

Opportunité de l'utilisation de l'imagerie satellitale moyenne resolution dans le cas de phenomene de faible etendue; cas des volcans de boue

Abdelkader ABDELLAOUI¹, Ileana G. PĂTRU²,
Mihai IELENICZ, André OZER³

Mots clés: teledetection; volcan de boue; traitement d'image.

Opportunitatea utilizării imaginilor satelitare de rezoluție medie în cazul fenomenelor de mică întindere. Cazul vulcanilor noroioși.

Vulcanii noroioși, rezultatul erupției în suprafața a scurgerilor noroioase bogate în fluide, sunt studiați de mult timp, pe pământ și în mare. Studiul vulcanilor noroioși prezintă interes din mai multe puncte de vedere: mai întâi din punct de vedere științific, datorita cantității importante de informații despre subsol și adâncimile pământului ; apoi din punct de vedere economic, prin faptul ca acești vulcani pot fi asociați cu prezenta resurselor naturale (gaz metan în cazul Pakistanului, de exemplu) ; dar și din punctul de vedere al turismului și al mediului înconjurător (în cazul Văii Buzăului, în România). Dacă un câmp de vulcani noroioși poate atinge un diametru de câțiva zeci de metri, (între o sută și două sute), vulcanii în sine au în general un diametru cuprins între 1 și 10 metri, prea redus în raport cu pixelul unei imagini satelitare cu o rezoluție slabă sau medie. Putem sa ne punem astfel problema posibilității de a studia zonele cu vulcani noroioși plecând de la imagini satelitare, mai precis de la imagini cu o rezoluție slabă sau medie. Articolul de față arata ca este totuși posibil sa se evedențieze fenomenele de o întindere redusă, (de la 1 la câțiva pixeli) pornind de la imagini satelitare și folosind mijloacele potrivite.

Les volcans de boue, résultant de l'extrusion en surface de coulées boueuses riches en fluides, sont depuis longtemps étudiés à terre et en mer. L'étude des volcans de boue est digne d'intérêt à plus d'un titre : au niveau scientifique d'abord par la quantité importante d'informations sur le sous sol et les profondeurs, au niveau économique ensuite par le fait que ces volcans peuvent être associés à la présence de ressources naturelles (gaz méthane dans le cas du Pakistan par exemple), au niveau touristique et environnemental (cas de la vallée de Buzeau, en Roumanie). Si un champ de volcans de boue peut atteindre un diamètre de quelques dizaines (voire une à deux centaines) de mètres, les volcans ont en général un diamètre de 1 à une dizaine de mètres trop réduite par rapport au pixel d'une image satellitale faible ou moyenne résolution. On peut alors s'interroger sur l'opportunité ou de la faisabilité de l'étude des zones de volcans de boue à partir de l'imagerie satellitale, notamment l'imagerie faible ou moyenne résolution. Le présent article montre qu'il est cependant possible de mettre en évidence des phénomènes de faible étendue (1 à quelques pixels) à partir de l'imagerie satellitale, moyennant des traitements appropriés.

Jusqu'à ces dernières années, l'imagerie faible et moyenne résolution est utilisée pour la localisation ou le suivi de phénomènes de grandes étendue (suivi de la végétation, phénomènes d'érosion, environnements urbains, etc..). Les phénomènes de faible étendue (de l'ordre de quelques pixels, voire quelques dizaines de pixels) n'ont pas fait l'objet d'études basées sur les traitement et l'interprétation de l'image satellitale. Pourtant, des anomalies particulières dans un contexte spécifique (foyer d'incendie, par exemple) peuvent être discernées même si elles n'occupent que l'espace de quelques pixels dans une image faible résolution. Nous montrons dans le présent article qu'il est possible, et intéressant, d'utiliser des images SPOT ou ASTER, moyennant des traitements spécifiques, pour l'étude de phénomènes de faible étendue.

Introduction

Les volcans de boue résultent de l'extrusion en surface de coulées boueuses riches en fluides. Ils sont généralement formés dans les zones de faiblesse de la croûte terrestre. Le phénomène



Fig. 1. Localisation des zones de volcanisme boueux dans le monde.

se produit lorsque le gaz trouve un passage à la surface. Mais un volcan de boue n'est pas seulement un drain de dégazage ; il peut aussi être une structure géologique active, avec une déformation de sa surface et des émissions de boue subactuelles.

Les volcans de boue sont associés à des dépôts sédimentaires anciens, à la présence de gaz organique à partir de dépôts d'hydrocarbures et à l'existence de fortes pressions internes qui ont tendance à pousser les gaz vers l'extérieur. C'est ainsi qu'ils sont souvent considérés comme un signe visible de la présence de réserves d'huiles et de gaz.

Plusieurs raisons ont poussé les scientifiques à étudier les volcans de boue à terre et en mer, principalement au sein des marges actives mais également sur les marges passives fortement sédimentées. Parmi ces raisons, nous citerons:

- leur importance potentielle dans de nombreux domaines : stabilité des marges continentales (déstabilisations sédimentaires, risques sismique), variations climatiques à plus ou moins long terme (dégagement de gaz à effet de serre dans l'hydrosphère et l'atmosphère), évolution des communautés biologiques profondes

- leur intérêt économique notamment comme indicateurs de la présence et du com-

portement des hydrocarbures en offshore profond, ainsi qu'à travers le stockage d'une quantité de méthane importante sous forme d'hydrates de gaz, pouvant représenter une source énergétique potentielle

- leur intérêt commercial pour l'exploitation touristique des zones de volcans de boue.

Les volcans de boue sont présents dans de nombreuses régions du globe, en mer comme sur les continents ; citons notamment : la mer méditerranée (Cita et al., Limonov et al.; Woodside et al. ; Robertson et al.), la Crimée, l'Azerbaïdjan (Hovland et al. ; Fowler et al.), le Turkménistan et l'Iran (Wiedicke et al.), l'Océan indien, l'Indonésie, etc.. La figure 1 ci-contre montre la plupart des sites de volcans de boue dans le monde.

En mer, ils sont étudiés par des méthodes bathymétriques et d'imagerie acoustique, tel le volcan de boue Hakon Mosby (HMMV) lors de la campagne ARKTIS XIX du Polarstern en juillet 2003 ; le traitement des données obtenues (Edy et al, 2004) permet, en particulier, de délimiter plusieurs coulées de boue. Sur la terre ferme des méthodes d'investigation classiques à partir de mesures terrain sont utilisées.

En Roumanie, la région de Vrancea, à la courbure des Carpates (figure 2), est le siège de volcans de boue étudiés depuis de nom-

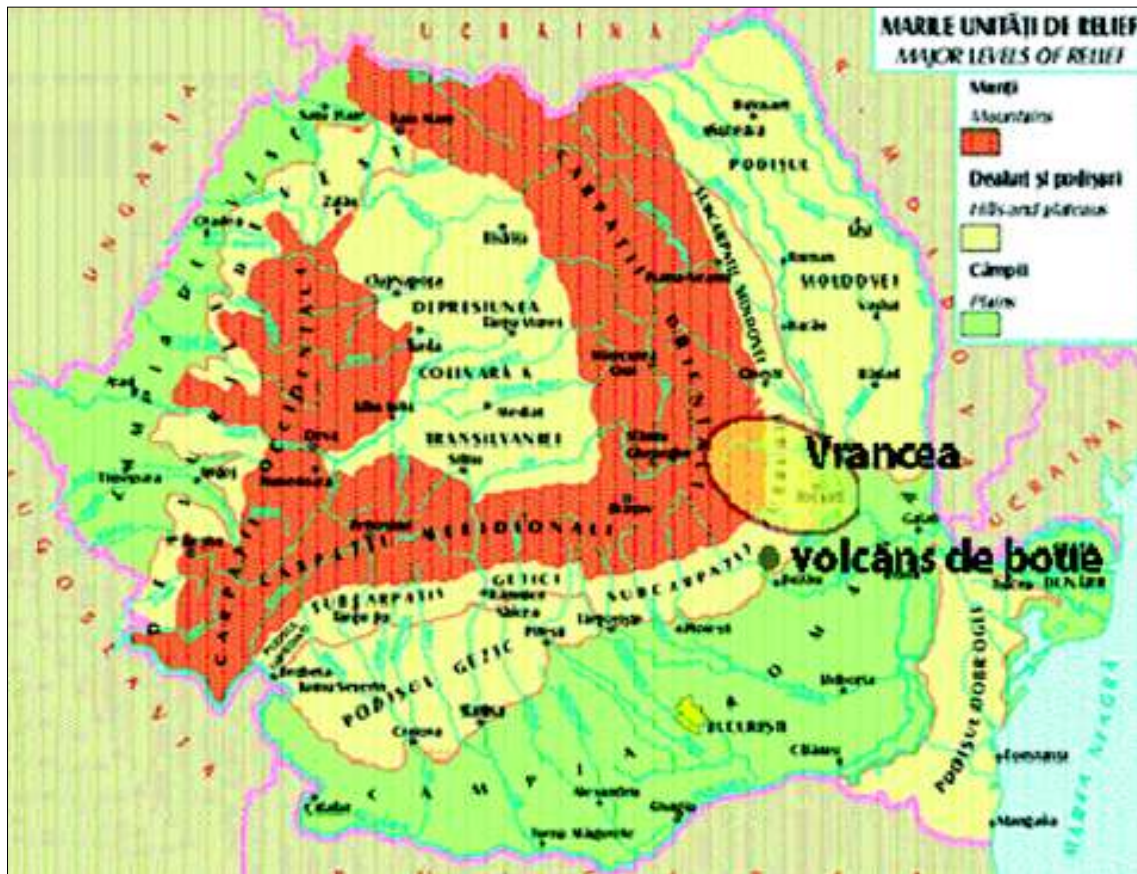


Fig. 2. La région de Vrancea et la région de volcans de boue en Roumanie.

breuses années (Badea et al.). La présente étude a pour objectif d'examiner l'opportunité de l'utilisation de l'imagerie satellitale pour la localisation et le suivi des zones de volcans de boue ; notre terrain d'étude est la zone de Buzeau ; nous utilisons trois sources de données : une image ASTER de 15 mètres de résolution prise en 2001, une image LANDSAT / TM de 30 mètres de résolution de 1988 et une photographie aérienne de 1985.

Présentation la zone d'étude

La région de Vrancea est riche en ressources minières, pétrolières et en gaz. La présence de faille favorise l'existence de phénomène de volcanisme boueux. Cette région est également exposée aux risques naturels comme beaucoup de régions en Roumanie. Située à la limite de trois unités tectoniques, elle est le siège de 95% des tremblements de terre en Roumanie (Van Hove, 2004). Citons à titre d'exemple les tremblements de terre de 1940 de magnitude

7.3, celui de 1977 de magnitude 7.2, celui de 1986 de magnitude 6.9 et celui de 1990 avec une magnitude de 7.1 sur l'échelle de Richter. La figure 2 situe la zone de Vrancea et la zone de volcanisme boueux.

Les volcans de boue de la région de Vrancea sont situés sur deux plateaux (Pâclele Mici et Pâclele Mari) alignés sur une large faille transversale d'orientation NNE-SSW. Ces volcans sont localisés au centre d'une dépression bordée par deux Cuestas, à l'ouest et à l'est, marquant les flancs de l'anticlinal Berca-Arbanasi. La figure 3, réalisée à partir d'un mosaïcage et d'un habillage de cartes géologiques de 1968 et 1969 au 1/200.000°, illustre la position particulière des deux volcans de boue (en bleu sur la figure 3) sur la faille (en rouge). Les deux zones de volcans s'étendent sur un territoire d'environ 200 mètres de diamètre pour la zone Nord et 300 mètres de diamètre pour la zone Sud.

Les documents utilisés et les premiers

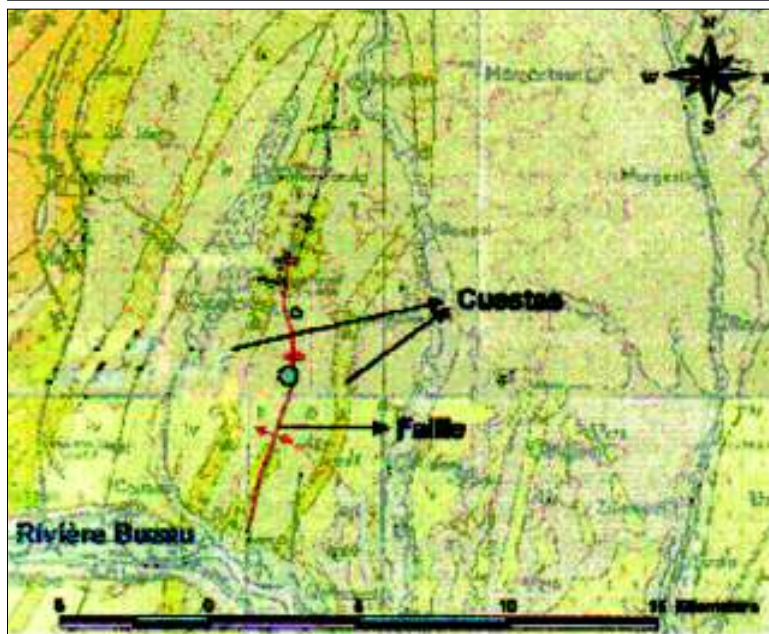


Fig. 3. Situation des volcans de boue en Roumanie : sur une faille , entre deux cuestas

traitements

Suivre l'évolution d'un phénomène naturel suppose d'en avoir une vue à plusieurs dates, donc utiliser des documents multi dates ayant des caractéristiques différentes (résolutions spatiale et spectrale, géométrie, facteur de bruit, etc..). Comme les images haute résolution spatiale ne sont disponibles que depuis peu, nous examinons la possibilité d'extraire suffisamment d'informations utiles à partir d'images moyenne ou faible résolution. Nous avons ainsi traité une image Aster de 2001 acquise dans le cadre du projet de recherche partagée sur les géorisques en Roumanie financé par l'Agence Universitaire de la Francophonie, une image Landsat/TM de 1988, et des photographies aériennes de 1995 également acquises dans le cadre du projet de recherche partagée.

Pour l'image Aster nous n'avons considéré pour cette étude que les canaux VNIR couvrant le visible et le proche IR avec une résolution de 15 mètres ; les canaux SWR et TNIR ont été écartés dans ce travail à cause de leur faible résolution spatiale relativement à l'étendue du phénomène étudié. Nous avons commencé par des traitements classiques (composition colorée, analyse en compo-

santes, analyse de texture). Nous présentons ici les seuls résultats concernant l'image ASTER.

La figure 4 montre trois traitements classiques sur la composante VNIR (3 bandes) d'un extrait de l'image Aster. Sur la composition colorée, on arrive déjà à localiser les 2 volcans nord et sud avec, sur chacun, les zones actives les plus importantes ; le réseau de coulée de boue à l'intérieur de la zone de volcans n'est pas discernable (faiblesse du contraste).

Un stretch de l'image accentue les détails au niveau des zones actives et permet de distinguer un peu plus nettement les coulées de boue sur la périphérie des volcans.

Un filtre passe haut fait apparaître les micro contours et les formes linéaires. Au niveau des deux volcans, et de façon plus nette pour le volcan sud, nous constatons un grand nombre de micro contours, signe d'une grande hétérogénéité et, probablement, d'une activité qui n'était pas discernable par les traitements précédents. Dans l'analyse en composantes principales, seule le premier néo canal est intéressant. Cependant, nous n'avons pas d'éléments significatifs nouveaux par rapport à ce qui précède.

La figure 5 montre les résultats de l'analyse

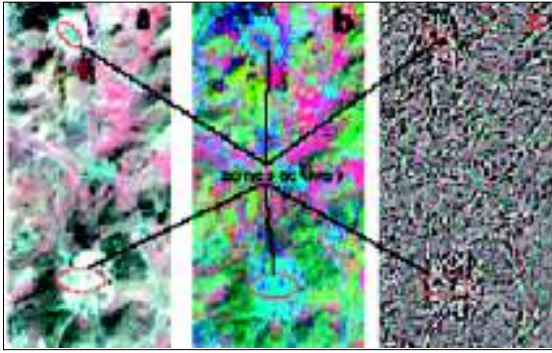


Fig. 4. Composition colorée, étalement dynamique et filtre sur image Aster VNIR

de texture sur la composante VNIR de l'image.

Ce traitement accentue de façon appréciable les détails au niveau des deux volcans. On voit ainsi que la texture de la surface n'est pas homogène. Cela peut être un estimateur de l'activité du volcan. Une absence d'activité se traduirait par une homogénéité plus grande de la surface et réciproquement.

Amélioration de l'analyse par le concept de « clonage »

Présentation. Rappelons qu'une image satellitale est constituée d'une série de N bandes (ou canaux) ; chaque bande est, en réalité, une vue du territoire imagé dans une région spécifique du spectre électromagnétique; toutes les bandes d'une même image concernent le même territoire vu au même moment ; chaque bande est également constituée d'un ensemble de « pixels », réponse d'une portion élémentaire du territoire à l'excitation du rayonnement solaire ; la taille d'un tel élément dépend de deux facteurs principaux les propriétés optiques de l'imageur et la distance sol-imageur ; la réponse enregistrée par l'imageur est une combinaison des réponses des divers constituants du pixel ; plus le nombre de ces constituants est élevé plus cette réponse s'éloigne de celle d'un objet géographique « pur » ; enfin, plus un constituant aura une réponse propre élevée, et plus la réponse du pixel tendra vers celle de ce constituant ; ainsi, la réponse du pixel de la figure 7 sera obtenue par:

$$R_p = S_{élé}R_{élé} + S_{cont}R_{cont} \quad [1]$$

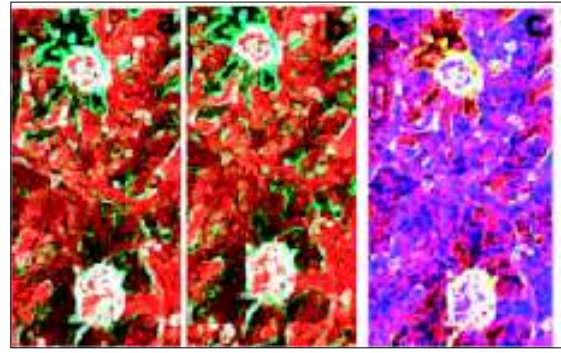


Fig. 5. Extrait des résultats de l'analyse de texture sur l'image Aster

dans cette formule, R désigne l'intensité du signal d'un élément et S sa superficie ; nous désignerons également par contraste d'un élément par rapport à son contexte, la différence absolue entre l'intensité du signal de l'élément et l'intensité du signal issu du contexte pris comme référence.

Si l'on se place dans le cas:

$$S_{élé} + R_{élé} - S_{cont} \cdot R_{cont} > \lambda > 0 \quad [2]$$

où λ est une valeur seuil dépendant entre autre de la dynamique de l'image alors la réponse de l'élément est « perceptible » par rapport à son contexte et l'élément est discernable.

Si maintenant l'on se place dans le cas:

$$S_{élé} + R_{élé} \gg S_{cont} \cdot R_{cont} \quad [3]$$

alors, la réponse de l'élément est prédominante, celle du contexte est pratiquement masquée et la réponse résultante du pixel sera confondue avec celle de l'élément « rouge » et le contexte ne serait pas vu. Nous raisonnons ainsi sur le produit $S \cdot R$ de la surface (relative) par la réponse radiative d'un élément de paysage. Cela signifie que la discernabilité d'un élément donné du paysage est augmentée par la réponse radiative, certes, mais aussi par sa surface relative (rapport de la surface de l'élément à la surface du contexte).

De la même façon, et dans le cas d'une image (plus exactement un canal donné d'une image), un pixel (entendons par là, la réponse

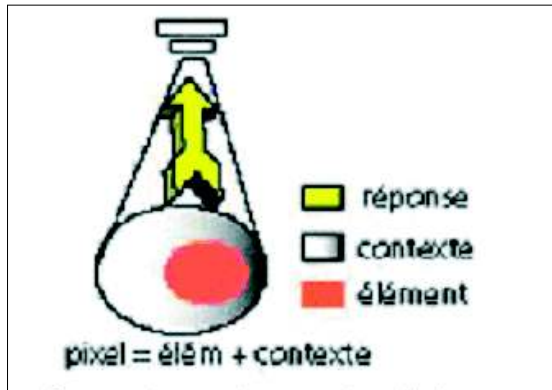


Fig. 6. Représentation de la réponse d'un élément de paysage

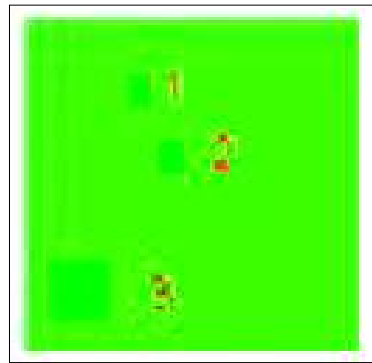


Fig. 7. La discernabilité d'un élément de paysage dépend de l'intensité du signal qu'il renvoie vers

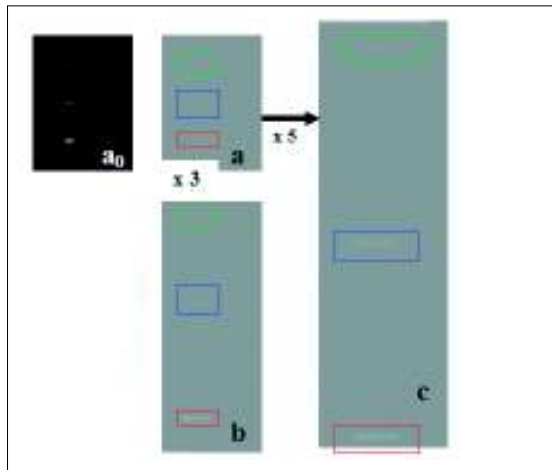


Fig. 8. Opération de clonage sur une image de synthèse simple

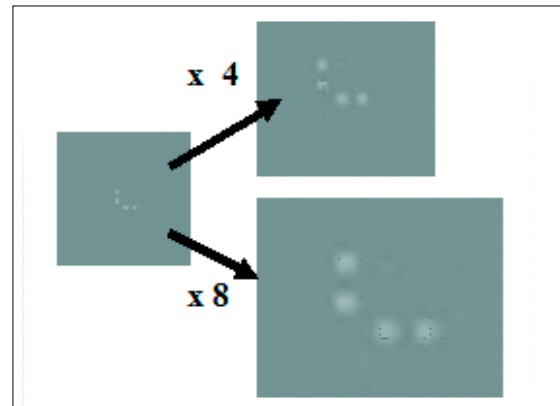


Fig. 9. Application de l'algorithme de clonage par des facteurs 4 et 8 sur une image de synthèse simple

combinée des constituants du pixel) sera discernable si sa réponse est suffisamment importante par rapport à son contexte (réponses des pixels voisins); ainsi sur la figure 8, le pixel 2 sera plus discernable que le pixel 1 ; dans le cas contraire, un élément de paysage sera discernable si son étendue spatiale est importante (elle occupe ainsi plusieurs pixels) comme cela est illustré par l'élément 3 de la figure 7.

Si nous considérons maintenant une image, avec une dynamique donnée pour laquelle certains éléments de paysage ne sont pas «visibles» malgré un processus d'amélioration (cela peut être dû au fait que ces éléments de paysage ont une faible étendue, donc occupent un nombre réduit de pixels), on peut imaginer qu'un zoom sur image amènerait une vision plus fine où l'on distinguerait les éléments cachés jusqu'alors. L'opération de zoom classique consiste en fait à augmenter la

dimension des pixels d'où une sensation de flou dès que l'on dépasse un facteur d'agrandissement. L'idée que nous introduisons consiste plutôt à « cloner » les pixels et les multiplier ; on obtient ainsi l'effet de la zone 3 sur la figure 7 ; le pixel 1 a été cloné par un facteur 2 et donc remplacé par un ensemble de $2 \times 2 = 4$ pixels identiques ; l'élément de paysage représenté par le pixel 1 occupe alors une plus grande surface apparente et devient discernable malgré son faible contraste.

Premiers résultats

Image de synthèse :

La méthode de clonage est d'abord testée sur des images de synthèse créée à partir d'un logiciel de traitement d'images classique, en l'occurrence Idrisi 32. Sur la figure 8 l'image (a) est l'image initiale créée avec une valeur de 146 sur une échelle de tons de gris allant

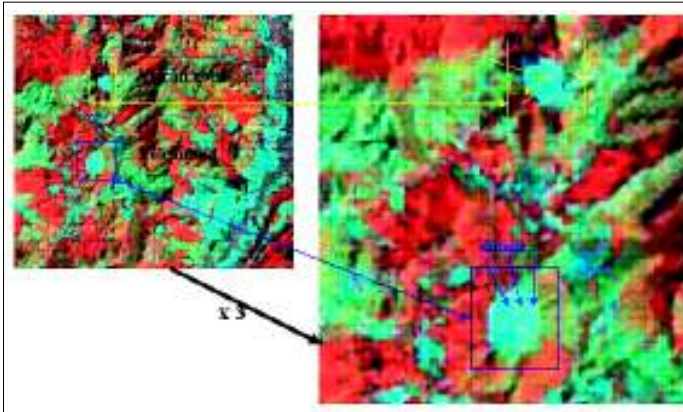


Fig. 10. Effet de clonage par un facteur 4 d'un extrait de l'image Landsat TM

de 0 à 255 ; sur cette image sont créés trois objets linéaires de même longueur et de valeurs respectives 148 mis en évidence par le cercle vert, 150 (rectangle bleu) et 155 (rectangle rouge) sur les niveaux de gris ; sur cette image seul le trait de niveau de gris 155 commence à être discerné ; c'est le seul objet de l'image qui vérifie la condition [2]; les deux autres ne sont pas visibles à cause de leur trop faible contraste par rapport au fond (contexte). L'image b représente un clonage par un facteur 3 ; le trait de niveau 150 apparaît déjà (la condition [2] est maintenant vérifiée grâce à une augmentation du terme S dans la condition) mais pas celui de niveau de gris 148 ; enfin sur l'image c, qui représente un clonage par un facteur 5, les trois niveaux de gris sont maintenant visibles. L'image a_0 représente un étalement très fort de la dynamique possible sur cette image à cause de sa dynamique particulière.

La figure 9 confirme ces résultats pour un objet de forme géométrique différente; l'opération de clonage a bien sur conservé la forme en la rendant plus discernable sans amener l'effet de flou caractéristique sur une opération de zoom classique.

Image Landsat :

L'image est de faible résolution et ne paraît donc pas adaptée pour l'étude de faible étendue; cependant, si l'on désire suivre l'évolution du phénomène, elle demeure le seul outil capable de nous fournir un historique car on ne

dispose pas forcément d'images (ou de photographies) de meilleure résolution et plus anciennes.

La figure 10 montre un clonage par un facteur 3 d'un extrait de la composition colorée de l'image Landsat; plusieurs détails, qui n'apparaissent pas sur l'image originale, sont visibles sur le clone, notamment au niveau des deux volcans. Ces détails concernent les parties actives des volcans qui ont un niveau de gris (ou de couleur) légèrement différent de celui du contexte; les coulées de boue apparaissent également très légèrement en objets linéaires. Les niveaux de détails restent néanmoins assez faibles compte tenu de la résolution de l'image et des dimensions réelles des phénomènes observés. Ceci montre que, même sur une image faible résolution, des phénomènes de faible étendue (activité au sein du volcan : réseau de coulée de boue par exemple) peuvent être mis en évidence moyennant des traitements adéquats.

L'image Aster :

La figure 11 illustre les résultats de l'application de l'opération de clonage d'abord sur une composition colorée de l'image Aster, puis sur cette même image transformée par des opérations de stretch, d'application de filtres (ici un filtre passe haut) ou d'analyse texturale (schéma de la figure 12).

La figure 11.a nous montre l'apparition de détails qui n'étaient pas visibles sur l'image originale : forme des zones actives accentuée,

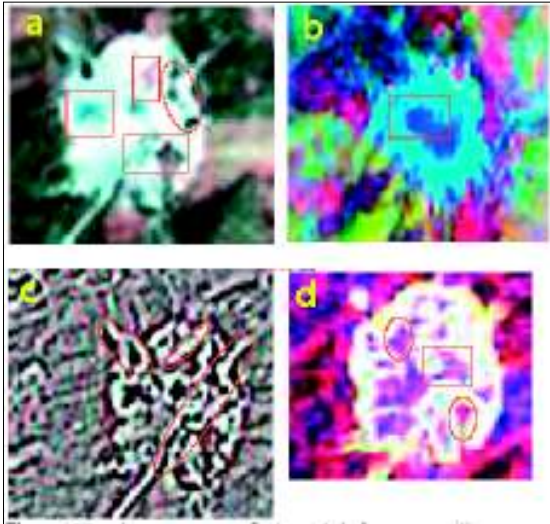


Fig. 11. Opération de clonage sur les résultats de traitements classiques de l'image Aster VNIR

coulées de boue, autres zones actives. Il va de soi que nous ne nous intéressons pas ici à la quantification de la superficie par une méthode classique de comptage de pixel et de conversion en surface (notons au passage que, conformément à l'analyse du paragraphe 4.1, même pareil calcul n'est qu'approximatif) ; notre objectif est ici de mettre en évidence l'activité du phénomène de volcanisme boueux et, éventuellement de suivre l'évolution de son intensité dans le temps. Comme les étendues sont dilatées par l'opération de clonage, l'estimation de surface devra introduire un facteur correctif, inverse du carré du facteur de clonage.

La figure 11.b correspond à un clonage après étalement de la dynamique ; les traces de coulées de boue ne sont pas apparentes ici mais d'autres détails sont mis en évidence.

La figure 11.c, amplifie la mise en évidence des micro contours ; en particulier elle rend visibles le réseau de coulée de boue dans le volcan.

La figure 11.d est intéressante; elle amplifie l'étendue de la différence de texture; quatre classes de texture apparaissent ainsi pour le volcan sud; cette différence de texture traduit l'hétérogénéité de la surface causée par l'activité du phénomène de volcanisme boueux de la zone étudiée. Le réseau de coulée de boue n'est pas directement observable sur cette

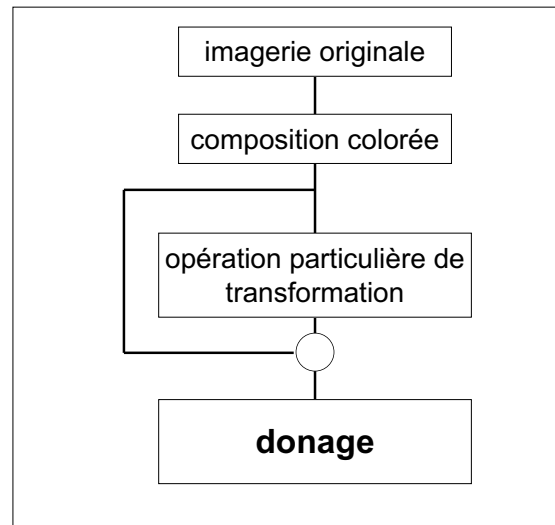


Fig. 12. Schéma synthétique de la chaîne de traitement

image.

La photographie aérienne :

Des trois documents, la photographie aérienne est celle qui a la meilleure résolution; elle fournira donc le plus de détails. Nous constaterons cependant que, dans une première analyse, le cratère du volcan (ici, le volcan sud) n'apparaît pas avec beaucoup de détails à cause de la dynamique de l'image ; la surface est quasiment d'apparence homogène, exceptés quelques détails grossiers que l'on pourrait mettre en évidence par un étalement de dynamique par exemple. Afin d'en améliorer le contraste, nous commençons par lui appliquer un stretch photographique (figure 13.b) qui a pour effet de mettre en évidence de manière plus marquée le volcan et de faire apparaître certains détails à peine discernables sur l'image originale comme la tache sombre en bas à droite du volcan qui devrait correspondre à une zone d'activité. Le clonage par un facteur 4 (figure 13.c) fait apparaître des détails que nous ne pouvions pas soupçonner au départ : deux zones actives apparaissent maintenant de manière très claire ; il en est de même des coulées de boue dont on voit le tracé de manière très nette ; en réalité, tout le réseau de collecte de la coulée de boue est mis en évidence et l'on peut pratiquement élaborer une carte de l'activité du volcan.

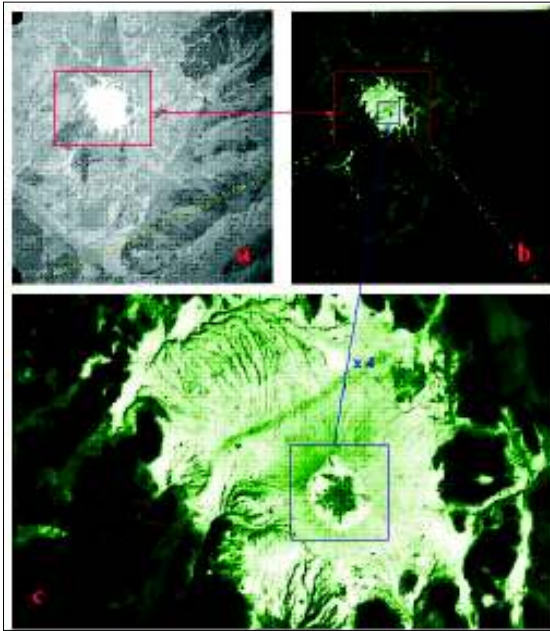


Fig. 13. Application de l'algorithme de clonage à un extrait de photographie aérienne.

Conclusion

Les phénomènes naturels de faible étendue ne sont pas étudiés à partir d'imagerie satellitales; les images faible ou moyenne résolution ne font pas apparaître les détails utiles par les traitements conventionnels; et les images hautes résolution sont encore relativement chères, elles ne sont pas disponibles pour des périodes anciennes et peuvent apparaître non justifiées pour des territoires accessibles pour des études terrain. La présente étude montre que l'utilisation de l'image faible ou moyenne résolution est exploitable pour ce type de phénomènes, notamment si l'on effectue une reconstitution multi date du phénomène. Les traitements conventionnels permettent déjà de mettre en évidence certains aspects; l'opération de clonage améliore très sensiblement l'analyse.

Les résultats de l'opération de clonage sur les photographies aériennes montre que cet algorithme est également applicable dans le cas d'images haute résolution.

Remerciements

Les images utilisées pour ce travail ont été acquises dans le cadre d'un projet de recherche partagée du Réseau thématique de télédétection entre les universités de Bucarest, Paris 12 et Liège. Une mission terrain a également eu lieu dans ce cadre sur le site des volcans de boue de la zone de Buzeau.

Nous remercions l'Agence Universitaire de la Francophonie pour ce financement.

REFERENCES

- BADEA L. et BU D., 1971 : *La dépression boutonnière de Berca et ses volcans de boue*. Revue Roumaine de Géologie, Géophysique et Géographie ; tome 15, n°2 : 145-152.
- CITA MB, RYAN WBF and PAGGI L, 1981: *Prometheusmud breccia. An example of shale diapirism in the Western Mediterranean Ridge*. Annales Géologiques des Pays Helléniques 30 : 543-569.
- FOWLER SR, MIDENHALL J., ZALOVA S., RILEY G., ELSEY G., DESPLANQUES A. and GULIYEV F., 2000: *Mud volcanoes and structural development on Shah Deniz*. Journal of Petroleum Science and Engineering 28: 189-206.
- HOVLAND M., HILL A. and STOKES D., 1997: *The structure and geomorphology of the Dashgil mud volcano, Azerbaïdjan*. Geomorphology 21: 1-15.
- LIMONOV AF, WOODSIDE JM, CITA MB and IVANOV MK, 1996: *The Mediterranean Ridge and related mud diapirism: a background*. Marine Geology 132 : 7-19.
- VAN HOVE J. Et al., 2004 : *Post-seismic Deformation in the Vrancea Region, Romania*. Publié sur site Internet : http://www.ecgs.lu/pdf/jlg92/JLG92_vanHove.pdf , 2 pages
- ZITTER Tiphaine AC, 2004: *Mud volcanism and fluid emissions in Eastern Mediterranean neotectonic zones*. Thesis / PhD (23 March 2004), Department of sedimentology and marine geology, Vrije Universiteit Amsterdam, Pays-Bas.

- (1) Département de géographie ; UFR LSHS Université Paris 12 -61,
avenue du Général de Gaulle ; 94010 Créteil
- (2) Faculté de Géographie Université de Bucarest
- (3) Département de Géomorphologie Université de Liège
- Courriel(1): abdellaoui@univ-paris12.fr, benblidia@yahoo.com