

# Génération d'un Modèle Numérique de Terrain Radar : Application à la région d'Oran, Algérie

HASNI Kamel, TOUAM Saïd , HASSAINE Benali  
Division de Géodésie, Centre des Techniques Spatiales,  
1, Avenue de la Palestine, B.P.13 Arzew 31 200, Algérie.  
Email: hasni\_kamel@maktoob.com

**ملخص :** نقدم في هذا العمل المرحلة الكاملة لمعالجة الصور لتوليد نماذج أرضية رقمية (MNT) ذات قياس التداخل الضوئي بإدراج البرنامج الذي أنجزته جامعة Delft (هولندا) ، قصد الحصول على نماذج أرضية رقمية ذات دقة التمييز العالية من خلال زوج من الصور الرادارية ERS1/2 . هكذا ، بمجرد الوصول إلى هذا الهدف ، تطرقنا لتحليل النتائج المحصل عليها خلال استعادة التضاريس في منطقة التجربة . نبين نتائجنا بأن النماذج الأرضية الرقمية المنجزة والتقنية InSAR تغطي الدقة الإجمالية لـ 20 م .

**الكلمات الأساسية :** ردار ، كاشوف (ردار) الفتحات الصناعية SAR ، نماذج أرضية رقمية MNT ، ردار قياس التداخل الضوئي ، طور .

**Resumé :** Dans ce travail, nous présentons un processus complet de traitement d'images pour la génération d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) interférométrique en incluant le logiciel développé par l'Université de Delft (Pays Bas), avec pour finalité l'obtention d'un MNT haute résolution à partir d'un couple d'images radar ERS1/2. Ainsi, une fois cet objectif atteint, nous avons été amenés à analyser les résultats obtenus lors de la restitution du relief d'un site test. Nos résultats montrent que le MNT réalisé avec la technique de l'InSAR donne une précision globale de 20 m.

**Mots-clés :** Radar, SAR, MNT, interférométrie radar, phase.

**Abstract :** In this work, we present a complete image processing for the generation of an interferometric Digital Terrain Model (D T M) including software developed by the University of Delft (Netherlands), with the aim of obtaining a high resolution D T M from a couple of ERS1/2 radar images.

Thus, once achieved, we have been conducted to analyze the results of the restitution of a relief in a test area. Our results showed that the D T M achieved with the InSAR technique gives an overall accuracy of 20 m.

**Key words :** Radar, SAR, D<sup>TM</sup>, radar interferometry, phase.

## 1. Introduction

La restitution du relief par stéréoscopie depuis l'espace est une discipline relativement ancienne avec notamment la photogrammétrie. Bien qu'accédant à de bons résultats, les difficultés de survols inhérentes aux conditions météorologiques la rendent toutefois limitée. Les capteurs optiques embarqués sur des satellites peuvent atteindre des précisions décimétriques mais demeurent dépendants des phénomènes atmosphériques. A ce titre, en s'affranchissant en partie de ces phénomènes, l'imagerie radar permet des exploitations intéressantes pour la réalisation de MNT.

## 2. PRINCIPE DE L'InSAR

L'interférométrie radar (InSAR : Interferometric Synthetic Aperture Radar) est une technique de télédétection utilisant deux images SAR acquises avec un décalage dans l'espace et (ou) dans le temps, appelé base, afin d'extraire l'information sur l'altitude (MNT) ou le mouvement de la surface terrestre (déformation).

L'InSAR appliquée au calcul de MNT a été décrite par Graham en 1974 et mise en application pour la première fois en 1986 sur des capteurs aéroportés [Bamler R., 1997]. Depuis, pour des raisons de stabilité orbitale, la technique satellitale du radar à ouverture de synthèse est la plus employée.

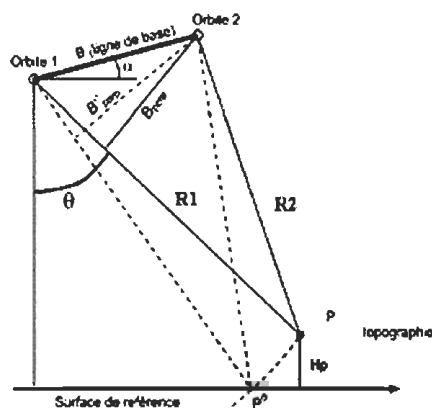


Fig. 1: principe géométrique de l'InSAR

A la différence des données optiques où on utilise la stéréoscopie, dans la technique de l'InSAR, la phase du signal est utilisée (équation 1). Nous calculons la différence de phase de deux images de la même zone, prises en deux passages (figure 1).

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = \frac{4\pi}{\lambda}(R_2 - R_1) \dots\dots\dots(1)$$

Avec :

$\lambda$  : Longueur d'onde.

R1, R2 : Distances obliques radar-cible.

Le terme  $\Delta\varphi$  est appelé « interférogramme ». Il est composé de trois termes :

Un terme de terre plate, qui est dû à l'existence d'une base. Il se traduit sur l'interférogramme en la présence de franges parallèles.

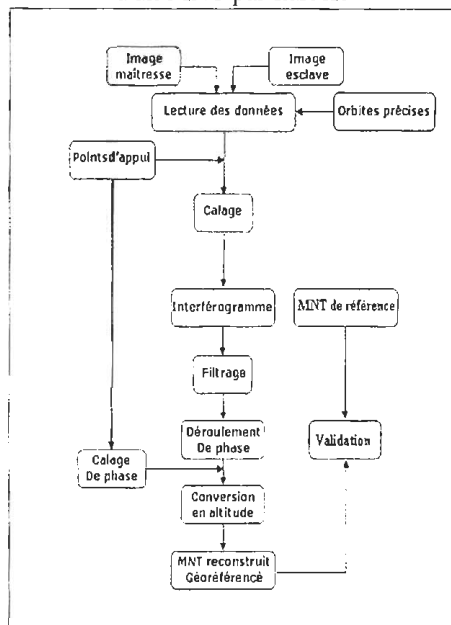
Un terme de topographie, correspondant à la différence de phase causée par l'altitude de la surface observée par rapport à une surface de référence (ellipsoïde, géoïde,...).

Un terme d'erreur.

### 3. Algorithme pour la réalisation d'un MNT Radar :

Pour la réalisation du MNT, nous avons utilisé le logiciel DORIS (Delft Object-oriented Radar Interferometric Software) [Kampes B. & Usai S., 1999], avec l'algorithme de la figure 2 suivante :

Fig. 2 Méthodologie générale de réalisation d'un MNT par InSAR



#### 3.1 Calage

Un pixel d'une image doit correspondre exactement à un pixel dans une autre image.

Recaler les deux images de la même scène permet image « maîtresse ». Par opposition, l'autre image est appelée image « esclave ».

### 3.2. Génération de l'interférogramme

La multiplication complexe est utilisée pour extraire l'information de phase, comme il est présenté dans l'équation 2.

$$I(i_1, i_2) = U_1(i_1, i_2) \cdot U_2^*(i_1, i_2) = |U_1| \cdot |U_2| \cdot e^{j(\varphi_1 - \varphi_2)} \dots\dots\dots(2)$$

Avec :

$U_k(i_1, i_2)$  Valeur l'interférogramme pour le pixel  $(i_1, i_2)$

$I(i_1, i_2)$  : Valeur complexe ( $k=2$ ) pixel  $(i_1, i_2)$  de la scène maîtresse ( $k=1$ ) ou esclave

### 3.3 Calcul de la cohérence :

La cohérence est une mesure de la fiabilité de la phase dans le voisinage d'un pixel. Elle est définie par l'équation 3 :

$$\rho = \frac{E\{U_1 U_2^*\}}{\sqrt{E\{U_1 U_1^*\} E\{U_2 U_2^*\}}} \dots\dots\dots(3)$$

Avec :

$U_1, U_2$  : Valeur moyenne dans la zone prédéfinie .

$\rho$  : Les signaux complexes.

Ou « \* » dénote le conjugué complexe. La valeur réelle de la cohérence est  $r=|\rho|$  et sa valeur déterminé la qualité de l' image dans cette région.

### 3.4 Calcul et soustraction du terme de la terre plate

Ce terme de phase causé par l'existence d'une base est calculé par rapport à une surface de référence (l'ellipsoïde WGS84) puis il est soustrait de l'interférogramme brut. Cet interférogramme ne contient maintenant que les franges topographiques, dont chaque frange représente une altitude dite «altitude d'ambiguïté», défini par Massonnet et Rabot (1993) [Massonnet D. & Feigl K., 1998] par l'équation 4 :

$$h_a = \frac{\lambda R_s \sin i_M}{2B_{\perp}} \dots\dots\dots(4)$$

Avec :

$R_s$  : Distance oblique de l'image esclave.

$i_M$  : Angle d'incidence de l'image maîtresse.

$B_{\perp}$  : Base perpendiculaire du couple.

### 3.5 Filtrage de la phase

Selon l'altitude d'ambiguïté employée, l'interférogramme peut contenir un bruit excessif, notamment dans les zones montagneuses, susceptibles de gêner son exploitation puisque les franges se retrouvent masquées.

Une étape de filtrage est nécessaire pour éliminer le bruit qui s'ajoute au signal exploitable. La difficulté du filtrage consiste à nettoyer le bruit sans dégrader l'information de phase. Ce bruit d'origine spatiale ou temporelle n'est pas toujours réversible. Seulement, une partie non négligeable du bruit affectant les interférogrammes peut être éliminée, ce qui conduit à une information de phase nettoyée laquelle garantit un déroulement de phase plus robuste et une information finale non bruitée.

### 3.6 Déroulement de phase

C'est une étape critique dans le processus interférométrique. Dans un interférogramme, la phase est seulement connue à modulo  $2\pi$ . Il est donc nécessaire de déterminer le multiple de  $2\pi$  à additionner à la phase mesurée sur chaque point pour obtenir une estimation de la phase réelle. Donc, la phase ambiguë dans l'intervalle  $[-\pi, \pi]$  être convertie en une valeur non ambiguë (continue) qui peut être n'importe quel nombre réel. Le déroulement de phase consiste donc à redistribuer à chaque pixel sa phase absolue. Deux contraintes grèvent cette procédure :

La surface doit être relativement régulière ; à ce titre, il est préférable qu'elle soit préalablement lissée.

La variation absolue entre deux pixels voisins doit être inférieure à  $\pi$ . Les discontinuités dues à l'occultation en zone de basculement ou d'ombre rendent alors la procédure particulièrement délicate.

### 3.7 Conversion des phases en altitudes

Cette étape permet de transformer la phase ainsi déroulée en hauteurs dans la géométrie radar ; l'utilisation de points d'appui permet de corriger les paramètres orbitaux de l'image maîtresse pour un calcul plus précis de la base, ce qui permet un bon géoréférencement du MNT résultant et pour déterminer les altitudes réelles.

### 3.8 Géoréférencement

Il s'agit de la transformation du système de l'interférogramme (ligne, pixel, phase) en un système de coordonnées géographiques  $(\lambda, \phi, h)$ .

## 4. Test resultats

Notre étude d'interférométrie porte sur une zone située au sud-est de la région d'Oran (Algérie), s'étalant sur 47 kmx47 km. Cette zone est relativement montagneuse avec un relief très marqué (figure 3). L'existence de zones plates au nord-ouest et au sud-ouest devrait induire des distorsions

géométriques sur les deux images, en particulier le phénomène d'ombre et de basculement.

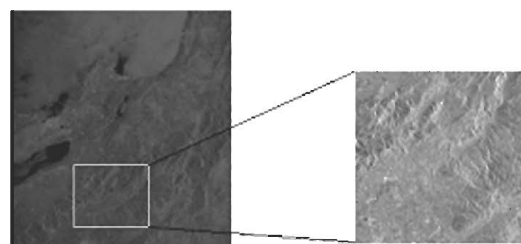


Fig. 3 Amplitude de l'image maîtresse (gauche) et zone de test (droite)

## 4.1 Donnée initiales

Nous disposons d'un couple interférométrique issu des observations du satellite ERS1 et de sa doublure ERS2 en orbite circulaire.

Tab. 1 Le couple ERS1-ERS2

Couple	Date	Angle d'incidence au centre	Orbite	Temps d'acquisition
Image 1	10/01/1996	23,164°	descendante	10:42:43
Image 2	09/01/1996	23,290°	descendante	10:42:33

Couple Date Angle d'incidence au centre Orbite Temps d'acquisition

Image 1 10/01/1996 23,164° descendante 10:42:43

Image 2 09/01/1996 23,290° descendante 10:42:33

Tab.1 : Le couple ERS1-ERS2

Ce couple d'images est acquis en mission tandem (décalage d'observation de 1 jours), ce qui permet de minimiser les problèmes de décorrélation temporelle. La longueur de base de 123.5 m induit une altitude d'ambiguïté de 83.5 m (équation 4). Cette valeur devrait conduire à une précision altimétrique correcte, tout en évitant la formation de bruit sur l'interférogramme.

## 4.2 Réalisation du MNT

L'application de l'algorithme précédent permettra d'extraire à partir du couple considéré un MNT de notre région.

### 4.2.1 Calage

Le calage a été sur la base des orbites précises délivrées par l'Université de Delft [Scharroo R. & Visser P., 1998]. Doris fournit une première approche, utilisant les orbites pour calculer la corrélation entre les deux images. Cette étape donne une idée grossière sur les paramètres de calage (un décalage de 196 lignes et de 194), elle permet de caler les images avec la précision de 30 pixels [Kampes B., 1999].

Puis une deuxième étape permet de calculer localement la corrélation entre les deux images d'amplitudes, cela permet d'arriver à une précision de calage de 1 pixel. Finalement, une étape plus précise permet de calculer le décalage entre un pixel dans une image et son homologue sur l'autre image. Ceci donne une précision de calage d'un 1/10ème ce qui permet de superposer l'image esclave sur l'image maîtresse. Le résultat de cette étape est un décalage de 194 en lignes et de 94 en colonnes. Finalement, l'image esclave est interpolée sur la même grille de l'image maîtresse pour qu'elles puissent être superposables.

Durant le calage, deux étapes de filtrage peuvent être introduites dans le traitement. Le premier est un filtrage en azimuth des deux images afin de supprimer les portions de spectre non chevauchées, puisque le traitement SAR des deux images a été effectué avec différent doppler centroïdes. Un deuxième filtrage est effectué en distance à cause du non chevauchement complet des deux scènes après le premier filtrage, qui est dû à une légère différence entre les angles de visée des deux capteurs se qui permet de réduire ce bruit.

#### 4.2.2 Produit interférométrique

Le produit interférométrique de DORIS est constitué de deux images : une image de phase ou interférogramme et une image de cohérence (figure 4). Pour la réalisation de l'interférogramme un facteur de multivue de 5 en azimuth et de 1 en distance a été utilisé afin de minimiser le bruit. La cohérence est automatiquement calculée après la création de l'interférogramme en utilisant l'équation 3, un facteur de multivue de (2,2) est utilisé pour réduire le bruit. La figure 4-b présente l'interférogramme nettoyé des franges orbitales (terme de terre plate). Ce terme de phase causé par l'existence d'une base, est calculé par rapport à une surface de référence (l'ellipsoïde WGS84) puis il est soustrait de l'interférogramme brut. L'interférogramme ne contient maintenant que les franges topographiques. Chaque frange représente une altitude de 83.5 m dans la ligne de visée du radar (altitude d'ambiguïté).

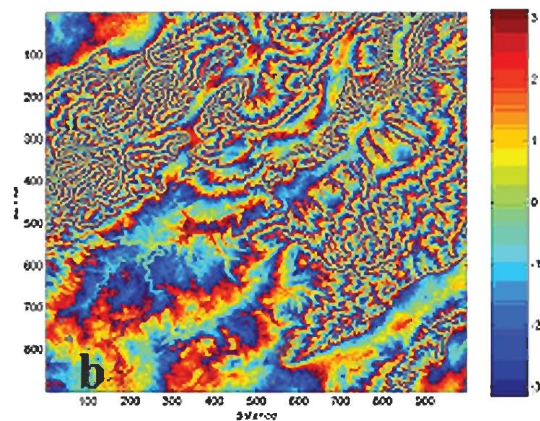
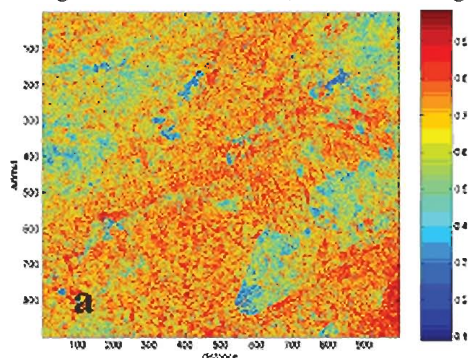


Fig. 4 a : Image de cohérence et b : Interférogramme

#### 4.2.3 Filtrage de phase

Le logiciel DORIS offre deux possibilité de filtrage : La première est une convolution spatiale et la deuxième est le filtrage de Goldstein décrit dans [Goldstein R. M. & Werner C. L., 1998]. Pour notre travail, nous avons choisi le filtre de Goldstein puisqu'il est plus commode pour les zones présentant une variation rapide de la phase [Tsay J. & Chen H., 2001].

Le filtre de Goldstein est basé sur le principe de diviser l'interférogramme en parties dont on calcul la transformée de fourrier de chacun deux [Goldstein R. M & Werner C. L., 1997] et les spectres sont transformés en nouveaux spectres suivant la formule:

$$Z' = |Z|^\alpha Z \dots\dots\dots(5)$$

Avec :

Z : L'ancien spectre.

Z' : Le nouveau spectre.

$\alpha$  : Paramètre du filtre.

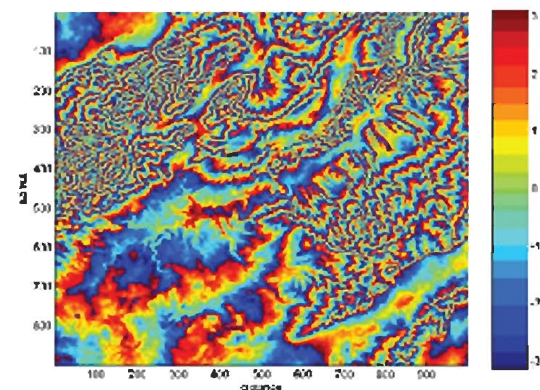


Fig.5 : Interférogramme filtré

#### 4.2.4 Déroulement de phase

L'étape de déroulement de phase a été réalisée avec le programme « SNAPHU » [Chen C. W. & Zebker H., 2001].

La figure 6 présente l'interférogramme déroulé de notre zone. Nous pouvons remarquer des trous dans l'image qui représentent des zones non déroulées, qui est dû au manque de cohérence dans ces zones. Ce sont principalement des zones montagneuses avec une végétation dense.

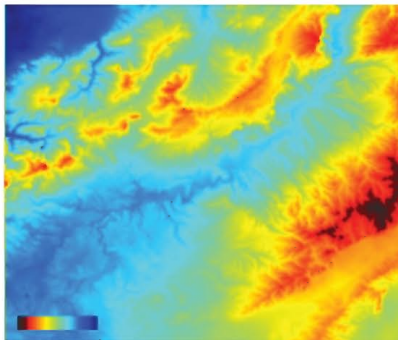


Fig. 6 : Interférogramme déroulé

#### 4.2.5 Conversion de la phase en altitude :

Comme étape finale, les altitudes peuvent être déterminées en utilisant plusieurs méthodes qui sont intégrés dans DORIS, qui permettent de convertir les phases en altitudes. Avant de réaliser cette étape, nous avons dû affiner la géométrie du couple pour une nouvelle estimation de la base interférométrique ; pour cela, des points de contrôle ont été utilisés. DORIS utilise un seul point de contrôle dont il calcule les coordonnées maître et esclave déroulée, mais cette information n'est utilisée dans aucune étape du processus, elle peut être introduite par l'utilisateur pour calculer la constante de phase à additionner à l'interférogramme déroulé, car quoique l'interférométrie radar soit une technique très précise, elle demeure néanmoins relative puisque le déroulement de phase s'effectue par rapport à un pixel de référence.

Nous avons utilisé des cartes de 1/50.000 pour choisir soigneusement 33 points qui ont une précision de 10 m. Les coordonnées des points ont été transformées de leur système d'origine, le système U<sup>TM</sup> Clarke 1880 au système WGS84. La figure 7 présente le MNT résultant du traitement.

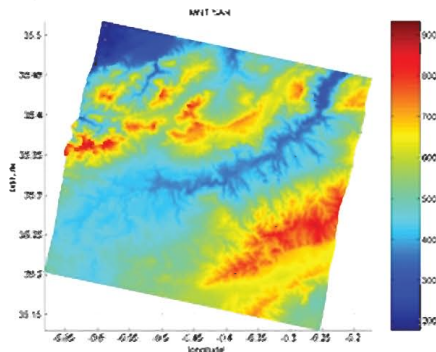


Fig. 7 : MNT résultant

#### 5. Validation :

Afin d'évaluer la qualité du MNT réalisé dans ce test, nous l'avons comparé au MNT global SR T M. La mission SR<sup>TM</sup> qui a été lancée le 11 Février 2000 et a duré 11 jours avait pour but de réaliser une base de donnée topographique numérique complète de la terre (Ramirez E., 2005). Les prévisions des précisions horizontales et verticales sont approximativement de 20 m et 16 m [Bridget S. & Sandwell D., 2003]. En absence de données meilleures, nous avons opté pour le MNT SR<sup>TM</sup> en supposant qu'il n'y avait pas de déformations significatives de la surface durant la période qui sépare l'acquisition de nos images et l'émission SR<sup>TM</sup> qui est de quatre ans. La comparaison des courbes de niveaux des deux MNT révèle un rapprochement entre eux, surtout dans les régions montagneuses. Mais, dans la zone plate, un décalage est visible au sud-ouest de la zone dans la figure 8.

La comparaison des deux MNT a révélé un nombre de points communs s'évaluant à 796672, couvrant la zone d'étude. Elle montre que la moyenne de la différence d'altitude entre les deux MNT SR T M et SAR notée  $dH = H_{SRM} - H_{SAR}$  est de 2.56 m. L'erreur moyenne quadratique (EMQ) de la différence est approximativement 20.15 m sur toute la zone (figure 9).

Entre les points communs des deux MNT, nous avons un pourcentage de 70.58 % correspondant à un écart altimétrique  $|dH| \leq 20$  m

qui sont principalement réparties dans les région montagneuses.

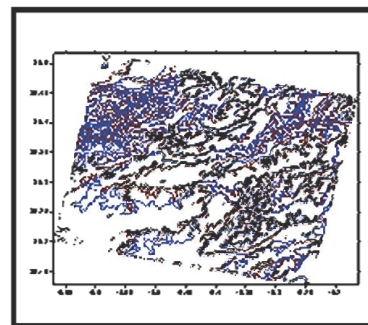


Fig. 8: Courbes de niveaux des deux MNT: SR<sup>TM</sup> (marron) et SAR (bleu)

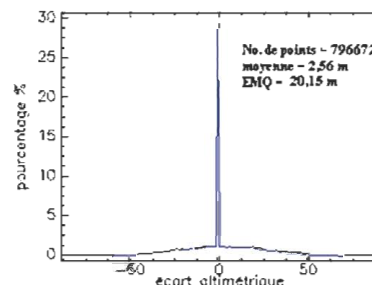


Fig. 9: Répartition des écarts altimétriques entre les MNT SR T M et SAR



## 6. Conclusion :

La génération d'un MNT précis avec la technique de l'interférométrie tandem d'ERS a été validée sur une grande surface où la topographie a des variations significatives par un traitement précis et accentué. Les résultats de notre travail, montrent que le MNT réalisé avec l'InSAR à une précision altimétrique de 20m approximativement dans les zone montagneuses, qui présente une cohérence moyenne.

## Références:

Bamler R.: Digital terrain models from radar interferometry. Photogrametric Week 1997.

2- Bridget S. & Sandwell D.: "Accuracy and resolution of shuttle radar topography mission data," Geophysical Research Letters, Vol. 30, No. 9, 1467, 2003.

3- Chen C. W. & Zebker H.: Two-dimensional phase unwrapping with use of statistical models for cost functions in nonlinear optimization. Journal of Optical Society of America. Vol.18, No.2, February 2001.

4- Goldstein R. M. and Werner C. L.: Radar ice motion interferometry. 3rd ERS ESA Symposium Proceedings. <http://www.ers-symposium.org/data> Goldstein. Florence, Italy. 1997.

5- Goldstein R. M. and Werner C. L.: Radar interferogram filtering for geophysical applications. Geophysical Research Letters 25(21), 4035-4038. November 1998.

6- Kampes B. & Usai S.: DORIS: the Delft Object-oriented Radar Interferometric Software. 2nd International Symposium on Operationalization of Remote Sensing. Enschede, The Netherlands. 16-20, August 1999.

7- Kampes B.: Delft Object-oriented Radar Interferometric Software, user's manual and technical documentation. TU Delft, 1999.

8- Massonnet D. & Feigl K., Novembre 1998. Radar Interferometry and its application to changes in the earth's surface, Reviews of Geophysics, Vol 36, p441-500.

9- Ramirez E.: Shuttle Radar Topography Mission. The Mission to Map the World JPL website URL: <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm> Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology, California.

10- Scharroo, R. and P. Visser (1998). Precise orbit determination and gravity field improvement for the ERS satellites. Journal of Geophysical Research 103(C4), 8113-8127.

11- Tsay J. & Chen H.: DEM generation in Taiwan by using InSAR an and ERS data. 22nd Asian. Conference on Remote Sensing, Singapore. 5-9 November 2001.