

APPORT DE L'INTERFÉROMÉTRIE RADAR SAR POUR LA RÉALISATION D'UN MNA (MODEL NUMÉRIQUE D'ALTITUDE) SUR LA RÉGION SUBCARPATIQUE DE BUZĂU (ROUMANIE)

K. HACHEMI¹

Les Modèles Numériques de Terrain (MNT) sont un élément important dans la représentation, l'analyse et l'interprétation du paysage. Dans la gestion des risques naturels en particulier, ils ont un rôle clé en apportant l'information 3D (tridimensionnelle), qui permet d'expliquer nombre de phénomènes et de prendre en compte des paramètres difficiles à interpréter dans une image à deux dimensions.

Pour répondre à la demande croissante de MNT, surtout pour des grandes étendues, de nombreux outils (aéroportés ou spatiaux) et des techniques (Photogrammétrie, Radargrammétrie, Lidar, GPS etc.), ont été élaborés. L'une de ces techniques est l'interférométrie radar SAR considérée comme la meilleure solution en termes de compromis entre couverture globale et précision [D. MASSONET et C. ELACHI, 2006]. Elle exploite l'information de différence de la phase de l'onde radar entre deux acquisitions de différentes positions. Elle a donné des résultats satisfaisants dans de nombreux sites comme la mission SRTM où a été réalisé un DEM (*Digital Elevation Model*) global pour 80 % de la surface de la Terre. Elle a cependant des limites et son succès dépend énormément des caractéristiques physiques de la surface des zones imagées en qualité de précision. Dans cet article, nous testons cette technique (InSAR) pour la réalisation d'un Modèle Numérique d'Altitude (MNA) dans une zone complexe de la région subcarpatique de Buzău (Roumanie) caractérisée par une humidité importante et une végétation prépondérante. Nous avons en particulier réalisé l'interférogramme topographique de la région à partir des images radars SAR du couple tandem des satellites ERS-1 et ERS-2. Nous avons effectué le déroulement et le géocodage dont le résultat correspond à un MNA de Buzău d'étendue de 100 km x 100 km avec une résolution de 20 m et de précision verticale globale qui ne dépasse pas les 17m.

Mots-clés : Radar, Interférométrie, InSAR, MNA, DEM, Interférogramme, Topographie, RSO, SAR, SRTM, ERS.

I. Introduction

C'est pour la réalisation d'un MNA (Model Numérique d'Altitude) que l'interférométrie radar RSO a été proposée pour la première fois par GRAHAM (1974) ; elle a été relancée en 1986 par ZEBKER et GOLDSETTEIN (1986).

¹ Université Paris – EST; GEONAT, hachemi_kamel@yahoo.fr

C'est à partir du lancement du satellite européen ERS-1 (1991) suivi du satellite ERS-2 (1995), et avec la disponibilité des couples tandems d'intervalle 24 heures que cette technique a connu un véritable essor. Elle s'est couronné en février (2000) par la mission SRTM qui a abouti à l'élaboration d'un DEM global pour presque 80 % de la surface de la Terre, avec une résolution de 30 m et une précision altimétrique globale moins de 16 m. Malgré son efficacité, on constate aujourd'hui que cette technologie n'est pas encore très répandue dans certains pays à cause de la complexité des traitements qui nécessite un savoir faire très particulier et complexe ainsi que les coûts des images radar et les outils à utiliser comme les logiciels spécialisés dans ce domaine.

L'interférométrie radar RSO exploite la différence de phase directement liée à la distance séparant le radar de la cible imagée. Elle a deux applications directes : la première est la réalisation d'un MNA et quand elle est utilisée en mode dit différentiel, elle peut aussi fournir des informations sur les changements du relief causés par des phénomènes géologiques comme les séismes, les glissements de terrain, la subsidence.

Les produits cartographiques et les images de télédétection nous aident à comprendre plusieurs phénomènes liés à l'espace géographique, cependant certaines décisions et conclusions ne peuvent être prises que si ces produits sont combinés avec un MNA. A titre d'exemple, les MNA ont une importance capitale dans la gestion des phénomènes hydrologiques (risques d'inondation) et géomorphologiques (détection des glissements de terrain etc.), mais aussi dans le génie civil et le domaine militaire.

Dans ce travail, nous allons tester cette technique d'interférométrie InSAR pour la réalisation du MNA de la région de Buzău (Roumanie), où la difficulté réside dans l'existence d'une humidité importante et d'une végétation forestière prépondérante.

II. La réalisation d'un MNA de la région de Buzău à partir de l'interférométrie radar InSAR

II.1. Méthode utilisée

C'est la méthode de l'interférométrie topographique qui a été utilisée ici pour l'obtention d'un Modèle Numérique d'Altitude (MNA). Elle se distingue de l'interférométrie différentielle par la conservation de la phase topographique. Pour la réalisation d'un MNA (*DEM*), il faut utiliser deux images radars complexes de la même scène prises à deux positions différentes ; c'est de l'effet stéréoscopique en images optiques [C. R. GUARINO, 1994]. Ces deux images radar SAR doivent être acquises lors de deux passages voisins du satellite ou

avec une plate forme à deux antennes différentes, équivalent à deux positions différentes. La base doit être inférieure à une valeur maximale dépendant de la fréquence du signal. Le choix du mode d'acquisition des données SAR dépend de l'objectif fixé par le traitement InSAR ; l'idéal pour la génération d'un MNA est le mode mono-passe. Par contre, si on cherche à quantifier les déplacements, on doit utiliser le mode multi-passe avec intervalle de prise de vue adapté à la recherche de changement voulu. Le mode mono-passe a plusieurs avantages : (1) élimination des effets atmosphériques, (2) les erreurs orbitales étant dues aux méconnaissances des positions des deux satellites pour le multi-passe, donc élimination de la décorrélation spatiale et (3) élimination des décorrélations temporelles dues aux déplacements et aux changements de paysage produits entre les deux passages en cas de multi-passes. Dans ce cas particulier, il y a que la végétation et les surfaces de l'eau qui ont un effet négatif sur la cohérence bien que la végétation n'ait pas beaucoup d'influence comme le cas du multi-passe. Les régions boisées en général ont tendance à perdre la cohérence, car les changements ont de courtes durées [J. I. H. ASKNE *et al.*, 1997]. Les mouvements de chaque branche ou chaque feuille dans le pixel (cellule de résolution) de la scène imagée peuvent perturber la phase. Malgré ces avantages de l'interférométrie d'un seul passage, il y a que l'interférométrie SAR aéroportée qui utilise cette technique. Le mode d'acquisition multipasse, est considéré généralement pour le suivi temporel des phénomènes naturels et la détection des déformations entre deux périodes, pour l'amplitude comme la phase. Il est utilisé par l'interférométrie différentielle et le choix des dates dépend des objectifs cherchés. Il est aussi utilisé dans la génération des MNA, par contre à cause de la décorrélation temporelle le résultat est médiocre. Grâce aux couples tandem des satellites ERS-1 et ERS-2, et leur intervalle de passage sur la même scène qui correspond à un jour (24 h), ce mode est plus souvent utilisé car la décorrélation temporelle ne représente pas un handicap sauf dans le cas où il y a un phénomène qui se manifeste dans une période courte de 24 heures. Par contre ce mode a comme inconvénient les artefacts atmosphériques qui ne peuvent pas être éliminés car ne sont pas les mêmes entre les deux périodes de prise de vue, ce qui induira nécessairement des erreurs. Il y a aussi l'intervalle de trois jours dans les régions du Nord où la décorrélation temporelle est négligeable, ce qui rend possible la réalisation du MNA à partir de deux passages au dessus de la scène avec des plate-formes équipées d'un radar avec une seule antenne. La phase du signal reçu par le capteur du radar englobe plusieurs phases de différentes sources (ϕ) en général :

$$\Phi_{\text{totale}} = \Phi_{\text{trajet}} + \Phi_{\text{propre}} + \Phi_{\text{instrumentale}} + \Phi_{\text{bruit}}$$

Pour que ces informations de la phase soient exploitables, il faut éliminer les autres paramètres qui ne sont pas retenus selon l'objectif recherché. Pour cela il faut générer des interférogrammes qui traduisent la différence de phase entre deux images radar de la même scène, considérant les autres termes constants entre les deux prises de vue. Il faut d'abord supposer qu'une cible a la même phase propre sur les deux images. Pour faire la différence, la première condition est que les deux scènes soient les plus analogues possible. Il faut alors utiliser deux scènes radar, avec des conditions de prises de vues les plus similaires possible séparées par une distance (Baseline) qui introduit l'effet stéréoscopique. L'une des deux scènes étant prise pour référence dans les calculs (scène Maître), l'autre est utilisée pour calculer par comparaison la différence de phase (interférogramme) et la cohérence indicatrice du degré de fiabilité des mesures de la phase.

La configuration utilisée qui a servi à la génération du MNA (*DEM*) de Buzău est en mode multi-passe. Cela ressemble à une configuration stéréo : deux capteurs SAR sur des orbites parallèles (ERS-1 et ERS-2) regardent la surface (scène) avec deux directions légèrement différentes. La séparation de la distance est appelée la Baseline « B » (voir *figure n° 1*), sa composante perpendiculaire « $B_{\perp}$ » joue un rôle très important dans le calcul de l'interférogramme. Elle donne les distances entre le radar et la cible pour chaque pixel de surface imagée. Contrairement à la technique de la stéréo conventionnelle où les points homologues doivent être identifiés et le contraste de l'image exigé, l'interférométrie utilise l'information de la phase de chaque pixel de l'image pour mesurer les parallaxes. Ce la est faisable car le SAR est un système de prise d'images cohérent qui enregistre la phase de l'onde reçue et la conserve partout dans toutes les étapes du traitement [J. C. CURLANDER et R. N. McDONOUGH, 1991]; [R. BAMLER et B. SCHÄTTLER, 1993] ; [B. RABUS *et al.*, 2003].

Les images SAR acquises par les deux radars (antennes) sont collectées en deux dimensions, le pixel est représenté par ses composantes en indice de ligne et de colonne. La première dimension du pixel collecté est donnée par sa distance par rapport au capteur le long de l'orbite en azimuth, et l'autre dimension en distance dans la direction de la visée du satellite (radar). Les phases des données acquises sont données par la longueur d'onde utilisée par le radar (dans cette étude c'est la bande « C » : 5.56 cm). Le retard de l'onde est provoqué par la propagation dans l'atmosphère (troposphère et ionosphère) et la contribution des bruits (thermique, quantification etc.).

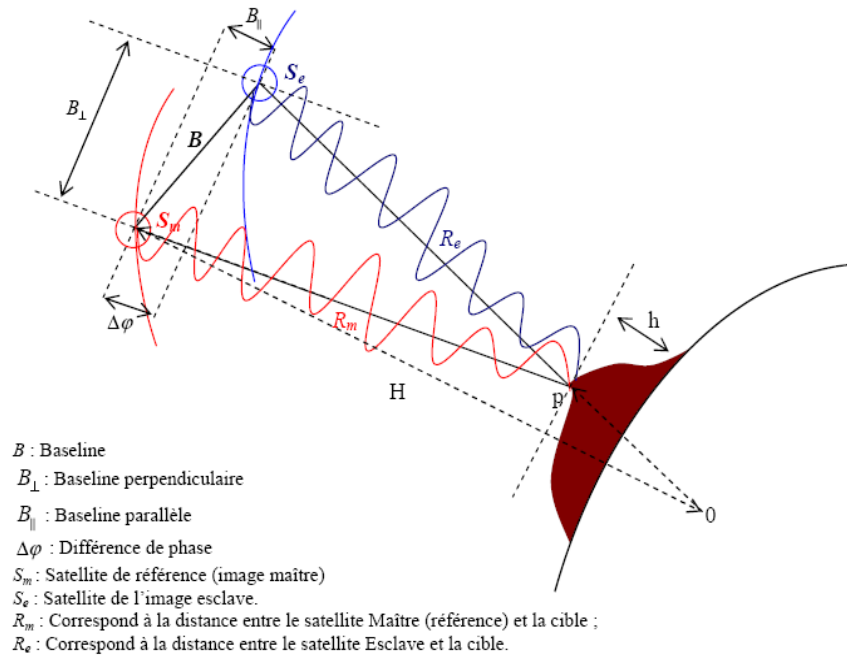


Fig. 1. Configuration et géométrie montrant l'intérêt de la Baseline perpendiculaire ($B_{\perp}$)

Les MNA produits par Interférométrie InSAR sont généralement d'une bonne précision. En effet, S. SYLVANDER et P. GIGORD (1995) ont comparé la qualité d'un MNA produit à partir d'images ERS-1 et d'un MNT IGN ; ils ont montré dans leurs travaux que la précision altimétrique peut atteindre 3 m en moyenne quadratique dans la génération d'un MNA à partir d'interférométrie radar RSO. Cette précision est cependant conditionnée par les artefacts et la variation de cohérence. Par ailleurs, dans leurs travaux sur l'Alaska et le Sud-Ouest des Etats-Unis, H. A. ZEBKER *et al.* (1994) ont montré des précisions de moins de 5 m dans quelques régions (40 km x 40 km) en utilisant également des données ERS-1. L'étude réalisée par E. RENAUDIN (2000) a montré que les MNA réalisés par l'interférométrie radar InSAR sont plus précis que les MNA obtenus par la méthode de stéréoscopie optique (images SPOT).

T. TOUTIN et L. GRAY, 2000 ont résumé les différentes précisions des MNA obtenues par interférométrie (InSAR) en utilisant les images de divers satellites radar par : une précision allant de 3 à 20 m des MNA réalisés à partir du couple tandem (ERS-1 et ERS-2) avec une résolution de 24 m pour la plupart des régions, excepter les régions avec végétation considérable ou

variabilité de l'humidité ; pour les images obtenues par JERS, une précision est de 10 à 20 m avec une résolution de 18 m ; par contre les images RADARSAT en mode standard, la précision est de 10 à 20 m avec une résolution de 20 à 29 m et avec un mode fine de résolution allant de 7 à 9 m, la précision est de 3 à 10 m.

II.2. Données utilisées

II.2.1. Le choix du couple d'image pour la réalisation du MNA

Avant de commencer les traitements d'interférométrie on a procédé à une analyse des données utilisées et cherché le meilleur couple pour la réalisation d'un MNA. Pour aboutir à un bon résultat avec cette technique, un MNA nécessite le plus court intervalle de temps possible entre les deux acquisitions et une corrélation spatiale. Il y a deux choix : un choix avant le traitement qui se fait avec le choix d'une meilleure corrélation temporelle, où il faut d'abord chercher la disponibilité des couples qui offriront l'intervalle de temps le plus court possible séparant les deux acquisitions. L'autre choix se fait après les traitements initiaux avec une Baseline spatiale. La Baseline doit être choisie parmi la gamme des bases possibles en interférométrie ; pour le satellite ERS, elle doit être inférieure à 500 m pour avoir une bonne cohérence de phase.

Pour atteindre cet objectif, nous avons réalisé des interférogrammes topographiques de tous les couples. Après de nombreux essais nous avons pu sélectionner le couple tandem ERS-1 et ERS-2 avec une cohérence optimum. Il représente le seul couple qui reflète relativement une bonne cohérence.

Les données utilisées pour la réalisation du MNA correspondent à des données radar RSO Mono-vue (SLC) des satellites ERS-1 et ERS-2 prises respectivement dans les dates suivantes 28 mai 1995 et 29 mai 1995 mode multi-passes (2 passages) avec intervalle de 24 h (voir *tableau n° 1*). Ces données sont des acquisitions descendantes acquises en jour.

Tableau 1

Les caractéristiques géométriques du couple tandem utilisé (ERS-1 et ERS-2)

Le Couple d'images ERS (ERS-1 et ERS-2)											
Orbites Maître/Esclave	B _{temp} [jours]	B [m]	B _{perp} [m]	B _{par} [m]	B _h [m]	B _v [m]	Alpha [deg]	Thêta [deg]	Inc _{angle} [deg]	Orbit _{conv} [deg]	H _{amb} [m]
20221/548	1	90,5	- 79	-43,8	-89,4	13,3	171,5	20,6	23,3	0,000818386	120,4

B_{temp} : Baseline temporelle
 B : Baseline (distance entre les deux radars)
 B_{perp} : Baseline perpendiculaire
 B_{par} : Baseline parallèle
 B_h : Baseline horizontale
 B_v : Baseline verticale

Alpha : Angle d'orientation de la Baseline
 Theta : Angle de vue
 Inc_{angle} : Angle d'incidence
 Orbit_{conv} : Angle entre orbites
 H_{amb} : Altitude d'ambiguïté [h = H_{amb}*phase/2π]

II.2.2. Choix de l'image de référence (Maitre) et de l'image auxiliaire (Esclave)

La combinaison du couple tandem (ERS-1 et ERS-2) qui ont respectivement des orbites 20021 et 548, offre une meilleure corrélation entre les deux images (meilleure cohérence par rapport à d'autres couples). Le choix de l'image Maitre est basé sur l'orbite la plus proche de la terre. On a pris comme image de référence l'image ERS-1 de l'orbite n° 20021. Ce choix a été effectué grâce au traitement réalisé avec le module IfSAR (ERDAS).

II.3. Traitement d'interférométrie radar (InSAR) pour la génération d'un MNA

La réalisation d'un MNA, passe par plusieurs étapes de traitement interférométrique que nous présentons brièvement. Toutes ces étapes de traitements sont exécutées sur les images dans la géométrie radar (non pas géométrie terrain, coordonnées système du capteur radar), jusqu'à l'étape de géocodage. Ces traitements ont été effectués grâce au logiciel DORIS spécialisé en interférométrie radar SAR. DORIS, permet à l'aide de la chaîne de traitement dont il dispose de créer un MNA ainsi qu'un Model Numérique de Déformation (MND), à l'aide de l'interférométrie (InSAR/DinSAR) avec multi-passes et il contient aussi quelques applications. DORIS n'est pas un processeur SAR, c'est-à-dire qu'il ne traite pas les données radars brutes (RAW). Il traite seulement les données ERS1/2, ENVISAT, JERS et les données RADARSAT. Les données doivent être en un seul format SLC (Single Look Complexe). Cette chaîne du traitement avec DORIS est sous la plate forme linux et Sygwin (Windows). Elle n'est pas restreinte, il y a possibilité d'introduire des changements ou adopter des modifications dans le code source des modules utilisés dans la chaîne de traitement, mais dans le cas général, la production d'un MNA suit l'enchaînement logique des traitements.

II.3.1. Traitement RSO

Cette première étape est appelée le traitement RSO (SAR), c'est le premier traitement à Synthèse d'Ouverture Radar des données brutes (RAW) qui sont enregistrés par l'antenne SAR. Une image SAR Brute (RAW) est un hologramme dans le sens que l'énergie d'une seule région de la surface imagée est éparpillée et distribuée sur une image. Comme nous disposons d'images SLC, nous n'avons pas effectué cette étape; ces données sont déjà traitées et fournies par l'ESA.

II.3.2. Corregistration

Cette étape consiste à recaler l'image Esclave sur l'image Maître. Elle vient avant la génération de l'interférogramme et est très importante. A cause de la courbure de la terre, de la différence des positions des antennes (différentes orbites), et du retard causé par les composants électroniques, les images des deux antennes sont différentes et étirées les unes par rapport aux autres. Avant les traitements d'interférométrie, une coregistration de l'image doit être réalisée avec une précision de 0,01 % du pixel [R. HANSEN et R. BAMLER, 1999]. L'étape de coregistration a été réalisée automatiquement avec le logiciel DORIS. Dans cette étape l'image Esclave sera sur-échantillonnée sur l'image Maître.

II.3.3. Génération de l'interférogramme

Après coregistration, l'interférogramme est formé à partir de la multiplication des deux images (Maître et Esclave). Ceci définit l'interférogramme complexe et donne par la suite la différence de la phase et l'image de cohérence ainsi que l'image d'amplitude (moyenne quadratique des deux images d'amplitude). L'image de cohérence produite pendant la génération de l'interférogramme correspond à une mesure du bruit et de fiabilité de la phase et peut être utilisée dans le déroulement de phase ainsi que l'image d'amplitude. La phase pour chaque pixel dans une image est définie comme [B. KAMPES, 1999] :

$$\varphi_p = -\frac{4\pi}{\lambda} r_p$$

L'interférogramme complexe en considération de la phase de la référence est défini comme :

$$Intf = M.E^*.R_{ef}^*$$

Avec : *Int* : Interférogramme complexe ; *M* : Image Maître complexe; *E* : Image Esclave complexe rééchantillonnée et sa conjuguée *E** ; *R_{ef}* : Phase de référence complexe.

L'image de la phase (interférogramme complexe moins phase de la référence) est définie comme:

$$\varphi = \arctan(Intf_{img}, Intf_{real}) ; \quad \varphi_{Intf} = \varphi_M - \varphi_E - \varphi_R$$

La phase de référence est définie comme la gamme du satellite maître à un point sur la surface de référence noté ($\varphi_R(p)$) :

$$\varphi_R = -\frac{4\pi}{\lambda}(R_m - R_e) = -\frac{4\pi}{\lambda} B$$

Cette étape permet à la fin d'avoir un interférogramme avec une image de cohérence qui exprime la fiabilité de cet interférogramme.

II.3.4. Filtrage

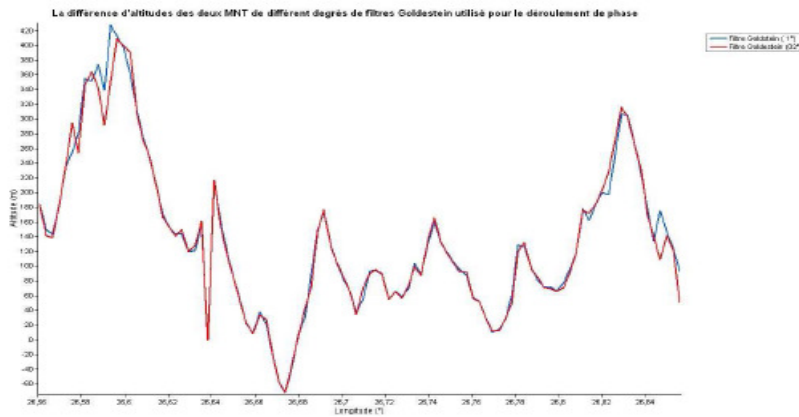
Le filtrage dans l'interférométrie est une opération facultative ; elle a comme objectif de lisser les franges des interférogrammes, pour bien mener et faciliter l'opération de déroulement de phase. Cette étape de filtrage s'effectue avant le déroulement de phase par le logiciel SNAPHU. Elle est utilisée pour réduire le bruit, pour une meilleure visualisation et pour aider à l'opération du déroulement de phase. Dans le cas de nos images et avant de procéder au déroulement, il nous est apparu nécessaire de passer par cette étape ; nous avons pour cela utilisé deux méthodes : la méthode de Goldstein et la méthode de Spatialconv (convolution spatiale).

– **Méthode de Goldstein** : La méthode de R. A. GOLDSTEIN et C. L. WERNER (1998) utilise l'image d'amplitude pour filtrer l'interférogramme. Elle est implantée par B. KAMPES dans la chaîne DORIS et permet de choisir le degré de filtrage. Elle s'exécute entre le «0°» (zéro filtrage) et le degré «1°» (filtrage maximum), elle consiste à assouplir l'interférogramme avant l'étape de déroulement de phase. Ce filtre est utilisé aussi par Altamira dans le progiciel Diapason pour filtrer les interférogrammes différentiels. Avant de procéder au déroulement de phase, nous avons anticipé par ce filtrage de l'interférogramme qui va diminuer l'information de la vraie phase mais en même temps va faciliter le déroulement de la phase.

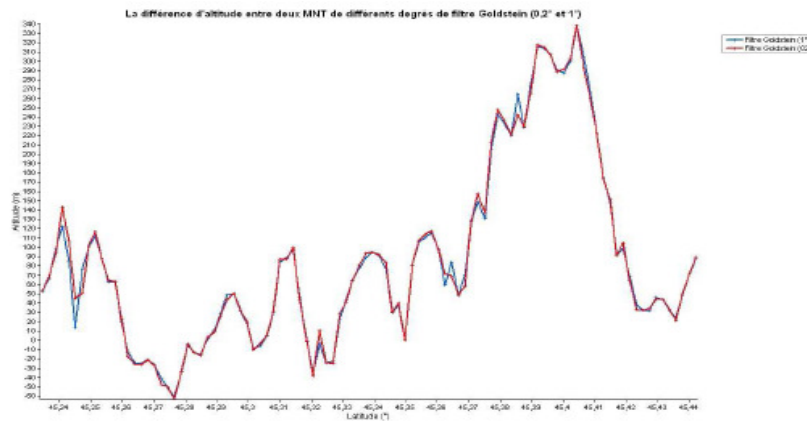
Nous avons essayé de trouver l'influence sur le résultat de l'altitude calculée en utilisant une combinaison des MNA créés avec deux degrés de filtrage différents, à partir de la méthode de Goldstein. Les graphes suivants (*n° 1, 2, 1 bis et 2 bis*) montrent cette comparaison. Nous constatons une différence moyenne d'altitude du même MNA de 3 m pour une différence de degré et filtrage égale à 0,8°. Dans le traitement effectué, le filtrage de Goldstein avec des degrés 0,2° et 1°, a montré une différence d'altitude entre 2 m et 4 m ; 2 m dans les zones plates et 4 m environ dans les zones de reliefs accidentés.

Les altitudes en rouge représentent les altitudes déroulées à partir des données filtrées avec la méthode de Goldstein avec un degré de $0,2^\circ$; par contre, les altitudes en bleu montrent le MNA calculé à partir du filtrage de l'interférogramme avec la méthode Goldstein de degré 1° . Ce graphe montre bien les différences d'altitude dues au degré de filtrage ; plus le degré de filtrage augmente, plus le déroulement est facile et plus l'altitude diminue.

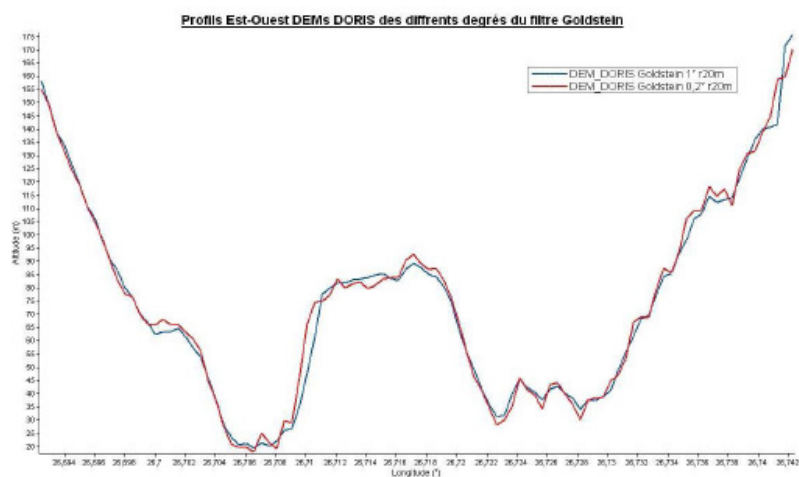
Les graphes n° 1 bis et 2 bis, montrent bien le raffinement et le lissage du degré 1 par rapport au degré 0,2 du filtre (Goldstein) dans les deux directions du MNA de la zone de l'anticlinal de Berca (volcans de boue Sud et Nord).



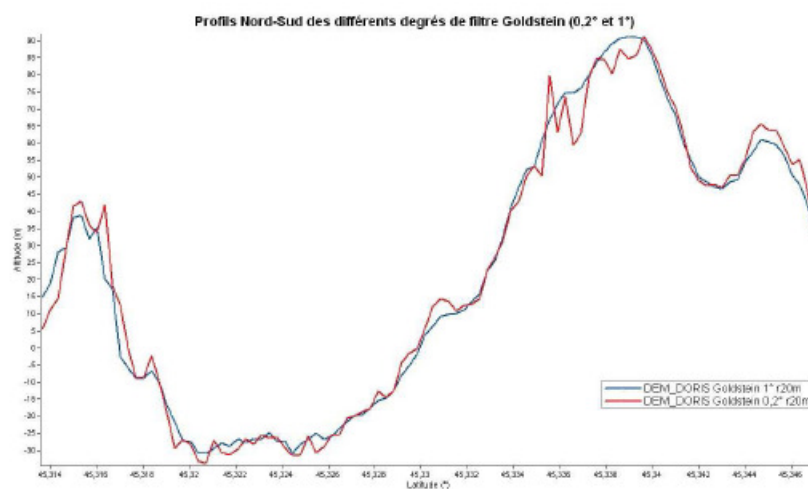
Graphe 1. Deux profils en direction de longitude des deux MNA réalisés avec le filtre Goldstein ($0,2^\circ$ et 1°)



Graphe 2. Deux profils en direction de latitude des deux MNA réalisés avec le filtre Goldstein ($0,2^\circ$ et 1°)



Grappe 1bis. Deux profils Est-Ouest du DEM_DORIS (MNA-ERS1/2-95) des deux degrés du filtre de Goldstein 0,2° et 1° (direction de longitude)

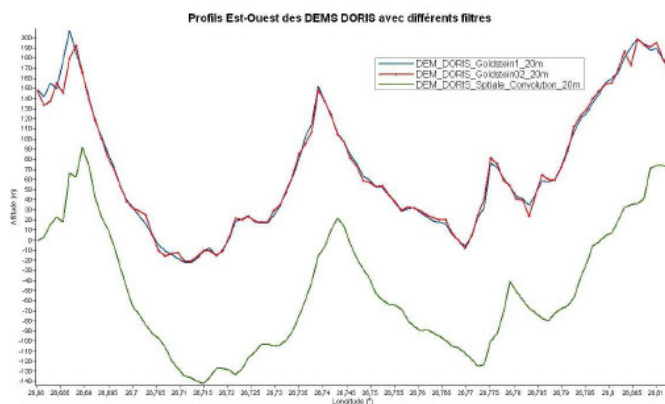


Grappe 2bis. Deux profils Nord-Sud du DEM_DORIS (MNA-ERS1/2-95) des deux degrés de filtre de Goldstein 0,2° et 1° (direction de latitude)

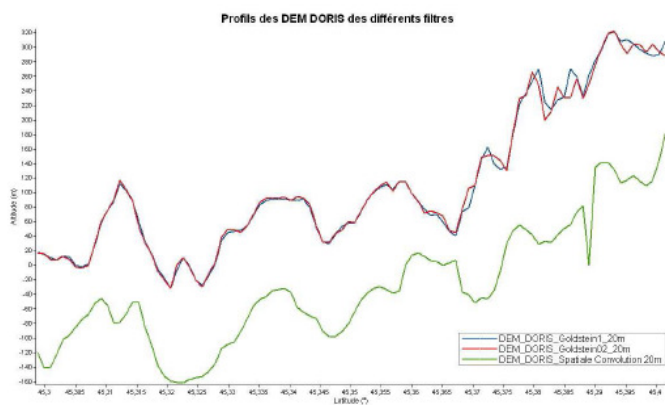
– **Méthode de Convolution Spatiale :** L'objectif de l'utilisation de la méthode Convolution Spatiale est pour illustrer l'efficacité de la méthode de Goldstein. Elle est implantée par B. KAMPES dans la chaîne DORIS. Dans ce

cas d'étude, le filtrage Goldstein a donné un bon résultat qui a facilité le déroulement. Le filtrage avec Convolution Spatiale n'est simplement qu'une circonvolution spatiale avec le choix d'une fenêtre de moyenne comme (3 x 3).

Les deux *graphes* suivants (*n° 3 et 4*), montrent la différence entre les deux filtres dans les deux directions (latitude et longitude). Les deux MNA respectent la même allure morphologique sauf que le MNA avec le filtrage Goldstein de degré 1 et plus ressemble avec le MNA Spatiale Convolution que le filtrage de Goldstein avec le degré 0,2. La différence entre les mêmes MNA du même filtre avec des différents degrés, ne dépasse pas les 5 m.



Graphe 3. Différence entre les MNA en direction de longitude



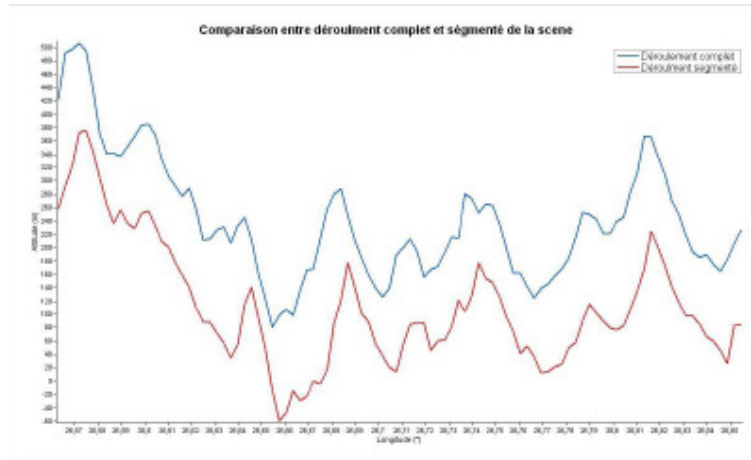
Graphe 4. Différence entre les MNA en direction de latitude

II.3.5. Déroulement de phase

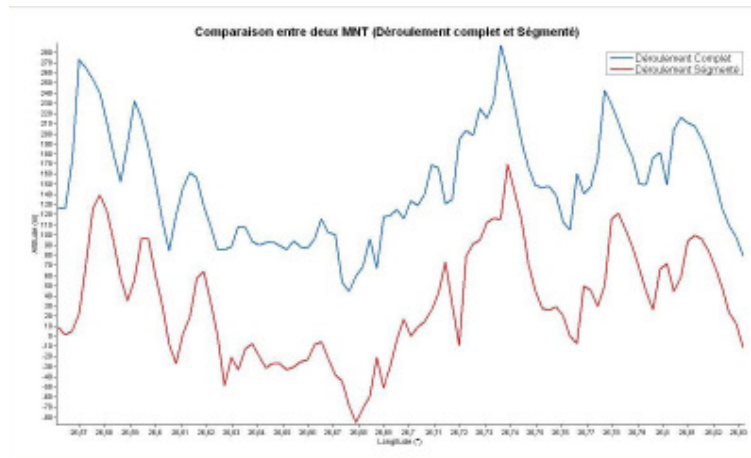
L'interférogramme produit par l'interférométrie est donné malheureusement par une valeur de phase pour chaque pixel au modulo 2π , ce qui signifie que la valeur de phase fournie est comprise entre $\varphi \in [0, 2\pi]$, alors que la vraie valeur peut dépasser 2π . La mesure de la hauteur correspondante est donc ambiguë. Ce problème doit être résolu par une étape de déroulement de phase. Cette étape du traitement est considérée la plus délicate, surtout pour des terrains accidentés et des pentes fortes ou avec des discontinuités. Par contre, le résultat est meilleur dans les terrains plats et des pentes modérés. Les régions montagneuses demandent plus de contrôle et le résultat doit être vérifié et corrigé sur le terrain.

Dans ce travail, nous avons réalisé le déroulement de phase par une méthode globale automatique à l'aide du logiciel SNAPHU [C. W. CHEN et H. A. ZEBKER, 2000], [C. W. CHEN et H. A. ZEBKER, 2001], [C. W. CHEN et H. A. ZEBKER, 2002], qui est publiquement distribué pour le domaine de la recherche. Ce logiciel est utilisé aussi par Diapason (Altamira). Cette étape a été soigneusement déroulée. L'image de cohérence de chaque interférogramme et l'image d'amplitude ont été utilisées pour vérification des données pendant le processus de déroulement. Les effets orbitaux résiduels ont été corrigés automatiquement par calcul. Afin d'éviter des erreurs dans le déroulement, un masque de cohérence est utilisé collectivement afin de ne conserver dans les calculs que les pixels les plus cohérents.

Pour montrer l'influence et l'importance du déroulement de la phase dans le calcul des altitudes, nous étions obligés de procéder à deux déroulements de deux interférogrammes de la même scène que nous avons comparés : (1) un interférogramme de toute la scène de 100 km x 100 km (interférogramme complet) ; (2) un interférogramme d'une partie de la scène de dimension 25 km x 25 km (interférogramme segmenté). Les *graphes n° 5 et 5 bis* montrent la différence d'altitude calculée entre les deux MNA avec un déroulement de toute la scène (100 km x 100 km) et un déroulement pour une segmentation (25 km x 25 km). On voit bien que le déroulement en segmentation présente un bon résultat et le MNA est bien raffiné que le déroulement complet de la scène. Cette différence ne dépasse pas les 6 m dans les deux directions.



Graphe 5. Deux profils en direction longitude montrent la comparaison entre deux MNAs déroulement complet et segmenté (Pas 20 m)



Graphe 5bis. Deux profils en direction longitude montrent la comparaison entre deux MNAs avec déroulement complet et segmenté (Pas 10 m)

II.3.6. Géocodage

Le géocodage passe par deux étapes : (1) La conversion de la phase déroulée en altitude de terrain dans une grille irrégulière c'est là qu'intervient

l'altitude d'ambiguïté. (2) La transformation de la géométrie radar en géométrie terrain ; pour chaque point de la grille (avec sa hauteur) correspond ses coordonnées en latitude et longitude qui utilise généralement l'Ellipsoïde WGS84 comme référence planimétrique (horizontale) et verticale. Dans cette étape la grille irrégulière est interpolée en une grille régulière correspondante. Le résultat obtenu correspond à deux fichiers (tableaux) en (*.dat) avec trois colonnes (X, Y et Z) de la même zone en coordonnées géographiques (Lat/Lon) et UTM, ce qui permet de choisir l'interpolation, le système de projection et la résolution adéquate comme dans ce cas 20 m pour restituer le MNA. La transformation de la phase déroulée en altitude (H) a été effectuée à l'aide de 3 méthodes : (1) Méthode d'Altitude d'Ambiguïté ; (2) Méthode de Rodriguez ; (3) Méthode de Swabitch.

– **Méthode d'Altitude d'Ambiguïté** : L'équation de transformation de la phase déroulée avec la méthode d'altitude d'ambiguïté est donnée par l'expression suivante [B. KAMPES, 1999] :

$$h(p) = -\frac{\lambda}{4\pi} \frac{R_l \sin(\theta)}{B_{\perp}} \Phi(P) \Rightarrow h(p) = \frac{\lambda}{4\pi} \frac{R_l \sin(\theta)}{B_h \cos(\theta) + B_v \sin(\theta)} \Phi(p)$$

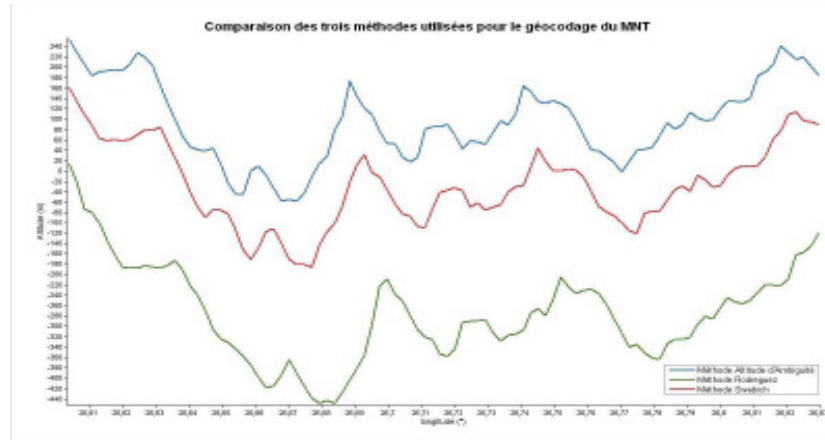
Où : $\Phi(p)$: Phase du pixel déroulée ; $h(p)$: Altitude du pixel cherchée ; B_h : Baseline horizontale du pixel centrale de la scène ; B_v : Baseline verticale du pixel centrale de la scène.

Par contre l'objectif de l'utilisation des deux autres Méthodes de Rodriguez et de Schwäbitch, voir respectivement [E. RODRIGUEZ et J. M. MARTIN, 1992] et [M. SCHWÄBISCH, 1995], est pour montrer l'efficacité et le choix de la méthode d'Altitude d'Ambiguïté.

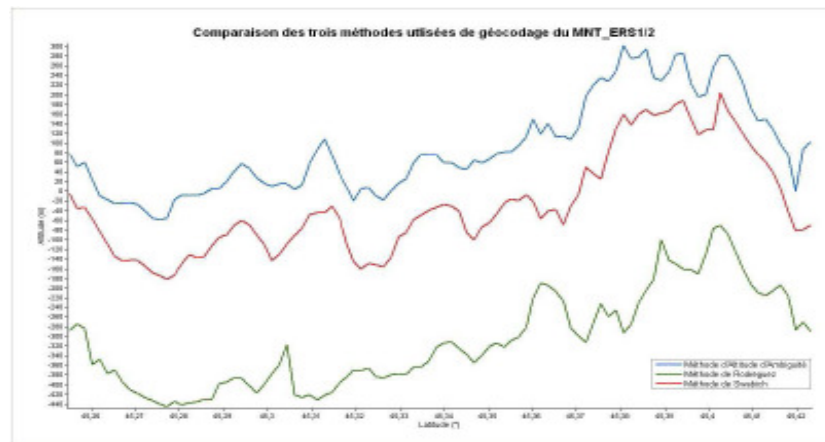
Après l'obtention de l'altitude de chaque pixel vient l'étape de conversion en coordonnées géographiques ou UTM où les équations de B. R. BOWRING, (1985) sont utilisées pour les transformer à un système d'ellipsoïde.

Nous avons effectué une comparaison à partir des profils des MNA pour montrer la différence d'altitude qui résulte entre ces trois méthodes de transformation (voir *graphes* ci-dessous). On voit bien que les trois méthodes respectent bien la morphologie du terrain, sauf que la méthode de Rodriguez (courbe verte) est plus ou moins différente des deux autres méthodes. Par contre, la méthode d'Altitude d'Ambiguïté est plus raffinée et reflète le terrain et donne moins de pic.

Après avoir testé les trois méthodes, nous avons retenu le MNA réalisé avec la méthode de l'Altitude d'Ambiguïté qui nous semble donner les résultats les plus proches des valeurs d'altitude terrain. Les *graphes* n° 6 et 7 illustrent cette comparaison dans les deux directions.



Graph 6. Trois profils en direction longitude des MNAs (3 Méthodes de conversion)



Graph 7. Trois profils en direction latitude des MNAs (3 Méthodes de conversion)

L'objectif de l'utilisation de ces méthodes de filtrage (Spatiale Convolution) ou de conversion (Rodriguez et Schwabitch) c'était pour justifier le choix des méthodes utilisées comme Goldstein (filtrage) ou Altitude d'Ambiguïté (conversion). Par contre, l'utilisation de la segmentation d'une partie de la scène pour le déroulement de phase c'était pour montrer l'erreur engendrée dans la procédure de déroulement de phase. Ces différentes méthodes peuvent introduire des incertitudes qui peuvent aller jusqu'à plus de 5 m ce qui

complique la précision du MNA réalisé surtout dans le but de l'évaluation et l'estimation des mouvements de terrain dans cette région.

II.3.7. Calibrage et qualité du MNA

Le MNA réalisé est maintenant géocodé ; pour chaque pixel on a attribué les coordonnées géographiques mais il faut savoir que chaque altitude du pixel est donnée par rapport un repère de géoïde niveau zéro. Il faut ajouter une valeur constante qui représente la plus basse valeur qui existe dans cette région avec une bonne précision pour calibrer le MNA-ERS1/2. Cette étape consiste à calibrer le MNA produit, soit avec des points de contrôle bien précis et puis corriger le MNA en le calant soit avec une carte topo ou un MNT. Dans ce cas on a utilisé le DEM-SRTM de 90 m à cause de l'impossibilité de trouver des points de calage. La seule solution qu'on a utilisée correspond à essayer de recaler le MNA-ERS1/2 sur le DEM-SRTM à partir des réseaux hydrographiques. Le résultat est encourageant car il ne montre pas un décalage planimétrique entre les deux MNA. La méthode de transformation de la géométrie radar vers la géométrie terrain et le géocodage utilisé ont bien donné de bons résultats. Reste toujours le problème de résolution car la seule différence c'est que le MNA-ERS1/2 réalisé possède 6 millions de points. Pour cela on a rééchantillonnée d'abord le SRTM à 20 m et on a effectué la comparaison après on a fait l'inverse (rééchantillonnée le MNA-ERS1/2 à 90 m) et on a fait la comparaison. Cette comparaison de résolution 20 m avec un DEM de 90 m rééchantillonnée à 20 m présente presque 5 fois la résolution du MNA réalisé ce qui traduit par une précision planimétrique de 20 m.

II.3.8. Vérification et correction avec des points GPS

Nous avons relevé des points de mesures par GPS, sur le terrain, cette quantité de plus de dizaine de points, est considérée insuffisante pour l'étendue du MNA réalisé. Cette déficience du nombre de points relevés (voir *tableau n° 2*), est due à la difficulté d'accès aux endroits, à la grandeur de la zone d'étude 100 km x 100 km et à trouver les points de référence sur les cartes topographiques. Car le premier objectif c'était le calibrage qui nous oblige à prendre des points précis et identifiables sur les cartes topographiques (points de référence), nous avons pris des points des ponts en majorité. Concernant les points de localisation des mouvements de terrain, nous avons pris que quelques uns comme exemples à cause de leur accessibilité difficile.

Nous avons utilisé un GPS prêté par le CNRS de Meudon (Labo Géographie Physique) avec des précisions différentes allant de 2 m à 10 m. Nous avons réalisé des levés dans les trois parties de la scène : au centre de la scène (où il y a les volcans de boues), dans la partie des plaines et la partie des reliefs (voir

figure n° 3). Cette procédure entre dans la vérification et la correction du MNA réalisé. A l'aide du logiciel ArcGIS, nous avons transformé les coordonnées de ces points dans le système WGS84 en coordonnées géographiques (Lat° et Long°) et en coordonnées UTM-35N (X, Y), ensuite superposés sur le MNA réalisé. Cette opération avait deux objectifs : la vérification et le calibrage des MNA réalisés.

Tableau 2

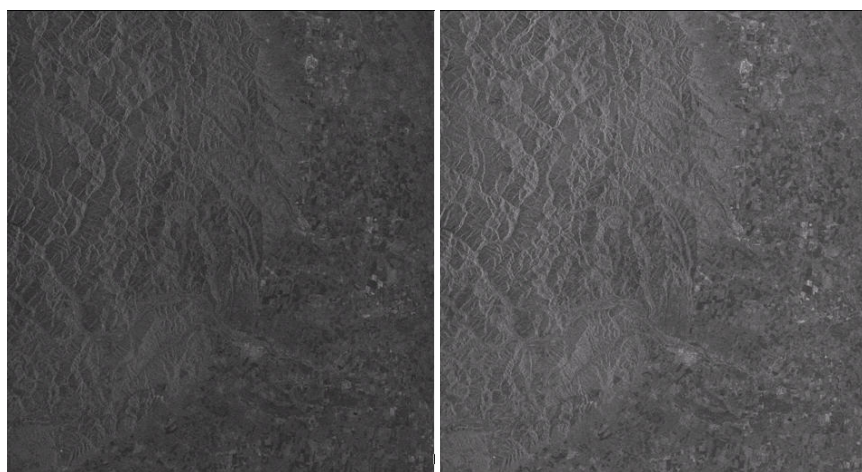
Points de mesure du terrain GPS

Pts	Nom	Lat. Nord	Long. Est	Z (m)	Carte-topo
1	Pont Caragele	44°59,200'	27°02,308'	55,1689	55,60
2	Lac de Luciu	44°58,141'	27°05,661'	53,6449618	56,3
3	Cote 1961 (village Albescu)	44°59,736'	26°54,166'	83,8202528	84,3
4	Pont Costești	45°03,348'	26°45,990'	80,7722436	80
5	Gura-Siriului	45°29,895'	26°15,153'	632,1571	500
6	Pont Mlăjet-1	45°22,922'	26°19,454'	331,9282	330
7	Pont Mlăjet-2	45°22,931'	26°19,532'	335,2810	330
8	Point Coulée de Boue	45°22,426'	26°19,336'	333,4522	330
9	Pâclele Mici	45°21,487'	26°42,743'	334,3666	334
10	Pâclele Mari	45°20,366'	26°42,424'	320,3457	320
11	Point Géodésique (entre deux volcans)	45°20,626'	26°42,688'	338,6338	338,1
12	Point Géodésique Pâclele	45°19,465'	26°42,300'	294,132887	292,4
13	Point Glissement Schela	45°19,129'	26°42,640'	322,17457	350
14	Pont Băligoasa-1	45°21,127'	26°42,230'	252,984763	250
15	Pont Băligoasa-2	45°21,112'	26°42,240'	242,926333	250
16	Pont Sibiciu-Pănătău-1	45°19,450'	26°22,043'	296,571294	285
17	Pont Sibiciu-Pănătău-2	45°19,483'	26°22,139'	284,684059	285
18	Pont Pătârlagele Sud-1	45°18,373'	26°21,824'	288,34167	260
19	Pont Pătârlagele Sud-2	45°18,388'	26°21,831'	286,817665	260
20	Pont Vallée Seacă-1	45°16,627'	26°21,356'	281,94085	267
21	Pont Vallée Seacă-2	45°16,612'	26°21,356'	283,464855	267
22	Pont Chiojd-1	45°15,215'	26°21,802'	261,214388	250
23	Pont Chiojd-2	45°15,273'	26°21,713'	265,1768	250
24	1 ^{er} Pont Berca-1	45°17,072'	26°40,541'	160,325284	160
25	1 ^{er} Pont Berca-2	45°17,166'	26°40,611'	160,325284	160
26	2 ^{ème} Pont Berca-1	45°17,206'	26°40,605'	152,40046	160
26	2 ^{ème} Pont Berca-2	45°17,221'	26°40,534'	148,742849	160
27	Pont Râmnicu Sărat-1	45°21,978'	27°05,743'	128,016386	160
28	Pont Râmnicu Sărat-2	45°21,911'	27°05,820'	98,7554978	160
29	Balta Albă Nord-Est	45°18,513'	27°18,057'	30,4800919	38
30	Balta Albă Sud-Est	45°16,529'	27°22,712'	28,6512864	32
31	R. Buzău Grădiștea	45°15,679'	27°23,660'	34,7473048	35
32	P. haut mPV-1	45°18,556'	26°22,935'	436,170115	500
33	P. haut mPV-2	45°18,563'	26°23,024'	452,019763	500
34	Glissement Pâclele-1	45°20'23,5"	26°41'8,2"	338,740563	340
35	Glissement Pâclele-2	45°20'24,4"	26°41'6,9"	337,158701	336

II.3.9. Les résultats de la réalisation du MNA à partir du logiciel DORIS

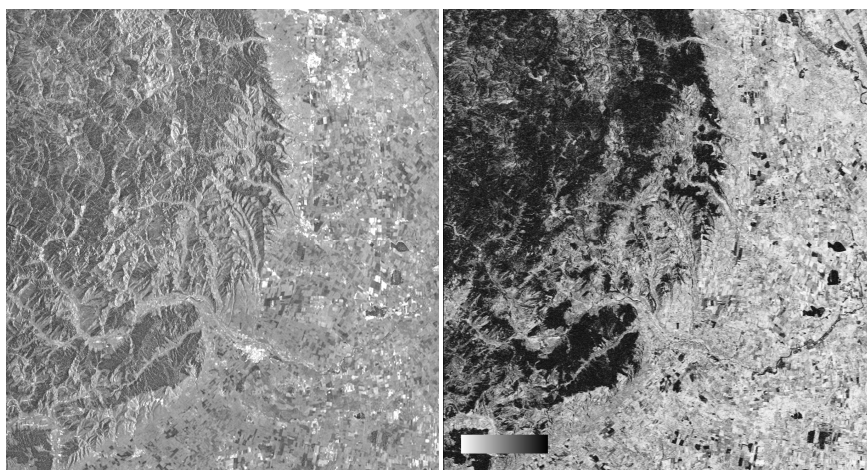
A l'aide du logiciel DORIS et à partir de deux images tandem (ERS-1 et ERS-2), on a pu réaliser un modèle numérique d'altitude (MNA) de la région du Buzău. La *figure n° 2* présente les principaux produits d'interférométrie réalisés par ce logiciel (DORIS).

Couple tandem ERS-1/ERS-2 (28-05-1995 /29-05-1995)



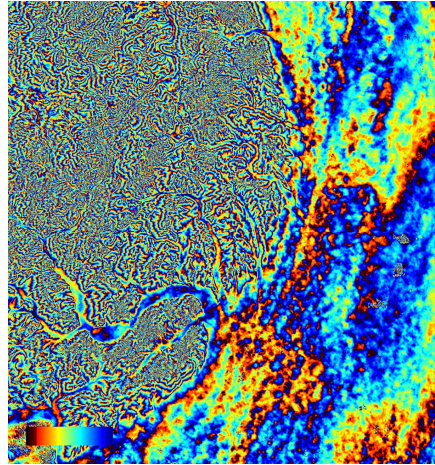
a) Image de magnitude Maitre

b) Image de magnitude Esclave

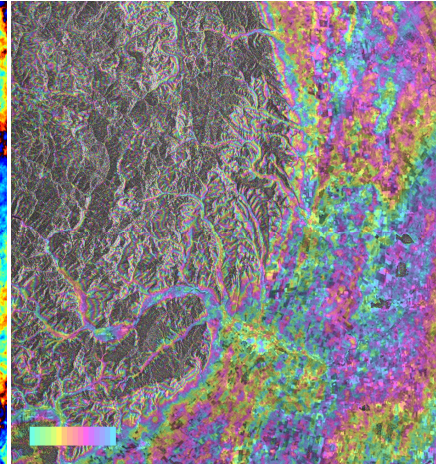


c) Image de magnitude

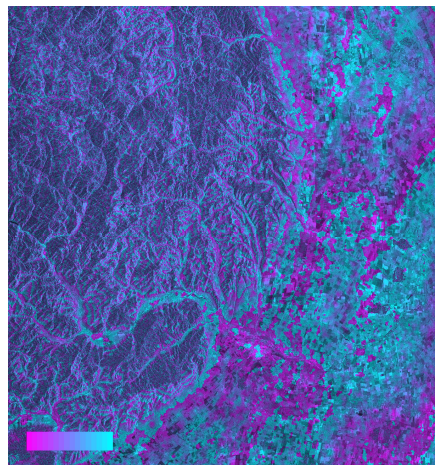
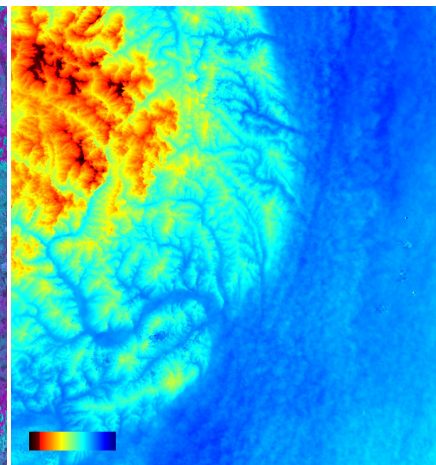
d) Image de cohérence



e) Interférogramme filtré



f) Interférogramme filtré et mixé

g) Image d'interférogramme mixée
suréchantillonnéeh) Image déroulée à partir
du logiciel Snaphu

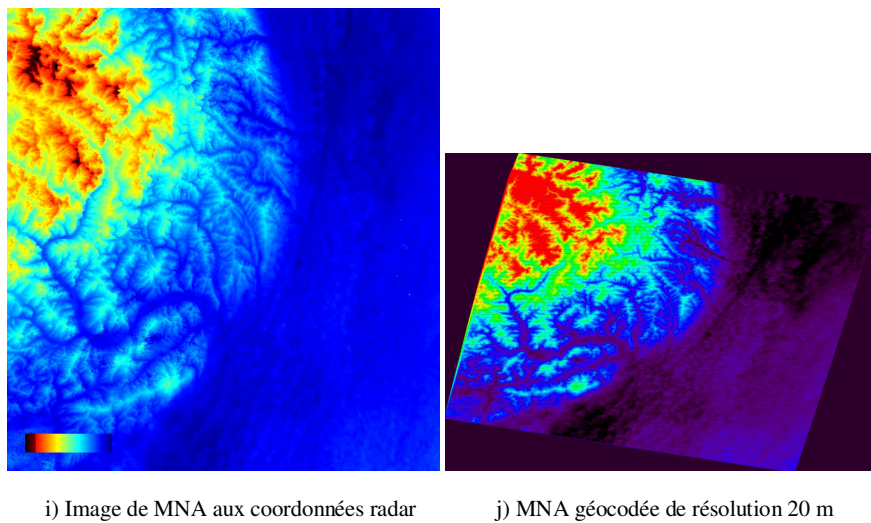


Figure 2.

Le résultat final du traitement représenté dans la *figure n° 3* avec la répartition et la localisation des points GPS.

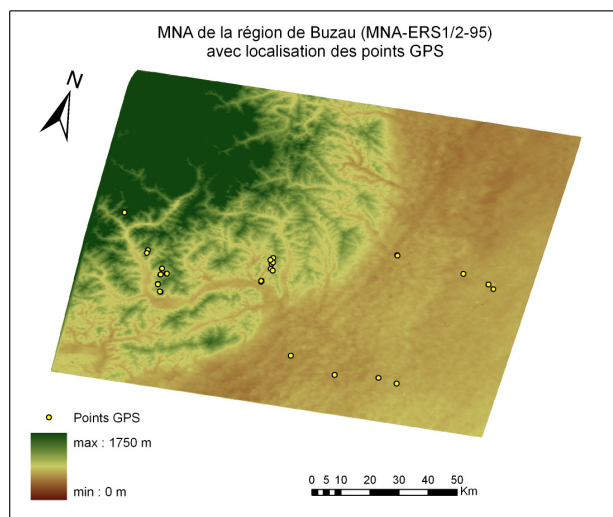


Figure 3. Résultat du MNA avec la localisation des points de GPS sur le MNA-ERS1/2-95

II.3.10. Exploration des résultats obtenus par DORIS

À la fin du processus, le résultat final du MNA généré correspond à 2 fichiers (*.dat) de 6 millions de points chacun qui correspond à un pas de 20 m x 20 m. Le premier en coordonnées géographiques en Latitude (°) et Longitude (°) et le deuxième en coordonnées UTM; dans ce cas c'est la zone 35 Nord UTM (X et Y en mètre). Nous avons choisi la méthode d'interpolation dite méthode le plus proche voisin et nous avons produit le MNA-ERS1/2-95. Suite au nombre élevé des points, nous avons eu des problèmes pour le choix de la méthode d'interpolation car l'exclusion avec d'autres méthodes d'interpolation demande beaucoup de mémoire et des machines plus puissantes.

Les figures suivantes (n° 4 et 5) montrent le MNA-ERS1/2-95 réalisé avec de vue 3D, avec ou sans effets d'ombres ainsi que la région de Berca (zone des volcans de boue (voir figure n° 6).

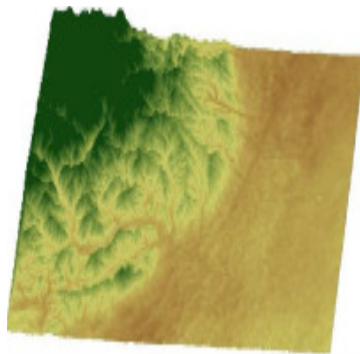


Fig. 4. MNA réalisé à partir du couple tandem ERS1/2-95 (vue en 3D, résolution 20m)

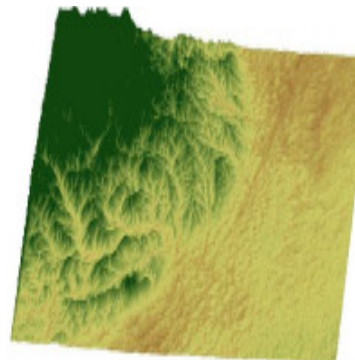


Fig. 5. MNA réalisé à partir du couple tandem ERS1/2-95 résolution 20m (vue en 3D avec utilisation d'effet d'ombre)

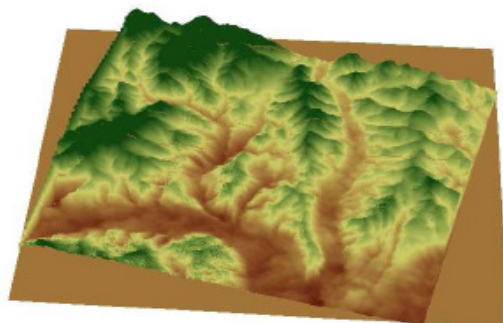
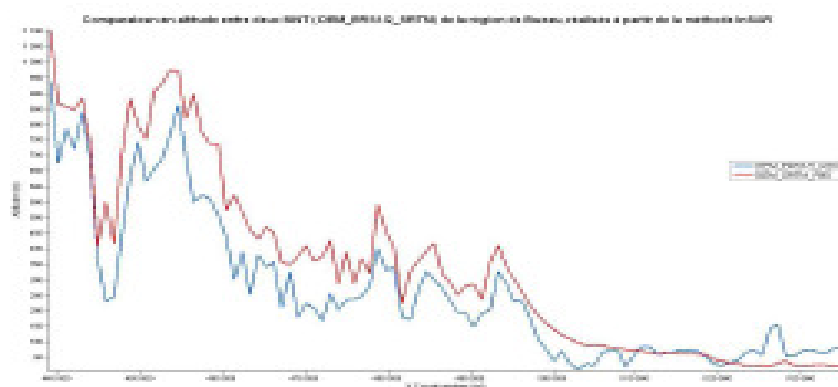


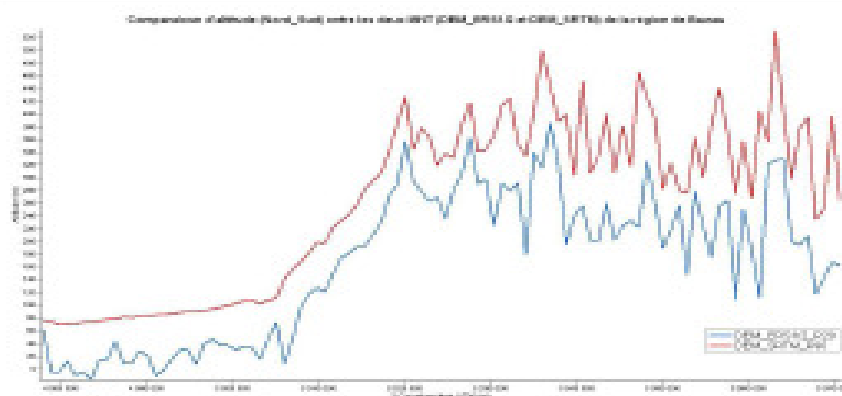
Fig. 6. MNA-ERS1/2-95 de la zone de Berca (volcans de boue) région de Buzău (résolutions 20m)

II.3.11. La comparaison du MNA-ERS1/2 avec le DEM_SRTM

Pour bien illustrer le résultat obtenu, nous avons effectué des graphes de comparaison entre des profils des altitudes du MNA-ERS1/2 réalisé et le DEM-SRTM de la même scène (voir *graphes n° 8 et 9*). Les deux graphes suivants montrent la comparaison entre un DEM-SRTM (2000) de résolution 90 m (rééchantillonnée de 20 m) avec le MNA-ERS1/2 réalisé (1995) dans les deux directions (X et Y). Cette comparaison montre une différence de quelques dizaines à quelques mètres que l'on peut considérer ici comme résultat optimal.



Graph 8. Montre la différence en altitudes entre un DEM SRTM de resolution 90 m avec le DEM ERS1/2 réalisé à partir d'un couple tandem avec une résolution 20 m dans l'axe Ouest-EST



Graph 9. Montre la différence en altitudes entre un DEM SRTM de resolution 90 m avec le DEM ERS1/2 réalisé à partir d'un couple tandem avec une résolution 20 m, dans l'axe Nord-Sud

Enfin, on peut considérer que les résultats obtenus par l'interférométrie InSAR pour les couples tandem sur la région de Buzău sont d'une bonne précision par rapport à la complexité géomorphologique de la zone d'étude et de son étendue (100 km x 100 km).

III. Analyse des résultats

III.1. Estimation de l'allongement du trajet de l'onde dû aux effets atmosphériques

Entre les deux passages du satellite, les conditions atmosphériques ne sont pas forcément identiques. Ce changement de conditions influe sur la phase qui est l'une des composantes de l'image radar. Nous avons vu que la phase peut être décomposée en trois termes principaux :

$$\varphi(p)_{re\acute{c}ue} = \varphi(p)_{propre} + \varphi(p)_{trajet} + \varphi(p)_{bruit}$$

Les conditions atmosphériques agissent surtout sur le terme $\varphi(p)_{trajet}$ et donc sur la différence de phase ; donc on peut modeler la phase liée au trajet par :

$$\varphi(p)_{trajet} = \varphi(p)_{traj-opt} + \varphi(p)_{atm}$$

Avec : $\varphi(p)_{traj-opt}$: Phase liée au trajet optique de l'onde ; $\varphi(p)_{atm}$: Phase liée au retard de l'onde par l'atmosphère.

Les effets atmosphériques qui se trouvent dans les interférogrammes ne peuvent pas être supprimés comme dans le cas des franges orbitales ou topographiques.

$$\delta\varphi_{atm1} = \frac{4\pi}{\lambda} \delta r_1, \quad \delta\varphi_{atm2} = \frac{4\pi}{\lambda} \delta r_2$$

Dans le cas multi-passes du satellite (deux acquisitions à dates différentes) la différence de phase atmosphérique n'est pas nulle à cause de la variation de l'indice de réfraction entre les deux acquisitions :

$$\Delta\delta\varphi_{atm} = \delta\varphi_{atm1} - \delta\varphi_{atm2} = \frac{4\pi}{\lambda} (\delta r_1 - \delta r_2) \neq 0$$

L'allongement peut se résumer comme l'addition d'un terme dit hydrostatique qui ne prend pas en compte la présence de vapeur d'eau dans l'atmosphère traversée et d'un terme dit humidité [D. RAUCOULES, 1997].

L'allongement **Hydrostatique** est proportionnellement lié à la pression (P):

$$\delta Al_{hyds} \approx 0,0022768 \frac{P_0}{1 - 0,00028H - 0,00266 \cos 2\varphi} \quad [\text{G. ELGERED}, 1993].$$

Où : H : Altitude du point (km) ; φ : Latitude du point.

Les zones à fortes différences d'altitudes sont sensibles à ce phénomène d'allongement ; pour les zones de haute montagne, la pression peut varier de 1/3 à cause de la topographie, l'allongement peut atteindre 75 cm.

L'allongement lié à l'**Humidité** dépend de : (i) la température moyenne ; (ii) la pression partielle en vapeur d'eau (mbar) ; (iii) la compressibilité inverse de la vapeur d'eau.

$$\delta Al_{humd} \approx (1 + 6.10^{-5} T_m).0,3754. \int \frac{e}{T^2} Z_w^{-1} ds ; \quad \text{où } T_m = \frac{\int \frac{e}{T} Z_w^{-1} ds}{\int \frac{e}{T^2} Z_w^{-1} ds} ;$$

Avec : $T_m (k)$: Température moyenne ; Z_w^{-1} : Compressibilité inverse de la vapeur d'eau ; e : Pression partielle en vapeur d'eau (mBar).

Cet allongement peut atteindre des valeurs de 1 m et il est variable en fonction des lieux et du temps, à cause de la forte inhomogénéité de la teneur en vapeur d'eau dans l'atmosphère.

La phase atmosphérique peut être exprimée en ajoutant le terme de la phase liée au volume rempli de gouttelettes d'eau ($\varphi(p)_{liquid}$) :

$$\varphi(p)_{atm} = \varphi(p)_{iono} + \varphi(p)_{hydro} + \varphi(p)_{humd} + \varphi(p)_{liquid} \quad [\text{MOISSEEV et HANSSEN, (2003)}]$$

Avec : $\varphi(p)_{trop}$: Phase liée à la troposphère ; $\varphi(p)_{hydro}$: Phase hydrostatique ; $\varphi(p)_{humd}$: Phase liée à l'humidité.

Dans l'interférométrie les allongements sont dus à la pression qui est due à la topographie (effet spatial et non pas temporel), ce qui est facilement modélisable; une correction peut être effectuée. Il est intéressant d'obtenir des informations météorologiques sur la zone de façon à écarter les jeux de données pouvant être altérées par ce phénomène. Il faut noter que la troposphère et l'ionosphère représentent une grande homogénéité la nuit que le jour en raison

de l'absence de rayonnement solaire, ce qui pousse à s'intéresser aux acquisitions ascendantes (mesures nocturnes).

Comme nous avons vu que l'atmosphère provoque un retard de l'onde radar, nous avons essayé de calculer pour chaque point ci-dessous (voir *tableau n° 4*), l'allongement dû à l'humidité et à l'hydrostatique. Nous avons pris des points dans les trois parties qui caractérisent cette zone d'étude et nous avons calculé les allongements appropriés à partir des formules décrites ci-dessus. La *figure n° 7* montre la localisation et la répartition de ces points d'échantillonnage choisis pour le calcul et l'estimation des allongements dus aux effets atmosphériques.

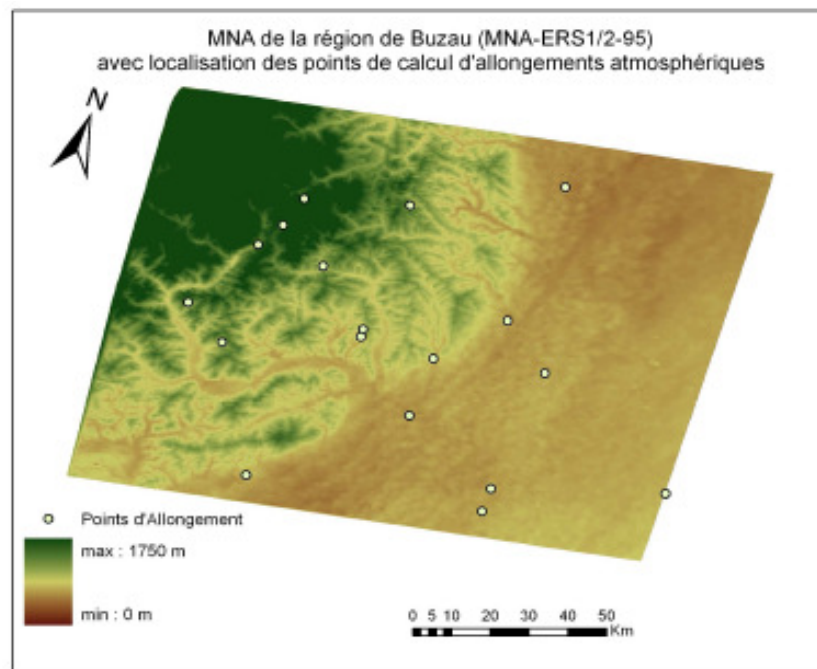


Fig. 7. Localisation des points pour le calcul de l'allongement Allongement hydrostatique (Al Hydrs) et Allongement de l'humidité (Al_Humd).

III.1.1. Allongement de l'humidité (Al-Humd)

L'allongement dû à l'humidité est le même pour toutes les acquisitions. Il est de l'ordre de 0,37m et la différence est de l'ordre du centimètre (voir *tableau n° 3*).

Tableau 3

Allongement du à l'humidité

Dates	P (mb)	T (C°)	Al Humd (m)
28/05/1995	1008,6	23,5	0,37545293
29/05/1995	1007,2	23,8	0,37545361

Al_Humd : Allongement de l'humidité.

III.1.2. Allongement hydrostatique (Al-Hydrs)

L'allongement hydrostatique est de l'ordre de 2,5 à 3 m sur les Subcarpates. Il est à peu près le même pour toutes les deux acquisitions et la différence est de l'ordre du centimètre. Au dessus des Carpates, il est de l'ordre de 2,70 à 3,50 m. Une différence d'altitude de quelques centaines de mètres est traduite par une dizaine de centimètres d'allongement hydrostatique. Au dessus des principales villes situées entre les glacis et la plaine, il est presque stable. Il est de l'ordre de 2,30 m. Par contre, au dessus des villes situées à la limite entre les Carpates et les Subcarpates, comme Nehoiu, il est estimé entre 2,30 à 2,50 m. Au dessus de la plaine, l'allongement hydrostatique est de l'ordre de 2,30 à 2,60 m (voir *tableau n° 4*).

Tableau 4

Points d'échantillonnage pour estimer l'allongement atmosphériques

N°	NOM	Lat (°)	Long (°)	Altitude (m)	Al Hydrs (m)	
					28/05/1995	29/05/1995
1	VOLCAN NORD	45,358209	26,712274	329	2,52255118	2,51904972
2	VOLCAN SUD	45,33975	26,70689	310	2,50800189	2,50452063
3	VILLE BUZĂU	45,15081	26,819824	96	2,35534777	2,3520784
4	CĂLMĂȚUI	44,963828	27,4151123	28	2,31215662	2,3089472
5	CĂLMĂȚUI SUD	44,975699	27,00972	53	2,32843149	2,32519948
6	POGOANELE	44,922005	26,988657	61	2,33436537	2,33112513
7	FOCȘANI	45,699471	27,182371	55	2,32628057	2,32305155
8	RÂMNICU-SĂRAT	45,378797	27,048659	121	2,37077538	2,3674846
9	FUNDENI	45,287987	26,87551	174	2,4081808	2,4048381
10	BĂLĂCEANU	45,252215	27,13525	66	2,33440146	2,33116116
11	MIZIL	45,008811	26,440118	121	2,3738791	2,37058401
12	NEHOIU	45,422437	26,305264	365	2,55048619	2,54694596
13	PĂNĂTĂU	45,326534	26,385325	412	2,58883738	2,58524391
14	SUBCARPAȚI-1	45,655336	26,820853	761	2,9085611	2,90452383
15	CARPAȚI-1	45,510307	26,618975	616	2,76615602	2,76231642
16	CARPAȚI-2	45,671137	26,575527	1214	3,46536527	3,46055512
17	CARPAȚI-3	45,560749	26,468435	1263	3,5382293	3,53331802
18	CARPAȚI-4	45,608783	26,52673	1125	3,33949266	3,33485723

Al Hydrs : Allongement hydrostatique.

Donc on peut dire que l'allongement hydrostatique global de toutes les acquisitions ne dépasse pas les 4 m dans toute la zone d'étude que se soit la partie du relief ou la plaine.

Une étude détaillée faite sur trois sites en Inde pour mesurer les effets atmosphériques sur les MNA générés à partir du mode multi-passes en utilisant deux paires tandems, a montré que les effets atmosphériques affectent les mesures de 0,2 l à 1 m dans la région de Bhuj (région des plaines arides). Par contre, dans les régions de Mumbai (terrain accidenté, lacs et forêts) et Kolar (terrains agricoles, douces, ondulés et terres boisées) les effets atmosphériques étaient presque négligeables [K. S. RAO *et al.*, 2006]. Dans cette étude, nous avons pu estimer un seuil d'allongement moyen causé par les effets atmosphériques (humidité et hydrostatique) pour toute la scène par 4,5 m. C'est la valeur maximale que peut engendrer cet effet (atmosphérique) sur le trajet de l'onde radar dans cette zone de Buzău et pour ces deux acquisitions.

III.2. L'exactitude et la précision d'un MNA

La qualité d'un MNA dépend de sa capacité à atteindre l'objectif tracé pour son utilisation. Il existe plusieurs objectifs pour la réalisation d'un MNA, il y a où elle nécessite un MNA précis d'autres grossier. Dans le cas où le MNA réalisé pour servir à atteindre trois objectifs : (1) Objectif géomorphologique consiste à créer une carte de pentes, associée à des images d'amplitude, composite colorée et des images de cohérence; cet objectif ne demande pas une grande précision altimétrique, mais une plus grande résolution planimétrique. (2) Utilisation pour éliminer les franges topographiques dans l'étude d'interférométrie différentielle; cet objectif demande, en préférence, une meilleure précision altimétrique, mais un MNA grossier peut être utilisé et donné des résultats. (3) Le troisième objectif c'est de faire la comparaison et la soustraction avec d'autres MNA comme le DEM-SRTM, ce qui demande une bonne précision altimétrique.

A partir de ce principe, pour qualifier un MNA, il faut distinguer entre l'exactitude et la précision d'un MNA. La différence entre les deux termes se résume sur les sources de décalage qui résultent entre le MNT de référence et le MNA réalisé. Les deux termes englobent l'erreur aléatoire imprévisible qui peut-être estimée par plusieurs répétitions de mesures. Par contre, l'exactitude inclut les erreurs systématiques, les erreurs grossières, les erreurs aléatoires, etc. Après l'élimination de ces erreurs, les termes exactitude et précision ont la même signification ce qui laisse l'utilisation du terme précision à l'écart type et à l'erreur moyenne quadratique (EMQ).

Dans le cas d'évaluation d'un MNA à partir d'un MNT de référence et si on prend la différence d'altitude (Δh_p) entre les deux pour chaque pixel :

$$\Delta h_p = h_p - H_p^{Réf}$$

L'erreur moyenne quadratique (EMQ) peut s'écrire pour un nombre de pixels (N) de la façon suivante :

$$EMQ = \sqrt{\frac{\sum_{p=(1,1)}^{p=(n,n)} \Delta h_p^2}{N}}$$

Où : Δh_p : Ecart altimétrique entre les deux altitudes ; $H_p^{Réf}$: Altitude de référence du pixel (p) ; h_p : Altitude du MNA réalisé du même pixel (p).

La précision pour une carte d'élévation est représentée par l'erreur moyenne quadratique de l'ensemble des altitudes de la base de données par rapport au DATUM et qui ne doit pas dépasser le tiers de l'équidistance ($\frac{1}{3} Equid$) pour les points de détail et le sixième de l'équidistance ($\frac{1}{6} Equid$) pour les points de cotés [A. KHALDI et A. ZAZA, 2000]. Si on prend un MNA de résolution 20 m, la précision doit être comprise entre 3 et 6 m.

III.3.1. Evaluation et précision du résultat

Afin d'évaluer nos résultats, il faut noter que nous avons travaillé sur une zone caractérisée par trois parties de morphologies différentes : (1) Zone plate (plaines) ; (2) Zone de reliefs modérés orientée vers le radar (intermédiaire) ; (3) Zone de forts reliefs.

La précision du MNA réalisé a été comparée avec un DEM SRTM de résolution 90 m et avec des points de mesures par GPS sur le terrain. Nous avons constaté qu'il n'y avait pas de décalage entre les deux MNA. Les deux MNA ont une ressemblance presque identique sauf que la résolution du SRTM est moins grande (90 m). Par contre, celle de MNA-ERS1/2 est de 20 m. Dans ce cas, un pixel du DEM-SRTM englobe 4 pixels du MNA-ERS1/2, ce qui implique que les erreurs horizontales du MNA-ERS1/2 sont les mêmes que celles du DEM-SRTM.

Le MNA-ERS1/2-95 réalisé est d'un apport important. La qualité des résultats est très bonne vu la morphologie de la zone d'étude. Il constitue une donnée pour les géomorphologues qui s'intéressent aux risques géomorphologiques comme les glissements de terrain ainsi que les coulées de boue qui dépendent des degrés d'inclinaison des pentes.

III.3.1.1. Précision horizontale

La résolution du MNA réalisé est de 20 m sachant qu'une bonne précision horizontale du radar est beaucoup plus facile à accomplir que pour les systèmes optiques [B. RABUS et al., 2003]. Le contrôle avec des points GPS et le calage avec le DEM-SRTM nous a ramené à estimer l'erreur par 20 m de l'ordre de la cellule de résolution.

III.3.1.2. Précision verticale

La précision verticale globale est estimée à 17 m pour toute la scène (100 x 100 km). Il faut noter que la précision est différente dans les trois parties de la scène (Plaine, Intermédiaire et Reliefs) : (1) zone 1 : Partie plaine (Plate), la précision est environ en moyenne entre 2 et 5 m ; (2) zone 2 : Partie intermédiaire (centre), la précision est environ en moyenne entre 5 et 15 m ; (3) zone 3 : Partie de reliefs (haute), la précision dépasse en moyenne les 35 m, étant difficile à estimer (varie beaucoup d'un pixel à un autre). Si on divise la scène imagée en trois, nous obtiendrons 1/3 Plaine, 1/3 intermédiaire et 1/3 Reliefs. La précision globale est donc de l'ordre de 17 m.

III.3.2. Les sources d'erreurs

Les erreurs de précision qui ont affecté le MNA résultant sont dues aux : (1) principalement, aux changements des conditions atmosphériques entre les deux passages des satellites. L'allongement atmosphérique pour les fréquences ERS et ENVISAT peut aller jusqu'à 5 m dans ce cas d'étude ; (2) phénomènes Overlay et Occultation qui sont : (i) sensibles aux zones montagneuses ; (ii) zone d'occultation (pente descendante; angle avec l'horizontal $\alpha > 90^\circ$) traduit une perte d'information (trou dans le MNA, pas une fausse information), phénomène moins fréquent que l'overlay ; (iii) l'overlay fournit une information fausse, sachant que dans ce cas les pentes dans la zone des glissements de terrain inférieures à 23° sont plus fréquentes que des pentes supérieures à 67° . Par contre, dans la zone de coulées de boue, les pentes les plus fréquentes sont entre 50° et 80° ; (3) sans oublier les erreurs associées au filtrage utilisé pour faciliter le déroulement de la phase qui dans ce cas sont estimées (filtre Goldstein de degré compris entre 0,2 et 1), à 2 m dans les zones plates et à 4 m environ dans les reliefs ; (4) erreurs des positions exactes des orbites pour chaque pixel de la scène imagée ; (5) erreurs dues au déroulement de phase verticalement et horizontalement (dans les deux directions X, Y) ; (6) erreurs dues à la Baseline ; (7) erreurs dues à la coregistration entre les images (Maitre et Esclave) ; (8) erreurs éventuelles de dérives instrumentales.

Il faut noter que ces erreurs peuvent affecter la précision verticale, mais pas beaucoup la morphologie.

III.3.3. Avantages

La réalisation du MNA par interférométrie radar SAR offre les avantages suivants : (1) l'étendue du MNA réalisé est de 100 km x 100 km ; (2) ce MNA a une résolution de 20 m considérée importante ; (3) le temps de la réalisation du MNA offre un gain de temps important en comparaison à d'autres méthodes ; (4) qualité du MNA ; les points GPS relevés et le DEM-SRTM nous ont permis d'estimer la précision globale pour une grande échelle (100 x 100 km); elle est de 20 m en horizontal et de 17 m en vertical ; (5) ce MNA sera amélioré au fur et à mesure sur les zones considérées intéressantes par segmentation ; (6) il sera utilisé comme un MNA de référence pour des petites zones après amélioration en qualité, dépendant de la connaissance de la zone à petite échelle; par exemple, 10 x 10 km car la bonne résolution le permet ; (7) la morphologie que représente ce MNA-ERS1/2 reflète la réalité du terrain, ce qui est intéressant pour l'étude des risques géomorphologiques comme les glissements de terrain et le suivi des coulées de boue malgré l'existence des imprécisions altimétriques.

IV. Conclusion

L'objectif principal de la présente étude était d'analyser l'apport de la technique d'interférométrie InSAR pour la réalisation du MNA de la région de Buzău. L'interférométrie radar InSAR exploite l'information de la différence de phase de l'onde radar entre deux acquisitions différentes. Elle est considérée comme la meilleure solution en termes de compromis entre couverture globale et précision. Son succès dépend beaucoup de la géométrie de prise de vue et essentiellement des caractéristiques physiques de la surface imagée qui peuvent perturber la phase entre deux périodes d'acquisitions. Nous avons testé cette technique dans une région très complexe subcarpatique de Buzău considérée comme une zone très humide et caractérisée par des terrains très accidentés avec différentes pentes ainsi qu'une végétation prépondérante. Ces trois caractéristiques ne sont pas favorables car ils introduisent une incohérence du signal électromagnétique. Cette technique donne de bons résultats dans les zones relativement plates. Nous avons réalisé un MNA à partir des images radars SAR du couple tandem des satellites ERS-1 et ERS-2. Grâce à ce traitement réalisé, nous avons pu obtenir un modèle numérique d'altitude (MNA) de la région de Buzău avec une résolution de 20 m, une étendue de 100 km x 100 km et une précision globale de moins de 17 m. La rapidité de la réalisation du MNA sur des grandes étendues, la bonne résolution et la précision (terrain plat < 3 m) représentent un acquis pour les études géomorphologiques.

Grâce aux couples tandems et l'intervalle d'1 jour, la décorrélation temporelle est réduite et se focalise sur les effets atmosphériques. Ce couple

tandem est utilisé pour la réalisation des MNA, la détection des faibles déformations produites et la modélisation des artefacts atmosphériques. L'un des problèmes rencontrés dans cette étude concernant l'interférométrie radar InSAR est relatif aux effets d'atmosphère où ils affectent la précision. Nous avons pu constater que ces effets atmosphériques sont dominants dans l'interférogramme réalisé surtout dans la partie plate qui se distingue parfaitement de la partie haute, sachant que les acquisitions diurnes sont plus affectées par les effets atmosphériques à cause des effets d'ionisation ; il faudrait donc utiliser des acquisitions nocturnes.

Bien qu'un MNA réalisé par InSAR soit moins précis que ceux réalisés à partir de Lidar ou le levé terrain, la méthode InSAR reste concurrentielle à cause notamment du grand gain de temps et la précision relative comparée aux surfaces balayées (plusieurs centaines de kilomètres avec une précision de l'ordre de quelques mètres). Cependant il peut donner une grande étendue et restitue parfaitement la géomorphologie du terrain, ce qui est utile et bénéfique pour l'étude géomorphologique. Le couple tandem représente jusqu'à présent le seul produit radar SAR exploitable pour la réalisation des MNA.

Malgré ces contraintes et les nombreuses difficultés nous avons pu utiliser l'interférométrie InSAR sur une zone complexe qui n'a pas encore été étudiée par ces outils. Nous avons pu enfin élaborer un MNA assez précis. Le retour au terrain nous a permis de conforter la plupart des résultats avancés.

V. Remerciements

Nous remercions l'AUF pour le financement du projet de recherche partagée sur l'apport de l'imagerie satellitale multi résolution dans le suivi des phénomènes de glissements de terrain en Roumanie, qui a permis d'acquérir les images utilisées dans le présent travail. Nous remercions aussi le Professeur Gh. VIȘAN pour les sorties sur le terrain et la collecte des points GPS.

BIBLIOGRAPHIE

- ASKNE, J. I. H., DAMMERT, P. B. G., ULANDER, L. M. H., SMITH, G., 1997, « C-Band Repeat Pass Interferometric SAR Observations of the Forest », *IEEE Transactions on Geoscience et Remote Sensing*, 35 (1), pp. 25-35, 1997.
- BAMLER, R., SCHÄTTLER, B., 1993, « SAR Data Acquisition and Image Formation », in Schreier, G. (ed.), *SAR Geocoding: Data and Systems*, Wichmann, Karlsruhe, pp. 53-102, 1993.
- BOWRING, B. R., 1985, « The Accuracy of Geodesic Latitude and Height Equations », *Survey Review Directorate of Overseas Surveys*, vol. 28, no 218, pp. 202-206, 1985.
- CHEN, C. W., ZEBKER, H. A., 2000, « Network Approaches to Two-Dimensional Phase

- Unwrapping: Intractability and Two New Algorithms », *Journal of the Optical Society of America A*, vol. 17, pp. 401-414 (2000).
- CHEN, C. W., ZEBKER, H. A., 2001, « Two-Dimensional Phase Unwrapping With Use of Statistical Models for Cost Functions in Nonlinear Optimization », *Journal of the Optical Society of America A*, vol. 18, pp. 338-351, 2001.
- CHEN, C. W., ZEBKER, H. A., 2002, « Phase Unwrapping for Large SAR Interferograms: Statistical Segmentation and Generalized Network Models », *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 40, pp. 1709-1719, 2002.
- CURLANDER, JOHN C., MCDONOUGH, ROBERT N., 1991, « Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing », John Wiley et Sons, Inc, New York, 1991.
- ELGERED, G., 1993, « Tropospheric Radio-Path Delay from Ground-Based Microwave Radiometry. Reprint from Atmospheric Remote Sensing by Microwave Radiometry », Chapter no 5, John et sons INC.
- GOLDESETIN, R. M., WERNER, C. L., 1998, « Radar Interferogram Filtering for Geophysical Applications », *Geophysical Research Letters*, 25(21), pp. 4035-4038, 1998.
- GRAHAM, L.C., 1974, « Synthetic Interferometry Radar for Topographic Mapping », *Proc. IEEE*, 62, pp. 763-768, 1974.
- GUARINO, C. R., 1994, « A Novel Method for Two-Dimensional Phase Estimation », USA 0-7803-1497-2/94, IEEE, pp. 2279-2281, 1994.
- HANSEN, R., BAMLER, R., 1999, « Evaluation of Interpolation Kernels for SAR Interferometry », *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 37 (1), pp. 318-321 (part 1), 1999.
- KAMPES, BERT, 1999, « DORIS », *Delft Object-Oriented Radar Interferometric Software, Manual and Technical Documentation*, Delft Institute for Earth-Oriented Space Research (DEOS), Delft University of Technology, 1999.
- KHALDI A., ZAZA, A. 2000, « La qualité des modèles numériques de terrain générés par corrélation automatique », *Thèse d'obtention de diplôme d'ingénieur en Topographie*, Dép. de topographie, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II (IAV), Rabat, Maroc, 2000.
- MASSONNET, DIDIER, ELACHI, CHARLES, 2006, « High-Resolution Land Topography », *B C. R. Geoscience* 338 (2006) 1029-1041, <http://france.elsevier.com/direct/CRAS2A/>, Internal Geophysics, 2006.
- MOISSEEV, D., HANSEN, R. F., 2003, « Influence of Hydrometeors on InSAR Observations », in *IGRSS 2003, IEEE, International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proc.*, Toulouse, France, (21-25), I-D12-08, July 2003.
- RABUS, BERNHARD, EINEDER, MICHAEL, ROTH ACHIM, BAMLER, RICHARD, 2003, « The Shuttle Radar Topography Mission - a New Class of Digital Elevation Models Acquired by Spaceborne Radar », *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 57 (2003) 241-262, 2003.
- RAUCOULES, DANIEL, 1997, « Utilisation de l'interférométrie ROS (ERS1) pour la construction de MNT en zone montagneuse, application au Grand Caucase », *Thèse. Mémoire Géosciences-Montpellier*, no. 3, Université Montpellier II, 1998-7558, L3.31-M3-364, 1997.
- RAO, K. S., AL-JASSAR, H. K., PHALKE, S., RAO, Y. S., MULLER, J.-P., LI, D. Z., 2006 « A Study on the Applicability of Repeat-Pass SAR Interferometry for Generating DEMs Over Several Indian Test Sites », *International Journal of Remote Sensing*, vol. 27, no. 3, 10 February 2006, 595-616.
- RENAUDIN, E., 2000, « Evaluation of DEMs from SAR Interferometry and Spot Stereoscapy for Remote Sensing », *Thèse pour obtention de diplôme d'ingénieur Topographe*, Institut de Géodésie et de photogrammétrie, Institut fédéral de technologie, Zürich, Suisse, 2000.
- RODRIGUEZ, E., MARTIN, J. M., 1992, « Theory and Design of Interferometric Synthetic Aperture Radars », *IEE Proceedings-F*, 139(2):147.159, 04/1992.
- SYLVANDER, SYLVIA, GIGORD, PATRICK, 1995, « Exploitation tridimensionnelle d'images ERS1 », *Bulletin I S.F.P.T.*, no. 138, pp. 40-53, 1995-2.

- SCHWÄBISCH, MARKUS, 1995, « Die SAR-Interferometrie zur Erzeugung digitaler Geländemodelle », Forschungsbericht, 95-25, Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt, Oberpfaffenhofen, 07/1995.
- TOUTIN, T., GRAY, L., 2000, « State-of-the-Art of Elevation Extraction from Satellite SAR Data », *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 55, no. 1, pp. 13-33, 2000.
- ZEBKER, H. A., GOLDSTEIN, R. M., 1986, « Topographic Mapping from Interferometric Synthetic Aperture Radar observations », *J. Geophysical Research.*, 91, pp. 4993-4999, 1986.
- ZEBKER, H. A., WERNER, C., L., ROSEN, P. A., HENSLEY S., 1994, « Accuracy of Topographic Maps Derived from ERS-1 Interferometric Radar », *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions*, vol. 32, pp. 823-836, Jul. 1994.
- *** « Logiciel de traitement Interférométrie DORIS (Delft Object-Oriented Radar Interferometric Software) », est un *Logiciel développé*, par Delft University of Technology, <http://www.enterprise.geo.tudelft.nl/doris/>