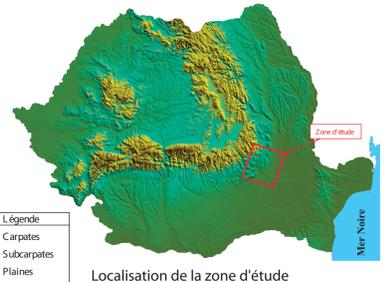


K. Hachemi(1), A. Abdellaoui(2), F. Grecu(3), A. Ozer(4), G. Visan(3), F. Bétard(2)
(1) ENST Télécom ParisTech/TSI, (2) Université Paris Est-Créteil Val de Marne, (3) Université de Bucarest, (4) Université de Liège.

I. INTRODUCTION

Généralement, les volcans de boue ne sont pas considérés comme des volcans dangereux à caractère désastreux et ne présentent pas de risque majeur.
Economiquement parlant, ils sont des indicateurs des gisements pétroliers (présence de réserves d'huile et de gaz). Mais ils ont des conséquences à caractère catastrophique (rejets de boue et de gaz) qui nuisent à l'environnement :
- changement de paysage (transformation d'un paysage verdâtre en paysage "lunaire" inhabitable);
- participation au réchauffement climatique (rejet de gaz dans l'atmosphère).
Il y a trois hypothèses qui peuvent être émises pour expliquer les éruptions de ces volcans de boue :
i) les tremblements de terre, la réactivation d'une faille libre de la pression dans les roches profondes et fait jaillir la boue du sol;
ii) les forages de gaz et de pétrole dans ces endroits;
iii) la géologie du terrain.

La région de Buzau (Roumanie), précisément la zone de Berca, est caractérisée par la présence des volcans de boue. Elle est aussi caractérisée par des séismes et des forages pétroliers à proximité; on peut s'interroger sur le rôle des secousses sismiques et des forages extensifs des nappes pétrolières sur l'accroissement de l'activité des volcans à libérer de la boue et du gaz.
Ces volcans ont des diamètres variant entre un mètre à quelques dizaines de mètres. Ils sont difficiles à repérer sur les images de faible ou moyenne résolution (images satellitaires optiques); à cet égard, ils présentent un intérêt pour les images radars RSO (SAR).
Dans cette logique nous avons essayé d'étudier les volcans de boue (Buzau) à partir des images radars RSO de la plate-forme ENVISAT à l'aide de la technique d'interférométrie différentielle (DinSAR).
Cette étude se focalise sur le suivi de leurs activités dans une période courte allant des mois d'octobre et décembre 2004 au mois d'avril 2005.
L'intérêt et l'objectif principal de cette étude sont ainsi de surveiller et de détecter les faibles déformations dues aux activités des volcans de boue dans la zone de Berca.



Localisation de la zone d'étude

II. LES VOLCANS DE BOUE DE BERCA

Depuis 1924, les volcans de boue de Berca (ville de Berca) sont déclarés réserve naturelle. Ils représentent la plus grande surface des volcans de boue en Europe. Ils sont considérés comme les seuls de ce type en Europe caractérisés par un accès assez difficile. Ces volcans de boue correspondent à une accumulation boueuse de forme conique. Ils mesurent entre moins d'1 m à 10 m de diamètres avec des formes bouillonnantes (bulles) de la boue froide. Ils sont dus à la remontée des gaz en provenance des couches pétrolières d'une profondeur allant de 200 à 300 m. Ils se composent d'un mélange visqueux d'eau, de gaz et d'argiles, qui constituent la boue.
Cette boue s'échappe et s'écoule en dévastant la végétation avoisinante.
L'éruption est causée par l'amplification des pressions souterraines et l'accroissement de la température.
Les éruptions ont été souvent localisées le long des failles (accidents) mais ce n'est pas toujours le cas.

Situation des volcans de boue de Berca :

Les volcans de boue de Berca sont localisés dans l'axe anticlinal orienté nord-sud, long de 20 km qui prend le nom de la ville Berca. Ils ressemblent à des monticules de boue séchée ou glissante, et représentent un paysage quasi lunaire (les plantes environnantes ne s'établissent pas à la nature du sol). Ils sont caractérisés par plusieurs cratères apparaissant à la surface comme un plateau bombé et formé par l'accumulation des boues éruptives.
Au long de l'anticlinal, on trouve quatre groupes de volcans de boue; les plus importants sont les deux volcans «PACLELE»: 1)- l'un se trouve au sud, on l'appelle «PACLELE MARI» qui signifie en français "Grands Brouillards" (Volcan sud); 2)- le deuxième au nord, «PACLELE MICI» qui signifie "Petits Brouillards" (Volcan nord).
La distance qui sépare les deux volcans de boue (Nord et Sud) est environ 2,5 km. Ils se situent à environ 12 km de la ville de Berca.

Volcans de boue	Latitude (Nord)	Longitude (Est)	Altitude (ft)
PACLELE MARI	45.339066°	26.709127°	338 m
PACLELE MICI	45.358327°	26.712473°	327 m



Les étapes de formation d'un cratère du volcan de boue de Berca, du rejet de la boue du cratère jusqu'à la forme conique de la boue sèche



Le rejet de la coulée de boue des volcans de Berca et la solidification rapide de cette coulée



La surface des volcans de boue de Berca caractérisée par des réseaux de ravines creusées par les écoulements de boue.

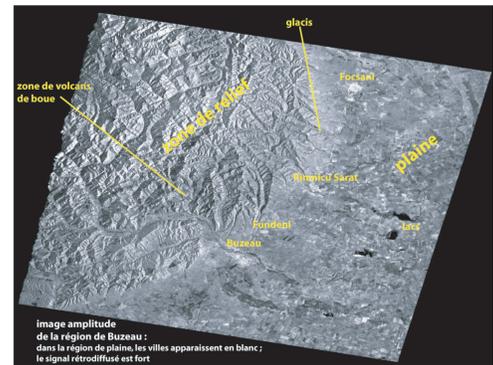
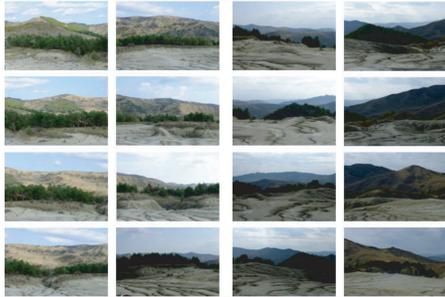


image amplitude de la région de Buzau : dans la région de plaine, les villes apparaissent en blanc; le signal rétrodiffusé est fort

Les changements environnementaux causés par les volcans de boue de Berca

1- Changement de paysage :

La quantité de boue dégagée des volcans de Berca transforme les paysages verdâtres en paysages quasi-désertiques où les plantes ne peuvent pas survivre à cause de la nature nouvelle du sol.



2- Le rejet du gaz dans l'atmosphère :

Le gaz qui s'échappe des profondeurs et qui s'injecte directement dans l'atmosphère correspond principalement à du méthane, associé à du dioxyde de carbone et de l'azote. Il peut avoir un impact sur le climat local régional et peut également être interprété comme un processus qui participe au réchauffement climatique global.



Le rôle des séismes et de l'exploitation pétrolière dans la région de Berca

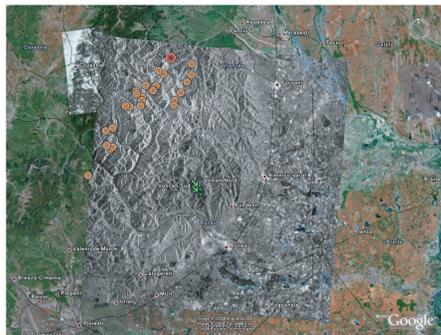
1- Séismes :

La zone d'étude est située dans les Carpates, produit d'une collision entre la plaque africaine et la plaque eurasienne au Néogène. Dans la région de Vrancea, la fréquence sismique par siècle est de 3 à 4 événements d'une magnitude supérieure à 7 sur l'échelle de Richter. Cette zone a été le siège de plusieurs phénomènes géologiques catastrophiques dans le passé qui peuvent resurgir à n'importe quel moment. Sachant que 95 % des tremblements de terre en Roumanie sont provoqués dans la région de Vrancea (environ 60 km au nord-ouest des volcans Berca). Dans la région des collines subcarpatiques et carpatiques, le soulèvement tectonique s'effectue à un rythme moyen de +2 mm/an. Les tremblements de terre les plus importants et les plus graves se sont produits, localisés et concentrés surtout dans la partie nord-ouest des volcans de boue.

Le tableau n°2 montre les principaux séismes qui se sont produits avec une moyenne de magnitude 7 sur l'échelle de Richter dans cette région du sud-est de la Roumanie, précisément dans le comté de Vrancea (voisin du Comté de Buzau).

Dates	Épicentres Latitude	Longitude	Profondeur (km)	Magnitude (échelle Richter)
26/10/1802	45.7°	26.6°	150	7.4
23/01/1838	45.7°	26.6°	150	6.9
10/11/1940	45.8°	26.8°	150	7.3
04/03/1977	45.8°	26.7°	86	7.2
30/08/1986	45.6°	26.3°	137	6.9
30/05/1990	45.8°	26.7°	89	7.1
31/05/1995	45.8°	26.8°	88	6.5

Source : USGS-NEIC, web

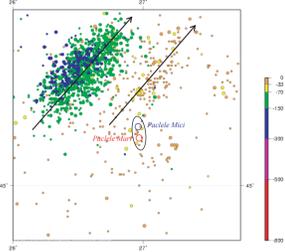


Carte de la localisation des principaux épicentres des séismes dans la région d'étude (superposition de l'image d'amplitude radar sur Google Earth).

Il existe deux lignes de concentration des épicentres des séismes provoqués dans cette région et orientées Sud-Ouest/Nord-Est :

- 1- Le premier axe :
 - moins important et plus proche des volcans de boue (20 km),
 - se caractérise par des séismes moins intenses avec des profondeurs superficielles allant de 33 à 140 km.
- 2- Le deuxième axe :
 - se situe dans les Carpates
 - se caractérise par des séismes plus importants avec des profondeurs moyennes allant de 150 à 300 km.
 - l'intensité de ces séismes est important, comme le séisme du 4 mars 1977 provoquant 2000 victimes et 35000 familles sans abri avec des dommages considérables.

Le nombre de séismes enregistrés dans cette zone est de 1329 séismes entre le 5 janvier 1973 et le 16 mars 2008, soit 38 séismes par an juste pour les épicentres localisés dans cette zone d'étude (100km x 100km). L'analyse de la sismicité historique de 35 ans de la région témoigne de cette activité sismique importante dans cette région.



Carte de localisation, de profondeur et des deux axes des épicentres des séismes du 05 janvier 1973 au 05 mars 2008 (Source: NEIC: Earthquake Search Results)

2- Les exploitations pétrolières :

La région de Buzau est considérée parmi les premiers sites pétroliers de la Roumanie et de l'Europe de l'Est. Cette zone d'exploitation de pétrole entoure les volcans de boue dans la région. Cette zone d'extraction pétrolière englobe une superficie d'environ 30 hectares. La Roumanie est classée à la 11ème place en Eurasie, avec une production de pétrole estimé à 105000 barils/jour, ce qui équivaut à 0,1% de la production mondiale.



Zone de stockage des hydrocarbures dans la région de Berca



Pompe d'extraction du gaz dans la région de Berca

III. DONNÉES et METHODE

Les données utilisées sont des données radar à synthèse d'ouverture RSO (SAR), précisément des images radars complexes SLC (Single Look Complex). Nous avons également utilisé un modèle numérique d'altitude (DEM) de la mission SRTM de la région de Buzau (mêmes coordonnées de la scène imagée) avec une résolution de 90 m. Le DEM-SRTM a été utilisé pour éliminer l'influence de la topographie à l'aide l'interférométrie différentielle (DinSAR).

Le choix des images des couples utilisés sont appuyés sur les conditions de faisabilité :
- l'intervalle Baseline temporelle (Btemp) est d'1 jour à 4 ans;
- la Baseline spatiale (B) (B < 1000 m).

Ces images couvrent une zone de 100 km x 100 km. Elles sont acquises à partir d'un passage de jour (orbite descendante), d'une direction azimutale vers le bas. La scène est illuminée vers la droite en visée latérale avec un angle d'incidence de 23°, dans la bande « C » de longueur d'onde (5,65 cm), et une polarisation verticale (VV).

La technique utilisée est l'interférométrie différentielle (DinSAR) avec la méthode du CNES (deux images RSO et un MNA externe). A partir d'un interférogramme réalisé entre deux dates différentes de la même zone, on peut mesurer les déformations du sol étendus, précises et denses. Elle permet ainsi de mesurer les déplacements du sol de l'ordre de 28 mm dans le cas de la bande C.

Nous avons traité tous les couples formés à partir de ces données et nous avons calculé les caractéristiques géométriques de prises de vue pour chaque couple (cf. tableau n°3)

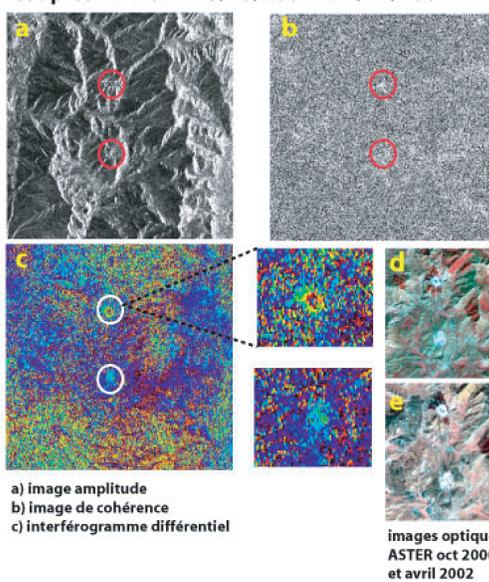
Les couples d'images ERS :									
Orbites	Même-Eclaire	B	Btemp	Btemp	Btemp	Btemp	Btemp	Incang	Hmax
(jours)	(jours)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(deg)	(m)
20221/548	1	90.5	-79	-43.8	-89.4	13.3	23.3	120.4	
20221/6059	336	115.9	-150.2	-66.6	-117.5	0.2	23.3	63.2	
20221/24095	1646	177	-129	-121	-163.4	67.9	23.3	73.8	
248/6059	385	75.3	-75.2	-2.7	-71.3	-23.8	23.3	126.7	
248/24095	1045	89.2	-62.3	-77.1	-85.5	59.3	23.3	115.7	
6059/24095	1260	80.7	31.2	-74.3	3	80.6	23.3	-305.5	

Les couples d'images ENVISAT :									
Orbites	Btemp	B	Btemp	Btemp	Btemp	Btemp	Btemp	Incang	Hmax
(jours)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(deg)	(m)
13774/14776	79	230.7	-304.2	-129.5	-230.2	16.7	22.8	30.4	
13774/15277	105	664.1	-619.3	-239.4	-663.9	11.2	22.8	15	
13774/16279	175	523.2	-499.7	-151.4	-521.3	-20.1	22.8	18.5	
14776/15277	35	344.4	-326.3	-109.8	-344.1	-9.3	22.8	28.4	
14776/16279	105	215.8	-214.5	-22.1	-209	-53.1	22.8	43.1	
15277/16279	79	149.2	120.6	87.8	143.5	-40.7	22.8	-76.7	

Btemp : Baseline temporelle
B : Baseline (distance entre les deux radars)
Btemp : Baseline perpendiculaire
Btemp : Baseline parallèle
Btemp : Baseline horizontale
Btemp : Baseline verticale
Incang : Angle d'incidence
Hmax : Altitude d'ambiguïté (H = Hmax*cos(2alpha))

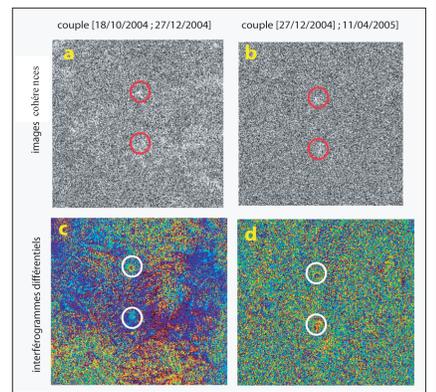
La figure ci-dessous montre l'apparence des volcans de boue pour le couple ENVISAT [18/10/2004; 27/12/2004]; nous faisons également un zoom séparé sur les deux volcans pour mieux les distinguer. Des extraits des images optiques ASTER de 2000 et 2002 sont également mis sur la même figure; la partie noire à l'intérieur de chaque « cratère » sur ces compositions colorées fausses couleurs correspond à l'eau superficielle; cela confirme bien que le volcan nord est plus actif que le volcan sud.

couples ENVISAT 18/10/2004 - 27/12/2004



a) image amplitude
b) image de cohérence
c) interférogramme différentiel
images optiques ASTER oct 2000 et avril 2002

Cette zone a montré une bonne cohérence respectivement entre les dates 18/10/2004 et 27/12/2004 (70 jours d'intervalle) et 27/12/2004 et 11/04/2005 (105 jours d'intervalle). Cette bonne cohérence est due à la stabilité de la phase, qui s'explique par la coulée lente et la solidification rapide de la boue à la surface entre les périodes de prise de vue; ce qui n'a pas perturbé les éléments dans le même pixel à cet endroit. Ceci témoigne de la fiabilité des interférogrammes différentiels, permettant d'affirmer que les franges observées sont dues aux déformations géologiques causées à l'origine par l'accumulation de la boue.



IV. RÉSULTATS et DISCUSSION

Les interférogrammes différentiels réalisés à partir des deux couples ENVISAT ont permis de bien distinguer les deux volcans de boue. Nous avons essayé d'interpréter la phase différentielle dans cette zone de Berca. Nous avons aussi réalisé les images amplitude et cohérence correspondantes à partir de ces deux couples ENVISAT. Nous avons également traité les images ASTER (images optiques de 15m de résolution) d'octobre 2000 et d'avril 2002.

L'analyse de ces différents produits nous permet de tirer les conclusions suivantes concernant les deux volcans de boue Paclele Mici (Nord) et Paclele Mari (Sud):
- Les deux volcans sont parfaitement discernables sur les images amplitude relatives aux deux couples;
- Sur les images de cohérence, les surfaces correspondant aux deux volcans de boue sont blanches dans une visualisation en niveaux de gris; ce qui signifie une forte cohérence et donc que ces surfaces sont stables entre les deux dates d'acquisition pour chaque couple;
- Sur l'interférogramme différentiel, nous distinguons les deux volcans de boue pour les deux couples d'images;
- ces volcans sont cependant plus nets sur le couple de 2004; ils sont également plus marqués pour le volcan Nord.

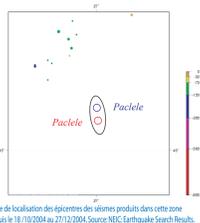
Ce constat nous permet d'avancer que le volcan nord (Paclele Mici) semble plus actif que le volcan sud (Paclele Mari) sur les périodes couvertes par les images analysées (deux couples); de plus cette activité est plus prononcée sur la période octobre à décembre 2004 que sur la période décembre 2004 à avril 2005.

Cette activité peut être interprétée par le fait que le volcan Nord est plus proche des axes des épicentres des séismes que le volcan Sud. Ce qui peut expliquer la différence de pression souterraine entre les deux volcans.

L'activité sismique entre les deux périodes des deux couples traités se résume comme suit :

(i) Couple du 18/10/2004 et 27/12/2004 :

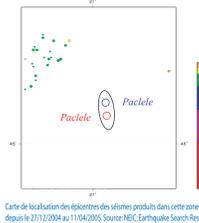
Entre ces deux dates de prise de vue, cette région a tremblé 12 fois avec une magnitude moyenne de M=4,14 sur l'échelle de Richter avec une profondeur moyenne des épicentres égale à environ 106 km. La plus importante magnitude est estimée à 5,90 (profondeur de l'épicentre égale à 95 km) et s'est produite le 27 Octobre 2004, 10 jours après la première prise de vue et presque 2 mois avant la deuxième acquisition du satellite ENVISAT. La quantité des précipitations enregistrées dans cette période de 70 jours est faible soit environ 15,9 mm/m².



Carte de localisation des épicentres des séismes produits dans cette zone depuis le 18/10/2004 au 27/12/2004. Source: NEIC: Earthquake Search Results.

(ii) Couple du 27/12/2004 et 11/04/2005 :

Cette période a enregistré 23 séismes produits avec une magnitude moyenne de M=3,4 sur l'échelle de Richter avec une profondeur moyenne d'environ 100 km. La magnitude maximale est estimée à 4,5 sur l'échelle de Richter et avec une profondeur de l'épicentre estimée à 113 km. L'enregistrement de la quantité des précipitations est estimé à plus de 17,8 mm/m².



Carte de localisation des épicentres des séismes produits dans cette zone depuis le 27/12/2004 au 11/04/2005. Source: NEIC: Earthquake Search Results.

Les épicentres des séismes entre les deux dates sont localisés dans la partie Nord-Ouest des Volcans de boue plus particulièrement dans la région de Vrancea. Cette zone sismique joue probablement un rôle dans l'accélération des activités des volcans de boue dans la région.

La partie sud-est des volcans qui correspond à la plaine de Buzau est caractérisée par une instabilité due à une subsidence qui se présente comme un affaissement lent. Ce mouvement de subsidence s'effectue à un rythme moyen de -2 mm/an sur la plaine de Buzau.

Cet affaissement des nappes provoque probablement des pressions ce qui fait accélérer la remontée de la boue.

Concernant le volcan Sud (Paclele Mari) la boue accumulée qui est rejetée occupe actuellement une surface d'environ 0,22 km², comparée à la surface occupée par les anciennes éruptions qui est de 1,62 km² soit une diminution de 13,75%.

VI. CONCLUSION

L'exploitation de la phase à l'aide de la technique d'interférométrie (DinSAR) a permis de détecter et de constater l'activité des volcans de boue de Berca. Les sites des volcans de boue sont représentés par une bonne cohérence grâce à l'écoulement lent et la solidification rapide de la boue à la surface, ce qui a garanti la stabilité de la phase enregistrée entre ces deux périodes car les éléments dans le pixel sont stables.

On peut dire avec réserve que l'activité du volcan de boue Nord (Paclele Mici) est due aux activités sismiques. Concernant les activités des exploitations pétrolières et faute du manque de données, on ne peut pas se prononcer sur leur rôle dans ce phénomène.

Il est vrai que les volcans de boue ne représentent pas un danger direct par rapport à l'homme mais ils peuvent être une menace pour l'environnement à moyen terme. Ceci oblige donc une surveillance minutieuse de leur activité qui se traduit par des rejets de gaz et de boue, activité qui joue un rôle dans le réchauffement climatique et les changements de paysage à l'échelle humaine.