

Apport de l'imagerie radar SAR (Images d'Amplitude) pour l'analyse des aléas et du changement dans la région de Buzău (Roumanie)*

K. HACHEMI⁽¹⁾, A. ABDELLAOUI⁽¹⁾, A. OZER⁽²⁾, Florina GRECU⁽³⁾, Gh. VIȘAN⁽³⁾

Mots clés : Radar, Image Amplitude, Composition colorée, SAR, Analyse diachronique.

Résumé. La région de Buzău, située sur la région subcarpatique en Roumanie est le siège de deux grands types d'aléas naturels : des aléas géologiques-geomorphologiques (glissements de terrains ; séismes dans sa partie Nord-Nord Est ; des volcans de boue sont également présents sur la zone) et des aléas climatiques ou hydrologiques (phénomènes d'inondation accentuant souvent l'érosion des sols) (Grecu et al., 2007).

On peut alors s'interroger sur le moyen le plus adapté pour établir un suivi permanent de ces risques, en établissant une cartographie aussi fidèle que possible et estimer, éventuellement, les dégâts et les modifications du paysage qui en résultent. L'imagerie satellitale, avec ses diverses résolutions, apparaît comme l'un des moyens les plus appropriés, sinon l'indispensable, pour résoudre le problème ainsi posé. A cet effet, Abdellaoui et al. (2005; 2007) ont essayé d'analyser l'apport des images optiques pour le suivi du risque naturel en Roumanie.

De la télédétection active ou passive, l'un des avantages des images radars est la possibilité d'enregistrement par tout temps indépendamment des conditions météorologiques (jour, nuit, nuages). Cette capacité leur donne un avantage de leur exploitation, pour le suivi des phénomènes en fonction du temps. La radiométrie enregistrée est fonction, entre autres paramètres, de l'humidité et de la rugosité de la 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.

Une étude multi date peut être réalisée à partir d'images composites associant des images d'une même scène à deux dates différentes. La composition colorée diachronique met ainsi en évidence les différences entre deux dates ; mais ces différences ne sont pas toujours causées par une variation des propriétés de la surface imagée. D'autres processus peuvent être à l'origine de ces variations ; nous citerons le recalage des images ou les conditions géométriques d'acquisition.

Pour le présent travail, 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 des images des satellites ERS et ENVISAT acquises par le laboratoire de géomorphologie de l'université de Liège dans le cadre d'une recherche partagée entre les universités Paris12, Liège et Bucarest, financée par l'AUF ; nous avons produits des images composites associant des scènes séparées par des intervalles d'1 à 1646 jours.

Les images utilisées couvrent une superficie de 100km x 100km.

L'analyse diachronique a permis de mettre en évidence les variations de surface, notamment au niveau des volcans de boue, des lacs (variation du volume d'eau présent), de la plaine (variation de la couverture végétale).

1. Introduction

L'image radar est une image complexe. La mesure associée à chaque pixel est constituée de deux parties : une partie réelle et une partie imaginaire. A partir de ces deux paramètres les deux informations d'amplitude et de phase sont extraites. La phase est exploitable indirectement par la technique d'interférométrie à l'aide d'une autre phase de la même scène. 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, comme la cartographie du dommage urbain ou des catastrophes naturelles ou industrielles, les changements des limites côtières

*Article présenté à la "Conférence Régionale de Géomorphologie de l'AIG: Glissements de terrain, Inondations et Changements Globaux Environnementaux dans les Régions"Montagneuses", 15-25 Septembre 2008, Braşov, Roumanie

(Bâ et al., 2007), le suivi de la déforestation, la surveillance de la fonte des glaces, la lithologie dans l'environnement polaire (Budkewitsch et al., 1996a, b), la cartographie géologique (Singhroy et Saint-Jean, 1999), la cartographie structurale (Wade et al., 2001), la classification des cultures (Bruniquel et Lopès, 1994 ; Lopès et Séry, 1997), la reconnaissance des formes, l'aménagement du territoire (Rudant et al., 1996), la détection et la caractérisation des nappes d'hydrocarbure dans les mers et les océans (Mercier et al., 2004). D. Troufleau et al. (1994), ont associé l'image amplitude au MNT pour montrer l'efficacité de ce type d'image pour déterminer l'humidité de surface du sol en zones arides et semi arides. Dans l'exploration géologique en zones arides, N. Baghdadi et al. (2005) ont démontré que l'imagerie radar SAR, en bande « L » ou « C », montre un plus fort potentiel de cartographie que les images optiques ASTER, surtout pour les structures linéaires comme les dykes ainsi que les structures circulaires. P. Laborde et M. Deveaux (1996) ont étudié les capacités et principales limites de l'imagerie SAR/ERS-1 pour la détection de phénomènes méso échelle en océanographie ; ils ont montré que seuls les courants supérieurs à 10m/s sont détectables par vent de vitesse supérieure ou égale à 10 m/s.

Les images radars d'amplitudes, constituent un outil très efficace pour le suivi dans le temps 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 envahies par les crues et d'identifier des zones qui peuvent servir pour une évacuation rapide. Il faut l'associer à d'autres images et un MNT. P. A. Brivio et al. (2002) ont pu cartographier l'extension de l'inondation au moment de l'acquisition, à l'aide de deux images radars SAR du satellite ERS-1 acquises un mois avant l'inondation et trois jours après l'inondation en novembre 1994 dans la région de Piémont en Italie. A. McMillan et al. (2006) ont utilisé une composition colorée pour l'identification des caractéristiques optimales pour la surveillance de l'inondation dans des zones urbaines. Dans le domaine de la géomorphologie, les images radars 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 produit dérivé des MNT. Pour l'estimation du volume des blocs déplacés, les cartes géologiques et géomorphologiques sont nécessaires.

L'objectif de ce travail est de montrer l'apport de l'imagerie radar pour l'analyse des changements du paysage dans la région subcarpatique de Buzau (Roumanie), en utilisant l'amplitude du signal radar rétrodiffusé entre différentes dates d'acquisitions. 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 des images des satellites ERS et ENVISAT acquises par le laboratoire de géomorphologie de l'université de Liège dans le cadre d'une recherche partagée entre les universités Paris 12, Liège et Bucarest, financée par l'AUF ; nous avons produits des images composites associant des scènes séparées par des intervalles d'1 à 1646 jours.

2. Méthodologie

2.1. L'analyse multi date

Pratiquement, la composition colorée diachronique met en évidence les différences entre deux dates ; mais ces différences, pour l'image radar, ne sont pas toujours causées par la seule variation des propriétés de la surface imagée. D'autres processus peuvent être à l'origine de ces variations ; nous citerons le recalage des images ou les conditions géométriques d'acquisition.

On peut alors modéliser le changement produit entre deux acquisitions par une fonction de trois variables (trois sources de natures différentes) : la scène imagée, la géométrie et le bruit ; on obtient ainsi :

$$\zeta_{chang}(p) = f[\zeta_b(p) \cdot \zeta_g(p) \cdot \zeta_s(p)]$$

$\zeta_b(p)$: traduisant les erreurs de calage, de traitement ...

$\zeta_g(p)$: pour les décorrélations causées par la différence des conditions géométriques de prise vue (différents angles d'incidence, ligne de base trop grande, différentes polarisations)

$\zeta_s(p)$: Du aux caractéristiques physiques ou diélectriques du pixel observé (c'est le changement recherché).

Cette décomposition du changement observé (par séparation des causes probables) est utile pour l'interprétation des images composites d'amplitudes et pour estimer les changements relatifs à l'évolution des caractéristiques propres des zones étudiées.

Cependant, une analyse multi temporelle à partir d'images amplitudes n'est possible qu'à certaines conditions :

- Dans une analyse multi date, les données doivent être en provenance du même centre de traitement et d'archivage (PAF); en effet, chaque PAF a des algorithmes propres de traitement de signal.
- La période séparant deux acquisitions doit être cohérente avec la période moyenne de changement pour le phénomène observé.
- L'angle d'incidence doit être identique pour les deux acquisitions, car il est difficile de comparer ou de superposer des images acquises sous des incidences différentes. La radiométrie, dans l'imagerie radar, est en effet très sensible à l'incidence de prise de vue. Pour les applications multi temporelles, la comparaison avant et après un événement, nécessite de travailler à incidence unique. (Adragna, 2001). Cela exclut les images acquises en orbite de sens opposés (ascendant et descendant) ; dans ce cas en effet, il est très difficile de corrélérer les images ; les objets (bâtiments, arbres, montagnes, etc.) sont vus par leurs faces opposées et apparaissent alors de façons très différentes.
- Enfin, les deux images doivent être prises avec un capteur utilisant la même longueur d'onde. En effet la rugosité relative d'une surface par rapport à l'onde radar dépend de la longueur d'onde et de l'angle d'incidence. Le travail de P. Laborde et M. Deveaux, (1996), sur l'uniformisation de l'image à cause de la variation de l'angle d'incidence de l'onde émise entre 19° et 26°, montre qu'il y a une diminution de l'amplitude du signal radar entre les points allant de la portée proximale (points plus proches de l'antenne) vers la portée distale (points plus éloigné de l'antenne). Cette variation se traduit par une baisse d'intensité des niveaux de gris de l'image selon l'axe radial. Si on applique le critère de Rayleigh,

$$\Delta h > \frac{\lambda}{8 \cos \theta}$$

pour deux angles d'incidence (19° et 26°) dans le cas du satellite ERS et ENVISAT, pour une longueur d'onde $\lambda = 0,0565$ m, on obtient une valeur Δh comprise entre 7,46901381 mm pour une incidence de 19° et 7,85686985 mm pour une incidence de 26° soit environ 0,40 mm de différence ; pour 23° on obtient la valeur $\Delta h = 7,67175761$ mm. Ceci montre qu'une différence de quelques degrés affecte la rugosité en fraction de millimètre, l'influence est donc minime.

2.2. Les données utilisées et la zone d'étude

2.2.1. La zone d'étude

La zone d'étude (Fig. 1) est un espace de 100km x 100km (couverture des images radar) englobant le comté de Buzău et des parties d'autres comtés (Vrancea, Braila, Prahova et Covasna). Elle subit deux types de risques naturels particuliers: les risques climatiques (phénomènes d'inondations; citons en particulier celles du 7 au 31 mai 2005 causant des dégâts matériels estimés à 150 millions d'euros) et les risques géologiques (tremblements de terre, glissements de terrain et coulées de boue). Les précipitations de fortes intensités, associées à des périodes de sécheresse, accentuent l'érosion des sols et favorisent le phénomène de glissement de terrains.

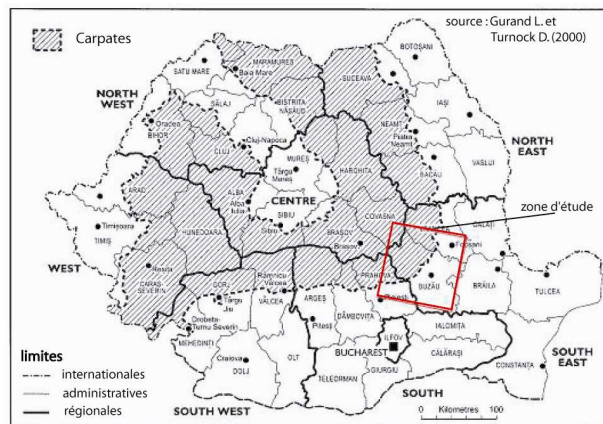


Fig. 1. Localisation de la zone de travail

2.2.2. Les données images

Les 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).

Pour cette étude, nous avons utilisé 8 images :

- 4 images mono vues complexes : une image du satellite ERS-1 et trois images du satellite ERS-2, aux dates : 28 et 29 mai 1995, 17 Juin 1996 et 29 novembre 1999;
- et 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 (1) synthétise les caractéristiques de ces images.

Tableau 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)
17-06-199	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)

2.3. Obtention des images amplitudes

2.3.1. Extraction des images amplitude

A l'aide des logiciels SAR, DIAPASON et DORIS, nous avons extrait les images amplitudes ramenées au format multivues par un rééchantillonnage spatial de 5 pixels en azimut et 1 pixel en distance afin d'avoir une dimension carrée du pixel ainsi qu'une résolution maximale de 20m dans les deux directions (azimutale et distance). Ceci a aussi pour conséquence de diminuer le chatoiement qui caractérise les images amplitude radar SAR. Elle est réalisée par la sommation incohérente de plusieurs vues en intensité (Grandchamp et Cavassilas, 1997). Nous disposons ainsi de quatre images amplitudes radar SAR de taille (5292 x 4900) pour ERS et quatre images de taille (5378 x 5178) pour ENVISAT.

2.3.2. Calcul de coefficient de rétrodiffusion et recalage des images

Les images amplitudes ne sont pas corrigées et ne sont pas données avec leur coefficient de rétrodiffusion. Aucune opération de calibration n'est réalisée par le logiciel Diapason, orienté vers les études de phase et l'interférométrie DinSAR. Les images extraites gardent les informations d'amplitude propres au produit de base. De fait, aucun coefficient de rétrodiffusion ne peut être extrait directement. Nous devons pour cela utiliser le logiciel BEST¹, fourni par l'ESA. Cette étape consiste à convertir l'image d'amplitude extraite en une image d'amplitude avec comme information le coefficient de rétrodiffusion pour chaque pixel.

2.3.3. Filtrage des images amplitudes

La lisibilité des images radars d'amplitudes est limitée par la présence de chatoiement (ou speckle). Le *speckle* est un bruit granulaire dû au fait que chaque élément rétrodiffuseur élémentaire se comporte comme une source émettant une onde cohérente et qui peut inférer en tout point de l'espace. L'inférence peut être, soit une inférence constructive, où le résultat est une tache brillante constituée par des pixels clairs sur l'image, soit une inférence destructive, où le résultat dans ce cas est une tache sombre que forment les pixels foncés. Pour augmenter la lisibilité, il existe des filtres spécifiques comme les filtres basés sur des modèles statistiques (filtre Frost 1981, Lee 1986, filtre de Kuan 1987...). Pour ce travail, nous avons utilisé le filtre Frost pour toutes les images amplitude avec une fenêtre moyenne de (3x3).

2.3.4. Géoréférencement et calage

Cette étape a été très délicate. En effet, il n'a pas été facile d'identifier des pixels « semblables » dans les images à recalage. Nous finalement du réaliser le calage des images amplitude l'une par rapport à l'autre à l'aide du logiciel ENVI en opérant séparément sur les images ERS d'une part et les images ENVI d'autre part.

Après géoréférencement nous avons encore constaté l'existence d'un décalage des images entre elles. Ce décalage est dû à la différence de géométries de prises de vue ainsi qu'aux différences d'orbites.

¹ <http://earth.esa.int/services/best/>.

3. Premiers résultats et interprétation

3.1. Lecture des images amplitude

Dans les images amplitudes, une surface lisse apparaît noire ou très sombre, à cause des variations moyennes des aspérités des pixels inférieures à 7.67mm suite à la relation qui existe entre la longueur d'onde utilisée et la rugosité. La réflexion spéculaire entraîne un faible retour d'énergie vers le capteur. La surface rugueuse, apparaît claire suite à la réflexion diffusée de l'onde incidente, caractérisée par la capacité de cette surface à renvoyer l'énergie vers le radar.

Les points les plus brillants dans l'image amplitude sont dus aux coins réflecteurs comme les bâtiments dans des zones urbaines ou les sommets des falaises en zone rurale ; les empilements de roches produisent de multiples réflexions surtout si l'angle droit est bien orienté vers le capteur. Dans notre zone d'étude, on distingue bien les villes grâce à leur capacité de rétrodiffuser le signal radar ; sur l'image de la figure 2, on voit nettement Buzau, Focșani, Ramnicu-Sarrat, Mizil, Galati... ; les trois lacs apparaissent en noir signe d'une surface lisse.

La rétrodiffusion du signal par la scène imagée vers le capteur radar est influencée par l'inclinaison du sol et sa rugosité (définie par l'écart quadratique moyen des irrégularités d'une surface) ; plus le sol est rugueux plus il a une forte intensité et il apparaît alors clair dans l'image. Les caractéristiques diélectriques du sol influencent également le signal ; les objets qui contiennent beaucoup de métal réfléchissent fortement comme le cas ici à Buzau où 85% des maisons ont des toits en métal (zinc). Des anomalies peuvent également apparaître dans l'image à cause de l'effet de chatoiement.

Une différence d'angle d'incidence induit une différence du seuil de rugosité à détecter. Pour les satellites ERS et ENVISAT et avec bande « C », $\lambda=0,0565$ m :

- pour ERS : ($\theta_{ERS} = 23,3^\circ$) ; $\text{Cos } \theta = 0,91844$; une surface est rugueuse si elle vérifie : $\Delta h > 7.689\text{mm}$.

- pour ENVISAT : ($\theta_{ENVISAT} = 22,8^\circ$) ; $\text{Cos } \theta = 0,92186$; une surface est rugueuse si elle vérifie : $\Delta h > 7.661\text{mm}$.

L'humidité agit sur la transmission et l'absorption du signal. Plus la teneur en eau est élevée, plus l'intensité rétrodiffusée est forte. Ainsi, la constante diélectrique détermine la profondeur de pénétration de l'onde radar ; quand elle est élevée, l'onde pénètre moins dans le sol et l'intensité rétrodiffusée est forte. Une augmentation de taux d'humidité augmente la constante diélectrique et amplifie la brillance du sol. Un terrain sec, au contraire, aura un signal faible.

3.2. Le principe de la composition colorée

Nous avons réalisé les composites 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 :

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

Le tableau 2 suivant résume les cas extrêmes pouvant être obtenus

Tableau 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

3.3. Image amplitude

Sur les images amplitudes radar SAR, on distingue 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 glacis

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 Orientales de la région de Buzau). Cette partie comprend : la limite entre les Carpatés orientales et les Subcarpatés, les deux volcans de boue (Pâcelele

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 (Fig. 2) ; 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.

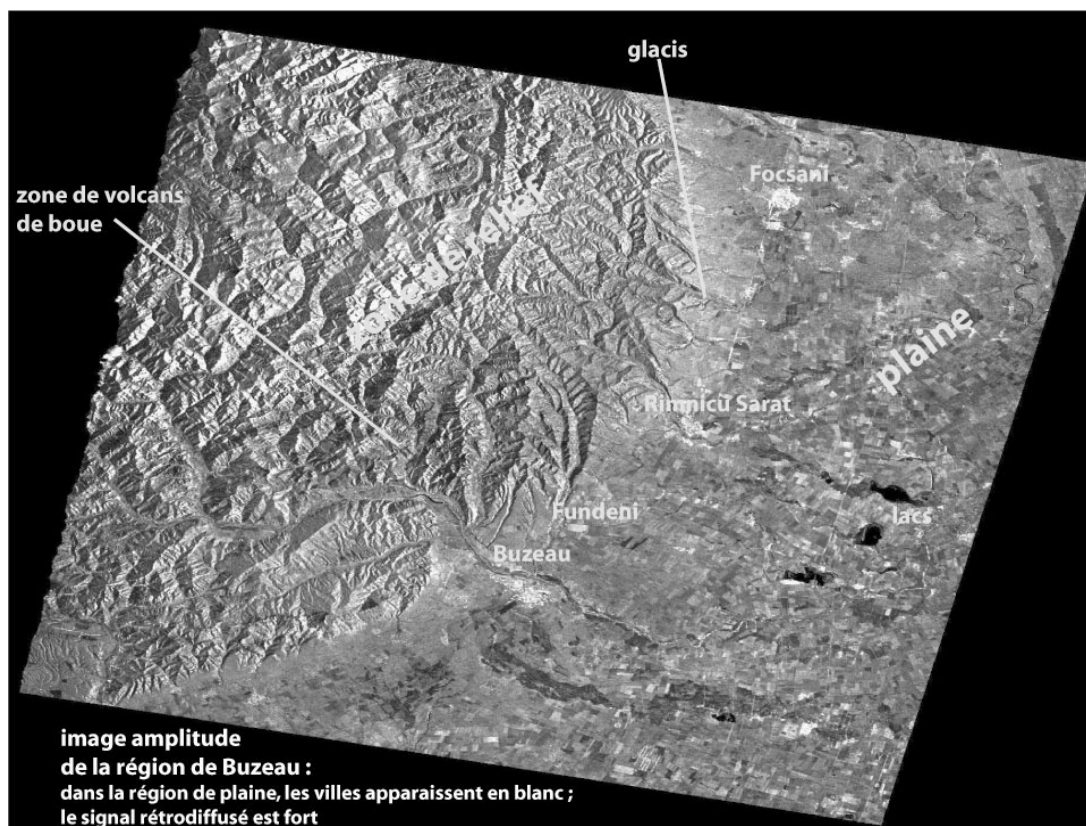


Fig. 2. Image amplitude de la zone d'étude

3.4. Validation

Sur les images amplitude réalisées, nous constatons une faible distorsion dans les deux dimensions du pixel, causée par la différence de résolutions dans les deux directions. On observe ainsi un léger allongement vers le Nord (direction azimutale). Cependant, les images sont relativement bien corrélées ; pour le confirmer, nous observons des couples d'images séparées par un très faible intervalle de temps (1jour) ; pour une telle période, il n'y a, en général pas de changement notable des propriétés de la surface, sauf dans le cas d'un événement exceptionnel (crue, avalanche, séisme, ...).

Nous avons d'abord observé (Fig. 3) le couple d'images acquises les 28 et 29 mai 1995. Les zones

apparaissant dans les couleurs rouge et verte, caractéristiques du changement, sont quasi inexistantes ; il y a donc très peu de changement, ce qui est normal sur un intervalle d'une journée. Les faibles surfaces rouges et vertes dans l'image (a) correspondent à des variations de radiométrie probablement dues à des effets d'atmosphère, ou plus sûrement à des défauts de calage. Les images (b) et (c) de la figure 3 présentent les mêmes changements ; les couples sont séparés par une journée (b : couple 28 mai 95 – 29 novembre 99 et c : couple 29 mai 95 – 29 novembre 99) ; mais les images constituant ces couples sont respectivement séparés de 3ans et 217 jours pour (b) et de 3 ans et 216 jours pour le couple (c).

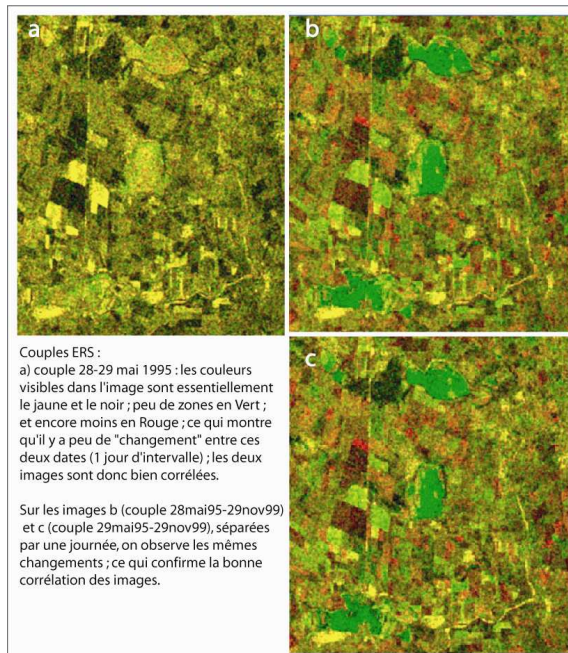


Fig. 3. La bonne corrélation des images

3.5. Les changements en zone de plaine

3.5.1. Les lacs

En 2004 :

La figure 4 montre la composition colorée associant les deux images acquises respectivement le 18 octobre et le 27 décembre 2004 ainsi que les précipitations des mois d'octobre et décembre 2004 à Buzău. Le premier lac (en haut de l'image) apparaît en rouge; cela signifie que le 18 octobre la surface du lac était recouverte d'eau (surface lisse); alors que le 27 décembre, le signal était fort (surface hétérogène à forte rétrodiffusion due soit à un vent fort – peu probable car les autres lacs ont une surface lisse- soit à la présence de végétation, soit un assèchement partiel du lac). La dernière

hypothèse semble la plus probable si l'on considère l'extrémité droite du lac (apparaissant en noir, ce qui traduirait la présence d'eau produisant une surface lisse à signal rétrodiffusé faible) ; cela est d'ailleurs confirmé par le diagramme des précipitations (Fig. 5) qui montre une chute de la quantité d'eau tombée à partir de 1999 (période de déficit jusqu'en 2005).

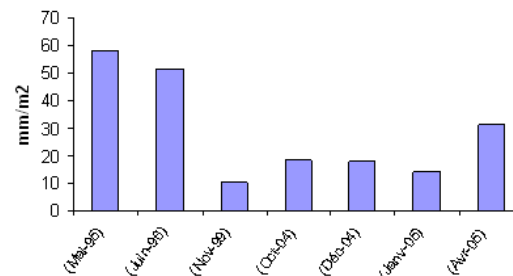


Fig. 5. Précipitation 1995-2005

En 2005 :

La figure 6 montre la composition colorée associant les deux images acquises respectivement le 31 janvier et le 11 avril 2005 (ainsi que les précipitations des mois de janvier et avril 2005 à Buzău. Le lac au nord de la zone semble avoir une surface pratiquement partagée en deux régions : une région nord en rouge, signe d'un signal fort en avril et faible en janvier ; et une région sud en jaune, signe d'un signal fort en janvier et également en avril. La région nord était donc recouverte d'eau en janvier, mais probablement pas en avril ; ceci est conforme aux graphiques des précipitations de décembre à avril : période pluvieuse en décembre et janvier (avec cependant un niveau faible de précipitations : 8 à 10mm/m²) et relativement sèche en début d'avril (date de l'acquisition de l'image). La région sud traduit un signal fort en janvier et avril, cela est dû à une forte rugosité de la surface (pas d'eau, vent fort, végétation).

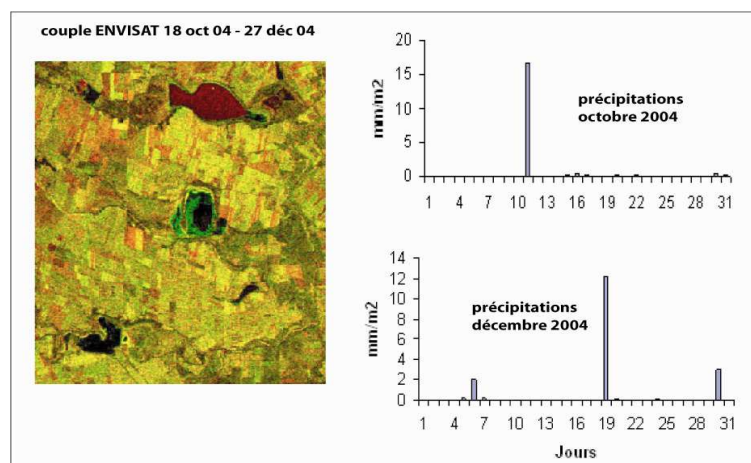


Fig. 4. Changements en 2004

3.5.2. La végétation

La figure 7 montre les changements survenus dans la partie plaine (Nord Est de l'image) entre le 27 décembre 2004 et le 11 avril 2005 d'une part et entre le 31 janvier et 11 avril 2005 d'autre part. La date du 11 avril 2005 est donc commune aux deux couples.

Constatons dans un premier temps que les zones urbaines (Focșani et Rumniciu Sarat) n'ont pratiquement pas changé d'aspect ; une légère coloration rouge pour la composition colorée de gauche indique une rugosité (ou une humidité) plus forte pour le 11 avril 2005 (effet du vent, de la poussée de végétation ...).

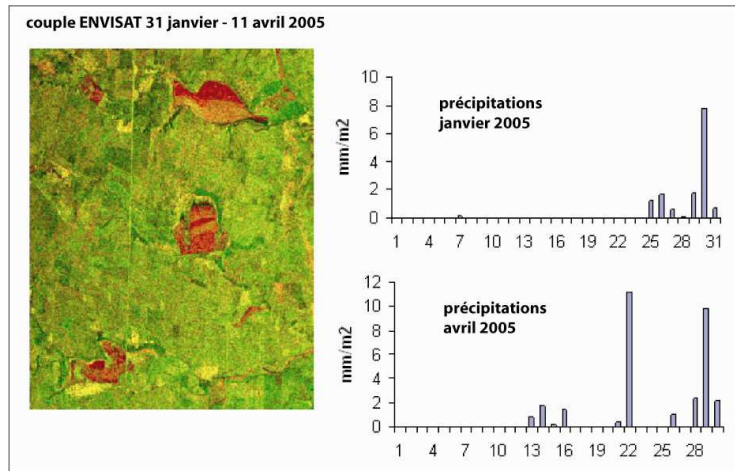


Fig. 6. Changements en 2005

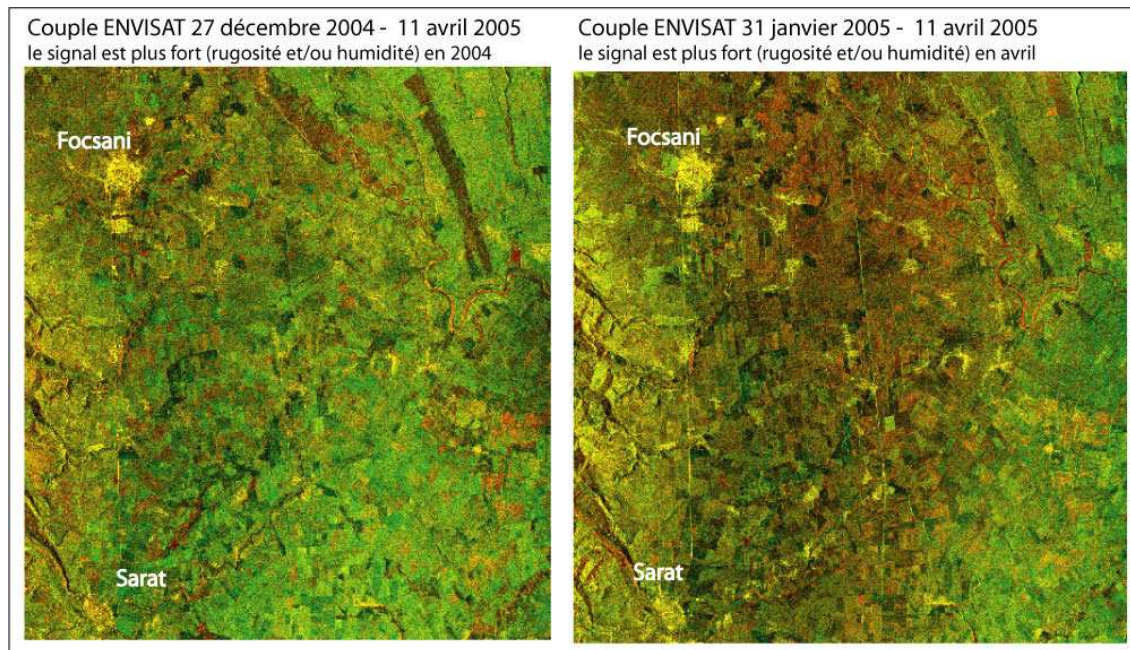


Fig. 7 : Changements en zone de plaine

Pour les parcelles agricoles, la situation est différente. On note un changement significatif entre les deux images de chacun des deux couples. Entre décembre 2004 et avril 2005, nous avons une diminution du signal (donc de la rugosité ou de l'humidité) ; par contre une augmentation du signal rétrodiffusé entre janvier 2005 et avril 2005.

Pour le lit de cours d'eau, par contre, nous notons une augmentation de signal dans les deux cas ; ce qui traduit une rugosité plus forte, autrement dit, probablement un dessèchement de surface (diminution de la quantité d'eau en surface). Ce résultat est conforme à celui obtenu pour les lacs. Il est donc plus plausible.

4. Premières conclusions

Les éléments principaux du paysage sont relativement bien distingués sur les images amplitude ; c'est le cas des zones urbaines, des parcelles et des lacs dans la zone plate ; les cours d'eau sont également bien distingués et la morphologie est bien décrite dans la partie accidentée ; ce qui prouve que l'image amplitude peut être concurrente aux images optiques malgré la présence du chatoiement (speckle).

Certains éléments demeurent néanmoins indiscernables à l'échelle des images et des déformations sur l'apparence des structures peuvent être observées, notamment dans la zone de relief, et donc fausser l'interprétation (apparition d'effet « cordon » par exemple). L'image radar d'amplitude, représente mieux la surface plate (plaine de Buzău) que la surface accidentée (collines subcarpatiques). 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, 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.

Nous n'avons pas pu caler avec précision toutes les images de la série disponible et nous avons donc opéré un calage séparé des images provenant de chacun des deux satellites (ERS et ENVISAT) ; ceci a eu pour conséquence de réduire les dates d'analyse diachronique.

Nous avons observé que le signal rétrodiffusé est très cohérent dans la zone plate de l'image mais très bruité dans la zone de relief à cause des perturbations dues aux différentes structures et à des pentes différentes.

Signalons également que la lecture de l'image amplitude doit être réalisée avec plus de précaution que pour une image optique ; un signal de forte intensité qui n'est pas toujours lié à une forte rugosité de surface ou une humidité importante du sol. La cause peut être la pénétration de l'onde radar (diffusion du volume). Nous noterons enfin que les textures apparaissant dans une image radar sont dues à des surfaces rugueuses par rapport à la longueur d'onde (critère de Rayleigh) car divers niveaux de rétrodiffusion existent selon la nature de la surface et son orientation.

Au niveau des types d'images analysées, tout au moins pour notre zone d'étude, nous avons observé

que les données ENVISAT sont plus adaptées au suivi temporel grâce à leurs courts intervalles ; les images ERS auraient pu donner de meilleurs résultats ; mais leur intervalle temporel est tellement grand qu'ils génèrent des décorrélations temporelles surtout à cause des caractéristiques de la zone d'étude.

Pour synthétiser, un certain nombre de conclusions nous paraissent intéressantes à souligner de façon particulière :

- l'imagerie radar est certainement, parmi les images satellitaires, la plus adaptée dans la détection des changements de paysage, notamment les faibles déformations impossibles à détecter sur les images optiques ;

- plusieurs techniques de traitements des images radar existent ; mais il nous semble qu'aucune ne peut aboutir seule à une interprétation sûre des « phénomènes observés » ; ceci car les changements mis en évidence sur les produits dérivés peuvent avoir pour cause aussi bien des changements réels du paysage que des perturbations du signal enregistré : artefacts atmosphériques, conditions de prise de vue, etc. car la phase comme l'amplitude sont assez sensibles aux multiples sources du signal ;

- l'image radar, par le fait même qu'elle soit le produit d'une télédétection active, est complexe et son traitement l'est tout autant ;

- comme toutes les images ne permettent pas d'aboutir à des produits dérivés facilement interprétables, il est nécessaire de disposer d'une grande série d'images offrant ainsi un plus grand choix de sélection ;

- la nature de la zone enfin et le comportement du terrain influent grandement sur la complexité de la chaîne de traitement et la qualité des résultats pour un objectif thématique donné.

Le retour au terrain nous a permis de conforter la plupart des résultats avancés.

5. Remerciements

Nous remercions l'AUF pour le financement du projet de recherche partagée sur l'apport de l'imagerie satellitaire 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.

BIBLIOGRAPHIE

- ABDELLAOUI A., PATRU I. G., IELENICZ M., OZER A., 2005, *Opportunité de l'utilisation de l'imagerie satellitale moyenne résolution dans le cas de phénomène de faible étendue ; cas des volcans de boue*, Revista de geomorfologie, vol. 7, pp. 141-150, 2005a.
- ABDELLAOUI A., BENBLIDIA N., PATRU I. G., IELENICZ M., OZER A., 2007, *La technique de clonage de pixels pour l'analyse de phénomènes de faible étendue par image satellitale : application aux mouvements de terrain sur la vallée de la Prahova (Roumanie)*, Revue Télédétection ; Vol. 6, n°3 ; pp. 233-246.
- ADRAGNA F., 2001, *Traitement des images de Radar à Synthèse d'Ouverture (RSO)* sous la direction de Henri Maître, Hermes Science Europe Publication, Paris, p : 328.
- BÂ K., WADE S., NIANG I., TRÉBOSEN H., RUDANT J.-P., 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.
- BAGHDADI N., GRANDJEAN G., LAHONDRE D., PAILLOU P., LASNE Y., 2005, *Apport de l'imagerie satellitale radar pour l'exploration géologique en zones arides*, Comptes Rendus (CR) Geosciences, volume 337, Issue 8, June, pp. 719-728.
- BRIVIO A., COLOMBO R., MAGGI M., TOMASONI R., 2002, *Integration of remote sensing data and GIS for accurate mapping of flooded areas*, Published in: International Journal of Remote Sensing , Volume 23, Issue 3 February 2002 , pp. 429-441.
- BRUNIQUEL J., et LOPÈS A., 1994, *Analysis and Enhancement of multitemporal SAR data*, Image and Signal Processing of Remote Sensing, 2315: 342-353.
- BUDKEWITSCH P., D'IORIO M. A., HARISSON J. C., 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..
- GRANDCHAMP M. et CAVASSILAS J.-F., 1997, *Restauration d'image marines issues d'un radar à ouverture synthétique par filtrage adapté et technique Multivue*, Seizième colloque GRETSI, 15-19 Septembre 1997, Grenoble, pp. 789-792.
- GRECU F., ZAVOIANU I., ZAHARIA L., COMĂNESCU L. (2007), *Analyse quantitative du reseau hydrographique du bassin versant Slanic (Roumanie)*, Physio-Geo – Géographie Physique et Environnement, vol.I, pp.79 – 94.
- LABORDE P., DEVEAUX M., 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.
- 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.
- MERCIER G., DERRODEY S., PIECZYNSKI W., 2004, *Segmentation Multiéchelle de Nappes d'Hydrocarbure*, Traitement du Signal, Vol. 21(4).
- 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.
- 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.
- 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 S., NDOYE A., MBAYE M., 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.

(1) Université Paris Est / Paris-12; (2) Université de Liège; (3) Université de Bucarest
hachemi_kamel@yahoo.fr; abdellaoui@univ-paris12.fr