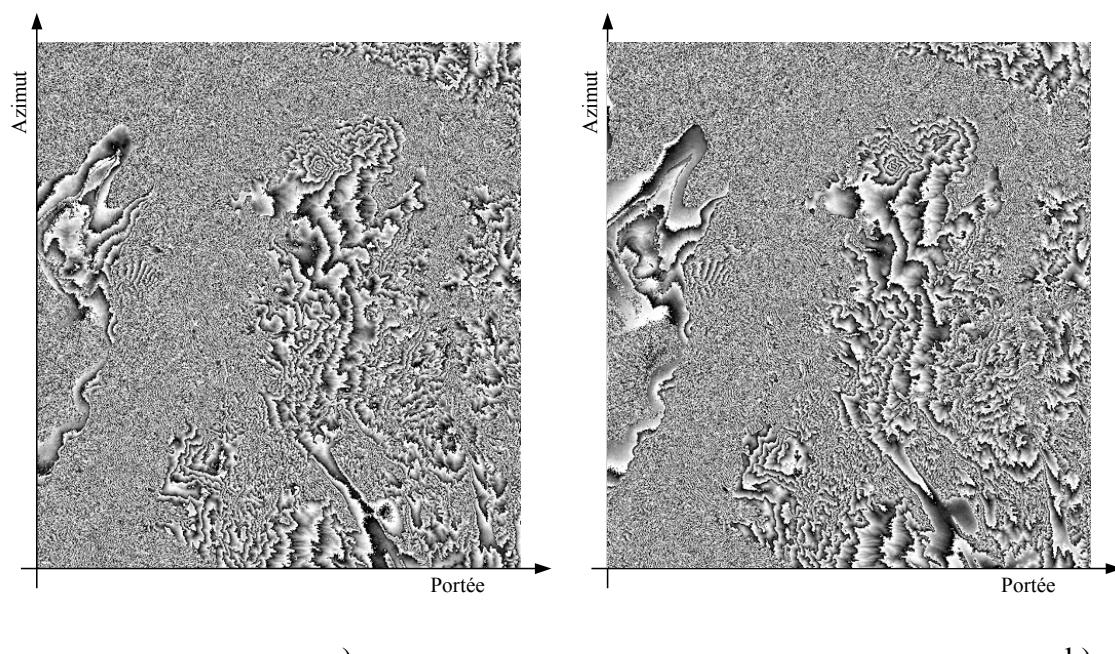


Figure V.2  
 a) *Interférogramme Tandem de Jordanie du 10 et 11 novembre 1995*  
 b) *Interférogramme Tandem de Jordanie du 16 et 15 décembre 1995*  
*considéré comme référence topographique*

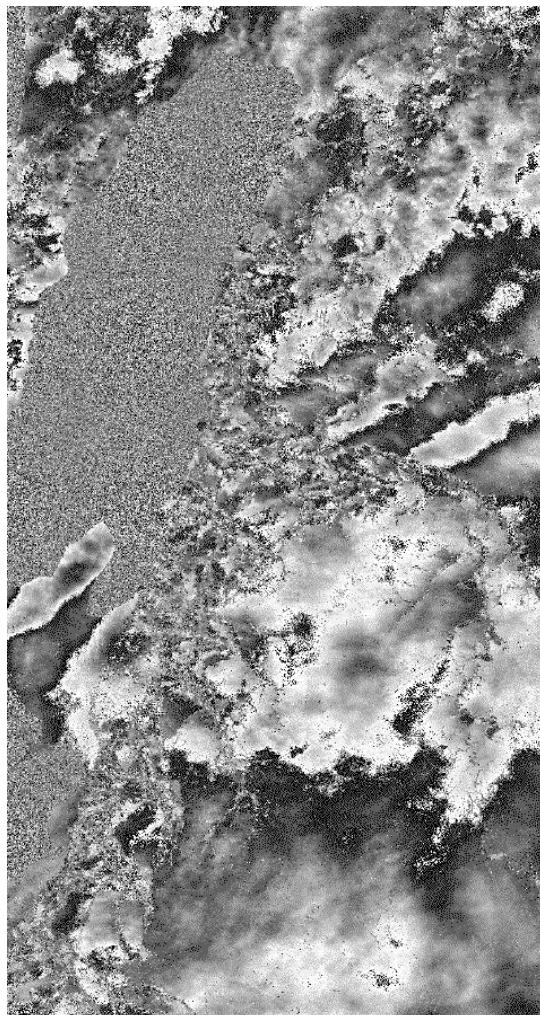


Figure V.3  
Interférogramme différentiel à quatre images de Jordanie

### V.1.1 Interprétation de l'interférogramme différentiel

On peut faire plusieurs constatations: Dans les zones à forte densité de connexions, la phase différentielle est fortement morcelée correspondant en cela aux zones déroulées indépendamment. Mais dans chaque zone, aussi petite soit-elle, la phase différentielle est approximativement constante alors qu'il s'agit initialement de zones à très forte densité de franges donc, de zones où le relief varie rapidement. Ceci nous permet d'affirmer que la transposition de géométrie a été correctement réalisée et que la phase topographique a été correctement soustraite. Deux franges résiduelles sont clairement visibles selon une direction sud-ouest - nord-est. Nous pouvons affirmer que ces franges contiennent bien une information relative à une variation de chemin optique et ne sont pas dues à une erreur de traitement pour les raisons suivantes:

- Il ne s'agit pas d'un résidu topographique comme pourrait le laisser croire la présence d'une de ces franges sur la péninsule du Lisan située sur la Mer Morte, à l'extrême gauche des figures. En effet, la topographie a été convenablement supprimée dans d'autres régions montrant un relief bien plus énergique. Comme le traitement est le même partout, il ne peut s'agir de franges résiduelles dues à la topographie. Il est certain qu'un tel résidu est bien présent dans l'interférogramme différentiel, mais il est très faible et bien inférieur à une frange comme on peut le constater sur les régions convenablement aplaniées.

- Il ne s'agit pas d'une erreur sur les paramètres de prise de vue. Une frange résiduelle horizontale est bien visible dans le tiers inférieur de l'interférogramme. Celle-ci est due au fait que la distance entre le satellite et le centre de la Terre est considérée comme constante dans le processus de calcul, ce qui est faux. Cette distance varie linéairement en première approximation induisant un plan de phase selon l'azimut. Cette variation n'a pas été prise en compte durant ce traitement car elle peut être corrigée a posteriori.
- Il ne s'agit pas d'une erreur sur la base interférométrique ou d'un mauvais retrait de la phase due au plan car une telle erreur aurait laissé apparaître une pente de phase suivant la portée ce qui n'est pas le cas. En effet, les deux franges observées font, en fait, partie d'une seule et même frange comme deux maxima consécutifs d'une même sinusoïde.

### V.1.2 Détermination de l'image perturbée

Pour déterminer, parmi les images, celles qui sont perturbées, nous avons généré deux interférogrammes différentiels à trois images en utilisant l'une puis l'autre paire Tandem comme référence topographique. La phase différentielle est mesurée dans la paire interférométrique constituée des images du 10 novembre et du 16 décembre. Pour cette paire, l'ambiguïté d'altitude est de 15.6m. La décorrélation géométrique y est donc très importante.

Les interférogrammes différentiels à trois images générés sont les suivants:

1. Interférogramme 10/11/95-16/12/95 moins référence topographique 10-11/11/95
2. Interférogramme 16/12/95-10/11/95 moins référence topographique 16-15/12/95

Ces interférogrammes différentiels (limités à la péninsule du Lisan) sont représentés à la figure V.4. On constate que, au lieu d'être identiques, tous deux montrent des franges différentielles localisées aux mêmes endroits mais en nombres différents. Il y a près de trois fois plus de franges dans le premier interférogramme que dans le second. Cette constatation nous permet d'affirmer que l'image du 10 novembre 1995 est perturbée par rapport aux autres. En effet, si cette image contient des perturbations susceptibles d'influencer localement la phase, celles-ci seront présentes dans l'interférogramme simple formé par les images du 10 novembre et du 16 décembre. Ces perturbations seront donc présentes de la même manière dans chaque interférogramme différentiel. Mais elles sont également présentes dans la paire Tandem de novembre utilisée comme référence topographique pour générer le premier interférogramme différentiel à trois images. Or si une référence topographique contient des franges différentielles, celles-ci apparaîtront dans l'interférogramme différentiel multipliées par le facteur de forme  $\kappa$  (éq. III.28). Ceci explique pourquoi les franges différentielles sont près de trois fois plus nombreuses dans le premier interférogramme que dans le second ( $\kappa \approx 28.2/15.6 \approx 1.81$ )

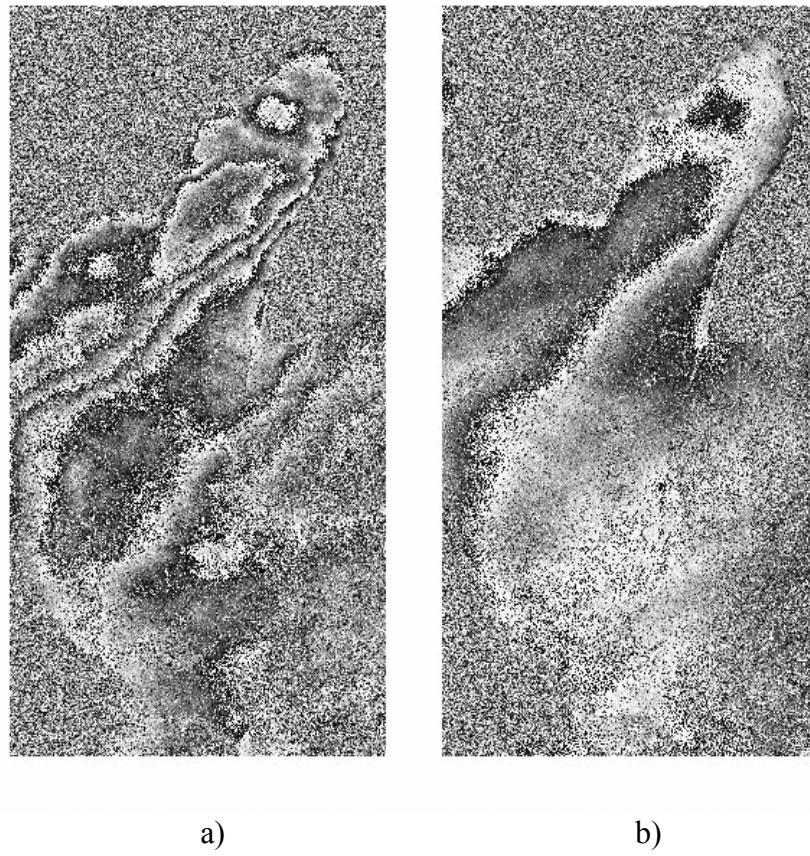


Figure V.4

*Interférogrammes à trois images de la péninsule du Lisan*

*La paire maîtresse est constituée des images du 10 novembre et du 16 décembre 1995*

- a) La paire Tandem de novembre constitue la référence topographique*
- b) La paire Tandem de décembre constitue la référence topographique*

### V.1.3 Origine des franges différentielles

L'origine des franges différentielles est difficile à déterminer avec exactitude sans l'apport d'informations annexes. Deux hypothèses sont valables : soit, il y a eu des mouvements locaux de la topographie, soit, une image au moins est perturbée par rapport aux autres et contient des artefacts atmosphériques.

#### V.1.3.1 Déplacement

S'il s'agit d'un déplacement local réel, ce qui est observé correspond aux déplacements cumulés qui auront eu lieu durant les deux acquisitions Tandem. Comme nous avons déterminé que seules l'acquisition du 10 novembre était perturbée par rapport aux autres, il s'agirait alors d'un mouvement qui se serait produit entre le 10 et le 11 novembre 1995. En ce qui concerne plus précisément la péninsule du Lisan, la frange résiduelle observée indiquerait que l'isthme et le pourtour de la péninsule se seraient affaissés de plus de 30mm par rapport au sommet de celle-ci. Un tel mouvement ne paraît pas, à prime abord, impossible car cette zone peut être sujette à des diapirs (dissolution ou poussée de roches salines à travers les terrains sous-jacents). Par contre, il paraît peu probable qu'un tel mouvement puisse se prolonger sur les hauts plateaux adjacents comme semble le montrer la structure des franges résiduelles.

### V.1.3.2 Artefacts atmosphériques

La seconde hypothèse consiste à supposer qu'une image au moins est perturbée par des effets atmosphériques par rapport aux autres images. Si, lors d'une acquisition, l'atmosphère traversée par l'onde radar n'est pas assimilable à un milieu d'indice de réfraction homogène, des variations locales de chemin optique pourront être observées lorsque l'on générera un interférogramme à partir de cette image et d'une autre qui, elle, aura été acquise en présence d'une atmosphère homogène (ou ne montrant pas les mêmes inhomogénéités).

L'indice de réfraction d'un milieu est le rapport entre la vitesse de la lumière dans le vide et la vitesse de la lumière dans le milieu considéré. Dès lors, si l'indice de réfraction est supérieur à 1, cela signifie que l'onde radar se propage à une vitesse inférieure à celle de la lumière dans le vide. Dans ce cas, il y aura retard de propagation par rapport à une propagation dans le vide. Ce retard de propagation se traduit par une augmentation du chemin optique.

Si le milieu dans lequel se propage l'onde radar est homogène et d'indice  $n$ , la phase observée dans l'image SAR en un point de coordonnée  $z$  en portée, sera donnée par :

$$e^{jnk_{z_0}z} \quad (V.1)$$

Si le milieu est inhomogène, cette phase sera :

$$e^{jk_{z_0} \int_0^z n(z) dz} \quad (V.2)$$

Donc, de manière tout à fait générale, la phase dans un interférogramme devrait s'exprimer :

$$e^{jk_{z_0} \left( \int_0^{z_2} n_2(z) dz - \int_0^{z_1} n_1(z) dz \right)} \quad (V.3)$$

Le fait de considérer  $n$  constant et égal à 1 comme nous l'avons fait jusqu'ici constitue une approximation parfaitement valable. En effet, la présence d'un indice de réfraction différent de 1 peut induire des variations de chemin optique et donc de phase de plusieurs dizaines de longueurs d'onde lors d'une acquisition. Si les conditions atmosphériques sont similaires lors de la seconde acquisition, les mêmes variations de chemin optique seront présentes et n'induiront qu'une erreur de l'ordre de quelques centièmes de pour-cent sur la phase absolue dans l'interférogramme [Zebker & Rosen 1996]. Il s'agit donc d'une erreur extrêmement faible et négligeable en comparaison des autres sources d'erreurs, qu'il s'agisse d'interférométrie simple ou d'interférométrie différentielle. Ceci n'est valable que si l'indice de réfraction, tout en étant inhomogène, ne varie pas ou peu entre les acquisitions.

Par contre, les variations d'indice de réfraction entre deux acquisitions, ont une influence non négligeable. Si de telles variations se produisent, des franges différentielles apparaîtront dans l'interférogramme généré.

Les variations d'humidité relative de la troposphère induisent les variations d'indice de réfraction les plus importantes. De plus, ces variations peuvent être très locales alors que les autres paramètres pouvant influencer l'indice de réfraction (densité électronique dans l'ionosphère, température et pression dans la troposphère) ont soit

une influence plus faible soit une influence sur une très grande échelle spatiale [Tarayre 1996; Zebker & Rosen 1997].

Pour déterminer si les franges résiduelles observées sont d'origine atmosphérique, des données annexes sont indispensables. Nous avons obtenu des Services Météorologiques du Ministère des Transports de l'Etat d'Israël les données concernant la couverture nuageuse et l'humidité relative mesurées avant, pendant et après chacune des quatre acquisitions qui nous intéressent. Les données relatives à la première paire Tandem sont représentées à la figure V.5. Elles montrent clairement que des changements conséquents de la couverture nuageuse et d'humidité de l'air (14%) ont eu lieu entre le 10 et le 11 novembre 1995. De plus, sur les images météo *Quick Look* disponibles sur Internet (Images NOAA, satellite F13), on peut constater que la couverture nuageuse est effectivement très dense au-dessus de la zone d'intérêt le 10 novembre et que l'orientation du front de nuages correspond à l'orientation des franges observées. Enfin, en se basant sur une relation liant l'humidité de l'air mesurée au niveau du sol au déphasage induit [Zebker & Rosen 1997], on peut déduire que le déphasage observé correspond à une variation locale d'humidité relative de l'ordre de 11%, ce qui est très proche des 14% mesurés sur le terrain [Derauw & Moxhet 1996].

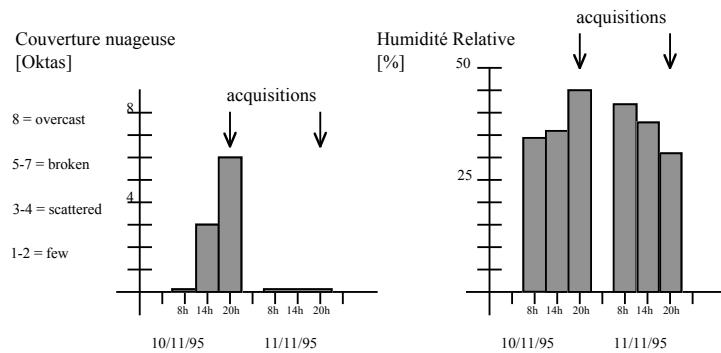


Figure V.5

*Evolution du couvert nuageux et de l'humidité relative entre le 10 et le 11 novembre 1995 (données fournies par le Service Météorologique, Ministère des transports, Etat d'Israël)*

Tous ces éléments nous permettent de supposer que nous sommes bien en présence d'artefacts atmosphériques et non pas de franges de déplacement.

#### V.1.4 Conséquences

La présence de franges résiduelles a plusieurs conséquences selon l'information que l'on veut obtenir par interférométrie:

- Si le but est d'obtenir un modèle numérique de terrain par interférométrie simple, la présence de perturbations de la phase dans une image par rapport à l'autre induit une erreur locale sur l'altitude calculée proportionnelle à la perturbation. Le facteur de proportionnalité est, dans ce cas, l'altitude d'ambiguïté. Si nous avions utilisé la paire Tandem de novembre pour obtenir un MNT sans avoir connaissance des perturbations présentes, nous aurions obtenu une erreur locale pouvant aller jusqu'à 2 franges sur la péninsule du Lisan. Dans le cas présent, cela aurait représenté une erreur absolue de près de 60 mètres.
- Si le but est de mesurer des mouvements de terrains, l'erreur induite est également directement proportionnelle à la perturbation de la phase. Dans ce cas, le facteur de proportionnalité est le nombre d'onde  $k_{z0}$ . Ceci signifie que dans le cas présent,

les franges résiduelles sur la péninsule du Lisan induisent une erreur toujours de l'ordre de 2 franges, ce qui correspond à une erreur absolue sur le déplacement de l'ordre de 50mm.

L'interprétation d'un interférogramme différentiel doit donc être faite avec circonspection et toujours avec l'apport de données annexes. La présence de perturbations de phase, via un quelconque processus, peut s'avérer désastreuse pour l'utilisation de l'interférométrie simple et différentielle, car une fausse interprétation de ces perturbations induit une erreur de mesure qui peut être largement supérieure à l'amplitude du phénomène que l'on désire mesurer. La possession de données annexes (météo, MNT approché, ...) ainsi que de plusieurs images SAR d'une même scène est donc primordiale pour mener à bien des études basées sur l'interférométrie. Seul l'apport de ces données supplémentaires permet de détecter, d'identifier et de mesurer l'ampleur des phénomènes perturbateurs. Cependant, il ne faut pas oublier que ces perturbations de phase contiennent de l'information liée à des phénomènes atmosphériques. Il est donc malavisé de les considérer comme uniquement néfastes à l'interférométrie SAR.

## **V.2 JORDANIE: MNT**

L'étude précédente nous a permis de détecter la présence d'artefacts atmosphériques essentiellement contenus dans l'acquisition SAR du 10 novembre 1995. En conséquence, la paire Tandem correspondante est à rejeter pour la génération d'un MNT fiable. La paire Tandem de décembre peut, par contre, être considérée comme une référence topographique. Nous avons dès lors généré un MNT de Jordanie sur base de cette paire. Cet MNT a été projeté en coordonnées UTM en utilisant un logiciel développé spécifiquement pour l'interférométrie SAR par l'Ecole Royale Militaire (ERM) (figure V.6). Ce logiciel remarquable permet de projeter tout MNT interférométrique, initialement en coordonnées Portée – Azimut, sur une sphère ou en coordonnées UTM sur différents géoïdes (World Geodetic System 1984, World Geodetic System 1972, European Datum 1950, North American Datum 1927, Clarke IGN France)

Sachant que ce MNT ne contient aucun artefact atmosphérique, sa précision nous est donnée par l'image de cohérence associée à la courbe des écarts-types théoriques sur l'altitude. Nous avons généré une carte des écarts-types sur base de l'image de cohérence. Comme l'estimateur des écarts-types (éq. II.22) n'est valide que pour les cohérences élevées, nous n'avons calculé que les écarts-types des altitudes obtenues à partir d'une phase interférométrique ayant une cohérence supérieure à 0.5 (figure V.7). L'histogramme des écarts-types, représenté à la figure V.7, montre que la précision théorique moyenne sur ce MNT est de l'ordre du mètre.

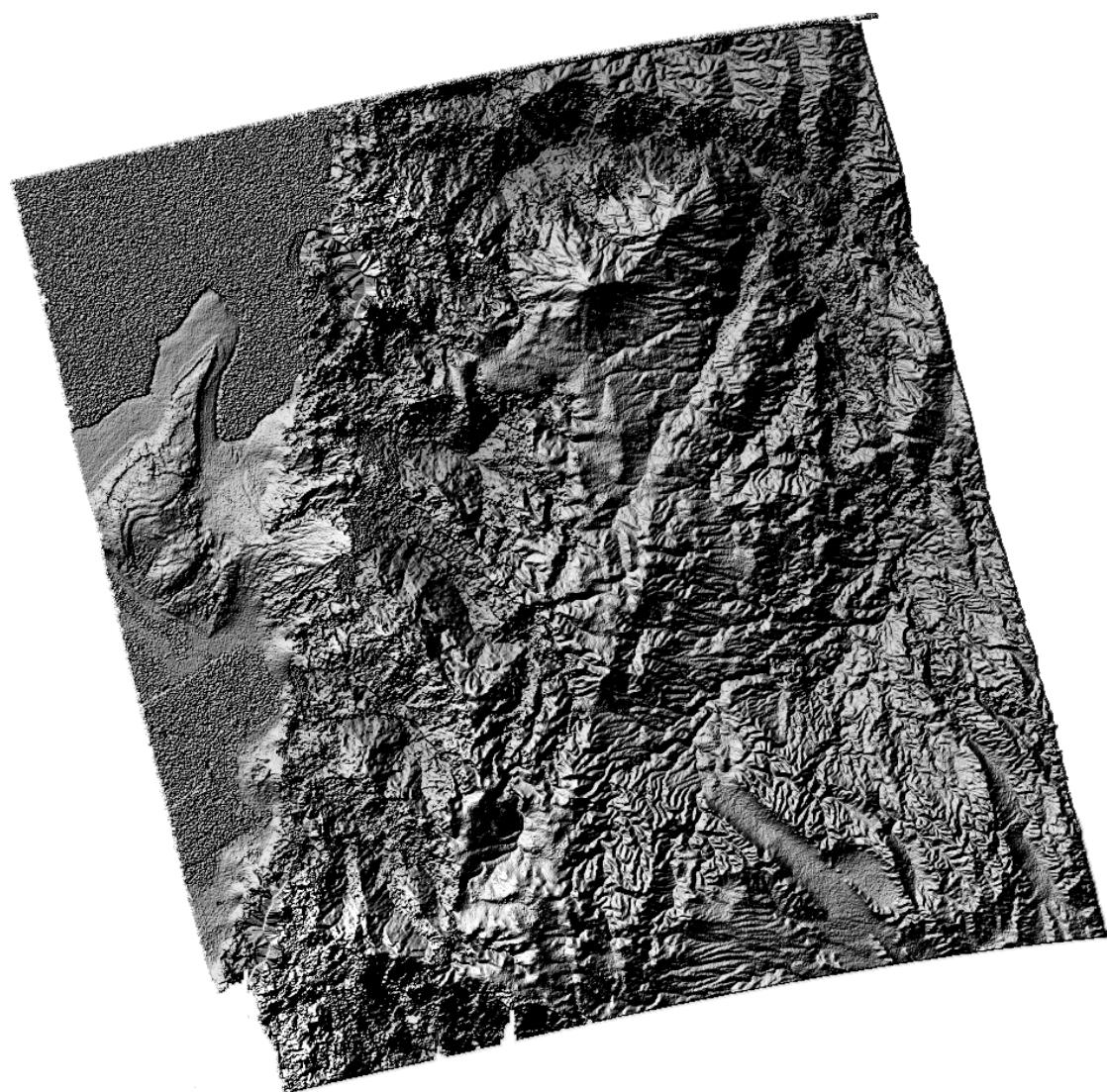


Figure V.6  
Modèle numérique de terrain de Jordanie projeté en coordonnées UTM

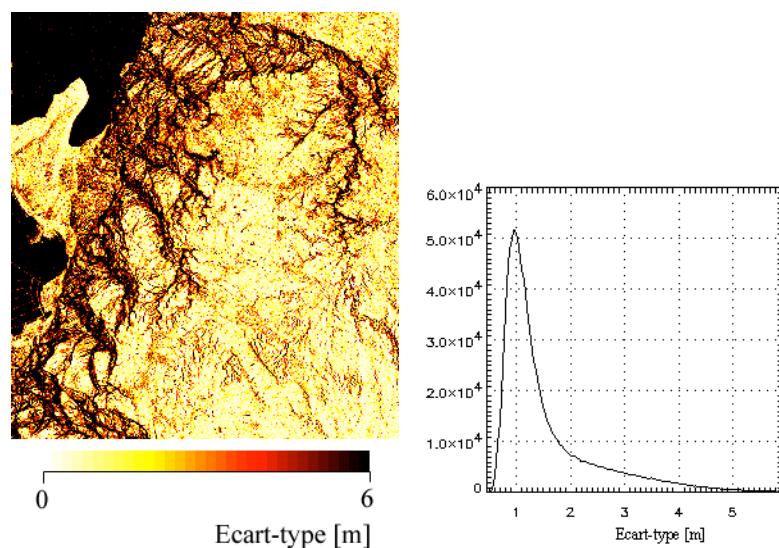


Figure V.7  
Carte des écarts-types théoriques sur les altitudes mesurées  
et histogramme correspondant



### **V.3 DETECTION DE MOUVEMENTS LENTS**

La possession d'une référence topographique fiable pour cette région de Jordanie nous a permis d'envisager, toujours en collaboration avec le LGT, une prolongation de l'étude tectonique de cette zone. A partir d'images acquises les 10 et 11 octobre 1997, soit près de deux ans plus tard, nous avons étudié les mouvements lents par interférométrie différentielle à quatre images. Sur l'ensemble de la scène, seule la cohérence sur la péninsule du Lisan a été conservée. Nous avons extrait la phase différentielle de la paire constituée des images du 16 décembre 1995 et du 10 octobre 1997 (figure V.8). On y observe une phase quasi plane, montrant que le traitement a été correctement réalisé, avec cependant des variations très locales de l'ordre d'une frange. Pour vérifier qu'il ne s'agissait pas une fois de plus d'artefacts, nous avons extrait la phase différentielle de la paire constituée des images du 15 décembre 1995 et du 11 octobre 1997. Nous avons obtenu un résultat tout à fait similaire. Il ne peut donc s'agir d'effets atmosphériques. Comme, de plus, ces événements ne correspondent à rien de visible dans l'image en module de la péninsule (figure V.9), nous pouvons également supposer qu'il ne s'agit pas de variations locales du coefficient de rétrodiffusion. Dès lors, nous devons admettre qu'il s'agit bien de déplacements locaux, en l'occurrence des affaissements, de l'ordre de 2 à 3 cm sur deux ans. Les géographes du LGT se sont rendu sur place et ont pu constater qu'il s'agissait de zones où avaient eu lieu des travaux d'excavation importants. Nous pouvons donc supposer que nous observons les tassements consécutifs à ces travaux. On observe également des franges différentes correspondant à des affaissements de l'ordre de 5cm en bordure de la péninsule. Dans ce cas, il s'agit très probablement des affaissements réels des côtes, cumulés sur deux ans, consécutif au sur-pompage dans la Mer Morte.

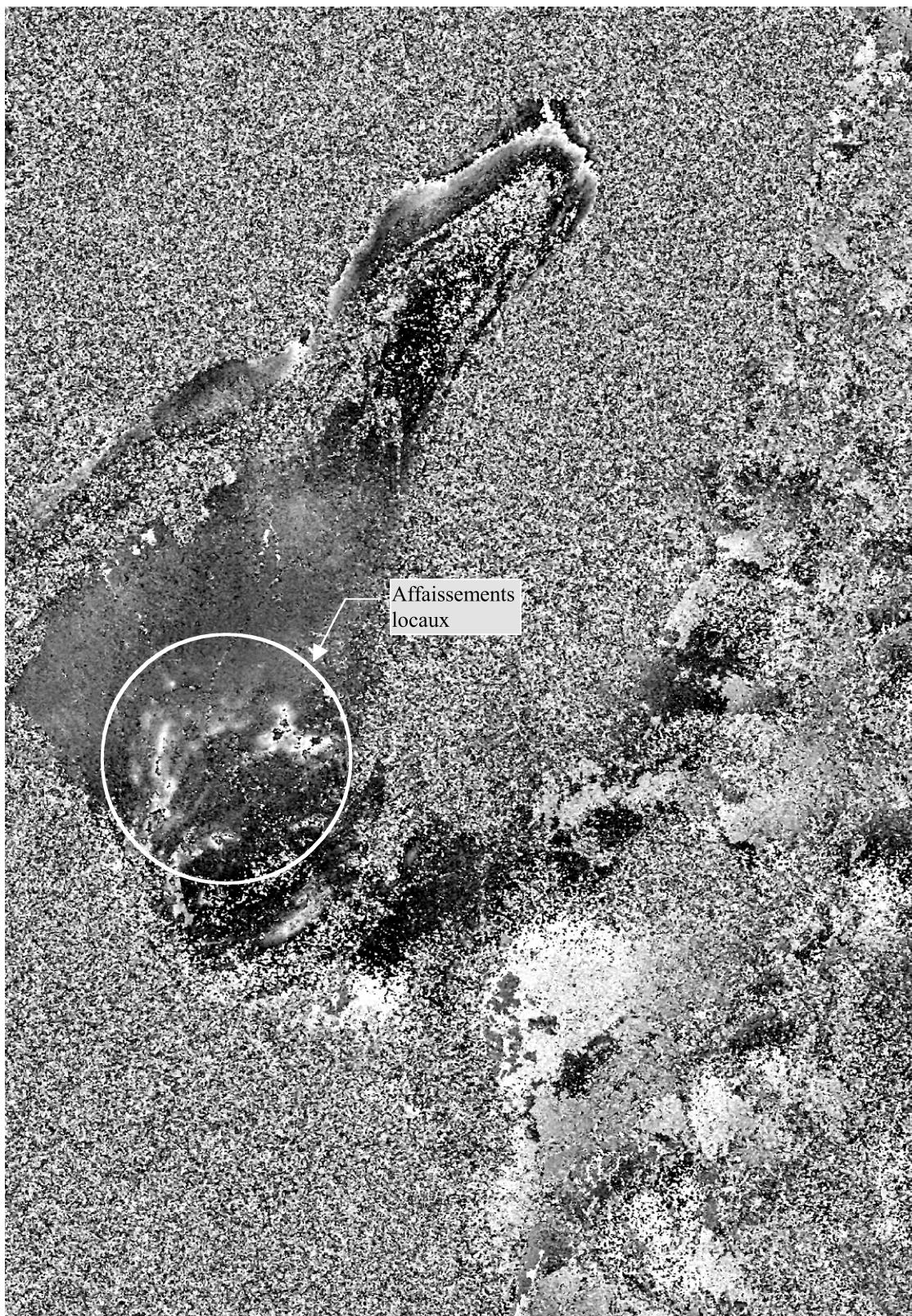


Figure V.8

*Interférogramme différentiel de la péninsule du Lisan  
L'interférogramme à long terme est constitué des images  
du 15 décembre 1995 et du 11 octobre 1997.  
La paire Tandem des 16 & 15 décembre 1995 est utilisée  
comme référence topographique.*



Figure V.9  
*Image en module de la péninsule du Lisan (15 décembre 1995)*

## **V.4 CONCLUSIONS**

Quel que soit le domaine d'application, on ne peut réaliser de mesure par interférométrie différentielle sans tenir compte des effets atmosphériques possibles. Il est absolument indispensable de disposer d'une connaissance suffisante des paramètres météorologiques pour valider les résultats de mesure. Lorsque la présence d'artefacts atmosphériques est suspectée, l'interférométrie différentielle peut être utilisée avantageusement pour déterminer, dans un quadruplet de scènes SAR, la ou les images qui sont perturbées. Ceci permet de déterminer, entre autres, la validité d'une image SAR en vue de son utilisation en topographie ou en interférométrie différentielle.

Dans les zones arides et stables comme la péninsule du Lisan, la cohérence peut être conservée sur de très longues périodes. Dans notre cas, nous avons pu observer une préservation de la cohérence sur près de deux ans, qui s'est avérée suffisante pour réaliser des mesures par interférométrie différentielle. Il en résulte que la péninsule du Lisan s'affaisse lentement, de deux à trois centimètres par an. Cet affaissement est très probablement consécutif au pompage excessif de l'eau de la Mer Morte pour l'alimentation de marais salants (durant ces trente dernières années, le niveau de la Mer Morte a baissé de près de 20 mètres).

## **VI AGRONOMIE**

La perte de cohérence entre deux signaux radar est liée à des facteurs géométriques ainsi qu'aux changements que subit la scène observée. Dès lors, cette perte d'information au niveau de la phase interférométrique est, en soi, une information relative à la scène. Il est donc malavisé de considérer les pertes de cohérence comme uniquement néfastes. La mesure de cohérence constitue en fait le troisième pan de la phasimétrie SAR. Cependant, l'utilisation de cette mesure comme un outil à part entière n'en est qu'à ses débuts. De nombreuses études sont en cours pour déterminer le contenu en information de ce canal de mesure et pour apprendre à l'utiliser. C'est dans cette optique que nous avons coordonné un projet d'évaluation de la phasimétrie SAR dans diverses études de cas. Notamment, nous avons collaboré avec les Facultés Universitaires des Sciences Agronomiques de Gembloux (FUSAGx) et l'Université Catholique de Louvain (UCL) pour analyser l'apport de l'information de cohérence et de l'imagerie SAR en général dans le domaine de l'agriculture.

### **VI.1 OBJECTIFS**

La télédétection offre au monde agricole une opportunité de mesurer directement ou indirectement divers paramètres tant au niveau parcellaire qu'au niveau régional pour évaluer a priori les rendements que l'on peut escompter. Ce type d'évaluation est primordial dans le cadre d'une gestion de la politique agricole commune.

Dans le cadre de l'étude qui nous concerne, l'Unité d'Hydraulique Agricole, qui s'est chargée des mesures terrain et de l'analyse des images de cohérence que nous avons produites, avait choisi d'étudier deux paramètres, à savoir, l'humidité du sol et la hauteur des plantations, pour quatre types de cultures : froment, pomme de terre, betterave sucrière et maïs.

#### **VI.1.1 Site test et données utilisées**

L'Unité d'Hydraulique Agricole des Facultés Universitaires des Sciences Agronomiques de Gembloux a choisi aléatoirement entre 5 et 7 parcelles test pour chacune des cultures précitées. Ce choix aléatoire induit des différences de variétés, d'interlignes, de densité et d'orientation des plants entre parcelles pour un même type de culture. Dès lors, si des corrélations sont mises en évidence entre les mesures de cohérence et les paramètres étudiés pour l'ensemble des parcelles, elles le seront indépendamment de ces paramètres variables.

Des mesures de terrain ont été réalisées sur chaque parcelle lors des acquisitions Tandem. Ces mesures, réalisées par le Centre de Recherches Agronomique de Gembloux – Station de Phytotechnie, reprennent la hauteur des plants, leur état phénologique, la direction des alignements et le taux d'humidité volumétrique dans la couche supérieure du sol.

Nous avons utilisé différentes paires Tandem entre mars et juillet 1996 de manière à analyser la corrélation entre les paramètres choisis et l'évolution de la cohérence au cours du temps. Pour couvrir le site test avec un maximum de paires Tandem durant la période de croissance des cultures, nous avons utilisé les paires Tandem acquises sur deux pistes (*tracks*) adjacentes, décalées d'une demi-scène, dont la partie commune incluait bien évidemment le site test. Les paires Tandem à notre disposition sont reprises dans le tableau VI.1.

Dates d'acquisition	Orbite ERS-1	Orbite ERS-2	Piste	Quadrant
19 & 20 mars 1996	24459	4786	423	2583
4 & 5 avril 1996	24688	5015	151	2583
23 & 24 avril 1996	24960	5287	423	2583
28 & 29 mai 1996	25461	5788	423	2583
13 & 14 juin 1996	25690	6017	151	2583
2 & 3 juillet 1996	25962	6289	423	2583

Tableau VI.1  
*Liste des paires Tandem utilisées*

## VI.2 TRAITEMENTS

De manière à faciliter la localisation des parcelles dans les images SAR en module et dans les images de cohérence, nous avons coregistré entre elles toutes les scènes SAR relatives à un même quadrant.

A partir de ces données coregistrées, nous avons produit les images de cohérence Tandem ainsi que quelques images de cohérence à plus long terme. Nous avons pu constater d'emblée que la cohérence Tandem se détériorait en fonction du cycle saisonnier. La cohérence est très bien conservée en mars mais a tendance à diminuer au cours du temps.

La figure VI.1 représente les images de cohérence Tandem obtenues fin mars, fin avril, fin mai et début juillet. Cette perte de cohérence est due à l'émergence de la végétation et à son évolution au cours du cycle saisonnier.

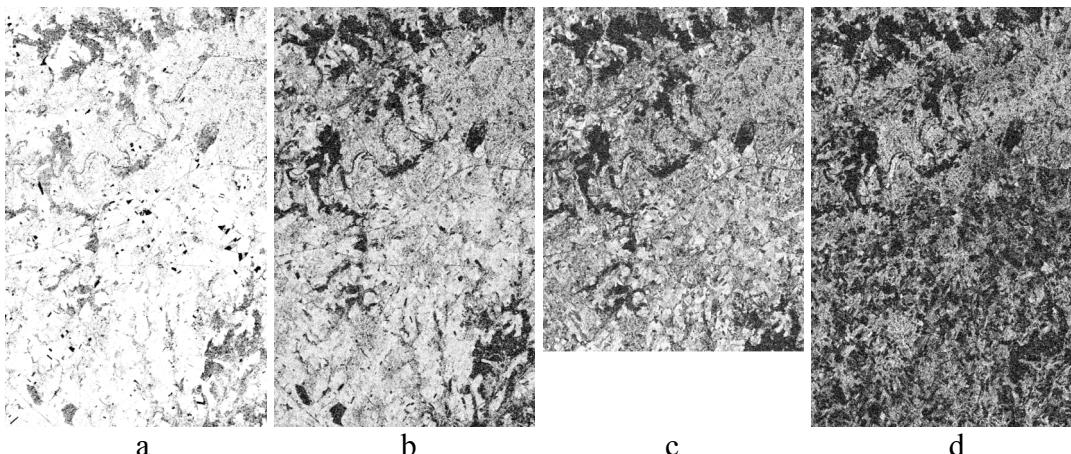


Figure VI.1  
*Evolution de la cohérence Tandem en fonction du cycle saisonnier*

- a) 19 et 20 mars 1996
- b) 24 et 25 avril 1996
- c) 28 et 29 mai 1996
- d) 2 et 3 juillet 1996

Nous avons également calculé la cohérence à plus long terme. Nous avons pu remarquer qu'à un mois d'intervalle, la cohérence est très fortement détruite, même entre mars et avril (figure VI.2). Cependant, certaines zones conservent la cohérence très longtemps. C'est le cas des zones urbaines qui restent visibles sur la carte de cohérence établie entre le 19 mars et le 3 juillet.

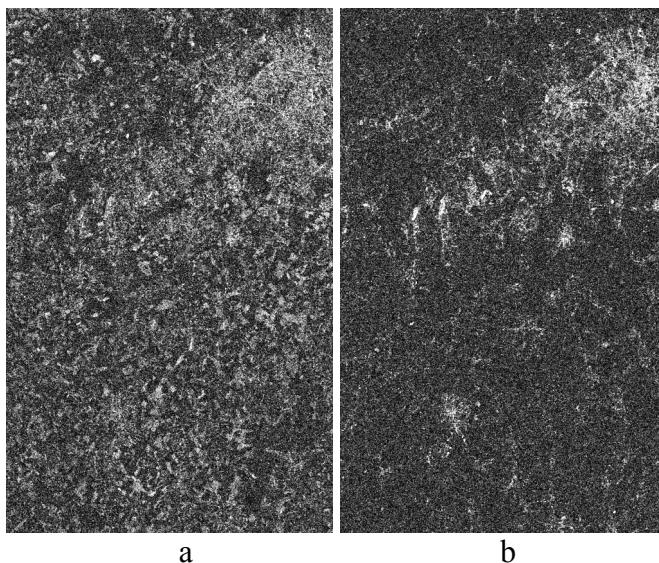


Figure VI.2  
Cohérence à long terme

- a) Cohérence à 35 jours entre le 20 mars et le 25 avril
- b) Cohérence à 142 jours entre le 19 mars et le 3 juillet

Nous pouvons remarquer que la cohérence à 35 jours conserve, malgré tout, une structure laissant apparaître certaines parcelles agricoles. Nous avons dès lors réalisé la composition colorée suivante : nous avons attribué le canal rouge à la cohérence Tandem du 24 et 25 avril 1996, le canal vert à la cohérence Tandem du 19 et 20 mars 1996 et le canal bleu à la cohérence à 35 jours entre le 20 mars et le 25 avril (figure VI.3). En conséquence, ce qui apparaît en vert montre les zones qui ont subi une perte de cohérence Tandem entre mars et avril. Ce qui apparaît en rouge montre les zones qui ont observé un regain de cohérence Tandem entre mars et avril. Ce qui apparaît en jaune montre les zones qui n'ont pas subi de perte de cohérence Tandem notable entre mars et avril, tout en ayant perdu la cohérence à 35 jours. Finalement, ce qui apparaît en niveau de gris, et plus particulièrement en blanc, montre les zones qui conservent une cohérence constante, qu'il s'agisse de cohérence Tandem ou de cohérence à 35 jours.

Nous pouvons remarquer que certaines parcelles agricoles regagnent très fortement en cohérence Tandem entre fin mars et fin avril. L'hypothèse la plus probable suppose que ces parcelles ont été labourées entre le 19 et le 20 mars 1996. Le labourage provoque un changement de rugosité qui induit une perte de cohérence quasi totale.

Nous déduisons de ces diverses observations que la cohérence est très dépendante de la période et de la durée d'observation. Ceci montre une fois de plus que la cohérence ne permet pas une classification de l'occupation du sol, figée dans le temps, mais qu'elle doit être considérée comme un outil de mesure donnant accès à l'évolution de certains paramètres au cours du temps.

Ceci a été confirmé par l'analyse qu'en a faite l'Unité d'Hydraulique Agricole [Moeremans & al. 1998].



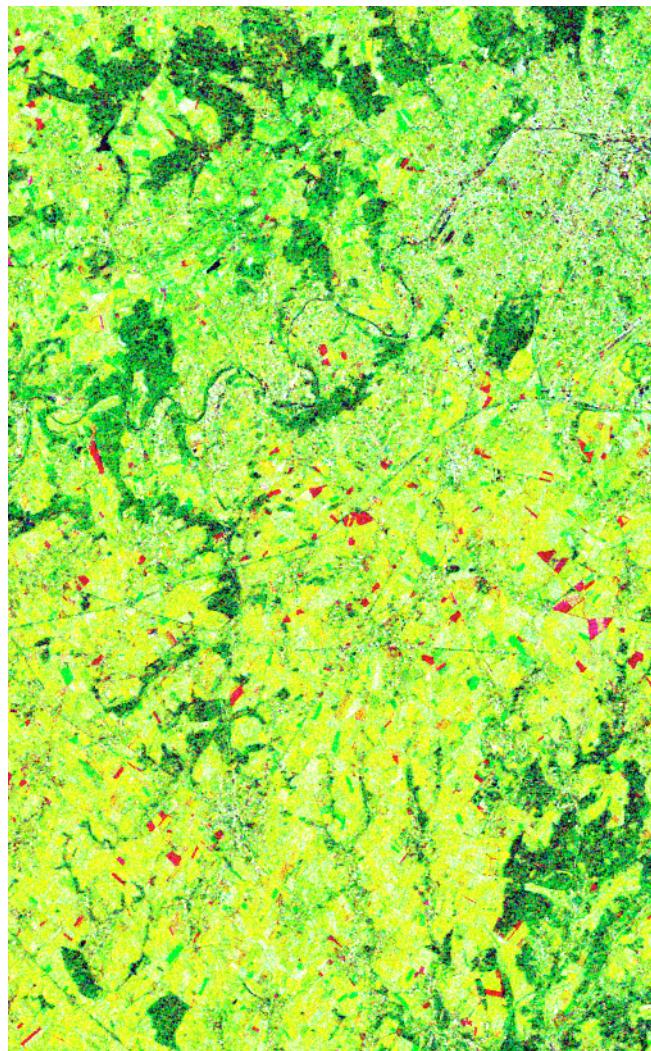


Figure VI.3

*Composition colorée de la cohérence à 35 jours avec les cohérences Tandem entre fin mars et fin avril*

*Canal rouge : cohérence Tandem du 24 et 25 avril 1996*

*Canal vert : cohérence Tandem du 194 et 20 mars 1996*

*Canal bleu : cohérence à 35 jours entre le 20 mars et le 25 avril*

## **VI.3 ETUDE DU CONTENU EN INFORMATION DE LA COHERENCE**

### **VI.3.1 Evaluation du taux d'humidité**

Certaines variations de cohérence Tandem peuvent être mises en relation avec les variations d'humidité du sol, mais uniquement entre mars et avril, avant l'émergence de la végétation. Lorsque le couvert végétal devient important, la cohérence est principalement influencée par les changements de rugosité de celui-ci. Dès lors, la cohérence a principalement été utilisée pour localiser les parcelles nues, montrant une cohérence très élevée. Par la suite, c'est sur base du coefficient de rétrodiffusion que l'Unité d'Hydraulique Agricole a pu établir une corrélation avec le taux d'humidité du sol [Moeremans & al. 1998].



### **VI.3.2 Hauteur des cultures**

L'utilisation de la cohérence Tandem pour la mesure de la hauteur des cultures est basée sur l'hypothèse simple qu'avec la croissance des végétaux, la rugosité du couvert végétal varie et la rétrodiffusion volumétrique s'intensifie. Dès lors, sous cette hypothèse, la cohérence Tandem doit décroître avec la hauteur des cultures observées. La cohérence moyenne a été calculée pour chaque parcelle test à partir de chaque image de cohérence Tandem disponible et comparée avec la hauteur moyenne mesurée pour la parcelle considérée. Il a pu être observé que la décroissance de la cohérence Tandem au cours du temps variait, en première approximation, linéairement avec la hauteur moyenne des cultures et ce, apparemment indépendamment d'autres paramètres tels que l'humidité du sol, l'orientation des rangées de plants, l'interligne ou le type de sol.

La relation linéaire la plus fiable a été obtenue dans le cas des pommes de terre. L'inversion de la relation permet la mesure de la hauteur des plants à partir de la cohérence Tandem avec une erreur relative de l'ordre de 10%. Par contre, il semble que dans le cas des betteraves sucrières, la relation linéaire ne soit pas suffisamment précise pour permettre la mesure de la hauteur moyenne des plants sur la seule base de la cohérence Tandem [Moeremans & al. 1998].

### **VI.4 CONCLUSIONS**

Cette étude, quoique partielle, montre que la cohérence contient effectivement des informations utiles au monde agricole. Elle devrait être complétée par d'autres études à plus long terme et portant sur un plus grand nombre de paramètres et de types de cultures.

Il est intéressant de remarquer que les zones urbaines conservent très bien la cohérence à long terme. De plus, la cohérence semble constante sur ces zones, qu'elle soit mesurée avec un jour d'intervalle entre les acquisitions SAR ou sur une période de plusieurs mois. La présence de tels diffuseurs que l'on peut considérer comme permanents peut être utilisée avantageusement pour réaliser des mesures par interférométrie différentielle sur de longues périodes dans des régions comme la Belgique, où les changements rapides de la végétation sont défavorables à cette technique.



## VII GLACIOLOGIE

Dans le cadre d'un projet mené en collaboration avec le Département de Géographie de la Vrije Universiteit Brussel (VUB), nous avons entamé une étude concernant l'apport de la phasimétrie SAR dans le domaine de la glaciologie. Le but premier de ce projet consiste à extraire les vitesses de surface et les taux de contrainte dans un écoulement rapide d'une coulée de glace en Antarctique. La couche de glace dans la partie Est de l'Antarctique est principalement drainée par de larges glaciers. Ceux-ci jouent un rôle crucial dans le comportement dynamique de la couche de glace en fonction des changements climatiques. Le glacier Shirase est l'un de ces glaciers à écoulement rapide. La vitesse d'écoulement de la partie flottante de la langue de ce glacier peut atteindre 2700m/an. La mesure des vitesses et gradients de vitesse permet de déduire les champs de contrainte dans la glace. En finale, cette approche permet de comprendre la dynamique du glacier étudié.

### VII.1 PRINCIPE DE MESURE

Plusieurs études ont démontré que l'interférométrie différentielle était particulièrement adaptée pour mesurer les vitesses de déplacement des glaciers ou, du moins, la composante de vitesse selon la portée [Goldstein & al. 1993]. En effet, lorsqu'un point observé se déplace dans le plan horizontal local, la composante de ce mouvement selon la portée générera une phase différentielle (éq II.18). Dès lors, connaissant la durée séparant les deux acquisitions qui servent à générer l'interférogramme contenant la phase différentielle, on peut calculer la composante de vitesse moyenne suivant la portée (figure VII.1).

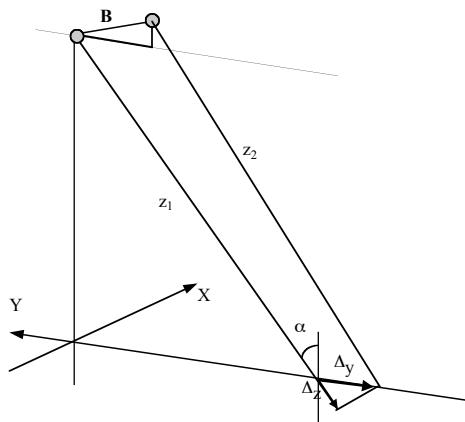


Figure VII.1  
Influence d'un déplacement horizontal sur la phase différentielle

Si on suppose que le mouvement observé a lieu dans le plan horizontal local, la composante de vitesse selon la portée au sol sera donnée par:

$$v_y = \frac{\Delta y}{\Delta T} = \frac{\Delta z \sin(\alpha)}{\Delta T} \quad (\text{VII.1})$$

où  $\alpha$  est l'angle d'incidence local et  $\Delta T$  est la durée qui sépare les acquisitions SAR concernées.

### **VII.1.1 Remarque**

Nous avons représenté à la figure VII.1, un déplacement suivant la projection au sol de la portée. Si le déplacement possède une composante de vitesse suivant l'azimut, cela n'aura strictement aucune influence sur la phase différentielle. Si une telle composante existe et est constante pour toute la scène, le décalage induit sera compensé par la coregistration et la figure VII.1 reste bien d'application. S'il existe des variations locales de cette composante, elles se traduiront par des erreurs de coregistration. Or, comme nous l'avons vu, une erreur de coregistration n'induit pas de biais de phase, mais en augmente la variance. En conclusion, l'interférométrie différentielle ne donne bien accès qu'à la composante du mouvement selon la portée. Ceci signifie que pour obtenir un champ de vitesse complet, trois paires interférométriques, contenant une phase différentielle et acquises selon des incidences différentes non coplanaires, seront nécessaires. Comme, sur base d'images ERS, on peut au mieux utiliser des paires ascendantes et descendantes, on ne pourra obtenir des informations sur le champ de vitesse qu'en imposant des hypothèses restrictives. Cependant, dans le domaine de la glaciologie, la télédétection en général et la phasimétrie SAR en particulier offrent bien souvent une opportunité d'investigation unique.

### **VII.2 SHIRASE**

Dans l'étude qui nous concerne, la zone d'intérêt est la partie centrale du glacier Shirase, situé en Antarctique par 39° de longitude Est et 70° de latitude Sud. La coulée de glace dont les déplacements sont à mesurer, couvre approximativement une surface de 20 km X 70 km.

Nous avons utilisé trois paires Tandem dont les caractéristiques sont reprises ci-après:

	Dates d'acquisition	Composantes de la base interférométrique				Ambiguïté d'altitude
		B <sub>x</sub>	B <sub>y</sub>	B <sub>  </sub>	B <sub>⊥</sub>	
Paire 12	9 & 10 avril 1996	55.4	0.8	18.7	52.5	-171
Paire 34	14 & 15 mai 1996	61.7	-5.7	27.2	56.5	-158
Paire 56	2 & 3 juin 1996	12.5	-2	12.6	-1.9	5588

Les paires d'avril et mai couvrent la même zone. Par contre, la paire du mois de juin observe la scène suivant une incidence légèrement différente. Dès lors, la zone couverte par cette paire est décalée de près d'une demi-scène par rapport à la zone couverte par les deux autres paires (figure VII.2).

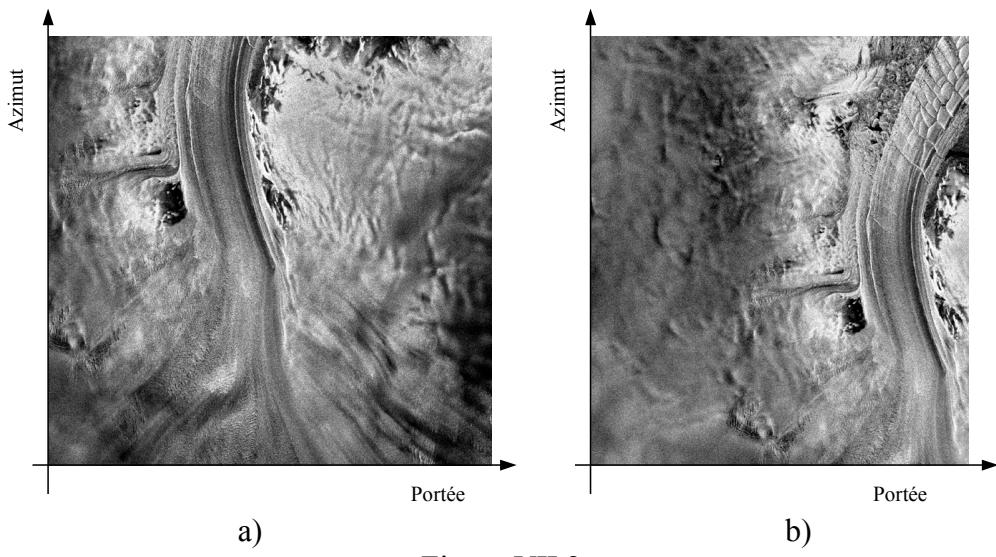


Figure VII.2  
*Images en module du glacier Shirase (Antarctique Est)*  
 a) scène ERS-1 du 9 avril 1996  
 b) scène ERS-1 du 2 juin 1996

Comme on peut le constater sur les images en module, la langue du glacier est bien visible et principalement orientée suivant l'azimut. On peut donc suspecter que dans le cas présent, l'interférométrie différentielle ne sera pas utilisable directement pour la langue du glacier. Par contre, dans les zones de drainage où la direction préférentielle a une composante marquée suivant la portée, l'interférométrie différentielle apportera des informations utiles.

Au vu des ambiguïtés d'altitude, nous avons commencé par traiter la paire de juin. En effet, l'ambiguïté d'altitude de cette paire est telle que la phase y est quasiment insensible à la topographie. Les franges obtenues peuvent donc directement être attribuées à la phase différentielle (figure VII.3).

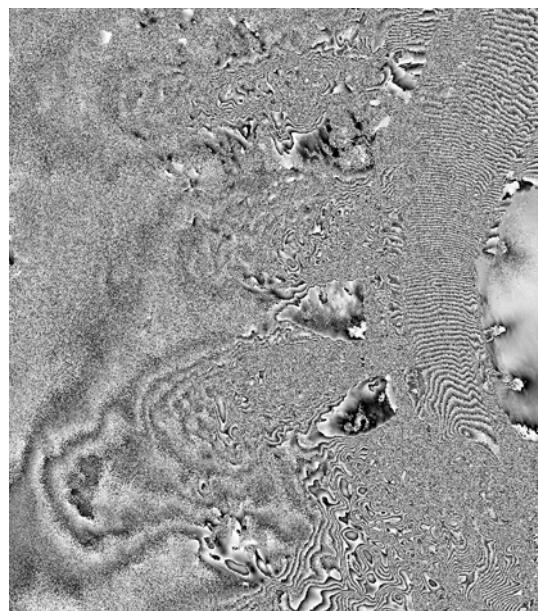


Figure VII.3  
*Interférogramme Tandem issu de la paire du 2 et 3 juin 1996, couvrant le glacier Shirase*

Malgré le fait que l'écoulement se fait principalement selon l'azimut, on observe un nombre considérable de franges sur la langue du glacier. Dans la zone de drainage, les franges ont une structure très irrégulière. Par contre, lorsqu'on arrive sur la langue du glacier, on observe l'apparition de franges quasi parallèles. Il y a une séparation nette entre écoulement "turbulent" dans la zone de drainage et écoulement "laminaire" au niveau de la langue du glacier. Cette ligne de séparation correspond à la limite à partir de laquelle la glace est flottante. A partir de cette ligne de séparation, on observe une accélération notable de l'écoulement qui se marque par une augmentation de la densité de franges.

Etant donné la haute densité de franges ou l'importance locale du bruit, cet interférogramme n'est déroulable que par zones assez restreintes, notamment sur la langue du glacier. De plus, comme les phases déroulées sur les zones en mouvement ne sont nulle part connectées à des zones fixes, une connaissance terrain relativement approfondie est requise pour pouvoir connecter les zones entre elles, sur base des gradients de vitesse qui les séparent.

### **VII.2.1 Suivi de cohérence**

Nous pouvons constater que les franges observées sont fort bruitées sauf sur les parties de la scène correspondant à des rochers. Il semble donc que la coregistration des images ait été réalisée en maximisant la cohérence d'abord sur les parties fixes de la scène. L'image de la cohérence estimée pour cette paire après coregistration est représentée figure VII.4.



Figure VII.4

*Glacier Shirase: Image de cohérence issue de la paire Tandem du 2 et 3 juin 1996*

On peut supposer a priori que la glace en mouvement doit conserver la cohérence aussi bien que des rochers couverts de neige et de glace. Dès lors, le bruit peut provenir d'une mauvaise coregistration au niveau local. Pour nous en assurer, nous avons découpé des portions de la scène sur la partie flottante du glacier et nous les avons coregistrées indépendamment du restant. La figure VII.5 montre l'interférogramme de la zone choisie, obtenu après coregistration de l'intégralité des scènes, ainsi que celui obtenu après coregistration des portions d'images.

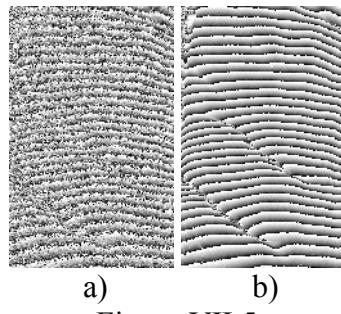


Figure VII.5

*Portion d'interférogramme sur la langue du glacier Shirase obtenu:*

- a) après coregistration de l'intégralité des images.
- b) après coregistration des portions d'images seules.

En se limitant à la partie mouvante du glacier, on obtient des franges d'excellente qualité. Ceci prouve bien que la perte de cohérence mesurée est fictive et due à une mauvaise coregistration au niveau local. On peut de nouveau remarquer que, en accord avec la théorie, une erreur de coregistration n'induit pas de biais de phase mais se traduit uniquement par une augmentation de la variance de phase [Just & Bamler 1994].

Partant de cette constatation, nous avons modifié le module de coregistration par maximisation locale de cohérence pour sortir les résultats de coregistration sous forme graphique. Comme précédemment, nous recherchons, pour chaque point d'ancre, le décalage entre image esclave et maîtresse qui maximise la cohérence locale. En suivant ainsi la cohérence, nous obtenons quatre informations pour chaque point d'ancre: les décalages optimum suivant l'azimut et la portée, la phase interférométrique ainsi que la cohérence locale estimée pour ces décalages optimaux. Ces informations sont sauvegardées dans des fichiers séparés. A l'issue du processus, ces informations sont données sous forme de cartes de mouvements locaux, d'une carte de cohérence et d'un interférogramme réduit.

#### **VII.2.1.1 Mesures de déplacements par suivi de cohérence**

Nous avons appliqué ce processus de suivi de cohérence à la paire Tandem de juin acquise au dessus du glacier Shirase. La figure VII.6 montre l'image de cohérence ainsi obtenue en comparaison de celle estimée précédemment.

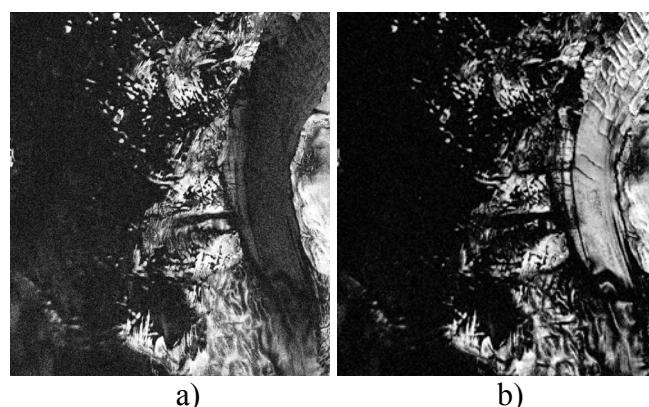


Figure VII.6

- a) Cohérence estimée après coregistration complète de la paire Tandem de juin
- b) Cohérence estimée par suivi de cohérence



Les cartes de déplacements sont représentées à la figure VII.7. Pour montrer l'orientation et l'amplitude des mouvements du glacier, nous avons généré une représentation vectorielle des déplacements ainsi qu'une image de leur amplitude en tenant compte du fait qu'un pixel de déplacement en azimut représente 4m et qu'un pixel de déplacement en portée représente 20m sur terrain plat (figure VII.8). On observe clairement que le déplacement de la langue du glacier est principalement orienté suivant l'azimut.

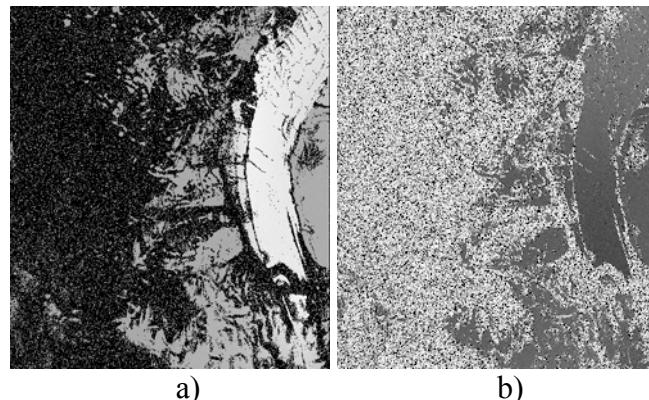


Figure VII.7

*Glacier Shirase: résultats obtenus par suivi de cohérence*

- a) Carte des déplacements azimutaux
- b) Carte des déplacements selon la portée

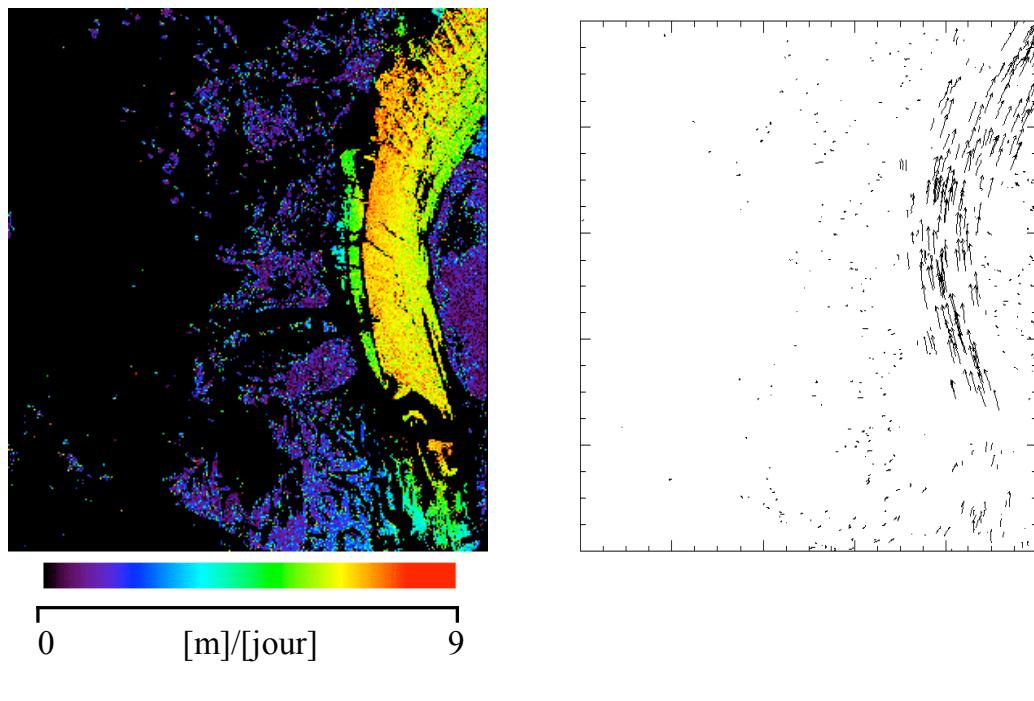


Figure VII.8

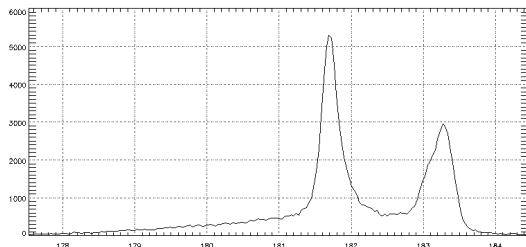
*Mouvements du glacier Shirase mesurés par suivi de cohérence*

- a) Amplitude des déplacements
- b) Représentation vectorielle



L'amplitude maximum des déplacements ainsi mesurés est de l'ordre de 8m par jour, ce qui correspond à des vitesses d'écoulement de l'ordre de 2900m par an, en excellent accord avec les vitesses mesurées, lesquelles peuvent atteindre 2700m/an dans le cas du glacier Shirase.

La figure VII.9 représente l'histogramme des déplacements suivant l'azimut. On observe deux pics. Le plus important et le plus étroit correspond au décalage optimum mesuré pour les parties fixes. Le second pic, plus étalé, correspond aux décalages locaux supplémentaires consécutifs aux mouvements du glacier entre le 2 et le 3 juin 1996. L'étalement de ce second pic dépend de la distribution des vitesses au sein du glacier.



**Figure VII.9**  
*Histogramme des déplacements azimutaux mesurés par suivi de cohérence*

Une analyse statistique sommaire sur une partie fixe ayant une cohérence supérieure à 0.7 avec une moyenne de 0.75, montre que l'on obtient des valeurs de déplacements centrées sur le pic correspondant à un déplacement nul avec un écart-type de 0.13 pixel en azimut et de 0.09 pixel en portée. Si nous reportons ces valeurs en terme de distances, nous obtenons des écarts-types de 52 cm en azimut et de 1m80 en portée sur terrain plan. Comme la cohérence moyenne sur la glace en mouvement est de l'ordre de 0.7, nous pouvons considérer que, dans le cas présent, les valeurs ci-dessus sont représentatives de la précision de mesure des déplacements par suivi de cohérence. On reste donc bien en-dessous de la précision d'une fraction de longueur d'onde offerte par interférométrie différentielle.

Insistons cependant sur le fait que, même si la mesure de déplacement par suivi de cohérence est peu précise, cette méthode nous donne accès aux mouvements azimutaux, ce qui n'est pas le cas de l'interférométrie différentielle. De plus, les déplacements azimutaux que nous mesurons sont entièrement découpés des mouvements verticaux qui peuvent se produire simultanément.

En ce qui concerne les mouvements suivant la portée, les vitesses mesurées sont théoriquement entachées d'une erreur très importante et du même ordre de grandeur que ce que l'on cherche à mesurer. Cependant, il est surprenant de constater l'excellent accord entre les vitesses suivant la portée, mesurées par interférométrie différentielle et par suivi de cohérence. Un simple comptage de franges montre que, entre l'endroit où l'écoulement est tangent à l'azimut et l'extrémité nord de la langue de glace, le déplacement suivant la portée correspond à une soixantaine de franges, soit approximativement 1m60. La mesure par suivi de cohérence nous donne une valeur similaire. De plus, comme le montre la représentation vectorielle, cette mesure débouche sur des orientations de déplacement en accord avec l'écoulement.

On peut encore remarquer que la mesure par suivi de cohérence est une mesure ponctuelle. De plus, les points fixes sont aisément identifiables. Cette méthode peut donc, dans le cas de déplacements importants, venir en complément de l'interférométrie différentielle pour déterminer la vitesse approximative d'au moins un point par zone déroulée indépendamment.

### VII.2.1.2 Interférogramme de suivi

Le processus de suivi de cohérence nous permet également de générer une phase interférométrique calculée en chaque point d'ancrage en utilisant les déplacements optimaux trouvés pour ceux-ci par suivi de cohérence. Cet interférogramme est représenté à la figure VII.10

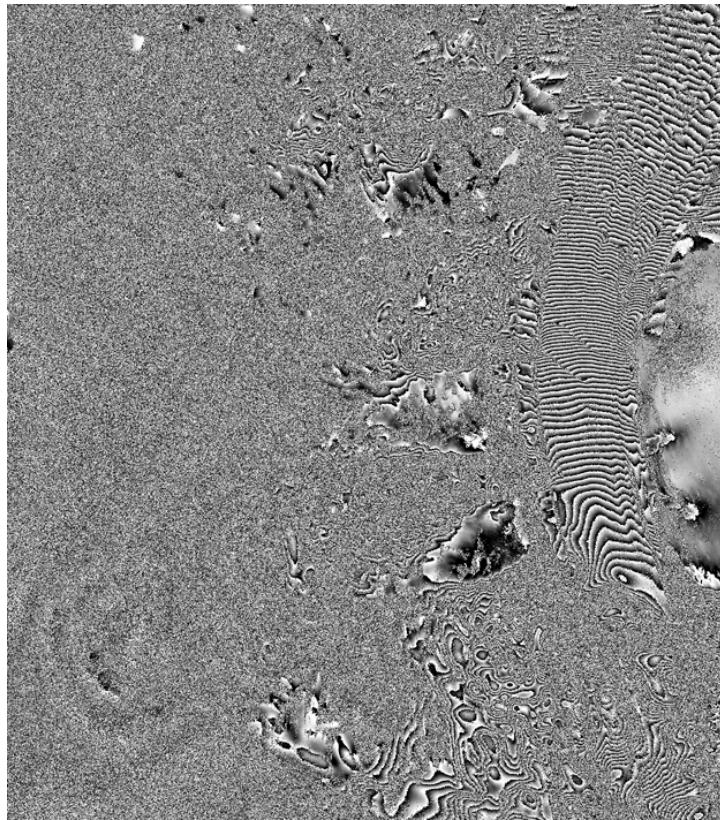


Figure VII.10  
Interférogramme de suivi issu de la paire Tandem de 2 et 3 juin 1996

Les franges situées dans les zones de basse cohérence sont beaucoup moins bien marquées. Ceci est dû au fait que le processus de coregistration par maximisation locale de cohérence n'est pas fiable dans ces zones. Nous calculons donc la phase interférométrique dans ces régions avec une erreur de coregistration importante induisant une perte de cohérence non négligeable.

Par contre, dans les zones de cohérence élevée, le suivi de cohérence permet de restaurer le signal interférométrique là où il était perdu suite aux déregistrations locales. On obtient cette fois un interférogramme parfaitement déroulable sur l'entièreté de la langue du glacier.

La phase déroulée, représentée à la figure VII.11, a été traduite en termes de déplacement. Les mesures de déplacement obtenues précédemment par suivi de cohérence, nous ont appris que la vitesse de la langue du glacier suivant la portée est nulle lorsque l'écoulement est tangent à l'azimut. Nous avons utilisé cette information pour compenser le décalage inhérent au déroulage de phase. En combinant ainsi suivi de cohérence et interférométrie différentielle, nous obtenons une mesure absolue des déplacements de la langue du glacier suivant la portée avec une précision d'une fraction de longueur d'onde. La précision est directement liée à la variance de phase qui est, elle, déterminée par la cohérence locale (éq. II.22).

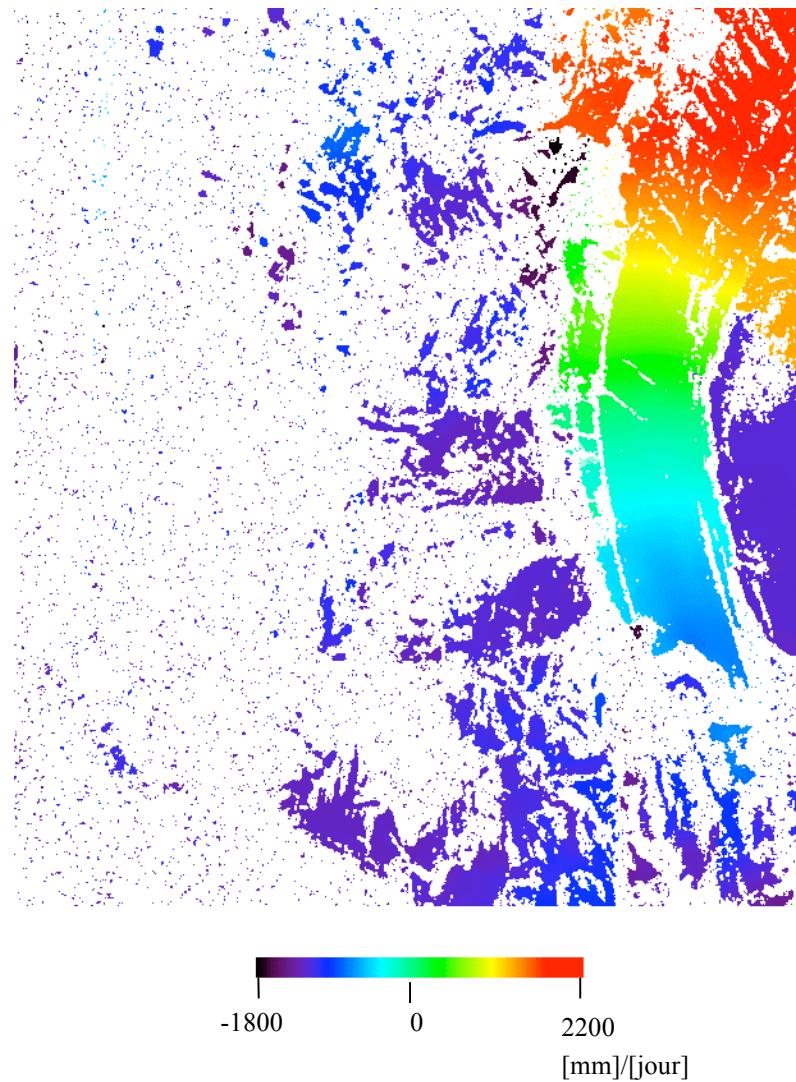


Figure VII.11

*Mesure des déplacements selon la portée de la langue du glacier Shirase par interférométrie différentielle*

La compensation que nous avons appliquée à l'ensemble de l'image n'est valable que pour la langue du glacier. En conséquence, les valeurs de mouvement mesurées sur des zones non connectées à la langue du glacier sont erronées. Une compensation adéquate doit être appliquée à chaque région déroulée indépendamment.

#### VII.2.1.3 Paires Tandem d'avril et mai

Nous avons également traité les deux autres paires Tandem disponibles sur le glacier Shirase. Toutes deux, quoique moins bonnes que la paire du mois de juin, ont pu être traitées par suivi de cohérence. Les résultats obtenus sont tout à fait similaires à ceux obtenus avec la paire de juin.

Les interférogrammes d'avril et de mai possèdent une ambiguïté d'altitude de l'ordre de 160m. Ces interférogrammes ne sont donc pas insensibles à la topographie. Ceci est confirmé par la présence de franges sur les parties rocheuses du site (figure VII.12). Par contre, la zone de drainage et la langue du glacier montrent des structures de franges similaires à celles observées dans l'interférogramme du mois de juin. Il semble donc que la topographie dans ces zones est faible et que les déplacements locaux du glacier ont tendance à rester constants au cours du temps, entre avril et juin.



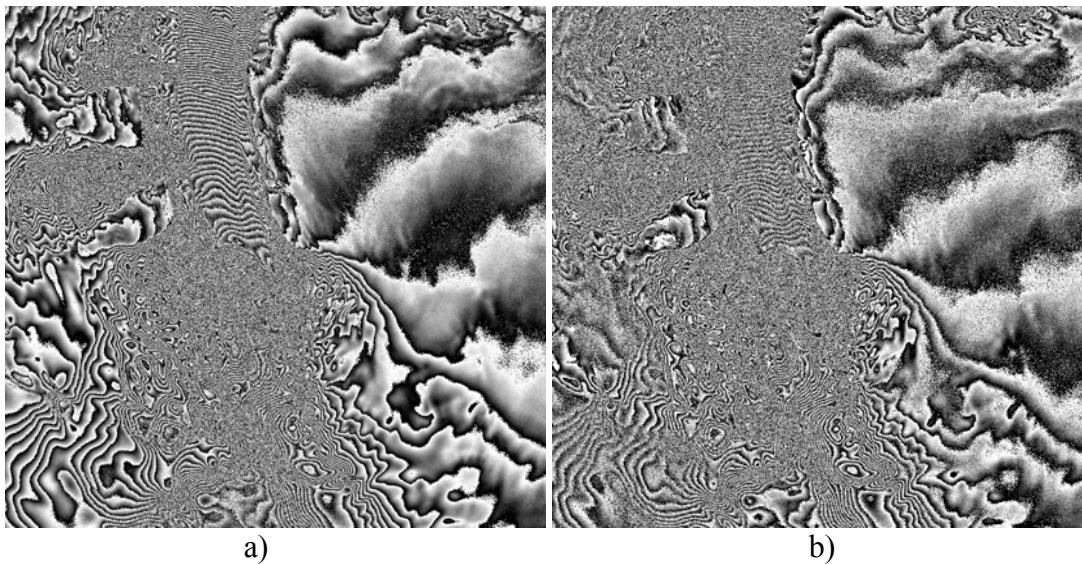


Figure VII.12  
Interférogrammes Tandem du glacier Shirase

a) Paire du 9 & 10 avril 1996

b) Paire du 14 & 15 mai 1996

Nous avons coregistré les six images à notre disposition par rapport à celle du 14 mai, en nous basant sur les éléments fixes de la scène. L'interférogramme de mai est trop bruité pour donner une information utile sur la partie commune aux six images. Par contre, il est possible de générer un interférogramme différentiel à quatre images entre avril et juin. La figure VII.13 représente la localisation de la partie commune aux différentes scènes utilisées, sur laquelle un interférogramme différentiel à quatre images a pu être généré. Etant donné que l'interférogramme de juin ne montre que les déplacements locaux, l'interférogramme différentiel, lui, ne devrait révéler que la topographie, à condition de considérer que les mouvements du glacier sont identiques entre chaque acquisition Tandem. Cependant, comme la coregistration des six images est basée sur les parties fixes, la différentiation n'est correcte que sur ces parties ou sur les zones à déplacements faibles (figure VII.14). Sur les zones subissant des déplacements importants, les deux interférogrammes ne sont pas localement coregistrés, et la différence qui en résulte est erronée. Entre avril et juin, on observe sur la langue du glacier, des déplacements pouvant atteindre 70 pixels en azimut. Dans cette zone, l'interférogramme différentiel n'a donc aucune signification, puisque nous avons localement soustrait des taux de franges inadéquats.

Pour compenser partiellement ce problème, on peut coregistrer les images en se basant sur les parties en déplacement rapide. On obtient alors un interférogramme différentiel correct uniquement sur les parties ainsi coregistrées. L'interférogramme différentiel est cette fois complètement faux sur les zones fixes ou les zones à mouvements lents (figure VII.14). Cet interférogramme, limité à la langue du glacier, est impossible à interpréter sans une connaissance approfondie du site car il peut soit montrer des franges relatives à la topographie de la langue de glace, soit refléter les variations dans l'écoulement entre avril et juin 1996.

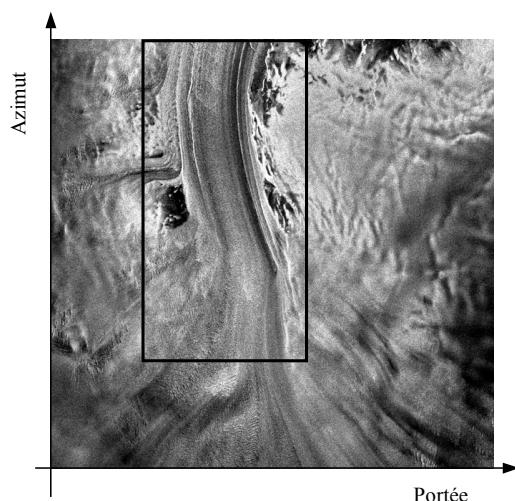


Figure VII.13  
*Partie commune aux six images SAR du glacier Shirase*

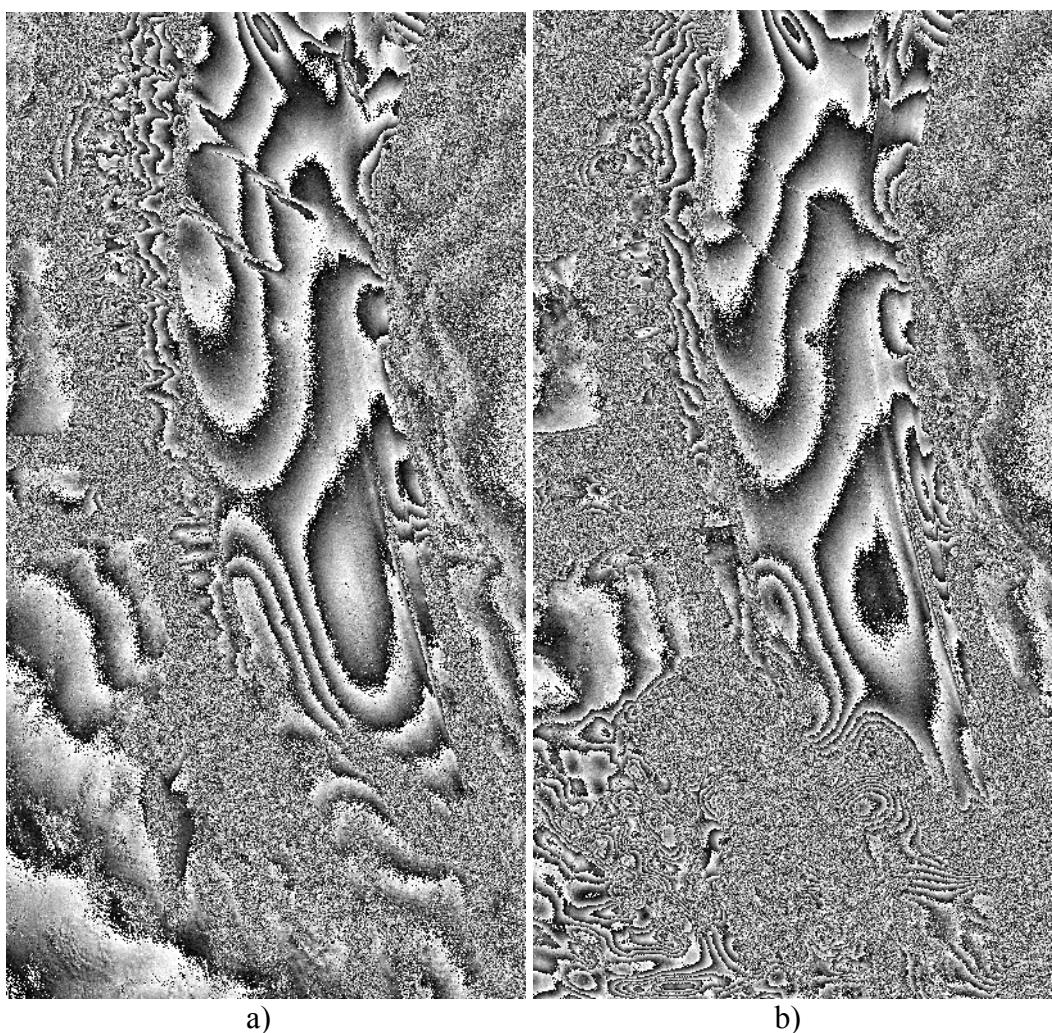


Figure VII.14  
*Interférogrammes différentiels de la langue du glacier Shirase*  
a) *Après coregistration sur base des parties fixes de la scène*  
b) *Après coregistration sur base de la langue du glacier*

### VII.3 PRECISION DE LA COREGISTRATION

Lors de la coregistration de deux images, on se limite à une transformation bilinéaire de coordonnées. Cette limitation est imposée par l'interpolateur complexe basé sur la transformée en Z (§III.1.1.3). Nous avons utilisé le principe de suivi de cohérence pour évaluer la qualité de la coregistration des images radar ainsi que la validité de l'approximation bilinéaire utilisée pour l'interpolation.

La dépendance de la portée dans l'image esclave en fonction de la portée dans l'image maîtresse peut, en première approximation, être exprimée par une relation linéaire. Partant de l'équation II.5 et de la figure II.2, la portée dans l'image esclave  $z_2$  peut s'exprimer de la manière suivante :

$$\begin{aligned} z_2^2 - z_1^2 &= B^2 - 2z_1B \cos \gamma \\ z_2^2 - z_1^2 &= (z_2 - z_1)(z_2 + z_1) \approx 2z_1(z_2 - z_1) \\ \Rightarrow z_2 &\approx z_1 - B \cos \gamma \end{aligned} \quad (\text{VII.2})$$

Les approximations faites ci-dessus sont tout à fait valides étant donné que dans le cas du SAR spatioporté, la base interférométrique est de l'ordre de quelques centaines de mètres alors que la portée est de quelques centaines de kilomètres. L'erreur relative induite est donc de l'ordre du %.

Comme  $\gamma$  ne varie que de  $6^\circ$  pour une scène de 100km et ce, régulièrement avec la portée, on peut considérer, en première approximation, que la linéarité est acquise.

De manière à évaluer quantitativement l'erreur de registration induite en se limitant à une approximation linéaire lors de la coregistration de deux images, nous avons réalisé la simulation numérique suivante : nous avons pris pour référence, la géométrie d'acquisition d'une paire Tandem acquise les 17 et 18 avril 1996 au-dessus de la frontière franco-belge. Nous avons calculé, en un certain nombre de points, les valeurs de la portée  $z_2$  dans l'image esclave en fonction de la portée  $z_1$  dans l'image maîtresse en utilisant la relation exacte. Nous avons ensuite calculé par moindres-carrés la meilleur droite passant par les couples de points  $(z_2 ; z_1)$ . La différence entre courbe théorique et approximation linéaire nous donne l'erreur de registration induite par l'approximation linéaire.

Pour vérifier cette courbe théorique, nous avons, après une première coregistration de la paire Tandem, mesuré les valeurs de déregistration en portée par suivi de cohérence. Pour obtenir une mesure fiable, nous avons moyenné toutes les lignes en portée de cette carte de déregistration. Ceci nous permet d'obtenir une courbe de la déregistration moyenne en fonction de la portée.

La courbe théorique ainsi que la courbe expérimentale sont représentées à la figure VII.15.

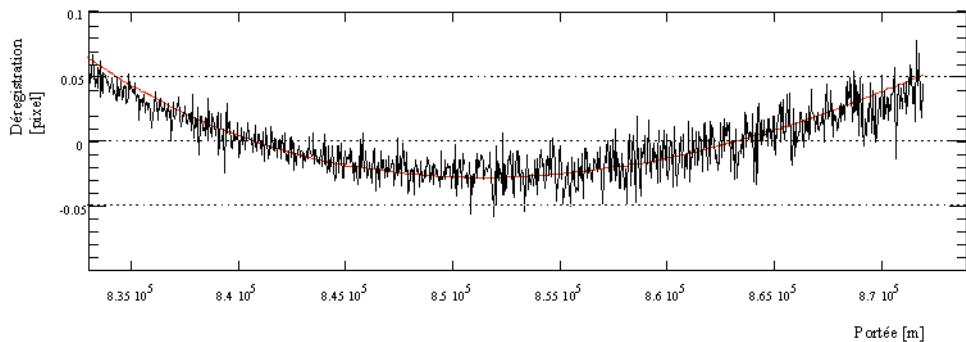


Figure VII.15

*Déregistration inhérente à une interpolation linéaire de l'image esclave  
Superposition de la courbe théorique et de la courbe expérimentale*

La similitude entre ces deux courbes est flagrante. Nous en déduisons que notre processus de coregistration nous a bien permis de trouver la meilleure transformation bilinéaire de coordonnées (au sens des moindres-carrés).

L'approximation linéaire utilisée pour interpoler l'image esclave est tout à fait valide et n'induit des erreurs de registration d'un maximum de +/- 0,05 pixel. Il faut néanmoins remarquer que pour des images de dimension supérieure à 100km en portée, l'erreur induite deviendrait très vite plus importante, induisant une perte de cohérence non négligeable.

En observant l'image de cohérence de la paire Tandem utilisée (figure VII.16), on constate que la cohérence est généralement plus faible pour les portées élevées, où se situent de nombreuses zones boisées. Cette situation se reflète sur la courbe de déregistration (figure VII.15), où l'on observe que la dispersion des valeurs expérimentales autour de la courbe théorique augmente avec la portée. On peut en conclure que le critère de coregistration par maximisation de cohérence est très fiable pour autant que la cohérence soit suffisamment élevée.

Pour avoir une idée quantitative de la précision de coregistration en fonction de la cohérence, nous avons calculé l'histogramme de la déregistration pour cinq intervalles de cohérence différents : [0,4 ; 0,5[, [0,5 ; 0,6[, [0,6 ; 0,7[, [0,7 ; 0,8[ et [0,8 ; 0,9[. Ces différents histogrammes sont représentés à la figure VII.17. Tous montrent un pic centré sur zéro dont la largeur décroît avec la classe de cohérence. On observe qu'au-delà d'une cohérence supérieure à 0,7, la largeur du pic à mi-hauteur est inférieure à +/- 0,1 pixel. La transformation bilinéaire de coordonnées que nous utilisons pour interpoler l'image esclave est calculée par moindres-carrés sur un très grand nombre de points. La figure VII.15 nous montre qu'à l'issue du processus de coregistration, nous obtenons bien une transformation bilinéaire de coordonnées très proche de la transformation bilinéaire théorique. Dès lors, nous pouvons affirmer que la précision de la coregistration est meilleure que 0,1 pixel et approche la limite théorique de 0,05 pixel permise par l'approximation linéaire.

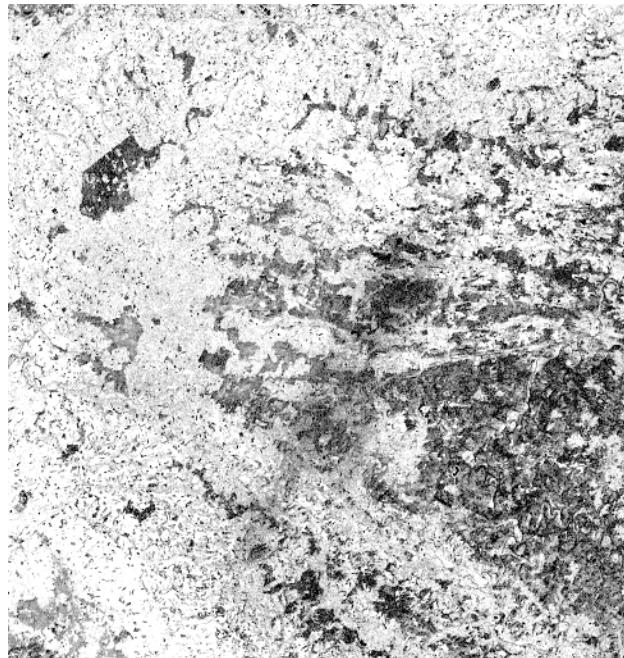


Figure VII.16  
Cohérence de la paire Tandem du 17 & 18 avril 1996

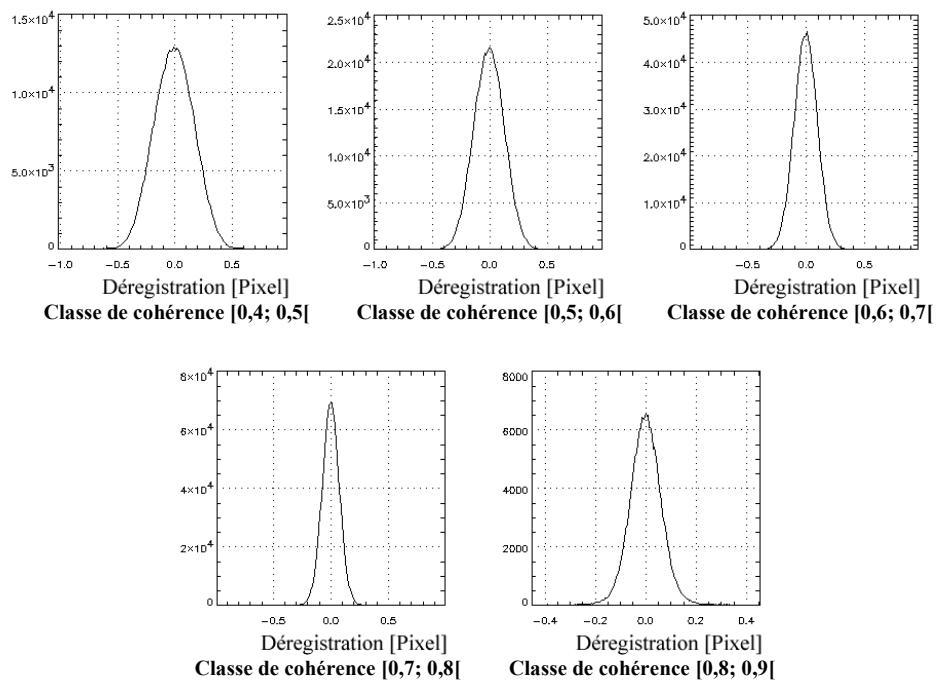


Figure VII.17  
Histogrammes des déregistrations en fonction de la classe de cohérence

## VII.4 CONCLUSIONS

Dans le domaine de la glaciologie, la télédétection en général et la phasimétrie SAR en particulier offrent bien souvent une opportunité d'investigation unique. L'interférométrie différentielle est d'un apport considérable dans ce domaine. Elle permet, en utilisant des paires Tandem, la mesure des vitesses de déplacement de

## *Chapitre VII*

glaciers avec une précision de l'ordre du cm/jour. Cependant, l'interférométrie différentielle ne donne accès qu'à la composante de vitesse selon la portée. Pour palier à cette limitation, nous avons développé une méthode de mesure des déplacements par suivi de cohérence. Cette méthode, quoique moins précise, donne des résultats en excellent accord avec la réalité terrain. Elle permet la mesure simultanée des déplacements azimutaux et des déplacements suivant la portée. De plus, comme il s'agit d'une mesure ponctuelle, elle peut être utilisée en complément de l'interférométrie différentielle pour compenser les décalages issus du déroulage de phase entre zones déroulées indépendamment.

La mise au point de cette méthode de mesure nous a permis d'évaluer la qualité de la coregistration de deux images SAR par maximisation locale de la cohérence. Il en résulte que, à l'issue de l'interpolation, images maîtresse et esclave sont coregistrées avec une précision inférieure au dixième de pixel.

## **VIII CONCLUSIONS**

La phasimétrie SAR regroupe toutes les techniques faisant appel au contenu en information de la phase des images obtenues par les radars à synthèse d'ouverture. Trois domaines de la phasimétrie ont été développés et explorés. Il s'agit de l'interférométrie, l'interférométrie différentielle et les mesures de cohérence.

Dans un premier temps, pour chacun de ces domaines, les algorithmes et logiciels nécessaires ont été développés. L'interféromètre ainsi produit a été testé et validé en utilisant les sites et données de références choisies par le groupe FRINGE de l'ESA.

Comparativement aux interféromètres présentés dans la littérature, celui développé durant ce travail possède ses spécificités propres. Nous avons notamment développé un interpolateur complexe particulièrement bien adapté à l'interférométrie SAR. Quoique limité aux transformations bilinéaires de coordonnées, cet interpolateur est très souple et possède un champ d'application non limité à la seule phasimétrie SAR. De plus, pour augmenter la fiabilité du déroulage de phase, la méthode classique, dite des résidus, a été adaptée de manière à tenir compte de la cohérence locale dans les interférogrammes SAR.

La souplesse de l'interpolateur permet de coregistrer aisément plusieurs paires d'images. Ceci a permis entre autres, de mettre au point l'interférométrie différentielle à quatre images et la combinaison de bases interférométriques.

La mission ERS Tandem offre, pour la majeure partie du globe, un très grand nombre de paires pouvant servir de références topographiques. L'interférométrie différentielle à quatre images permet d'utiliser ces références quelle que soit la paire interférométrique contenant une phase différentielle à mesurer.

De son côté, la combinaison de bases interférométriques offre la possibilité d'augmenter la précision de la topographie interférométrique ou d'obtenir une ambiguïté d'altitude équivalente mieux adaptée. De plus, lorsque des artefacts atmosphériques sont inévitables, cette technique permet de diminuer, par moyennage, l'influence de ceux-ci.

Dans un second temps, nous avons mené ou participé à diverses études qui nous ont permis de qualifier la phasimétrie SAR, ou d'étudier l'apport d'information qu'elle offrait, dans différentes disciplines. Les aspects faisabilité et qualité ont été explorés de manière à pouvoir transférer la phasimétrie SAR du domaine de la recherche vers le monde industriel et la distribution de services aux utilisateurs potentiels.

Nous nous sommes attachés à déterminer et quantifier les sources d'erreurs et à analyser les données annexes indispensables pour palier ou éviter celles-ci.

Dans certains cas, certaines routines du logiciel constituant notre interféromètre ont été modifiées, ou des modules spécifiques ont été développés, pour optimiser l'apport d'information offert par la phasimétrie dans la discipline concernée.

En premier lieu, nous avons réalisé une étude approfondie de la cartographie topographique interférométrique. La génération de modèles numériques de terrain par interférométrie SAR est l'application de la phasimétrie qui est la plus mature. Cependant, cette technique n'a pas encore acquis un statut opérationnel. Il est très difficile d'évaluer a priori la faisabilité d'un traitement interférométrique ou d'en garantir la qualité. De plus, il n'existe pas d'analyse de qualité standardisée des produits interférométriques. C'est pour combler partiellement ces lacunes que nous avons mené à bien un projet, basé sur l'analyse a priori de la faisabilité d'un traitement interférométrique et l'évaluation a posteriori de la qualité du modèle

numérique de terrain généré. De cette étude, il ressort essentiellement que l'interférométrie est un outil remarquable, permettant d'obtenir des modèles numériques de terrain de haute précision, dont la qualité peut être évaluée au niveau local sur base de l'image de cohérence et de l'estimation théorique de l'écart-type sur les altitudes mesurées. Cependant, pour être fiable, cette technique doit absolument faire appel à des données annexes, essentiellement météorologiques. En effet, les variations de conditions atmosphériques peuvent constituer d'importantes sources d'erreurs. Ces données annexes sont nécessaires à une sélection *a priori* des meilleures scènes à traiter pour l'obtention d'un MNT de qualité. De plus, ces données sont également nécessaires à l'élaboration d'un rapport de qualité complet du MNT produit. L'interférométrie différentielle a été développée et validée dans le cadre d'études sismiques menées en collaboration avec le Laboratoire de Géomorphologie et Télédétection (LGT) de l'Université de Liège. Il a été démontré que cette technique permettait de réaliser des mesures de déplacements locaux sur de très longues périodes. La condition première à la réalisation de telles mesures est bien évidemment la préservation de la cohérence sur des intervalles suffisamment longs. Cette condition s'avère remplie dans les zones arides. Nous avons, en particulier, pu mesurer des mouvements de la péninsule du Lisan, sur les abords de la Mer Morte, sur un intervalle de temps de près de deux ans. Ces mouvements semblent consécutifs au pompage excessif d'eau dans la Mer Morte. Ce type de technique s'avère donc précieux dans le cadre d'une politique de développement durable.

Cependant, comme dans le cas de la topographie interférométrique, il est indispensable de disposer de données annexes pour pouvoir qualifier les résultats de mesure.

La mesure de cohérence constitue le troisième pan de la phasimétrie SAR que nous avons abordé. La perte de cohérence entre deux signaux radar est liée à des facteurs géométriques aussi qu'aux changements que subit la scène observée. Dès lors, cette perte d'information au niveau de la phase interférométrique est, en soi, une information relative à la scène. L'utilisation de cette mesure comme un outil à part entière n'en est qu'à ses débuts. Nous avons collaboré avec les Facultés Universitaires des Sciences Agronomiques de Gembloux (FUSAGx) et l'Université Catholique de Louvain (UCL) pour analyser l'apport de l'information de cohérence et de l'imagerie SAR en général dans le domaine de l'agriculture. Cette étude, quoique partielle, montre que la cohérence contient effectivement des informations utiles au monde agricole. La cohérence, ou plutôt la perte de cohérence sur les sites agricoles et forestiers, semble suivre le cycle saisonnier. Notamment, il semble que la cohérence Tandem moyenne mesurée sur une parcelle soit liée à l'état phénologique de la culture en question et permette l'évaluation de la hauteur des plants.

Lors de cette étude, nous avons pu remarquer que les zones urbaines conservent très bien la cohérence à long terme. La présence de tels diffuseurs que l'on peut considérer comme permanents peut être utilisée avantageusement pour réaliser des mesures par interférométrie différentielle sur de longues périodes dans des régions comme la Belgique, où les changements rapides de la végétation sont défavorables à cette technique.

Dans le domaine de la glaciologie, la télédétection en général et la phasimétrie SAR en particulier offrent bien souvent une opportunité d'investigation unique. L'interférométrie différentielle et la mesure de cohérence ont toutes deux été utilisées avec succès dans ce domaine pour mesurer les déplacements rapides d'un glacier en Antarctique. Nous avons utilisé l'estimation de la cohérence pour affiner la coregistration au niveau local et nous servir de cette mesure de coregistration pour

## *Conclusions*

évaluer les déplacements du glacier en question. Cette méthode de suivi de cohérence, quoique moins précise que l'interférométrie différentielle, est parfaitement adaptée à ce type d'étude et donne des résultats en excellent accord avec la réalité terrain. Elle permet la mesure simultanée des déplacements azimutaux et des déplacements suivant la portée.

En conclusion, la phasimétrie SAR s'avère être une technique ayant un champ d'application très large, qui n'a certainement pas été investigué complètement. Elle acquiert la place qui est la sienne : une technique puissante ayant ses avantages et ses inconvénients, venant en complément d'autres méthodes et nécessitant l'apport d'autres sources d'information pour être opérationnelle et fiable.

Certaines applications, telle la topographie interférométrique, ont acquis une maturité suffisante pour passer dans le domaine industriel et fournir un service aux utilisateurs.



## **BIBLIOGRAPHIE**

- Born & Wolf 1980  
*Principles of optics*  
M. Born and E. Wolf  
Pergamon press, 6<sup>th</sup> edition, pp 501-505, 1980
- Cornet & al. 1997  
*Use of ERS Tandem data to produce digital elevation models by interferometry and study land movements by differential interferometry in Calabria and Jordan*  
Y. Cornet, J. Y. Doulliez, J. Moxhet, D. Closson, A. Kourgli, P. Ozer, A. Ozer and D. Derauw  
Proc. Third ERS Symposium, ESA SP-414, pp 493-498, 1997
- Dammert 1996  
*Accuracy of InSAR measurements in forested areas*  
P. Dammert  
Proc. FRINGE 1996, ESA SP-406, pp 37-49
- Derauw 1995 (a)  
*Developments of an InSAR Processor*  
D. Derauw  
Proc SPIE, **2584**, pp 376-383, 1995
- Derauw 1995 (b)  
*Phase unwrapping using coherence measurements*  
D. Derauw  
Proc SPIE, **2584**, pp 319-324, 1995
- Derauw & Roose 1995  
*Coregistration and complex interpolation*  
D. Derauw and S. Roose  
Proc. SPIE, **2584**, pp 319-324, 1995
- Derauw & Moxhet 1996  
*Multiple image SAR interferometry*  
D. Derauw and J. Moxhet  
Proc. FRINGE 96, ESA SP-406, pp 167-178, 1996
- Derauw & Barbier 1998  
*Quality assessment of InSAR topographic mapping: The exemple of Belgium*  
D. Derauw and Ch. Barbier  
Proc. SPIE, **3497**, (à paraître)
- Gabriel & Goldstein 1988  
*Crossed orbit interferometry: Theory and experimental results from SIR-B*  
A.K. Gabriel and R. M. Goldstein  
Int. J. Remote Sensing, **9**, pp 857-872, 1988
- Gabriel & al. 1989  
*Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry*  
A. K. Gabriel, R. M. Goldstein and H. A. Zebker  
J. Geophys. Res., **94**, pp 9183-9191, 1989
- Ghiglia & Romero 1994  
*Robust two-dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods*  
D. Ghiglia and L. Romero  
J. of Opt. Soc. of Am., **11**, pp 107-117, 1994
- Goldstein & Zebker 1987  
*Interferometric radar measurements of ocean surface currents*  
R. M. Goldstein and H. A. Zebker  
Nature, **328**, pp 707-709, 1987

- Goldstein & al. 1988                    *Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping*  
     R. M. Goldstein, H. A. Zebker and Ch. L. Werner  
     Radio Science, **23**, pp 713- 720, 1988
- Goldstein & al. 1989                    *Remote sensing of ocean currents*  
     R. M. Goldstein, T. P. Barnett and H. A. Zebker  
     Science, **246**, pp 1282-1285, 1989
- Goldstein & al. 1993                    *Satellite radar interferometry for monitoring ice sheet motion: Application to an Antarctic ice stream*  
     R. M. Goldstein, H. Englhardt, B. Kamb and R. M. Frolich  
     Science, **262**, pp 1525-1530, 1993
- Graham 1974                              *Synthetic interferometer radar for topographic mapping*  
     L. C. Graham  
     Proc. IEEE, **62**, pp 763-768, 1974
- Hanssen & Usai 1997                    *Interferometric phase analysis for monitoring slow deformation processes*  
     R. Hansen and S. Usai  
     Proc. Third ERS Symposium, ESA SP-414, pp 487-491, 1997
- Just & Bamler 1994                    *Phase statistics of interferograms with application to synthetic aperture radar*  
     D. Just and R. Bamler  
     Applied Optics, **33**, pp 4361-4368, 1994
- Li & Goldstein 1990                    Studies of multibaseline spaceborne interferometric synthetic aperture radar  
     F.K. Li and R.M. Goldstein  
     IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sens., **28**, pp 88-97, 1990
- Massonnet & Rabaute 1993            *Radar interferometry, limits and potential*  
     D. Massonnet and Th. Rabaute  
     IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sens., **31**, pp 455-464, 1993
- Massonnet & al. 1993                    *The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry*  
     D. Massonnet, M. Rossi, C. Carmona, F. Adragna, G. Peltzer, K. Feigl and T. Rabaute  
     Nature, **364**, pp 138-142, 1993
- Massonnet 1994                         *Validation of ERS-1 interferometry at CNES*  
     D. Massonnet  
     Proc. Second ERS-1 symposium, ESA SP-361, pp 703-709, 1994
- Massonnet & Feigl 1995 (a)          *Satellite radar interferometric map of coseismic deformation of the M=6.1 Eureka valley, California earthquake of May 17, 1993*  
     D. Massonnet and K. L. Feigl  
     Geophys. Res. Letters, **22**, pp 1541-1544, 1995
- Massonnet & Feigl 1995 (b)          *Discrimination of geological phenomena in satellite radar interferograms*  
     D. Massonnet and K. L. Feigl  
     Geophys. Res. Letters, **22**, pp 1537-1540, 1995

- Massonnet & al. 1995                    *Deflation of mount Etna monitored by spaceborne radar interferometry*  
     D. Massonnet, P. Briole and A. Arnaud  
     Nature, **375**, pp 567-570, 1995
- Massonnet & al. 1996                    Detection of postseismic fault zone collapse following the Landers earthquake  
     D. Massonnet, W. Thacher and H. Vadon  
     Nature, **382**, pp 612-616, 1996
- Moeremans & al. 1997                    *Use of ERS SAR interferometric coherence and PRI images to evaluate crop height and soil moisture and to identify crops*  
     B. Moeremans, S. Dautrebande and D. Derauw  
     Proc. SPIE, **3499**, (à paraître)
- Piette & Derauw 1997                    *Validation de l'interférométrie SAR appliquée aux images JERS-1 et RADARSAT*  
     F. Piette et D. Derauw  
     Etude de faisabilité réalisée dans le cadre du programme national belge Telsat IV, Contrat d'étude T4/DD/014, Rapport final.  
     Réf. CSL: RP-CSL-TEL-97002
- Prati & Rocca 1990                    *Limits to the resolution of elevation maps from stereo SAR images*  
     C. Prati and F. Rocca  
     Int. J. Remote Sensing, **11**, pp 2215-2235
- Prati & al. 1990                        *Seismic migration for SAR focusing: Interferometric application*  
     C. Prati, F. Rocca, A. Monti Guarnieri and E. Damonti  
     IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sens., **8**, pp 627-640, 1990
- Rabiner & Gold 1973                    *Theory and applications of digital signal processing*  
     L. R. Rabiner and B. Gold  
     Prentice Hall, New Jersey, pp 393-399, 1973
- Rodriguez & Martin 1992              *Theory and design of interferometric synthetic aperture radar*  
     E. Rodriguez and J. M. Martin  
     IEE Proc. F, **139**, pp 147-159, 1992
- Rogers & Ingalls 1969                  *Venus: Mapping the surface reflectivity by radar interferometry*  
     A. E. Rogers and R. P. Ingalls  
     Science, **165**, pp 797-799, 1969
- Roose & al. 1993                        *An efficient interpolation algorithm for Fourier diffractive optics*  
     S. Roose, B. Brichau and E. W. Stijns  
     Opt. Comm., **97**, pp 312-318, 1993
- Rosich Tell & Laur 1996                *Phase preservation in SAR processing: The interferometric offset test*  
     B. Rosich Tell and H. Laur  
     Proc. IGARSS'96, Lincoln, pp 477-480, 1996
- Rudant & al. 1997                        *Laboratory experiment for the interpretation of phase shift in SAR interferograms*  
     J. P. Rudant, A. Bedidi, R. Calonne, D. Massonnet, G. Nesti and D. Tardi  
     Proc.FRINGE 1996, ESA SP-406, pp 83-95, 1997

- |                          |  |
|--------------------------|--|
| Rumsey & al. 1974        | <i>A radar brightness and altitude image of a portion of Venus</i><br>H. C. Rumsey, G. A. Morris, R. R. Green and R. M. Goldstein<br><i>Icarus</i> , <b>23</b> , pp 1-7, 1974  |
| Seymour & Cumming 1994   | <i>Maximum likelihood estimation for SAR interferometry</i><br>M. S. Seymour and I. G. Cumming<br>Proc. of IGARSS'94, <b>3</b> , pp 1467-1469, 1994  |
| Tarayre 1996             | <i>Extraction de modèles numériques de terrain par interférométrie radar satellitaire; algorithmie et artefacts atmosphériques</i><br>H. Tarayre - Oriot<br>Thèse de doctorat<br>Institut National Polytechnique de Toulouse, 1996 |
| Tarayre & Massonnet 1996 | <i>Atmospheric artefacts on interferograms</i><br>H. Tarayre-Oriot and D. Massonnet<br>Proc. FRINGE 1996, ESA SP-406, pp 125-128, 1996   |
| Wegmüller 1997           | <i>Soil moisture monitoring with ERS SAR interferometry</i><br>U. Wegmüller<br>Proc. Third ERS Symposium, ESA SP-414, pp 47-52, 1997   |
| Wu & al. 1996            | <i>The effect of different land covers on the accuracy of interferometric DEM</i><br>X. Wu, K. H. Thiel and A. Wehr<br>Proc. FRINGE 1996, ESA SP-406, pp 33-41, 1996   |
| Zebker & Goldstein 1986  | <i>Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar observations</i><br>H. A. Zebker and R. M. Goldstein<br>J. Geophys. Res., <b>91</b> , pp 4993-4999, 1986  |
| Zebker & Villasenor 1992 | <i>Decorrelation in interferometric radar echoes</i><br>H. A. Zebker and J. Villasenor<br>IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sens., <b>30</b> , pp 950-959, 1992   |
| Zebker & al. 1994 (a)    | <i>On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry: The Landers earthquake</i><br>J. of Geophys. Res., <b>99</b> , pp 19617-19634, 1994   |
| Zebker & al. 1994 (b)    | <i>Accuracy of topographic maps derived from ERS-1 interferometric radar</i><br>H. A. Zebker, Ch. L. Werner, P. A. Rosen and S. Hensley<br>IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sens., <b>32</b> , pp 823-835, 1994                |
| Zebker & Rosen 1997      | <i>Atmospheric artefacts in interferometric SAR surface deformation and topographic maps</i><br>H. A. Zebker and P. A. Rosen<br>J. of Geophys. Res., <b>102</b> , pp 7547-7563, 1997   |
| Zisk 1971                | <i>A new earth-based radar technique for the measurement of Lunar topography</i><br>S. H. Zisk<br>Moon, <b>4</b> , pp 296-306, 1972  |





*Le raisonner tristement s'accrédite.  
On court, hélas!, après la vérité.  
Ah! Croyez-moi, l'erreur à son mérite.*  
*Voltaire*