

L'association d'images diachroniques avec un MNA pour une meilleure interprétation des changements de paysage dans la région de Buzău (Roumanie)

K. HACHEMI¹, A. ABDELLAOUI², F. GRECU³, A. OZER⁴, M. VISAN³

Résumé. L'imagerie radar est un moyen actif permettant d'observer le territoire par tout temps indépendamment de toutes conditions météorologiques. L'image radar d'amplitude apporte, à partir de la radiométrie, des informations sur les caractéristiques diélectriques (humidité du sol, cibles métalliques, ...) et géométriques (pente locale, rugosité, orientation, ...) de la surface imagée. Les images diachroniques (composition colorée) sont le résultat d'une comparaison entre des images d'amplitude permettant d'avoir des informations du changement de la radiométrie entre différentes dates. Le MNA (Modèle Numérique d'Altitude) représente une donnée complémentaire importante pour l'analyse du territoire. L'association des deux informations (relief à partir du MNA et images amplitudes avec leurs produits dérivés), permet alors d'avoir une meilleure interprétation de l'évolution du paysage dans la région.

L'objectif de notre travail consiste à confronter ces deux informations pour interpréter les changements entre plusieurs dates d'acquisition des images d'amplitude radar (RSO) dans la région de Buzau (Roumanie), région très complexe, très humide et caractérisée par des reliefs et des terrains très accidentés avec différentes pentes ainsi qu'une végétation prépondérante. Ces trois caractéristiques rendent le problème plus complexe car ils compliquent l'interprétation du signal électromagnétique rétrodiffusé.

Nous avons pu obtenir différents résultats : (1) La réalisation des images d'amplitude et diachroniques avec une résolution de 20 m sur la période 1995 – 2005. Nous avons produit 12 couples de composition colorée de différents intervalles des satellites ERS et ENVISAT, 6 couples des images ERS entre 1995 et 1999 et 6 couples des images ENVISAT entre 2004 et 2005. (2) La réalisation d'un modèle numérique d'altitude (MNA-ERS1/2-95) de la zone d'étude avec une résolution de 20 m sur une étendue de 100 km x 100 km et une précision globale de moins de 17m. La réalisation du MNA de Buzau est obtenue à partir du couple tandem (ERS-1/ERS-2) des 28 et 29 mai 1995. L'association des images diachroniques d'amplitude avec le MNA-ERS1/2-95 nous a permis d'observer les changements de paysage. Ces changements de paysage ont des origines différentes à cause des trois types du terrain : **(a) pour la partie plate** (plaines), les changements sont dus à : (i) l'humidité -pluies- (périodes humides et périodes sèches); (ii) culture de champs (rugosité : l'intervalle de temps dépasse les 4 semaines); (iii) la végétation. **(b) pour la partie intermédiaire** (reliefs modérés, pentes orientées vers le radar), les changements sont dus aux : (i) différence de l'humidité et la végétation; (ii) petites différences d'angle d'incidence entre les différentes prises de vue surtout pour les pentes orientées vers la visée du capteur. **(c) pour la partie haute à l'ouest** (forts reliefs, reliefs accidentés), les changements sont dus aux : (i) petites distorsions qui sont dues aux différentes géométries d'acquisitions des images (prises de vues); (ii) l'humidité et la végétation. Cette association entre un MNA et des images de composition colorée (radiométrie) ne demande pas une grande précision altimétrique. Par contre, elle demande une plus grande résolution planimétrique.

Ces résultats permettent de souligner les points suivants : (1) L'image radar d'amplitude, représente mieux la surface plate (plaine de Buzau) que la surface accidentée (collines subcarpatiques et Carpates). (2) Elle donne pour la région haute des distorsions qui sont proportionnelles aux degrés des pentes. Plus la pente est raide plus la distorsion est grande. (3) Par contre, sur la zone des plaines de Buzau, la distorsion est moins importante sauf pour la distorsion qui résulte des dimensions de résolution qui n'est pas exactement identique dans les deux directions.

Mots clefs: Diachronique, Amplitude, MNA, Buzau, Radar, RSO, Composition colorée.

I. Introduction

La zone de Buzau (Roumanie) de par ses caractéristiques géologiques, géomorphologiques, géodynamiques, tectoniques et climatiques, est soumise à plusieurs risques naturels qui modifient

continuellement le paysage. Ces changements sont peu ou pas observables à partir des images satellitaires optiques. Le radar à Synthèse Ouverture (RSO) est alors un moyen efficace, rapide et peu coûteux pour étudier ces phénomènes, grâce à son fonctionnement (tout temps) et sa capacité à

exploiter l'onde radar à partir de plusieurs méthodes. Cette mesure permet d'obtenir deux informations : **(1) Energétique (radiométrie)** : Puissance émise et reçue (*grâce à l'amplitude de signal*). **(2) Temporelle (phase)** : Distance entre le capteur radar et la cible (*grâce au paramètre de la phase de l'onde enregistrée*). L'amplitude caractérise la réflectivité du pixel pour l'onde hyper fréquence. Elle est exploitable directement et comparable à l'image optique. Elle est en relation directe avec l'état de surface ; ainsi les surfaces rugueuses et humides sont représentées par une forte radiométrie ; au contraire les surfaces lisses et arides apparaissent avec des valeurs faibles de radiométrie. Les images radars d'amplitude ont été utilisées dans plusieurs domaines et à différents objectifs. Elles ont montré leurs utilités et efficacités dans : le suivi de la déforestation, la surveillance de la fonte des glaces, la lithologie dans l'environnement polaire (P. BUDKEWITSCH et al., 1996 a, b) ; l'étude et la détection des phénomènes méso-échelle en océanographie (P. LABORDE et M. DEVEAUX, 1996) ; la reconnaissance des formes, l'aménagement du territoire (J. P. RUDANT et al., 1996) ; la classification des cultures (J. BRUNIQUEL et A. LOPÈS, 1994 ; A. LOPÈS et F. SÉRY, 1997) ; la cartographie géologique (V. SINGHROY et R. SAINT-JEAN, 1999), la cartographie structurale (S. WADE, et al., 2001) ; la détection et la caractérisation des nappes d'hydrocarbure dans les mers et les océans (G. MERCIER et al., 2004) ; la cartographie du dommage urbain du aux catastrophes naturelles ou industrielles, les changements des limites côtières (K. BÂ et al., 2007) ; la cartographie de l'extension de l'inondation au moment de l'acquisition (P. A. BRIVIO et al., 2002). Les images de composition colorée ont été utilisées pour l'identification des caractéristiques optimales pour la surveillance de l'inondation dans des zones urbaines (A. MCMILLAN et al., 2006).

Les images de composition colorée d'amplitude radar (diachroniques) constituent un moyen très efficace pour le suivi dans le temps de plusieurs phénomènes naturels. Dans le cas des phénomènes hydrologiques (les crues, les inondations, etc.), elles permettent d'évaluer l'impact des inondations sur le territoire. Cependant une image satellitaire seule ne permet pas de comprendre pourquoi certaines zones sont inondées et d'autres pas ; elle ne permet pas de faire de prédictions quant aux terrains qui seront envahis par les crues et d'identifier des zones qui peuvent servir pour une évacuation rapide. Le MNA (Modèle Numérique d'Altitude) est utilisé dans la compréhension et la prédiction des phénomènes

d'inondation. Il permet de comprendre le fait que certains endroits sont inondés et d'autres pas et permet aussi d'avoir une idée sur les terrains qui seront envahis par les crues à l'aide de la géomorphologie du terrain. Il permet aussi d'identifier les zones d'évacuation. Bien que les images satellitaires aient montré leur efficacité dans le suivi des phénomènes hydrogéologiques et l'évaluation de l'impact des crues et les inondations elles seront plus efficaces en les associant à des MNA. Dans le domaine de la géomorphologie, ces images radars (diachroniques) permettent de détecter des zones humides susceptibles de connaître des glissements ; cependant, on ne peut pas prévoir avec exactitude le sens du glissement ni le volume des blocs déplacés ; le sens du glissement pourra être déduit à partir d'une carte de pentes, elle-même produite dérivée des MNA. L'association de l'image amplitude avec un MNA a montré déjà son efficacité pour déterminer l'humidité de surface du sol en zones arides et semi arides (D. TROUFLEAU et al. 1994). Les images radars peuvent donc détecter les zones humides sensibles aux mouvements du terrain (glissements de terrain, coulées de boue, ...); en les combinant avec les MNA, on peut prévoir avec précision la direction des glissements ou les coulées de boue dans la région. Ils donnent aussi plus d'information avec les cartes géologiques.

Le MNA joue un rôle très important dans différents domaines surtout dans le domaine de la gestion des risques naturels. Il représente une donnée très importante pour comprendre la géomorphologie d'une région. Par contre, une image amplitude radar permet d'avoir les informations instantanées de la région imagée et comme le radar c'est un outil à tout temps et toutes conditions météorologiques, la composition colorée permet d'avoir une information de changement de paysage entre deux dates différentes. La combinaison de ces deux informations, la géomorphologie du terrain, plus particulièrement du pixel, confrontée aux images de compositions colorée à des différentes périodes traduites par le changement de la radiométrie du pixel entre deux dates, permet d'avoir une meilleure interprétation de paysage dans la région.

Les objectifs de cette étude sont de montrer l'utilité de : (1) l'imagerie radar RSO (SAR) pour l'analyse des changements du paysage entre différentes dates d'acquisitions dans la région subcarpatique de Buzau ; (2) la technique d'interférométrie InSAR pour la réalisation du MNA de Buzau ; (3) l'association d'images diachroniques avec un MNA pour une meilleure

interprétation des changements de paysage dans la région de Buzau (Roumanie). Le but principal de notre travail consiste à confronter ces informations pour bien interpréter les changements entre plusieurs dates d'acquisition des images radar dans la région de Buzau (Roumanie). Pour atteindre cet objectif, nous allons réaliser un MNA de 20 m de résolution et des images de composition colorée de 20 m de résolution des différentes dates entre 1995 à 1999 pour les images ERS et 2004 à 2005 pour les images ENVISAT.

II. La zone d'étude et données utilisées

II.1. Localisation et caractéristiques de la zone d'étude

La zone d'étude se trouve dans les Carpates Orientales extérieures, précisément dans la Courbure Subcarpatique (Figure 1). Cette situation est le siège de fréquents phénomènes comme les coulées de boue, les inondations, les séismes et les glissements de terrain. La vallée de Buzau (exactement dans l'axe anticlinal où se localise la combe) est aussi connue par la présence des volcans de boue qui sont dus à la remontée des gaz en provenance des couches pétrolifères d'une profondeur allant de 200 à 300 m. Cette zone d'étude se délimite par les coordonnées géographiques suivantes : latitude du sud au nord : $44,813^{\circ}/45,926^{\circ}$; longitude de l'ouest à l'est : $26,089^{\circ}/27,614^{\circ}$. Cette zone d'étude se caractérise aussi par : (1) une zone plate, qui est représentée par

les plaines de Buzau située à l'est ; altitudes moyennes entre 30 à 80 m ; (2) une partie haute représentée par les Subcarpates et les Carpates à l'ouest, et qui se caractérise par : (i) une partie intermédiaire avec des altitudes allant de 300 à 400 m ; (ii) une partie haute avec des altitudes supérieures à 1000 m.

Les trois zones de reliefs du terrain de la zone d'étude peuvent avoir différentes réponses du signal radar rétrodiffusé vers le capteur : (1) un terrain plat correspond aux plaines de Buzau à l'est ; (2) une zone intermédiaire pentes orientées vers la visée du radar ; (3) une zone très accidentée entre les subcarpatiques et les Carpates à l'ouest.

II.2. Le choix de la zone d'étude

Le choix de la zone d'étude est justifié par la fréquence élevée des risques naturels ainsi que par les déformations qui peuvent être produites par ces différents phénomènes. Cette zone est riche de plusieurs types de déformations : déformations liées aux glissements de terrain accélérés par les inondations et les tremblements de terre ; déformations liées aux coulées de boue ; déformations liées aux séismes ; déformations liées aux petites activités bouillonnantes dues aux gaz des volcans de boues ; déformations liées à la subsidence urbaine suite au pompage d'eau et à l'exploitation pétrolière ; déformations liées à la subsidence de la plaine Calmatui-Buzau où la profondeur de la nappe phréatique est de 1 à 2 m.

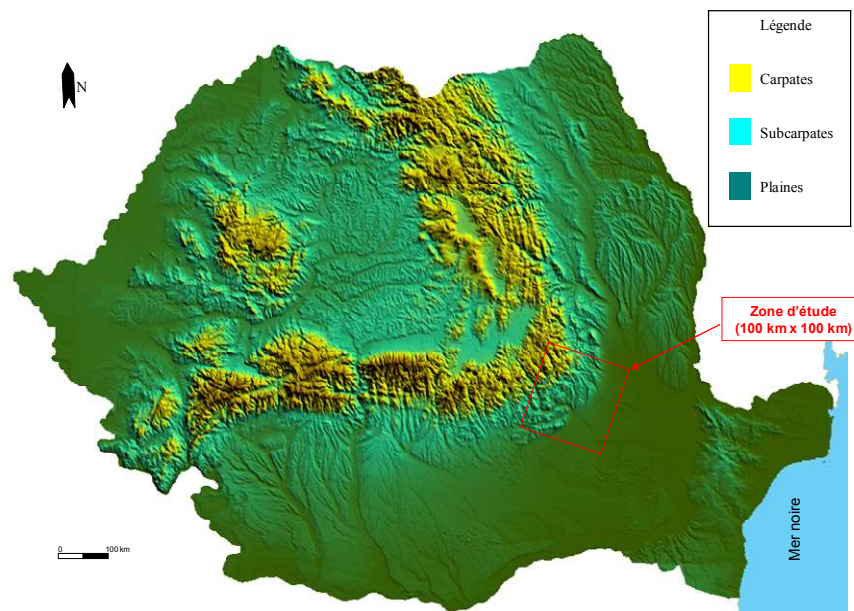


Fig. 1 : La zone d'étude (Localisation et caractéristiques de la zone d'étude)

II.3. Les données utilisées

Les données utilisées sont des données Radar (Image RSO (SAR)) de types SLC (Single Look Complex) données Complexe Mono Vue, des satellites : ERS-1, ERS-2 et ENVISAT. Ces données SLC utilisées, ont été traitées par compression d'impulsion en direction radiale en distance et par la synthèse d'ouverture RSO (SAR) en direction azimutale à partir du même centre de traitement et d'archivage (UK-PAF). L'acquisition des images est descendante (acquisition de jour) avec polarisation V/V et bande «C » de longueur d'onde 5,56 cm.

Pour cette étude, nous avons utilisé 8 images radar RSO (SAR) SLC :

- 4 images mono vues complexes (ERS) : une image du satellite ERS-1 et trois images du satellite ERS-2, où 1 couple tandem (ERS-1 et ERS-2). Les dates d'acquisition de ces images ERS sont respectivement : 28 et 29 mai 1995, 17 Juin 1996 et 29 novembre 1999 ;
- 4 images ENVISAT : deux en 2004 (octobre et décembre) et deux en 2005 (janvier et avril).

Ces images ont respectivement 26460 lignes et 4900 colonnes pour ERS et 26890 lignes et 5178 colonnes pour ENVISAT. Elles couvrent une surface de (100km x 100km) avec une résolution de 4m (en azimut) et 20m (en distance).

Le tableau suivant (n°1) synthétise les caractéristiques de ces images.

Tableau n°1:

Images Amplitude			
Dates	Orbites	DATUM	Centre image (Lat. / Long)
ERS			
28-05-1995	20221	GEM6	(45,377/ 26,802)
29-05-1995	548	GEM6	(45,387/ 26,807)
17-06-1996	6059	GEM6	(45,386/ 26,806)
29-11-1999	24095	GEM6	(45,385/ 26,832)
ENVISAT			
18-10-2004	13774	WGS84	(45,404/26,895)
27-12-2004	14776	WGS84	(45,419/ 26,904)
31-01-2005	15277	WGS84	(45,434/26,911)
28-05-1995	16279	WGS84	(45,460/ 26,916)

III. Méthodologie et résultats

La méthodologie optée dans cette étude est basée sur les trois étapes suivantes : (1) La réalisation des images d'amplitude et diachroniques (compositions colorées) avec une résolution de 20 m à des différentes dates d'acquisition (1995-2005), montrant les changements de paysage ; (2) La réalisation d'un modèle numérique d'altitude (MNA) de la zone d'étude avec une résolution de 20 m sur une étendue de 100 km x 100 km et une précision globale de moins de 17m ; (3) L'association des images diachroniques avec le MNA-ERS1/2-95 réalisé. Grâce aux traitements réalisés, nous avons pu obtenir différents résultats.

III.1. Composition colorée

Nous avons produit 12 couples de composition colorée de différents intervalles avec la résolution 20 m des satellites (ERS et ENVISAT) (voir figures n°2 et 3).

Nous avons réalisé les compositions colorées par couple en affectant le vert à l'image la plus ancienne et le rouge à l'image la plus récente. Nous obtenons ainsi la couleur de chaque pixel de l'image résultante par la combinaison suivante :

$$c_{(p)} = a_{(p)} [V] + b_{(p)} [R].$$

Où $a_{(p)}$ et $b_{(p)}$ représente respectivement des valeurs dépendant de l'intensité du signal du pixel pour la composante la plus ancienne et la plus récente.

Ainsi pour un pixel apparaissant en noir dans l'image 1 (intensité du signal égale à 0) et en blanc dans l'image 2 (intensité du signal égale à 1), nous avons :





$$a_{(p)} = 0 \text{ et } b_{(p)} = 1 \text{ d'où } c_{(p)} = [R] \rightarrow \text{le pixel apparaît « rouge »}$$

Le tableau suivant (n°2) résume les cas extrêmes pouvant être obtenus :

Tableau n°2 :

Les cas extrêmes des couleurs résultantes de la composition colorée			
a\b	0	$0 < \beta < 1$	1
0	Noir		Rouge
$0 < \alpha < 1$	Couleurs intermédiaires entre le vert et le rouge		
1	Vert		Jaune

La légende suivante montre les clés d'interprétation de ces images de composition colorée.

<i>Clés d'interprétation des images diachroniques</i>	
	<i>Signal faible en 1er date et fort en 2ème date</i>
	<i>Signal fort en 1er date et faible en 2ème date</i>
	<i>Signal fort dans les deux dates (pas de changement)</i>
	<i>Signal faible dans les deux dates (pas de changement)</i>

- **Images diachronique (composition colorées) ERS :**

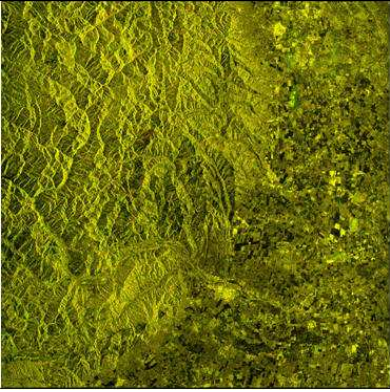
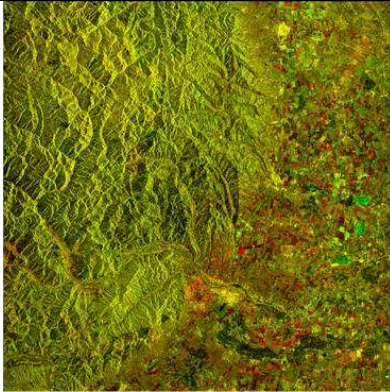
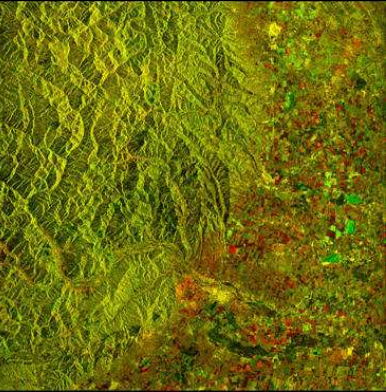
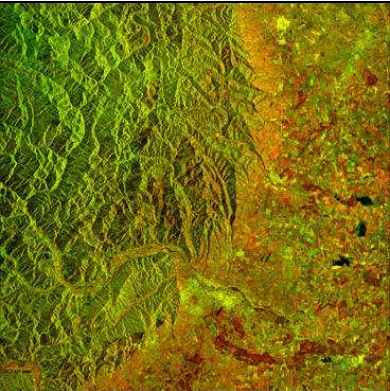
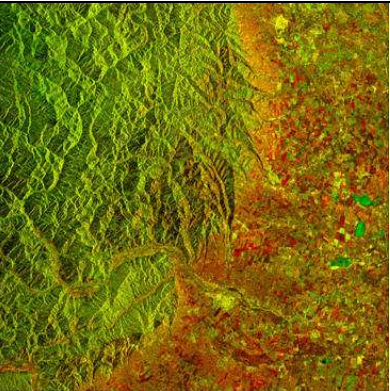
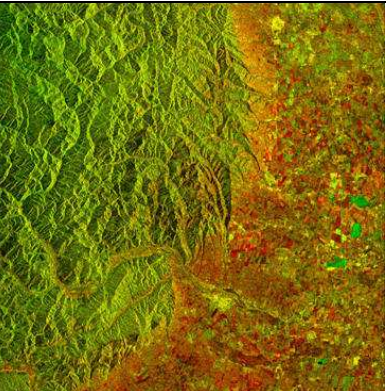
Images de composition colorées de résolution 20 m de tous les couples traitées :		
Couples ERS :		
		
a) Couple tandem 28/05/1995 et 29/05/1995 des orbites (20221 et 548), d'1 jour d'intervalle.	c) Couple 29/05/1995 et 17/06/1996, des orbites (548 et 6059), de 385 jours d'intervalle.	d) Couple 28/05/1995 et 17/06/1996 des orbites (20221 et 6059), de 386 jours d'intervalle.
		
b) Couple 17/06/1996 et 29/11/1999, des orbites (6059 et 24095), de 1260 jours d'intervalle.	e) Couple 29/05/1995 et 29/11/1999, des orbites (548 et 24095), de 1645 jours d'intervalle.	f) Couple 25/05/1995 et 29/11/1999, des orbites (20221 et 24095), de 1646 jours d'intervalle.

Fig. 2

- Images diachronique (composition colorées) ENVISAT :

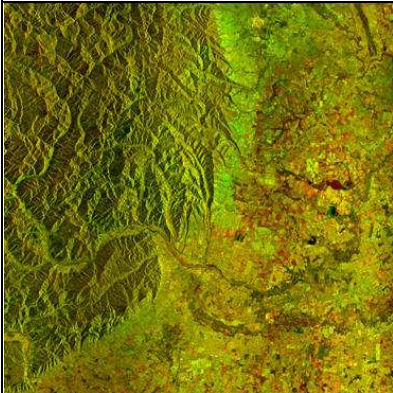
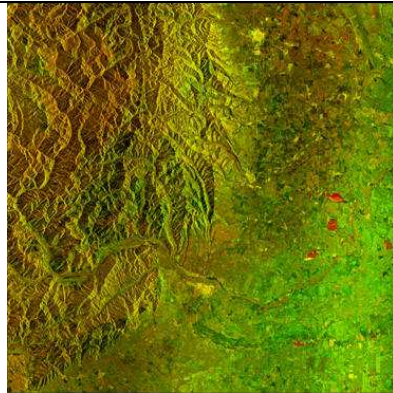
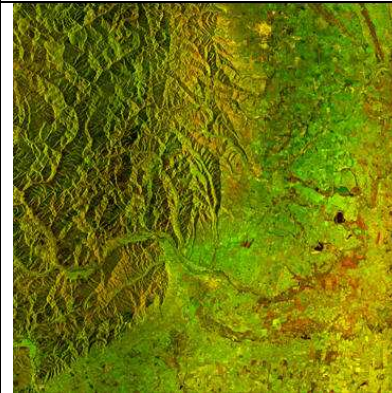
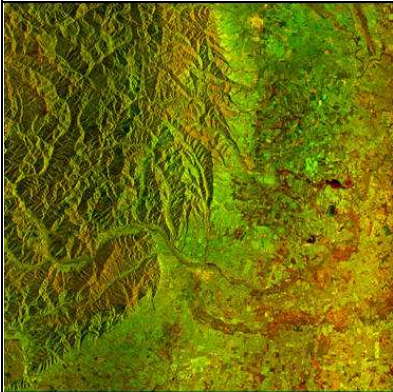
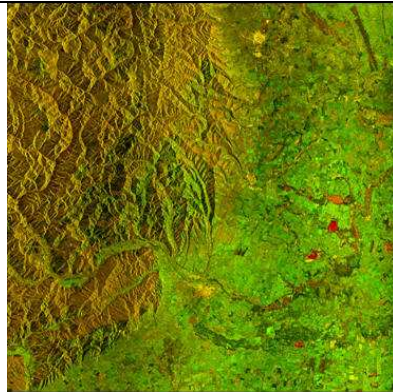
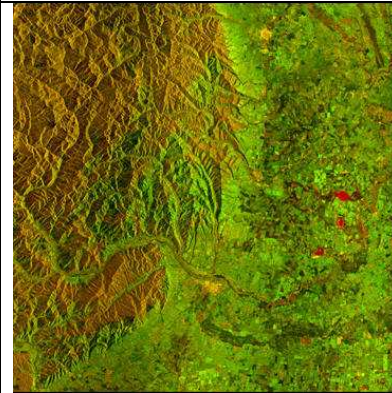
Couples ENVISAT :		
		
a) Couple 18/10/2004 et 27/12/2004, des orbites (13774 et 14776), de 70 jours d'intervalle.	b) Couple 31/01/2005 et 11/04/2005, des orbites (15277 et 16279), de 70 jours d'intervalle.	e) Couple 27/12/2004 et 31/01/2005, des orbites (14776 et 15277), de 35 jours d'intervalle.
		
c) Couple 18/10/2004 et 31/01/2005, des orbites (13774 et 15776), de 105 jours d'intervalle.	d) Couple 27/12/2004 et 11/04/2005, des orbites (14776 et 16279), de 105 jours d'intervalle.	f) Couple 18/10/2004 et 11/04/2005, des orbites (13774 et 16279), de 175 jours d'intervalle.

Fig.3

III.2. Réalisation du MNA de la région de Buzău

III.2.1. La technique utilisée

Les MNA peuvent être produits par plusieurs techniques : levés topographiques directs sur le terrain (grande précision, très couteuse et énormément de temps de réalisation) ; LIDAR (Light Detection and Ranging) plus précise (20 à 60 cm) et très couteuse ; photogrammétrie ; stéréoscopie (deux images optiques) ; radargrammétrie (deux images radars) ; radarclinométrie (une image radar) ; interférométrie radar (InSAR) etc. C'est la technique de l'interférométrie topographique (InSAR) qui a été utilisée pour l'obtention du Modèle Numérique d'Altitude (MNA) de cette

région de Buzău. C'est pour la réalisation d'un MNA (Modèle Numérique d'Altitude) que l'interférométrie radar RSO (InSAR) a été proposée pour la première fois par Graham (1974) ; elle a été relancée en 1986 par ZEBKER et GOLDSETEIN (1986). 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 couronnée 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 (résolution 30 m).

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 configuration utilisée qui a servi à la génération du MNA (DEM) de Buzau 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», sa composante perpendiculaire 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. 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 alors utiliser deux scènes radar, avec des conditions de prises de vues les plus similaires possible. 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 (Voir figures n°4-a et 4-b). 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 (24h), 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.

III.2.2. La précision du MNA (MNA-ERS1/2-95) réalisé

Les MNA produits par Interférométrie InSAR ont généralement une bonne précision. La qualité d'un MNA produit à partir d'images ERS-1 peut atteindre une précision altimétrique de 3 m en moyenne quadratique. Cette précision est cependant conditionnée par les artefacts et la variation de cohérence [S. SYLVANDER et P. GIGORD, 1995]. Dans quelques régions (40 km x 40 km) de

l'Alaska et le Sud-Ouest des Etats-Unis, les précisions ont put atteindre moins de 5 m en utilisant également des données ERS-1 [H. A. ZEBKER et al., 1994]. Les MNA réalisés par l'interférométrie radar InSAR sont plus précis que les MNA obtenus par la méthode de stéréoscopie optique (images SPOT) (E. RENAUDIN, 2000). Les précisions peuvent aller 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 (T. TOUTIN et L. GRAY, 2000).

La réalisation du MNA de Buzau (Voir figures n°4-e et 4-f) est obtenue à partir du couple tandem ERS1/ERS-2 (28/29-05-1995). Ce couple a montré une meilleure cohérence dans l'ensemble de la scène imagée (Voir figure n°4-b). Il faut noter que la précision est différente dans les trois parties de la scène (Plaine, Intermédiaire et Reliefs) : (1) partie plaine (Plate), la précision est en moyenne entre 2 et 5 m ; (2) partie intermédiaire (reliefs modérés orientés vers le radar), la précision est en moyenne entre 5 et 15 m ; (3) partie de reliefs (haute), la précision a dépassé en moyenne les 35 m, elle est difficile à estimer (varie beaucoup d'un pixel à un autre). Si on divise la scène imagée en trois nous obtiendrons 2/3 Plaine, 1/3 intermédiaire et 1/3 Reliefs. La précision globale est donc de l'ordre de 17 m pour toute la scène (100 x 100 km).

Les sources d'erreurs sont dues principalement : (1) aux changements des conditions atmosphériques entre les deux passages des satellites où l'allongement dans ce cas ne dépasse pas les 4,5 m ; (2) aux 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 dans le cas des pentes supérieures à 67° ; (3) aux 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.

La figure n°4 présente les principaux produits d'interférométrie InSAR générés par le logiciel DORIS pour la réalisation du MNA de Buzau.

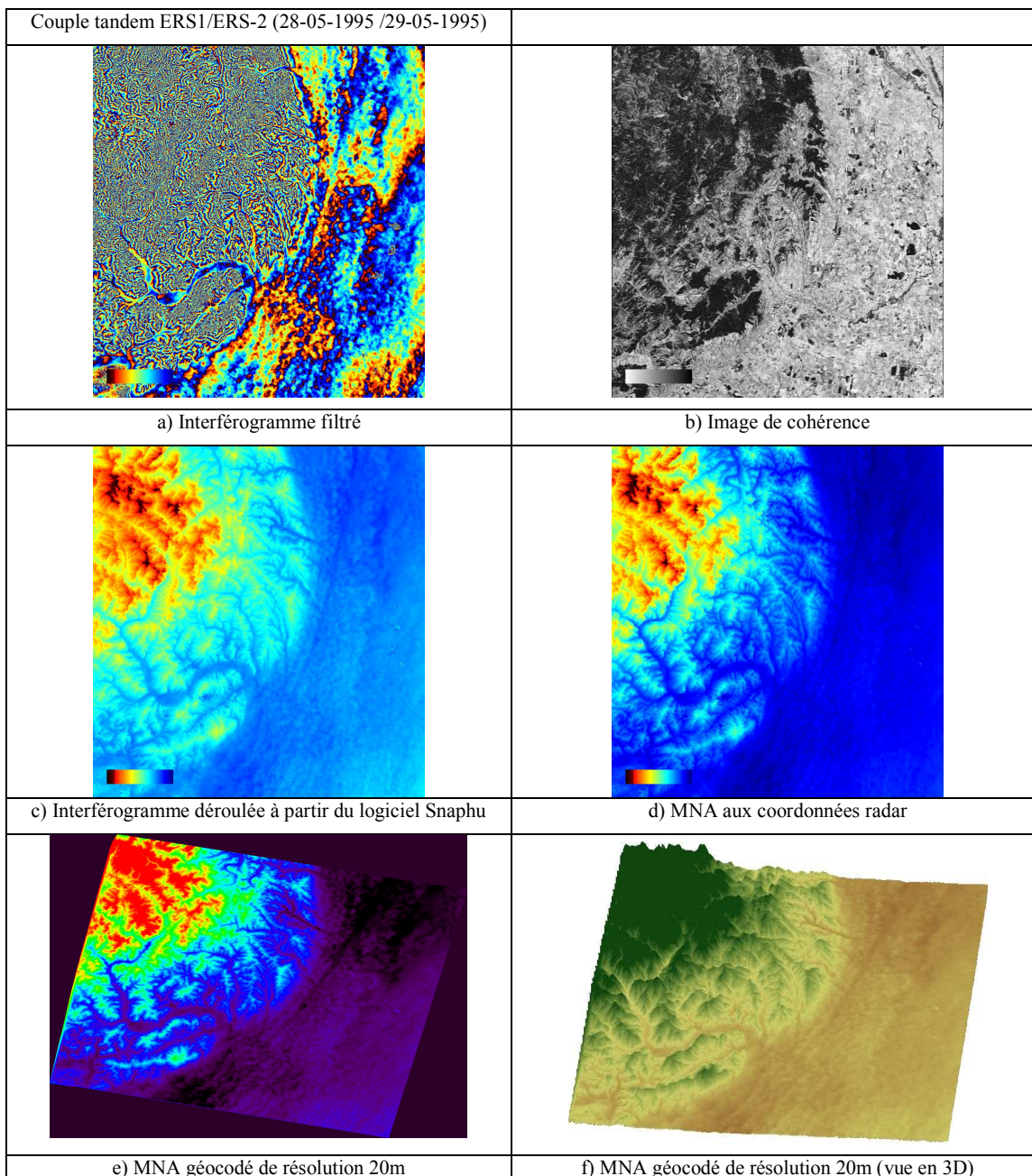


Fig. 4

III.3. Association des compositions colorées avec le MNA-ERS-1/2-95

Nous avons réalisé les compositions colorées par couple en affectant le rouge et le bleu à l'image la plus ancienne et le vert à l'image la plus récente. Nous obtenons ainsi la couleur de chaque pixel de l'image résultante par la combinaison suivante :

$$c_{(p)} = a_{(p)} [R+B] + b_{(p)} [V].$$

Où $a_{(p)}$ et $b_{(p)}$ représente respectivement des valeurs dépendant de l'intensité du signal du pixel

pour la composante la plus ancienne et la plus récente. La combinaison du Rouge et du Bleu donne le Violet.

Ainsi pour un pixel apparaissant en noir dans l'image 1 (intensité du signal égale à 0) et en blanc dans l'image 2 (intensité du signal égale à 1), nous avons :

$$a_{(p)} = 0 \text{ et } b_{(p)} = 1 \text{ d'où } c_{(p)} = [R+B] \rightarrow \text{le pixel apparaît « Violet »}$$

Le tableau suivant (n°3) résume les cas extrêmes pouvant être obtenus :





Tableau n°3

Les cas extrêmes des couleurs résultantes de la composition colorée			
a/b	0	$0 < \beta < 1$	1
0	Noir		Vert
$0 < \alpha < 1$	Couleurs intermédiaires entre le vert et le rouge		
1	Violet		Jaune

Nous avons associé les images de composition colorées (résolution 20 m) avec le MNA-ERS-1/2-95 (résolution 20 m) de tous les couples traitées (voir figure n°5 et 6). La légende suivante

montre les clés d'interprétation de ces images de composition colorée.

Clés d'interprétation des images diachroniques

-  Signal faible en 1er date et fort en 2ème date
-  Signal fort en 1er date et faible en 2ème date
-  Signal fort dans les deux dates (pas de changement)
-  Signal faible dans les deux dates (pas de changement)

- Les Couples d'images du satellite ERS

Couples ERS :

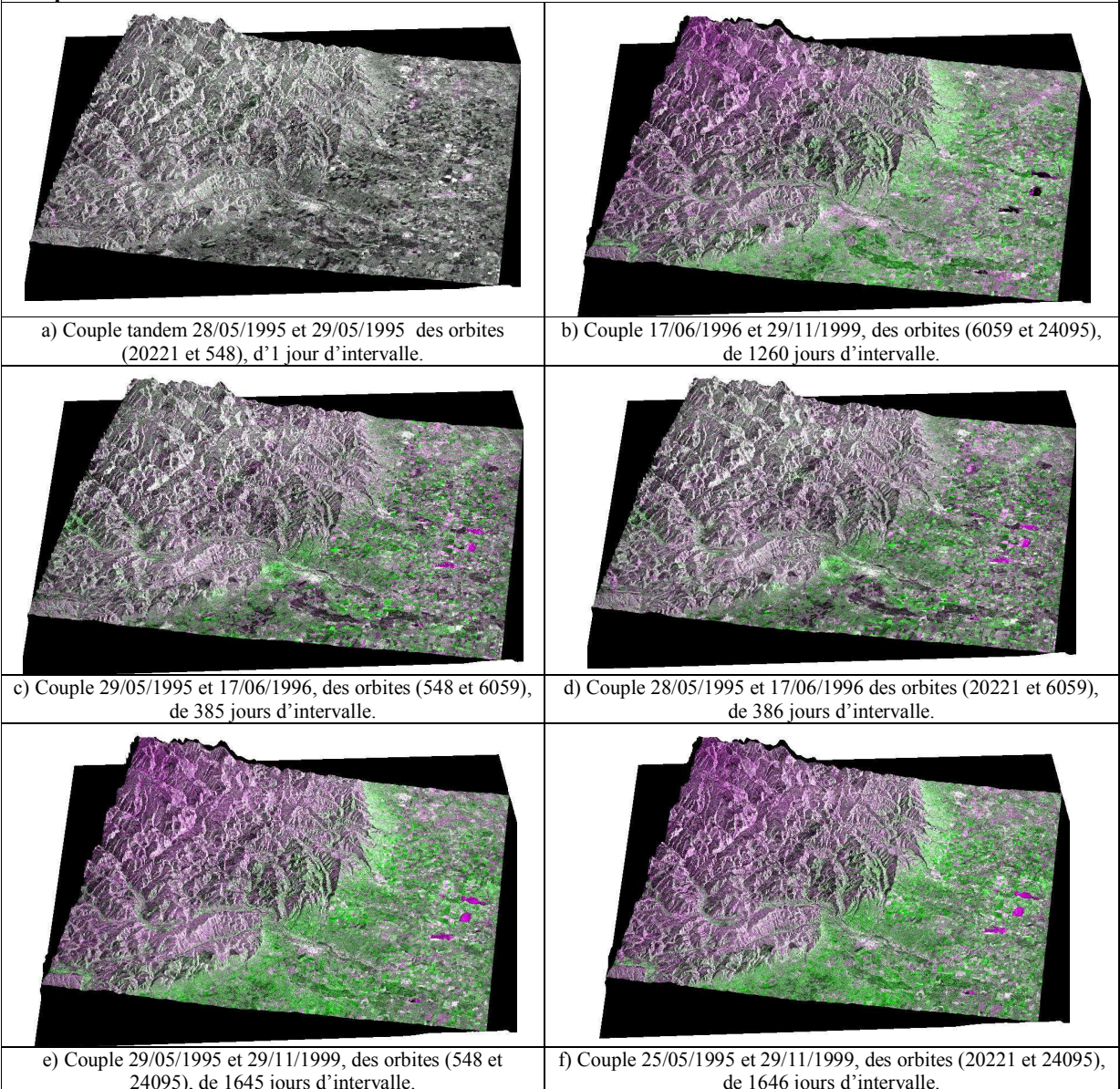


Fig. 5

- Les Couples d'images du satellite ENVISAT

Couples ENVISAT :

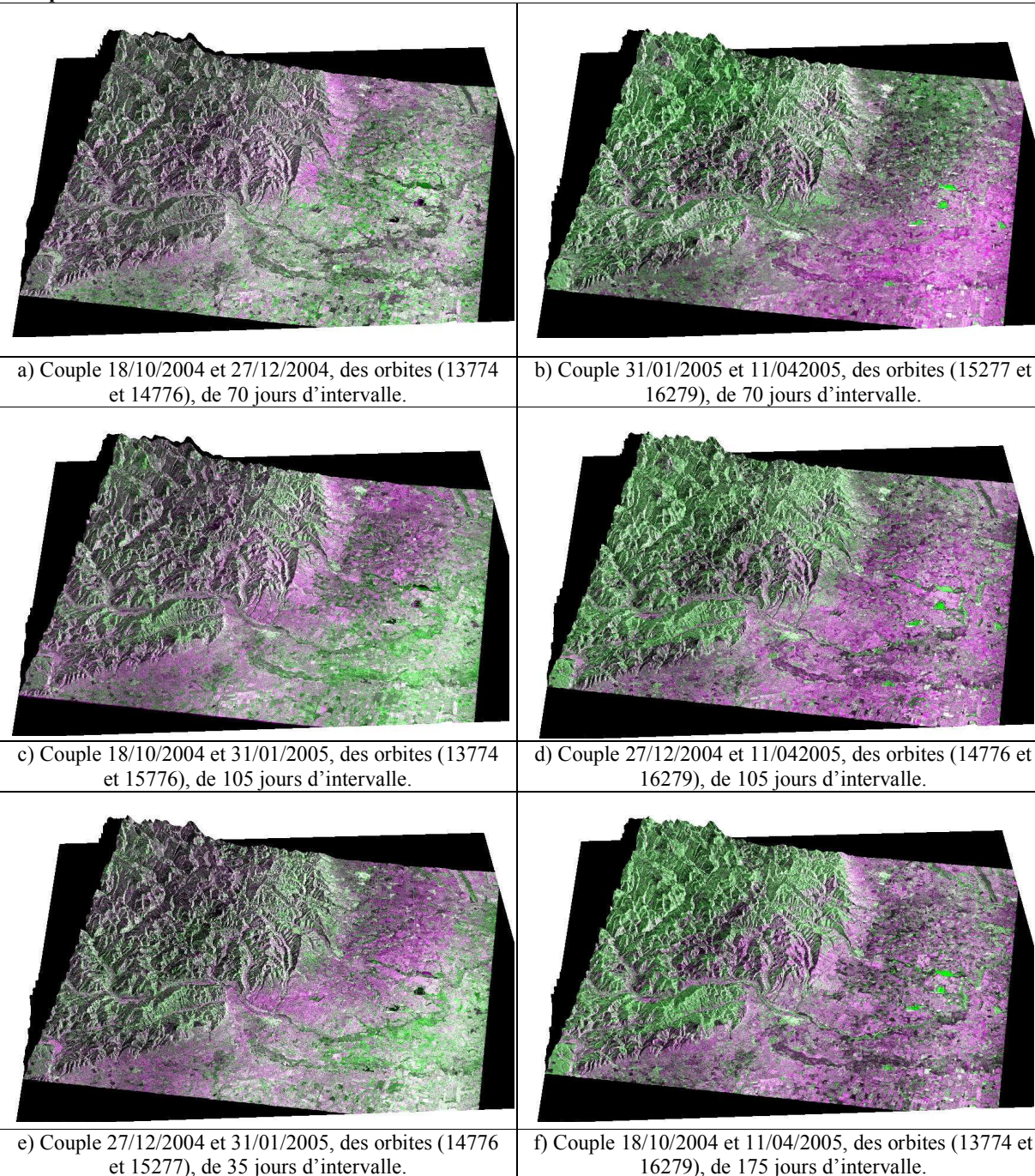


Fig. 6

IV. Interprétation et discussions

L'interprétation de ces images radar SAR nous a permis de distinguer nettement trois parties bien différenciées : une partie plate d'altitude allant de 30 à 80m (agriculture et foyers urbains), une partie intermédiaire d'altitude moyenne allant entre 300 et 400m (zone de glaciers avec une bonne réflexion suite

à leur orientation vers la visée du radar et leurs très faibles pentes ($\alpha < 23^\circ$) et une partie de relief d'altitude allant de 850 à 1500m (partie des Subcarpatés et Carpatés de Courbure de la région de Buzau). Cette partie comprend la limite entre les Carpatés de Courbure et les Subcarpatés, les deux volcans de boue (Paclele Mari et Mici) Sud et Nord, une faille, des zones de glissements de terrain,

et la rivière de Buzau au Sud des deux volcans de boues.

Les principaux éléments du paysage sont bien identifiés (Voir figure n°7). En zone de plaine, les lacs sont bien visibles, notamment quand ils sont remplis d'eau en absence de vent « fort » (apparence en noir, caractéristique d'une surface lisse). Les parcelles sont bien distinguées à cause de leur différence de rugosité. Les villes apparaissent en blanc traduisant une forte rétrodiffusion du signal (les coins sont très réflecteurs ainsi que les toits des maisons à cause du matériau de couverture). En zone de relief, il y a également une forte rétrodiffusion du signal ; on notera également la déformation de l'apparence du paysage : en particulier apparence d'un « cordon » en dessous de la région des volcans de boue.

Concernant le résultat d'association des compositions colorées avec le MNA-ERS-1/2-95 : l'image radar d'amplitude représente mieux la surface plate (Plaine de Buzau) que la surface accidentée (collines subcarpatiques et Carpates). Elle donne pour la région haute des distorsions qui sont proportionnelles aux degrés des pentes. Plus la pente est raide plus la distorsion est grande. Par contre, sur la zone des plaines de Buzau, la distorsion est moins importante sauf pour la distorsion qui résulte des dimensions de résolution qui n'est pas exactement identique dans les deux directions.

Les changements de paysage observés dans le terrain ont des origines presque différentes à cause des trois types du terrain imagé : dans la **partie plate** (plaines), les changements sont dus à : (1) humidité – pluies – (périodes humides et périodes sèches) ; (2) culture de champs (rugosité : l'intervalle de temps dépasse les 4 semaines) ; (3) végétation. Dans la **partie intermédiaire** (Reliefs modérés, pentes orientées vers le radar), les changements sont dus aux : (1) différences de l'humidité et la végétation ; (2) petites différences d'angle d'incidence entre les différentes prises de vue surtout pour les pentes orientées vers la visée du capteur. Dans la **partie haute** à l'Ouest (Forts reliefs, reliefs accidentés), les changements sont dus aux : (1) petites distorsions qui sont dues aux différentes géométries d'acquisitions des images (prises de vues) ; (2) l'humidité et la végétation.

Le principal but de la réalisation du MNA de Buzau c'était de l'associer avec des images de composition colorée (diachroniques). Cet objectif ne demande pas une grande précision altimétrique. Par contre, il demande une plus grande résolution planimétrique possible. La réalisation du MNA de Buzau a été obtenue à partir du couple tandem. Le seul couple qu'a montré une meilleure cohérence dans l'ensemble de la scène imagée (100 km x 100 km).

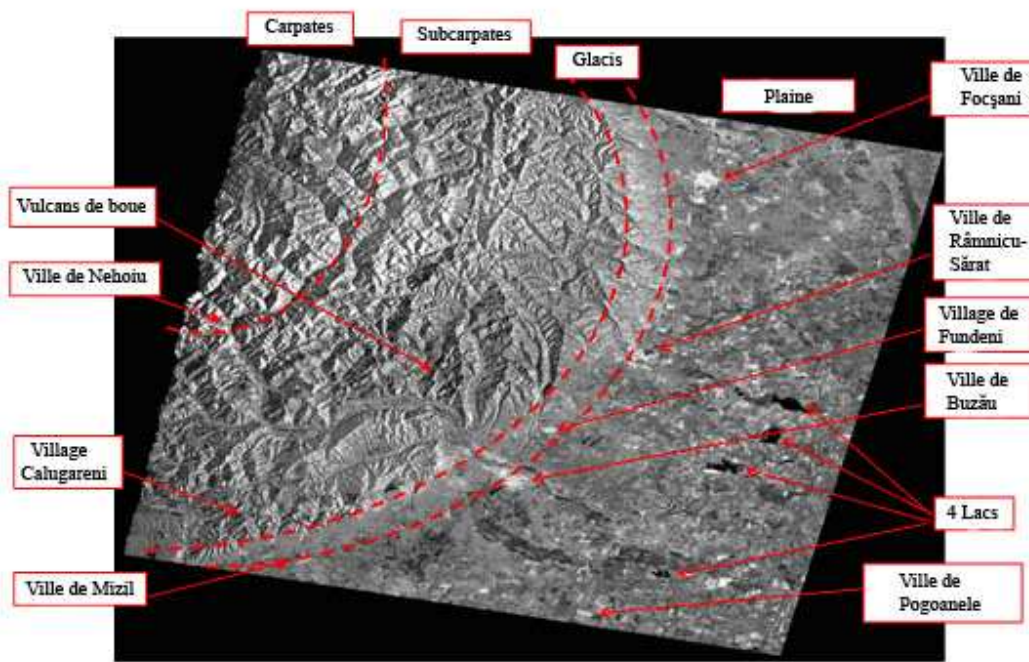


Fig.7: Image radar d'amplitude géoréférencée de la zone d'étude

Les avantages du MNA de Buzau (MNA-ERS-1/2-95) réalisé dans cette étude par la technique d'interférométrie (InSAR) sont : (1) le grand gain de temps de la réalisation du MNA qui offre un gain important en comparaison à d'autres méthodes ; (2) la précision relative comparée aux surfaces balayées (100 km x 100 km avec une précision de l'ordre de quelques mètres). Cette bonne résolution de 20 m et la précision (terrain plat < 5m) représentent un acquis pour les études géomorphologiques ; (3) ce MNA sera amélioré au fur et à mesure sur les zones considérées intéressantes par segmentation ; (4) 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 ; (5) 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.

V. Conclusion

L'objectif de ce travail était de montrer l'utilité de l'association des images diachroniques avec le MNA réalisé par la technique d'interférométrie (InSAR) pour l'analyse des changements du paysage dans la région subcarpatique de Buzau (Roumanie). Nous avons associé plusieurs couples d'images séparées par des intervalles de temps différents pendant lesquels nous avons essayé de détecter et d'interpréter les changements. Nous avons pour cela utilisé l'amplitude du signal radar rétrodiffusé entre différentes dates d'acquisitions des images des satellites ERS et ENVISAT. Nous avons produit des images composites associant des scènes séparées par des intervalles d'1 à 1646 jours.

Nous avons testé cette technique dans une région très complexe subcarpatique de Buzau. Cette région est considérée comme une zone très humide et caractérisée par des reliefs, par des terrains très accidentés avec différentes pentes ainsi qu'une végétation prépondérante. Nous avons pu détecter des changements de paysage et en interpréter les causes probables. Nous avons pu élaborer un MNA assez précis. L'analyse de la phase, nous a permis de constater que la phase atmosphérique est dominante

dans les interférogrammes réalisés, pour l'InSAR, les artefacts atmosphériques affectent la précision.

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. Bien que le 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). La qualité du 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 notre cas le MNA réalisé pour objectif géomorphologique consiste à être associé à des images d'amplitude, composite colorée, cet objectif ne demande pas une grande précision altimétrique mais demande une plus grande résolution planimétrique.

Du point de vue méthodologique, l'association entre l'image radar et le MNA a permis une meilleure visualisation de la réalité terrain et l'interprétation plus fine des résultats. On peut dire que *le radar reste un moyen très efficace pour ce genre d'étude en général. Son efficacité et son succès dépendent : (i) beaucoup de la géométrie de prise de vue (disponibilité des données présentant une bonne corrélation spatiale). (ii) essentiellement des caractéristiques physiques de la surface imagée qui peuvent perturber le signal entre deux périodes d'acquisitions.*

VI. Remerciement

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 risques naturels en Roumanie qui a permis d'acquérir les images utilisées dans le présent travail. Ces images ont été obtenues auprès de l'ESA par le Laboratoire du Professeur A. OZER (Université de Liège) dans le cadre d'un programme de recherche partagé entre les universités de Liège (Belgique), Paris-XII (France) et Bucarest (Roumanie).

REFERENCES

- BÂ KADER, WADE SOULEYE, NIANG ISABELLE, TRÉBOSEN HERVE, RUDANT JEAN-PAUL, 2007, «Cartographie Radar En Zone Côtière A L'aide D'images Multidates Rso D'ers-2 : Application Au Suivi Environnemental de la Langue de Barbarie et de L'estuaire du Fleuve Sénégal», Revue Télédétection, vol. 7, n° 1-2-3-4, pp. 129-141, 2007.

- BRIVIO A., COLOMBO R., MAGGI M., TOMASONI R., 2002, «Integration of remote sensing data and GIS for accurate mapping of flooded areas», in: International Journal of Remote Sensing, Volume 23, Issue 3 February 2002, pp. 429-441, 2002.
- BRUNIQUEL J., et LOPÈS A., 1994, «Analysis and Enhancement of multitemporal SAR data», Image and Signal Processing of Remote Sensing, 2315:342-353, 1994.
- BUDKEWITSCH Paul, D'IORIO Marc A., HARISSON J. Chris, 1996 «SAR Expressions of Geology in the Canadian Arctic», In: Proceedings for the 26th International Symposium on Remote Sensing of Environment / 18th Symposium of the Canadian Remote Sensing Society. du 25 au 29 mars 1996, Vancouver, pp. 88-91, 1996a.
- BUDKEWITSCH Paul, D'IORIO Marc A., HARISSON J. Chris, 1996 «Signatures radar en bande C des lithologies en environnement arctique: résultats préliminaires de l'Île de Bathurst (Nunavut)», In: Recherches en cours, Commission géologique du Canada, pp. 67-72, 1996b.
- 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.
- LABORDE Patrick, DEVEAUX Martine, 1996, « Etude des apports et limites du Radar à Ouverture Synthétique dans l'observation de l'océan à la Mésoéchelle à partir des images SAR ERS-1 recueillies lors de la campagne Sémaphore », Rapport d'étude, série Hydrographie, Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM), Février 1996, centre militaire d'Océanographie, Bureau de recherche et d'étude SHOM-Météo, Rapport d'étude n° 001/96, pages 40, 1996.
- LOPÈS A., et SÉRY F., 1997, « Optimal Speckle reduction for the production model in Multilook Polarimetric data and the complex Wishart distribution », IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 35(5): pp. 632-647, 1997.
- MCMILLAN A., MORLEY J. G., ADAMS B. J., CHESWORTH S., 2006, «Identifying Optimal SAR Imagery Specifications for Urban Flood Monitoring: A Hurricane Katrina Case Study», 4th International Workshop on Remote Sensing for Disaster Response, 2006.
- MERCIER Grégoire, DERRODEY Stéphane, PIECZYNSKI Wojciech, 2004, «Segmentation Multiéchelle de Nappes d'Hydrocarbure», Traitement du Signal, Vol. 21(4), 2004.
- RENAUDIN E., 2000, «Evaluation of DEMs from SAR interferometry and Spot stereoscopy for remote sensing», Thèse pour obtention de diplôme d'ingénieur Topographe, Institut de Géodésie et de photogrammétrie, Institut fédéral de technologie, Zürich, Suisse, 2000.
- RUDANT J.P., BALTZER F., LOINTIER M., MAÎTRE H., MOUGIN E., PENICAND C., PROST M., 1996, «Apport des images radar satellitaires ERS-1 et JERS-1 dans le domaine de la cartographie générale et thématique en contexte tropical humide», SFPT société Française de Photogrammétrie et Télédétection, (142):15-31 et 81-82, 1996.
- SINGHROY V., SAINT-JEAN R., 1999, «Effects of relief on the selection of RADARSAT-1 incidence angle for geological applications», Canadian Journal of Remote Sensing, Vol. 25, n°3, pp. 211-217, 1999.
- SYLVANDER Sylvia et GIGORD Patrick, 1995, «Exploitation tridimensionnelle d'images ERS1», Bulletin I.S.F.P.T., n° 138, pp. 40-53, 1995-2.
- TOUTIN T., et 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.
- TROUFLEAU D., AUDOIN A., VIDAL A., MORAN M.S., GOODRICH D.C., WASHBURN J., 1994, «Importance des corrections radiométriques dues au relief pour les données SAR du satellite ERS-1 : Applications à l'hydrologie », X^{ème} journées hydrologiques -Orstom, Septembre 1994, pp. 635-650.
- WADE SOULEYE, NDOYE AMINATA, MBAYE MASSAER, 2001, «Fusion d'images optique et radar : application à la cartographie du massif granitique de Bambadji (Falémé, Sénégal oriental)», Télédétection, 2001, Vol.2, n°2, pp. 119-127, 2001.
- ZEBKER H. A. et GOLDSTEIN R. M., 1986, *Topographic mapping from interferometric Synthetic Aperture Radar observations*. J. Geophysical. Research., 91, P. 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 Interférométrique DORIS (Delft Object-oriented Radar Interferometric Software) est un logiciel développé par Delft University of Technology. <http://www.enterprise.geo.tudelft.nl/doris/>

- (1) ENST Télécom ParisTech/TSI**
- (2) Université Paris Est-Créteil Val de Marne**
- (3) Université de Bucarest**
- (4) Université de Liège**