Utilité de l'image de cohérence du couple tandem (ers-1/2) dans la délimitation et le calcul des dimensions des lacs et de la végétation dans la zone de Buzau en Roumanie

Kamel HACHEMI[1*], Abdelkader ABDELLAOUI[2], André OZER[3], Florina GRECU[4] et Mircea Cristian VISAN[3]

[1] *Laboratoire de Géographie Physique (LGP), UMR 8591 CNRS, 1 Place Aristide Briand, 92195 Meudon, cedex, France. Téléphone : 33(0)1 45 07 55 56; télécopieur : 33(0)1 45 07 58 30 ; courriel : hachemi_kamel@yahoo.fr*

[2] *Université Paris Est-Créteil Val de Marne, département de géographie, 61 avenue du Général de Gaulle, 94000 Créteil, cedex, France. Téléphone : (33) 1 45 17 11 34 ; télécopieur : (33) 1 45 17 11 85 ; courriel : abdellaoui.geo@gmail.com*

[3] *Laboratoire de géomorphologie et télédétection, Unité de géographie physique, Université de Liège, Allée du 6 Août, 2-B11 - 4000 Liège (Sart-Tilman), Belgique. Téléphone : +32-(0)4-366 53 35 ; télécopieur : +32 (0)4-366 57 22 ; courriel : a.ozer@ulg.ac.be*

[4] *Université de Bucarest, Faculté de géographie, Département de géomorphologie, pédologie, geomatics, B-dul Nicolae Balcescu, nr. 1, 01 00 41 Bucarest, Roumanie. Téléphone : +4021 310 4551 ; télécopieur : +4021 3104551 ; courriels : grecu@geo.unibuc.ro et visanmirceacristian@gmail.com*

Revue Télédétection, 2012, Vol. 11, No 3, p. 373-384

Résumé

En interférométrie radar SAR (InSAR/DinSAR), un couple tandem (ERS-1/2) est utilisé pour la réalisation d'un MNA ou la détection des déformations d'un événement majeur (séisme, ...) produit entre les deux acquisitions. L'avantage du couple tandem est le petit intervalle de temps (24 heures) entre les deux prises de vue. Généralement dans ce cas, il n'y a pas de décorrélation temporelle ce qui se traduit par une bonne cohérence. L'image de cohérence est utilisée indirectement dans l'interférométrie radar RSO (Radar à Synthèse d'Ouverture) comme indicateur du taux de fiabilité des interférogrammes produits. Elle peut être utilisée d'une façon directe pour identifier et délimiter les différentes zones qui perturbent la phase de l'onde radar dans chaque pixel. Ce paramètre réagit dans plusieurs cas comme indicateur des mouvements incohérents de surface. Ces mouvements comme par exemple les houles de la surface de l'eau perturbent la phase. Dans ce cas, la cohérence est nulle et elle est représentée par une couleur sombre. Par contre, les endroits stables comme l'urbain, conservent la phase et ils sont représentés en clair. L'objectif de ce travail est de montrer l'utilité et l'efficacité de l'image de cohérence dans la cartographie des lacs et de la végétation dans la région subcarpatique de Buzau. Nous avons mesuré les dimensions des lacs et de la végétation à partir du couple tandem, comparé avec les données existantes et interprété les résultats obtenus : (i) les trois lacs de Buzau, situant dans la plaine Est et au Nord-Est de la ville de Buzau, apparaissent nettement dans l'image de cohérence ; (ii) concernant la végétation, nous avons pris deux parties comme exemple pour essayer de délimiter et de calculer le périmètre et la surface de ces zones. A l'aide de cette image (cohérence), nous avons pu distinguer les parties où peuvent se situer la végétation en grands mouvements dus aux effets du vent donc à grande hauteur. Les lacs sont bien délimités, notamment quant ils sont pleins comme dans les saisons des pluies. L'image de cohérence permet donc de délimiter deux phénomènes naturels dans cette région, les lacs et la végétation.

Mots clefs : Cohérence, Buzau, lacs, végétation, RSO, ERS1-2.

Abstract

Utility of the coherence image for the tandem Pair (ers-1/2) in delimitation and calculation of the dimensions of Lakes and vegetation in the buzau area, romania

In radar SAR interferometry (InSAR/DinSAR), a Tandem pair (ERS-1/2) is used for the realization of a DEM or the detection of deformations of a major event (e.g. earthquake) occurring between two acquisitions. The advantage of the Tandem pair is the time interval of 24 hours between the two captures. Generally, there is no temporal decorrelation considering the small difference in time between the acquisitions; that results in a good coherence. The coherence image is used indirectly in radar SAR interferometry (Synthetic Aperture Radar) as an indicator of the levels of confidence of the interferograms. It can be used in a direct way

to identify and delimit the various movement zones which disturb the phase of the radar wave (in each pixel).This parameter reacts in several cases as an indicator of the unstable movements of surface. These movements, as for instance the wave-movement of surface water, disturb the phase. In this case, coherence is null and it is represented by a dark colour. On the other hand, the stable places, as in the case of urban space, preserve the phase and they are represented in light colour. However, this parameter serves as indicator and at the same time separator between the moving zones and the stable ones. The objective of this work is to show the utility and the effectiveness of the coherence image in the cartography of lakes and vegetation in a region at the Curvature of the Romanian Carpathians. We measured the surfaces and dimensions of the lakes based on the Tandem pair and made a comparison with the existing data and interpreted the results obtained: (i) the three lakes, located in the plain to the East and North-East of the Buzău town, clearly appear in the coherence image; (ii) regarding the vegetation, two test areas were picked in order to try to delimit and calculate their perimeters and surfaces. Using this image (coherence), one could distinguish the parts with vegetation in great movements due to the effects of the wind, therefore characterised by great heights. The lakes are well delimited, in particular when they are full, in the rain seasons. The coherence image thus makes it possible to delimit two natural elements in this area, the lakes and the vegetation.

***Keywords**: Coherence, Buzău, lakes, vegetation, SAR, ERS-1/2.*

1 INTRODUCTION

Les applications indirectes de l'interférométrie radar RSO (Radar à Synthèse d'Ouverture) consistent à utiliser d'autres produits que les interférogrammes, comme les images de cohérence. Généralement, l'image de cohérence est utilisée indirectement dans l'interférométrie radar RSO comme indicateur du taux de fiabilité des interférogrammes produits pour qu'ils soient exploitables. Elle peut être utilisée d'une façon directe et précise pour identifier et délimiter les différentes zones en mouvements qui perturbent la phase de l'onde radar. Cette délimitation est basée sur le fait que la cohérence dépend du paramètre de la phase dans chaque pixel. Ce paramètre réagit dans plusieurs cas comme indicateur des mouvements incohérents de surface. Ces mouvements comme par exemple les houles de la surface de l'eau perturbent la phase. Dans ce cas, la cohérence est nulle et elle est représentée par une couleur sombre. Par contre, les endroits stables comme l'urbain, conservent la phase et sont représentés en clair. Cependant, ce paramètre joue un rôle d'indicateur et en même temps séparateur entre les zones en mouvements et les zones stables. Les images de cohérence du couple tandem ont été utilisées d'une façon remarquable et efficace dans plusieurs domaines et à différents objectifs. Elles sont importantes pour beaucoup d'application, telles que la géodynamique, l'agriculture, la glace et la surveillance d'humidité du sol. Dans l'extraction des paramètres de forêt par interférométrie, des combinaisons des données de coefficient de rétrodiffusion et la cohérence avec un MNT ont pu estimer la taille concrète des arbres des forêts (Askne et al., 1995, 1997). Dans les études des caractéristiques biophysiques des secteurs de forêt, la combinaison des images de cohérence tandem et les images d'amplitude (coefficient de rétrodiffusion) du satellite JERS ont apporté de manière significative des informations sur l'évaluation de la densité de biomasse et de l'occupation des sols de forêt tropicale (Luckman *et al.*, 2000). Dans le cas des inondations, l'intégration des images d'amplitude et de cohérence a été utilisée pour indiquer tous les secteurs inondés entre les deux passages des satellites ce qui a permis d'établir une carte d'inondation précise de la région de Béziers (sud de la France) (Nico *et al.*, 2000). Les images de cohérence des couples tandem ERS-1/2 (24h) ont le potentiel d'être utilisées pour l'évaluation du volume des arbres dans les forêts boréales et se sont avérées meilleures que les données optiques (SPOT XS) pour certain cas des volumes d'arbres (Fransson *et al.*, 2001). A l'aide de six images de cohérence dont trois tandems, ces images (cohérence) ont prouvé leur efficacité pour différencier entre certaines classes de surfaces qui n'ont pas été distingués par les images d'amplitude radar (rétrodiffusion). Elles ont été utilisées pour classer les endroits comme le saule-aulne, le sapin, la glace, et l'eau dans le delta de Mackenzie (Canada). Les surfaces de Saule-aulne ont montré le taux de cohérence le plus élevé suivi respectivement par du sapin, des lacs gelés, des canaux gelés et de l'eau (Hall-Atkinson et Smith, 2001). Dans le cas des applications urbaines, une certaine catégorie de cohérence peut être corrélée avec un certain type d'occupation du sol pour fournir des informations sur les changements produits entre les deux acquisitions d'images SAR. Elles ont été utilisées dans la surveillance des activités d'expansion des villes. La cohérence dans des secteurs urbanisés est plus élevée que dans les endroits couverts de végétation. Les changements des taux de la cohérence, des valeurs plus basses vers des valeurs plus élevées dans certains endroits, peuvent donner une indication sur le remplacement de la végétation par des bâtis (Stabel et Fischer, 2001). Dans la cartographie des limites de l'Antarctique, l'utilisation de la cohérence a été profitable et a conclu que la technique de l'interférométrie, en utilisant des images RADARSAT, fournit des résultats très satisfaisants pour la cartographie de l'Antarctique comparée avec les images optiques (LANDSAT et SPOT) (Gray *et al.*, 2002). Dans la cartographie à grande échelle, les images de cohérence tandem (ERS) ont été aussi utilisées et associées avec des images d'amplitude

(coefficient de rétrodiffusion) de JERS pour la surveillance et le suivi de l'évaluation de la forêt boréale en Sibérie (Wagnera *et al.*, 2003). Dans le domaine de l'agriculture, les images de cohérence des couples tandems (six couples) ont été utilisées à la recherche des paramètres de récolte (taille, humidité, ...). Elles ont montré leur utilité et leur efficacité dans la surveillance des champs de blé d'hiver, betterave à sucre, pomme de terre et maïs (Blaes et Defourny, 2003). Dans la cartographie des dommages d'un séisme, les variations des images de cohérence ont été utilisées pour cartographier les dommages provoqués par le séisme de Bam (26 décembre 2003) (Hoffmann, 2007). La cartographie de l'âge des forêts, en utilisant la cohérence du couple tandem ERS, a montré une résolution spatiale qui a pu différencier entre différents peuplements de forêt. Elle a fourni l'âge régional détaillé et l'évaluation de biomasse dans les régions de l'Angleterre, l'Ecosse et le Pays de Galles. Cette répartition et comparaison des évaluations par âge associée à d'autres informations avaient la capacité et le potentiel de fournir le taux de croissance et des informations pour l'abattage dans ces régions (Drezet et Quegan, 2007). Dans les études des risques d'incendies des forêts, les images de cohérence multi-passe de différentes bandes (X, C et L) ont été utilisées pour l'évaluation de la sévérité de brûlure et ont été très utiles pour cartographier les endroits de pin affectés par les feux dans les forêts méditerranéennes (Tanase *et al.*, 2010).

Dans ce travail, nous allons essayer de calculer les dimensions des lacs et de la végétation à partir de l'image de cohérence du couple tandem ERS1/ERS2 de la région de Buzau, vérifier la précision avec les mesures du terrain, faire une comparaison avec les données existantes et interpréter les résultats obtenus.

2 IMAGE DE COHERENCE ET SOURCES DE L'INCOHERENCE

2.1 Image de cohérence (C_{oh})

Théoriquement la cohérence est définie par le coefficient de corrélation (C_{oh}) entre les deux acquisitions des deux images qui construisent l'interférogramme (Touzi *et al.*, 1999). C'est une comparaison mathématique entre l'interférogramme créé et le produit des deux modules des deux images pour chaque pixel de la scène imagée, avec un rééchantillonnage d'une nouvelle taille du pixel. La formule suivante permet d'évaluer le degré de confiance de l'interférogramme.

$$C_{oh} = \frac{\sum_{P}^{N} S_1(p).\overline{S_2}(p)}{\sqrt{\sum_{P}^{N} |S_1(p)|^2 \sum_{P}^{N} |S_2(p)|^2}}$$

Avec : i :représente la zone d'échantillonnage ;

$S_1(p)$: Image complexe radar Maître pour le pixel (p) ;

$\overline{S}_2(p)$: Conjugué de l'image complexe radar Esclave pour le pixel (p) ;

$|S_1(p)|$: Module de l'image complexe Maître pour le pixel (p) ;

$|S_1(p)|$: Module de l'image complexe Esclave pour le pixel (p) ;

N : le nombre de pixels dans la zone d'échantillonnage.

En pratique l'image de cohérence permet de donner un aperçu des variations qui peuvent exister entre les deux images utilisées, soit dans le recalage des deux images ou les conditions géométriques d'acquisition de ces deux images ainsi que sur les changements probables des caractéristiques physiques de la cible imagée entre ces deux prises de vues, pour toutes les zones d'échantillonnage. $|C_{oh}(p)|$, est un coefficient de corrélation (degré de cohérence) traduit par des valeurs comprises entre [0 et 1] ; le degré (1) représente une forte cohérence entre ces deux images par contre le degré (0) signifie une cohérence nulle.

La cohérence est donc une estimation du degré de stabilité de la phase entre les deux images radar acquises dans les conditions géométriques presque identiques de la même scène. Cette stabilité et instabilité est représentée dans l'image de cohérence pour une mauvaise cohérence par des zones sombres et les bonnes cohérences par des zones claires. Dans une échelle de gris le degré de cohérence varie du noir (valeur minimale) au clair (valeur maximale).

2.2 Sources de l'incohérence

La fiabilité de l'interférogramme créé par l'interférométrie radar RSO (InSAR) repose sur l'image de cohérence ; un degré maximum signifie une forte corrélation entre les deux phases et est interprété sur le terrain par l'absence de changement entre les deux dates d'acquisition des images avec des conditions géométriques de prise de vue identiques ou presque et un même niveau de distribution statique du chatoiement (Adragna et Nicolas, 2001). Dans le cas contraire, un degré de cohérence minimum se traduit sur le terrain par le fait que les deux pixels des deux images ont subi un changement ou que les deux pixels tout simplement n'ont pas la même position. La faible cohérence entre les deux acquisitions peut avoir plusieurs origines : différence d'angle d'incidence important entre les deux acquisitions surtout pour les pentes orientés vers la visé du radar ; changement des caractéristiques physiques du sol imagé entre les deux acquisitions ; surfaces en continuel mouvement comme les lacs, les mers etc. ; les zones recouvertes de végétation ainsi que les forêts à cause de l'accumulation rapide des mouvements comme sous l'effet des vents ; tout mouvement sur le sol peut affecter la phase entre les deux acquisitions (passage de véhicule, etc).

3 ZONE D'ETUDE ET DONNEES UTILISEES

3.1 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°/45,926° ; longitude de l'ouest à l'est : 26,089°/27,614°. 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 Carapates 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 (Grecu *et al.*, 2010). 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 verts la visée du radar ; (3) une zone très accidentée entre les subcarpatiques et les Carpates à l'ouest.

3.2 Données utilisées

Les données utilisées sont des données Radar RSO (SAR) de type 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 couvrent une surface de (100km x 100km) avec une résolution de 4m (en azimut) et 20m (en distance). Ces images ont été obtenues auprès de l'ESA par le Laboratoire de Géomorphologie et Télédétection (Université de Liège), dans le cadre d'un programme de recherche partagé entre les universités de Liège (Belgique), Paris-XII (France) et Bucarest (Roumanie). Les deux images prises respectivement le 28 et 29 du mois de mai 1995 forment un couple tandem ERS-1/ERS-2.

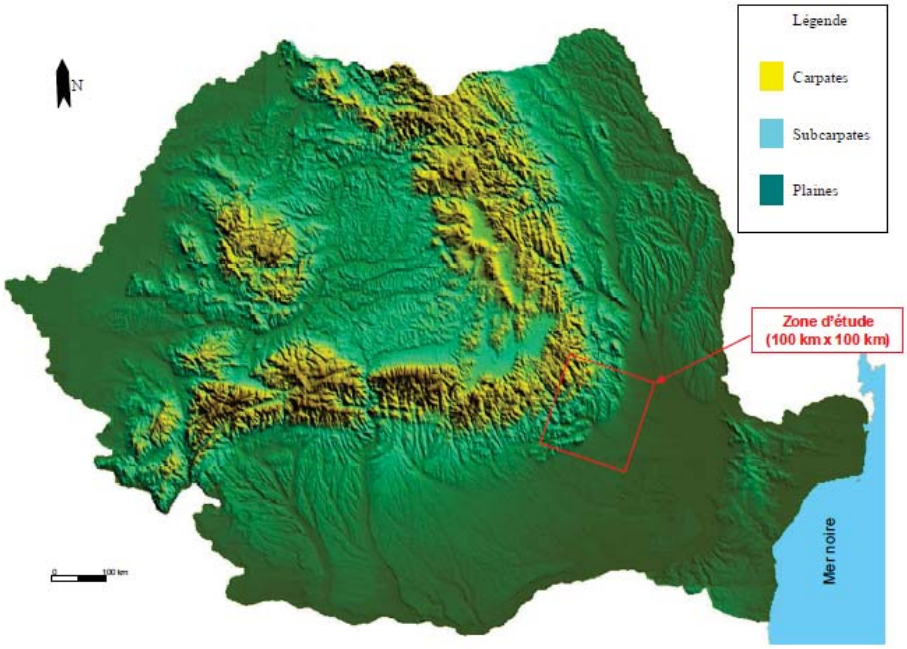


FIGURE 1 – La zone d'étude (Localisation et caractéristiques de la zone d'étude)
The study area : Localization and characteristics

4 METHODOLOGIE ET RESULTATS

Dans cette étude et à l'aide de la technique d'interférométrie radar InSAR, nous avons généré une image de cohérence du couple tandem de 20 m de résolution. Nous avons aussi géoréférencé cette image de cohérence. Le résultat obtenu est une image de cohérence géoréférencée du couple tandem (28/29 mai 1995) avec une résolution 20 m (figure 2). Pour bien mener cette étude, nous avons aussi calculé les taux de cohérence du couple tandem traité par InSAR. Nous avons divisé l'image de cohérence de toute la scène en deux parties selon les caractéristiques de cette zone d'étude. Une zone des plaines qui est plate et une zone de relief relativement élevée et accidentée. Nous avons calculé les taux de cohérence de toute la scène puis les deux parties séparément (Plaine et Relief). Le résultat est présenté dans le tableau suivant (tableau 1). Ce tableau 1 montre les caractéristiques de la géométrie de prise de vue ainsi que les taux de cohérence du couple tandem (ERS-1/ERS-2) calculés.

Tableau 1 – Les caractéristiques géométriques de prise de vue et les taux des cohérences du couple d'images (ERS-1/ERS-2). *Geometrical characteristics of the capture and rates of coherences of the pair images (ERS-1/ERS-2)*

B_{temp} : Baseline temporelle
B : Baseline (distance entre les deux radars)
B_{perp} : Baseline perpendiculaire
$Orbit_{conv}$: Angle entre orbites
H_{amb} : Altitude d'ambiguïté $[height = h_mb * phase/2pi]$
$C_3[0-1]$: Taux de Cohérence moyenne pour toute la scène.
$C_{Rel}[0-1]$: Taux de Cohérence moyenne pour la partie de relief dans la scène imagée.
$C_{Plai}[0-1]$: Taux de Cohérence moyenne pour la partie de la plaine de la scène imagée

Orbites Maître/Esclave	B_{temp} $[jours]$	B $[m]$	B_{prep} $[m]$	C_3 $[0-1]$	C_{Rel} $[0-1]$	C_{Pla} $[0-1]$	$Orbit_{conv}$ $[deg]$	H_{amb} $[m]$
28-05-1995/29-05-1995	1	90.5	-79	0.616227	0.553663	0.705942	0.000818386	20.4

4.1 Délimitation à partir de l'image de cohérence

Dans la partie plaine, on constate une bonne cohérence mise à part les lacs. Ils sont bien représentés en couleurs très sombres avec une cohérence zéro (figure 2). Dans la partie des reliefs surtout où il y a la végétation, on voit clairement une mauvaise cohérence (figure 2). Pour montrer l'utilité et l'efficacité de l'image de cohérence, nous avons mesuré les superficies et les dimensions des lacs et de la végétation à partir du couple tandem (tableaux 2 et 3).

4.1.1 Lacs de Buzau

Au nord-est de la ville de Buzau, il y a trois lacs qui apparaissent nettement dans l'image de cohérence et qui se situent dans la plaine Est. Le tableau 2 montre les surfaces et les dimensions de ces lacs mesurés à partir de l'image de cohérence du couple daté 28 et 29 mai 1995.

Tableau 2 – Délimitation des lacs à partir de l'image de cohérence.*Delimitation of the lakes based on the coherence image*

Lacs/Balta	Coordonnées géographiques (centre)		Dimensions		Superficie	Altitude	Distance /Buzau
	Lat.	Long.	Longueur	Largeur		(m)	(km)
Balta Jirlaul	45°10'20,26" N	27°13'18,39" E	5,38 km	2,28 km	9,104 Km^2	38	31
Balta Amara	45°13'40,12" N	27°13'18,39" E	Diamètre 3,27 km		9,237 Km^2	33	38
Balta Alba	45°17'11,01" N	27°20'03,40" E	6 km	2,5 km	7,730 Km^2	12	38
Distances entre les deux lacs Jirlăul et Albă du Lac Amara		d12 (Jirlăul/Amara)			d23 (Amara/Albă)		
		4,9756 Km			3,8825 Km		

4.1.2 Végétation

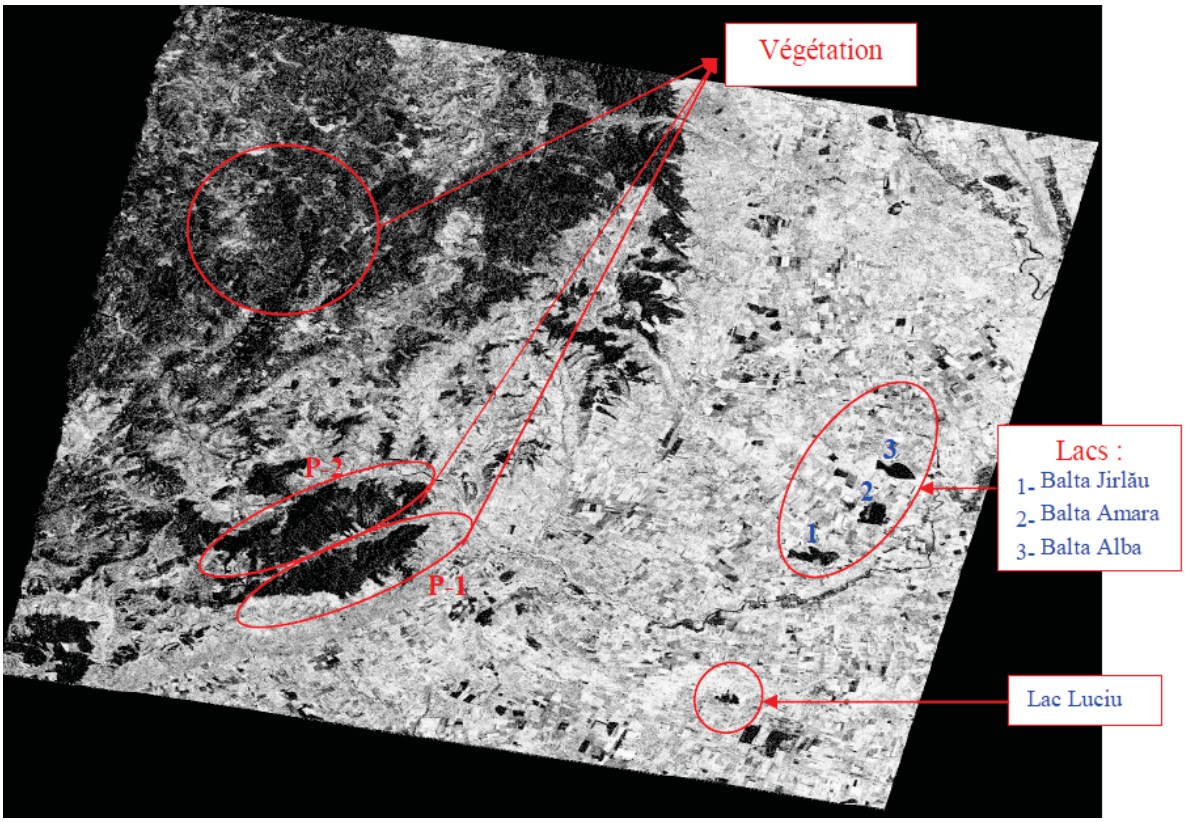
On a pris deux parties comme exemple pour essayer de délimiter et calculer le périmètre et la surface de ces parties de végétation. Ces résultats montrés dans le tableau 3 sont obtenus à partir de la même image de cohérence du couple tandem (28 et 29 mai 1995).

Tableau 3 – Délimitation de la végétation à partir de l'image de cohérence ($P-1$ *et* $P-2$, *voir figure* 1). *Delimitation of the vegetation based on the coherence image* ($P-1$ *et* $P-2$, *see figure* 1)

Partie de végétation	Coordonnées géographique (centre)		Périmètre	Superficie
	Lat.	Long.		
P-1 Végétation Nord	45°13'22,50" N	26°32'22,50" E	107,45 km	147,63 Km^2
P-2 : Végétation Sud	45°8'55,50" N	26°34'1,50" E	76,046 km	109,09 Km^2

5 DISCUSSIONS ET INTERPRETATION

Le couple tandem (28/29 mai 1995) représente le seul parmi les autres couples qui a donné une bonne cohérence dans l'ensemble de la scène. Cette cohérence témoigne de la fiabilité de l'interférogramme résultant à partir de ces deux dates. Pour ce couple tandem ERS-1/ERS-2, l'intervalle de temps entre les deux prises de vue est de 24 heures, ce qui lui a donné une bonne cohérence. Ce couple a été utilisé dans d'autres travaux pour la réalisation d'un MNA de Buzau (Hachemi, 2009). Il n'y a pas de décorrélation temporelle vue la petite différence de temps entre les prises de vue des deux images RSO. Après avoir calculé les taux de la cohérence de la scène et des deux parties (reliefs et plaine) séparément, nous avons calculé les dimensions des lacs et de la végétation dans cette région de Buzau. L'image de cohérence de la zone de Buzau obtenue en utilisant les images du couple tandem (ERS-1 et ERS-2), donne une mauvaise cohérence pour les zones de végétation et des lacs et une bonne cohérence pour les zones urbaines.



Ces résultats s'expliquent ainsi : (i) les zones de lacs sont recouvertes d'une surface d'eau superficielle en continuel changement (effet du vent sur la surface) d'où la faible cohérence entre les images ; (ii) les zones de relief apparaissent en noir ; elles sont recouvertes de végétation haute (bois, forets) qui peuvent présenter des aspects différents d'une image à l'autre (effets du vent par exemple) d'où la faible cohérence entre les images ; (iii) enfin la zone de plaine est probablement peu couverte de végétation (sols nus, secs) au moment de l'acquisition des images ; il y a donc peu de changement d'où la forte cohérence entre les images ; (iv) les zones urbaines grâce à leur stabilité sont représentées par une bonne et forte cohérence. Entre ces deux dates de prise de vue du 28 et 29 mai 1995, il n'y a pas eu d'incident géologique entraînant des changements supérieurs à 28 mm (1/2 longueur d'onde de la bande « C ») en direction du radar. Dans la partie plaine, on voit bien une bonne cohérence, par contre dans la partie des reliefs surtout où il y a la végétation, on voit clairement une mauvaise cohérence. A l'aide de cette image de cohérence on a pu délimiter les parties où peuvent se situer la végétation en grands mouvements dus aux effets du vent donc à grande hauteur. Donc l'image de cohérence permet de délimiter deux phénomènes naturels dans cette région, les lacs et la végétation. Les lacs sont bien délimités et notamment quant ils sont pleins comme dans les saisons des pluies (figure 3) et ils sont bien présentés en couleurs très sombres avec une cohérence zéro. Ce couple (image de cohérence) nous a permis de calculer avec une grande précision les dimensions des surfaces des lacs et de la végétation dans la région de Buzau. Par contre, la précision de cette mesure est de l'ordre du pixel (20m x 20m) soit de ±0.0004 km2. Ensuite, nous avons comparé ces résultats avec les seules données de 1963 qui existent (Gastescu, 1963). Les dimensions des surfaces des trois lacs en 1963 sont comme suit : Balta Jirlaul = 10,69 km2, Balta Amara = 6,98 km2 et Balta Alba = 10,68 km2. La comparaison entre ces données (1963 et 1995) d'intervalle de 32 ans nous ramène à dire que ces lacs (Balta Alba et Balta Jirlaul) sont en rétrécissement à part le lac Balta Amara qui montre une extension. La différence entre les deux mesures (1963 et 1995) est résumée dans le tableau suivant (tableau 4). Il montre aussi la vitesse de cette variation de surface de l'eau dans cette période de 32 ans.

Tableau 4 – Comparaison entre les deux mesures des surfaces des trois lacs entre 1963 et 1995. *Comparison between the two area measurements (1963 and 1995) of the three lakes*

Lacs/Balta	Superficie 1995	Superficie 1963	Différence de surface $\triangle S$	Précision ∂S	Différence de surface $\triangle S+\partial S$	Vitesse de variation dans les 32 ans
Balta Jirlaul	9,104 Km^2	10,69 Km^2	-1,586 Km^2	±0.0004 Km^2	-1,5856	- 0,04955 km^2/an
Balta Amara	9,237 Km^2	6,98 Km^2	+2,257 Km^2	±0.0004 Km^2	+2,2566	+ 0,070518 Km^2/an
Balta Alba	7,730 Km^2	10,68 Km^2	-2,95 Km^2	±0.0004 Km^2	- 2,9496	-0,092175 Km^2/an

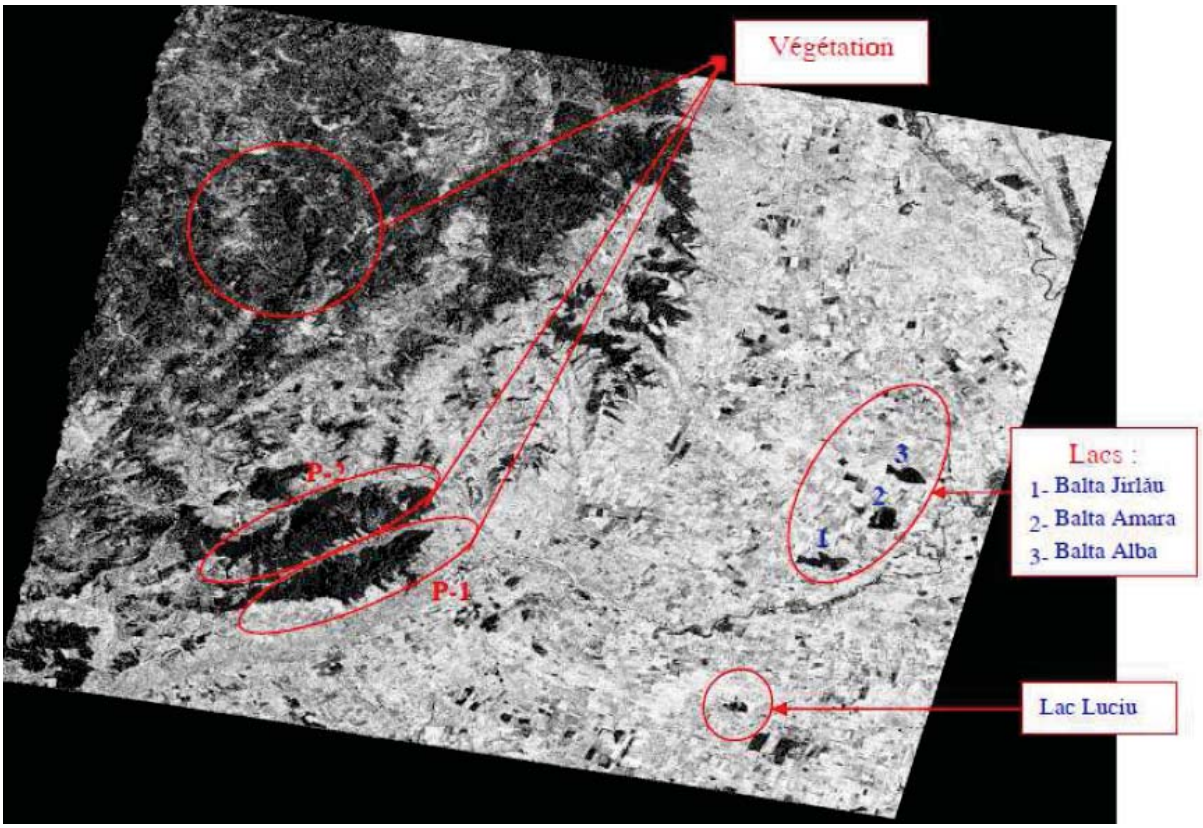


Figure 2 – Image de cohérence géoréférencée du couple tandem (28/29 mai 1995). *Les lacs sont numérotés de plus proche de la ville de Buzau.*
P-1 : végétation nord et P-2 : végétation sud
Figure 2 : Georeferenced coherence image of the tandem pair (May 28/29, 1995). *The lakes are numbered in the order of their distance from the Buzău town.*
P-1 : vegetation to the north and P-2 : vegetation to the south

Dans une période de 32 ans, nous constatons une diminution des surfaces des deux lacs Balta Alba au nord et Balta Jirlaul au sud. Par contre, le lac du milieu (Balta Amara) augmente. Cela nous laisse supposer que les deux lacs (nord et au sud) alimentent le lac du milieu avec une réduction de la surface de l'eau estimée à 2,2786 km2 dans cette période de 32 ans.

Les trois lacs se localisent dans la plaine de subsidence et des divagations (défluviations). Cette plaine se situe entre les rivières de Buzau et Calmatui ; elle occupe une zone très basse qui correspond à l'accumulation alluviale holocène.

L'altitude de cette zone est comprise entre 82 m (près du sud de la ville de Buzau) à l'ouest et 51 m à l'est. Ces lacs se situent au contact entre le piémont et la zone de subsidence Calmatui-Buzau et Ramnicu-Sarat. Ce sont des lacs qui se forment sur des rivières qui sont affluentes d'une rivière plus grande. Ils représentent le point de convergence de petites rivières et de la rivière principale de Buzau. La rivière de Buzau a des rivières secondaires qui sont les sources des rivières de piémont (la source se situe dans la plaine de piémont) d'une longueur de 15 à 30 km. Ces lacs ont une double alimentation : ils sont alimentés par la rivière principale de Buzau et les rivières secondaires des piémonts (sources des rivières secondaires).

Dans la zone de confluence (rivières principales et secondaires), le débouché de la rivière est barré par des alluvions qui font accumuler l'eau en formant des grands lacs (balta). Ce sont des lacs naturels salés, avec un degré de salinité qui varie en fonction du climat. En cas de sécheresse, ils sont très salés. Par contre, lors de précipitations abondantes, ils sont moins salés à cause du fort débit de la rivière de Buzau et de l'eau de pluies. Ils se sont formés à la fin du Pléistocène supérieur et au début de l'Holocène. Balta Jirlaul, est un lac d'eau douce. Balta Amara et Balta Alba, ont des minéralisations élevées et une grande salinité.

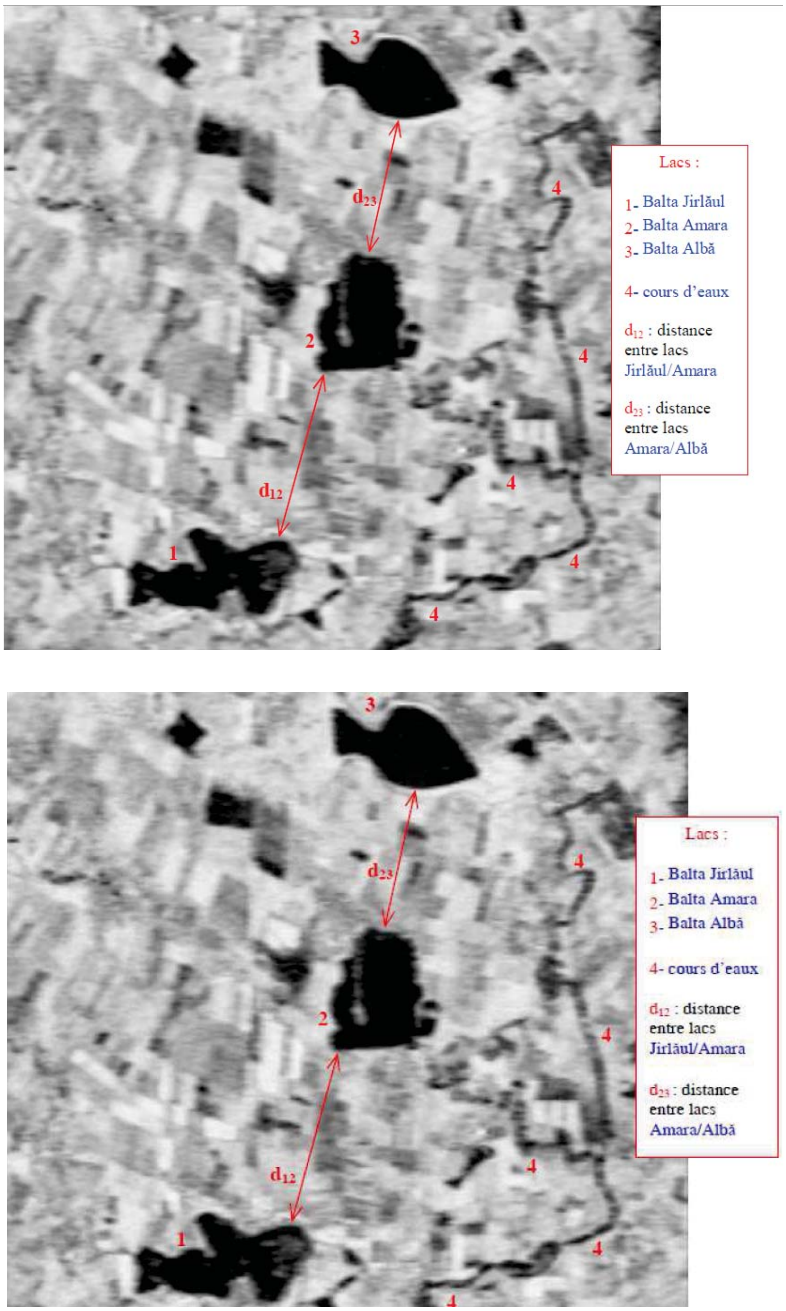


FIGURE 3 – Zone des lacs dans l'image de cohérence (couple tandem, 28/29 mai 1995), *Les lacs sont numérotés de plus proche de la ville de Buzau.*
Figure 3 : Area of the lakes on the coherence image (tandem pair, May 28/29, 1995), *The lakes are numbered in the order of their closeness to the Buzău town.*

L'alignement entre Focşani et Rimicu-Sarat coïncide avec la zone (surface) où se sont produits des processus de subduction et où l'accumulation lente de l'énergie sismique a produit des déchargements brusques et violents, qui correspondent à des tremblements de terre avec des magnitudes allant de 5 à 7,4 sur l'échelle de Richter et qui ont des épicentres entre 90 et 200 km dans la Montagne de Vrancea (Geografia Romaniei, V.5 2005). Par contre, dans la région des collines subcarpatiques et carpatiques, le soulèvement est de l'ordre +2 mm/an. La dépression Brasov au nord (à l'extérieur de notre zone d'étude) s'abaisse de 2 mm/an. Cette partie de la Plaines Roumaine, de la Curvure, est caractérisée par une instabilité due à une subsidence qui se présente comme un abaissement lent, qui favorise des divagations des rivières (Grecu, 2010). Et dans la zone où se trouvent les lacs, la subsidence est très active relativement vers la rivière Siret, là où débouche la rivière de Buzau. Ce déplacement est de l'ordre de -2 mm/an. Citons comme preuve, le lit de la rivière de Buzau qui a changé de cours vers le nord à cause de cette subsidence. Le cours de la rivière s'est déplacé vers le nord à partir du point Dedulesti. Avant 1969, la distance parcourue par l'eau de la rivière était de 16,5 km et en même temps alimentait le lac Amara. Après cette date le cours de la rivière est coupé vers le Nord et parcourt une distance de

6,5 km vers le Nord (il a crée un nouveau lit -raccourci) (Visan *et al.*, 1973). Sans oublier le rôle du tremblement de terre du 4 mars 1977 de magnitude 7.2 sur l'échelle Richter qui a eu 4 secousses. Chacune d'entre elles a eu un foyer propre de profondeur différente 93, 79, 93 et 109 km (Balteanu, 1989). Cette zone affectée par le séisme a un épicentre à 60 km au nord de la station de recherche de Patirlagele, avec une énergie libérée qui est égale à 39,8 x 1021 ce qui représente 15 fois, l'énergie moyenne annuelle qui s'est libérée de la zone sismique de Vrancea (L. Constantinescu, 1978, cité par D. Bălteanu, 1989). Ce séisme a fait apparaitre des sources, des lacs et des barrages naturels. Il a aussi causé des mouvements de masse de plusieurs types : chutes de pierres ; effondrement ; éboulement ; glissement de terrain et coulées de boue.

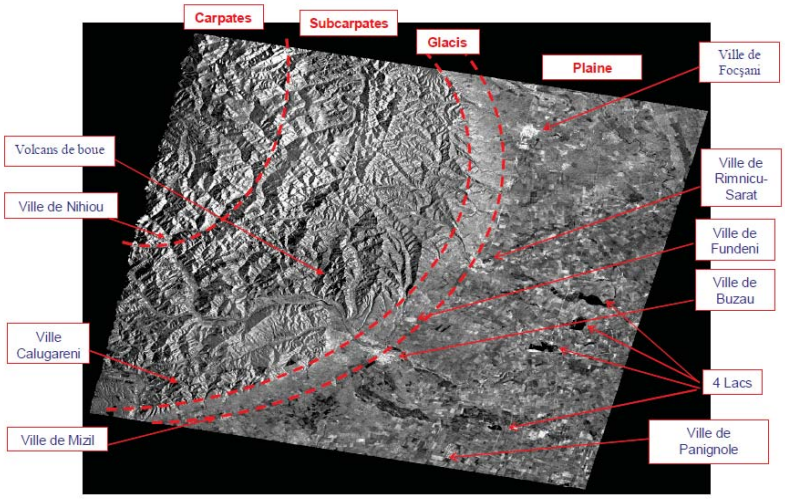


Figure 4 – Image radar d'amplitude géoréférencée de la zone d'étude. *Georeferenced radar amplitude image of the study area.*

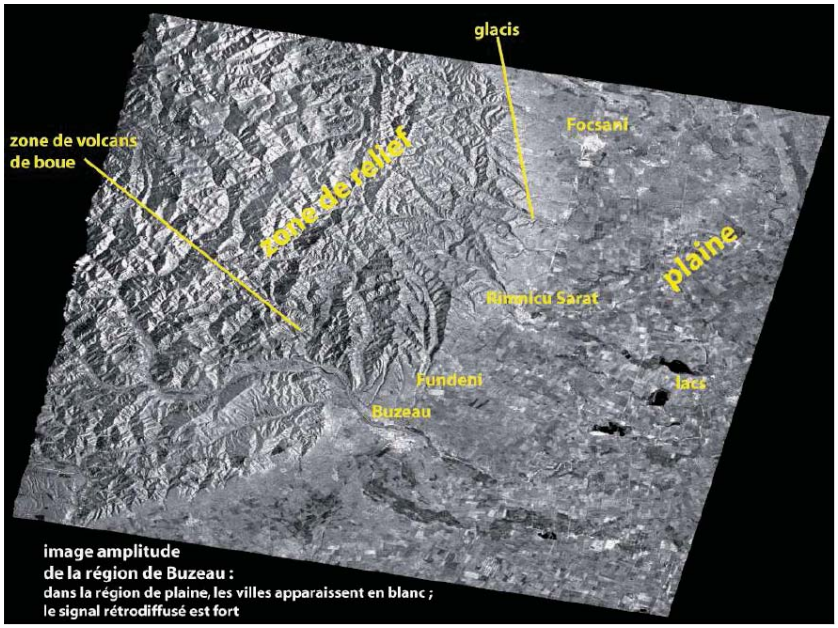
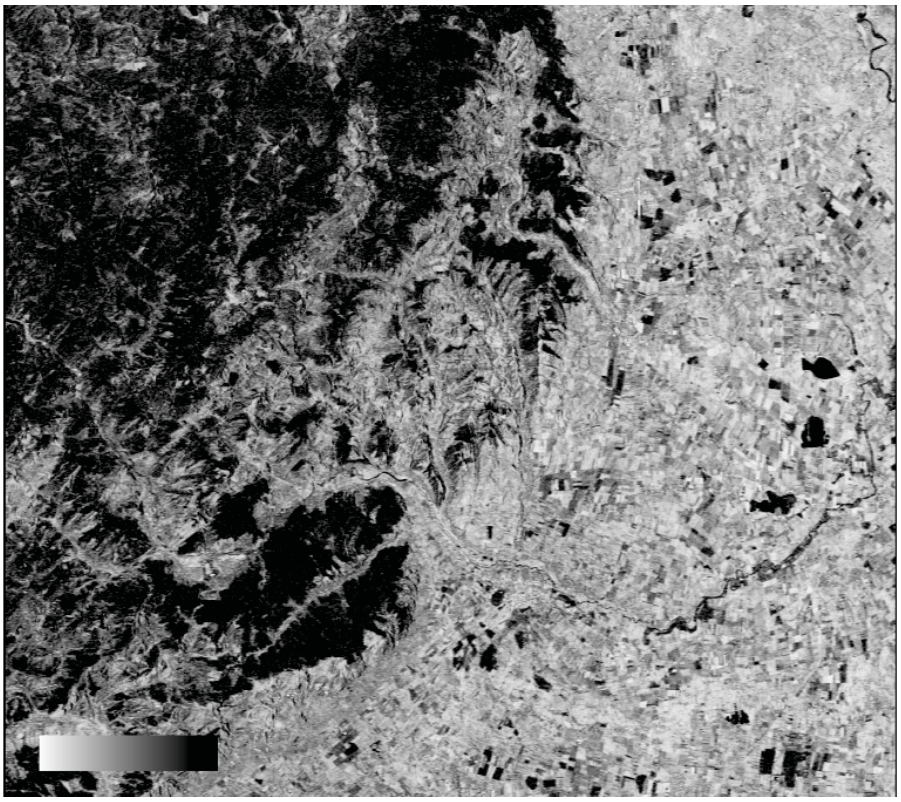


Figure 5 – Image radar d'amplitude géoréférencée de la zone d'étude. *Georeferenced radar amplitude image of the study area.*

La figure 4 montre les hauteurs, les dépressions des Subcarpates, les cours des rivières et la plaine de Buzau. Cette figure illustre la limite de la Courbure des Carpates et les Subcarpates. Les cours d'eau débouchent vers le sud et sud-est dans la rivière de Buzau et la rivière de Ramnicu-Sarat. La zone d'étude montre deux grands débouchés des cours d'eau qui viennent des Carpates et Subcarpates : ce sont les rivières de Buzau et Ramnicu-Sarat et qui sont bien représentées sur l'image d'amplitude radar (figure 5). Ces deux rivières sont les principales sources d'alimentation des trois grands lacs se trouvant dans la plaine (Balta Jirlaul, Balta Amara et Balta Alba).



Ce constat nous permet d'avancer que les trois lacs convergent en un seul grand lac durant cette période de 32 ans (1963 à 1995). Cette activité peut être interprétée par le fait que les deux lacs au nord et sud diminuent et le lac du milieu s'agrandi. Ce qui peut expliquer la différence de la surface et de la quantité d'eau estimées à -2,2786 km2 pour cette durée de 32 ans. On peut avancer que les lacs sont en train de se transformer en un seul grand lac. Nous avons aussi pu estimer la durée maximale de cette transformation qui ne dépasse pas les 1779 années et pourrait être accélérée par l'activité sismique de la région.

6 CONCLUSION

Nous avons pu calculer avec grande précision les dimensions et les surfaces des lacs et de la végétation dans une zone très complexe de la région de Buzau (Roumanie). Cette étude, nous a permis d'avancer que la cartographie à partir des images de cohérence tandem peut concurrencer les mesures du terrain. Ce travail, nous a permis de confirmer l'intérêt des images de cohérence du couple tandem (ERS-1/ERS-2) obtenues à partir de la technique d'interférométrie (InSAR) pour la cartographie des lacs et de la végétation et le suivi de leur changement. Il montre aussi l'importance de ces images et l'exploitation du taux de cohérence qui est compris entre [0 et 1] pour différencier les zones urbaines des zones végétales. La cohérence dans les plaines de Buzau est meilleure que dans les Subcarpates et les Carpates.

7 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 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 André 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)

8 REFERENCES

Adragna, F. et Nicolas, J. M. (2001) Traitement des images de Radar à Synthèse d'Ouverture (RSO) sous la direction de Henri Maître. Hermes Science Europe Publication, Paris, 328 p.
Askne, J.I.H., Dammert, P.B.G., Fransson, J., Israelsson, H. and Ulander, L. M. H. (1995) Retrieval of forest parameters using intensity and repeat pass interferometric SAR information. Symposium international, Extraction des paramètres bio-géophysiques à partir des données RSO pour les applications terrestre, Toulouse, France, 10-13 octobre 1995, p. 119-129.

Askne, J.I.H., Dammert, P.B.G., Ulander, L.M.H. and Smith, G. (1997) C-band repeat pass interferometric SAR observations of the Forest. IEEE Transactions on Geoscience et Remote Sensing, vol. 35, no 1, p. 25-35.

Blaes, X. et Defourny, P. (2003) Retrieving crop parameters based on tandem ERS-1/2 interferometric coherence images. Remote Sensing of Environment, vol. 88, p. 374-385.

Balteanu, D. (1989) Caracterele morfostucturale si modelarea actuala a reliefului. Mobilité tectonique et la tendance actuelle d'évolution des reliefs dans la région subcarpatiques de Buzau, Universitatea din Bucuresti, Institutul de Geografie, Bucuresti, p. 49-61.

Drezet, P.M.L. and Quegan, S. (2007) Satellite-based radar mapping of British forest age and Net Ecosystem Exchange using ERS tandem coherence. Forest Ecology and Management, vol. 238, p. 65-80.

Fransson, J. E. S., Smith, G., Askne J. and Olsson H. (2001) Stem volume estimation in boreal forests using ERS-1/2 coherence and SPOT XS optical data. International Journal of Remote Sensing, vol. 22, no 14, p. 2777-2791.

Gastescu, P. (1963) Lacurile din Romania, Edit.Academiei, Bucuresti, 294 p.

Gray, A. L., Short, N., Bindschadler, R., Joughin, I., Padman, L., Vornberger, P. and Khananian, A. (2002) RADARSAT Interferometry for Antarctic Grounding-Zone Mapping. Annals of Glaciology, 1 January 2002, International Glaciological Society, vol. 34, no 1, p. 269-276.

Grecu, F., Comănescu, L., Toroimac, G., Dobre, R., Sacrieru, R., and Mărculet, C. (2010) Slope dynamics - precipitation interrelation in the Curvature Subcarpathians (Romania). Revista de Geomorfologie, vol.12, p. 45-52.

Grecu, F. (2010) Geografia campiilor Romaniei. Edition Universitatii, Bucuresti, 260 p.

Hachemi, K. (2009) Apport de l'interférométrie radar SAR pour la réalisation d'un MNA (Modèle Numérique d'Altitude) sur la région subcarpatique de Buzau (Roumanie). Journal Analele Universitatii Bucuresti, annee LVIII – 2009, p. 5-38.

Hall-Atkinson, C. and Smith, L.C. (2001) Delineation of delta ecozones using interferometric SAR phase coherence Mackenzie River Delta, N.W.T., Canada, Remote Sensing of Environment, vol. 78, p. 229-238.

Hoffmann, J. (2007) Mapping damage during the Bam (Iran) earthquake using interferometric coherence. International Journal of Remote Sensing, vol. 28, no 6, 20 march 2007, p. 1199-1216.

Luckman, A., Baker, J. and Wegmüller U. (2000) Repeat-Pass Interferometric Coherence Measurements of Disturbed Tropical Forest from JERS and ERS Satellites. Remote Sensing of Environment, vol. 73, p. 350-360.

Nico, G., Pappalepore, M., Pasquariello, G., Refice, A. and Samarelli, S. (2000) Comparison of SAR amplitude vs. coherence flood detection methods—a GIS application. International Journal of Remote Sensing, vol. 21, no 8, p. 1619- 1631.

Stabel, E. and Fischer, P. (2001) Satellite radar interferometric products for the urban application domain. Advances in Environmental Research, vol. 5, p. 425-433.

Tanase, M. A., Santoro, M., Wegmüller, U., De La Riva, J. and Pérez-Cabello, F. (2010) Properties of X-, C- and Lband repeat-pass interferometric SAR coherence in Mediterranean pine forests affected by fires. Remote Sensing of Environment, Elsevier – Oct 15, 2010, vol. 114, no 10, p. 2182-2194.

Touzi, R., Lopes, A., Bruniquel, J. and Vachon, P. W. (1999) Coherence Estimation for SAR Imagery. IEEE, Transactions on Geoscience & Remote Sensing, vol. 37, no 1, p. 135-149.

Visan, GH., Cirstea, A. and Balauta, L. (1973) Unele aspecte climatice in Cimpia Rimnicului. Geografie, Extras, Analele Univesitatii Bucuresti Anul XXII-1973.

Wagnera, W., Luckmanb, A., Vietmeiera, J., Tanseyb, K., Balzterc, H., Schmulliusd, C., Davidsone, M., Gaveauc, D., Gluckf, M., Le Toane, T., Quegang, S., Shvidenkof, A., Wiesmannh, A. and Jiong Yug, J. (2003) Large-scale mapping of boreal forest in Siberia using ERS tandem coherence and JERS backscatter data. Remote Sensing of Environment, vol. 85, p. 125-144.

*** (2005) Geografia Romaniei, V, Campia Romana, Dunarea, Podisul Dobrogei, Litoralul Romanesc al Marii Negre si Platforma Continentala, Academia Romana, Institutul de Geografie, Edit. Academei Romane, 968 p.