

IDENTIFICATION DE DEPOTS PYROCLASTIQUES ET DE LAHARS A PARTIR DES IMAGES THR : APPLICATION AU CAS DE L'ERUPTION DU 2010 DE MERAPI.

Zeineb Kassouk¹, Jean-Claude Thouret¹, Akhmad Solikhin^{1,2}

1 : PRES Clermont, Université Blaise Pascal, Laboratoire Magmas et Volcans (LMV), CNRS UMR6524 et IRD R163, 5 rue Kessler, 63038 Clermont-Ferrand, z.kassouk@opgc.univ-bpclermont.fr

2 : Center of Volcanology and Geological Hazard Mitigation (CVGHM), 57 Jalan Diponegoro, Bandung, Indonesia.

Résumé

Dans ce travail nous étudions le flanc sud du volcan Merapi (Indonésie) dévasté par la grande éruption de 2010 (IEV 4). Nous poursuivons deux objectifs : (1) Identifier les dépôts pyroclastiques et de lahars grâce à la classification «orientée-objet» appliquée à trois images GeoEye-1 (1,64 m; 15/10/2010 et 29/07/2011) et Pléiades (0,5 m rééchantillonnée à partir de l'image panchromatique à 0,7m et l'image multispectrale à 2,8 m; 29/10/2012). Ces dépôts pyroclastiques comprennent les écoulements denses canalisés, ceux qui ont débordé des vallées et les déferlantes diluées à l'amont du bassin et sur les marges des vallées. (2) Suivre l'évolution temporelle de ces dépôts grâce aux indices spectraux calculés pour chaque image. Nous avons appliqué la classification orientée-objet aux indices spectraux, NDWI, NDVI et NDRSI (indices de la végétation, de l'eau et de sol ferrique). Les résultats ont permis d'identifier 15 classes de dépôts pyroclastiques, de lahars et les zones affectés dans la vallée de Gendol-Opak (~ 80 km), qui représentent 75% de classes obtenues par photo-interprétation de l'image et appuyées par des observations de terrain. Les indices NDWI et NDVI ont mis en évidence les zones affectées par les déferlantes ($NDWI < 0,2$ et $0,1 < NDVI < 0,3$) et la végétation indemne ($0,2 < NDWI < 0,4$; $NDVI < 0,16$). Les indices NDWI et NDRSI ont permis de distinguer les dépôts canalisés ($NDRSI < -0,3$ et $0,1 < NDWI < 0,2$) des zones couvertes par les lahars ($NDRSI > 0,3$ et $NDWI < 0,1$). L'analyse bivariée des trois indices spectraux NDWI, NDVI et NDRSI a permis de suivre l'évolution temporelle post-éruption.

Mots-clés : Volcan Merapi, Imagerie à haute résolution spatiale, Classification orientée-objet, Indices spectraux; Dépôts pyroclastiques.

Abstract

In this paper we are interested in the eruptive activity from pyroclastic deposits based on HSR imagery that focuses on the south flank of Merapi volcano, Indonesia, which was devastated by the large (VEI4) 2010 eruption. We pursue two objectives. (1) We use the object-oriented classification (OOC) to identify and delineate deposits from pyroclastic density currents (PDCs) and post-eruption lahars, based on spectral, shape and contextual data from GeoEye-1 (1.64 m, 15/10/2010 and 29/07/2011) and Pleiades imagery (0.7 m (PAN) and 2.8 m (MS) resampled to 0.5 m, 29/10/2012). The PDC deposits include valley-confined block-and-ash flows (BAFs), unconfined, overbank pyroclastic flows (OPFs), and high-energy surges and ash-cloud surges. (2) We follow up the evolution of these deposits through changes in the spectral indices that support the OOC. The object-oriented classification of three spectral indices, NDWI, NDVI and NDRSI (Vegetation, water and red soil indices), has enabled us to delineate 15 units of PDC and lahar deposits, and damaged forests and settlements in the Gendol-Opak valley (~ 80 km²). This represents 75% of classes obtained by photointerpretation of the same image and supported by field observations. A combination of NDWI and NDVI helps to separate areas affected by surges ($NDWI < 0,2$ and $0,1 < NDVI < 0,3$) from unscathed vegetation ($0,2 < NDWI < 0,4$ and $NDVI < 0,16$). NDRSI and NDWI separate the overbank PFs ($NDRSI < -0,3$ and $0,1 < NDWI < 0,2$) from wet or lahar deposits ($NDRSI > 0,3$ and $NDWI < 0,1$). Bivariate analysis of three spectral indices, NDWI, NDVI and NDRSI, shows the temporal analysis of the deposits and areas between 2010 and 2012.

Keywords: Merapi Volcano, High spatial imagery, Object-oriented classification, Spectral indices, Pyroclastic deposit.

1. Introduction

Le potentiel de la télédétection pour les études pré et post-éruptives dans les zones volcaniques actives a largement été démontré (Harris et al., 2008; Solikhin et al., 2012; Graettinger, 2013). Ces recherches sont notamment consacrées à l'évaluation des dépôts volcaniques et pyroclastiques (Carter et al., 2008; Joyce et al., 2009), la cartographie des déformations (Howell et al., 2012) et des avalanches de débris (Kerle et van Wyk de Vries, 2001; Wessls et al., 2010; Nartha et al., 2012). Les méthodes de détection automatique des dépôts volcaniques utilisant des données radar et les images optiques et thermiques, et des techniques de télédétection (photo-interprétation, photogrammétrie, traitement d'images aériennes et satellitaires, interférométrie radar) ont été discutés (Joyce et al., 2009, McAlpin and Meyer, 2013).

Le lancement de capteurs à très haute résolution spatiale (THR), sub-métrique (ex. IKONOS, WorldView, GeoEye, Pléiades) et les nouvelles technologies de traitement d'images offrent de nouvelles possibilités pour la cartographie des dépôts pyroclastiques après les éruptions. Les techniques de télédétection classiques se sont essentiellement fondées sur l'information spectrale associée à chaque pixel. Elles ne prennent pas en compte les structures spatiales des images : c'est pourquoi, elles ne sont pas adaptées à l'analyse des images THR.

La classification orientée objet ne traite plus le pixel de manière isolée mais des groupes de pixels (objets) dans leur contexte et à différentes échelles de perception (Benz et al., 2004). Dès lors, les capacités d'extraction de l'information sont multipliées. L'interprète peut utiliser non seulement les valeurs spectrales mais aussi des paramètres morphologiques (taille, forme, voisinage des objets), ce qui améliore considérablement la qualité de l'information extraite des images THR.

Le Merapi, un strato-volcan situé au centre de l'île de Java, Indonésie, est l'un des volcans les plus actifs au monde (Figure 1). Il s'élève à 2910 m au milieu d'une région très densément peuplée (>900 hab/km). Le Merapi est caractérisé par des éruptions explosives fréquentes dont la récurrence est de 8 à 15 ans (Thouret et al., 2000).

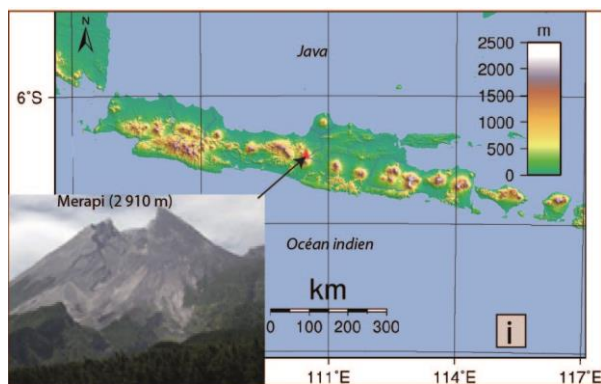


Figure 1 : Localisation du volcan Merapi au centre de l'île de Java montrant le niveau de cratère ébréché et le flanc sud dévasté (Vallée de Gendol-Opak) après l'éruption d'octobre-novembre 2010.

L'éruption majeure d'octobre-novembre 2010 est la plus volumineuse et dangereuse depuis 140 ans (IEV 4, Suroño et al., 2012). Entre le 26 octobre et le 22 novembre 2010, elle s'est traduite par l'effondrement du dôme sommital du Merapi et la production de retombées vers l'ouest et d'écoulements pyroclastiques denses. Ceux-ci ont dévasté le cône du Merapi vers l'ouest et essentiellement le flanc sud, jusqu'à plus de 17 km du sommet dans la vallée de Gendol-Opak d'une superficie de ~80 km (Charbonnier et al., 2013; Komorowski et al., 2013).

Cette éruption est caractérisée par trois types de produits pyroclastiques : (1) des écoulements de blocs et cendres qui sont généralement denses et canalisés dans les vallées principales (valley-confined block-and-ash flows, BAFs), (2) des écoulements pyroclastiques plus ou moins denses ayant débordé des vallées (overbank-pyroclastic flows OPFs); et (3) des déferlantes pyroclastiques diluées, à l'amont de la zone (high-energy surges, HES), associées à l'effondrement du dôme, et aussi sur les marges des vallées (ash-cloud surges, ACS), associées aux écoulements BAFs. Des lahars, un écoulement d'un mélange d'eau et de matériaux très concentré (Smith and Fritz, 1989; Thouret et Lavigne, 2000), consécutifs à l'éruption se sont produits sur l'ensemble des versants et essentiellement durant les moussons qui caractérisent la région (de Bélizal et al., 2013).

De nombreuses études ont été conduites afin de caractériser ces dépôts en utilisant des données satellitaires radar (Suroño et al., 2012) et optiques (Gertisser et al., 2011; Komorowski et al., 2013; Solikhin et al., 2013). Charbonnier et al (2013) ont étudié l'architecture et l'extension des dépôts pyroclastiques en interprétant visuellement la composition colorée des images satellites à très haute résolution spatiale (THR). Thouret et al (2013) ont établi une carte géologique détaillée du Merapi après l'éruption de 2010. De Belizal et al (2013) et Hadmoko et al (2013) ont étudié l'impact des lahars suite à l'éruption pré et post-éruption. Tous ces travaux se sont essentiellement intéressés à la caractérisation des dépôts pyroclastiques et des lahars en interprétant visuellement des compositions RGB des images THR optiques.

Nous proposons dans ce travail une nouvelle méthode d'extraction des informations spectrales texturales et spatiales qui permet de mieux caractériser les dépôts d'écoulements pyroclastiques denses (PDC) et de lahars sur des images THR (GeoEye et Pléiades). Ainsi, dans une première partie nous montrons l'apport des indices spectraux existants (indices normalisés de la végétation, de l'eau et de sol ferrugine) pour l'identification de chaque type de dépôts. Dans une seconde partie, nous appliquons la méthode de classification orientée-objet à l'image des indices afin d'établir une cartographie détaillée de dépôts pyroclastiques et des zones affectées (forêts, villages, zones urbanisées) par l'éruption d'octobre-novembre 2010. Enfin, nous étudions l'évolution temporelle des dépôts à travers l'analyse bivariée des indices spectraux précédemment calculés à l'échelle de objets issus de la segmentation.

2. Matériels et méthodes

2.1. Caractéristiques des images satellitaires

L'étude a été réalisée sur le flanc sud du Merapi en utilisant les données des images acquises après l'éruption d'octobre-novembre 2010 :

- l'image GeoEye-1, avec une résolution de 1,65 m, du 15 Novembre 2010 trois semaines après l'éruption du 26 octobre 2010,
- l'image GeoEye-1 du 11 juin 2011 (1,65 m) acquise 7 mois après l'éruption,
- et une image Pleiades-1A acquise le 29 septembre 2012 soit 25 mois après l'éruption, produit fusionné à 0,5 m (à partir de l'image panchromatique à 0,7 m et de l'image multispectrale à 2,8 m).

La correction atmosphérique des images a été effectuée en utilisant la méthode « Dark-Object Subtraction » (Chavez, 1996; Song et al., 2001) implémentée sous Envi Exelis 5. Elle consiste à soustraire à la valeur de la réflectance de chaque pixel de l'image la plus faible valeur de réflectance. Chaque image a été par la suite orthorectifiée en utilisant le modèle numérique de terrain MNT ('UGM' 2011) à une résolution d'1 mètre.

Données	GeoEye-1 (MS)	Pleiades-1A (Fusion PAN+MS)
Résolution spatiale (m)	1,65	0,5 (produit fusionné à partir de 0,7 Pan / 2,8 MS)
Résolution spectrale (nm)	Bleu : 450 - 510 Vert : 510 - 580 Rouge : 655 - 690 PIR : 780-920 450-800 (PAN)	Bleu : 430-550 Vert : 490-610 Rouge : 600-720 PIR : 750-950 480 -830 (PAN)
Date d'acquisition	- 15/11/2010 - 29/07/2011	29/10/2012

Tableau 1 : Caractéristiques des images satellitaires utilisées dans ce travail.

2.2. Méthode de détection et de délimitation des dépôts pyroclastiques

La démarche méthodologique générale, présentée dans la figure 2, consiste en quatre étapes :

- 1- Calcul des indices spectraux (NDWI, NDVI, NDRSI),
- 2- Segmentation de l'image en régions de pixels,
- 3- Calcul des attributs pour chaque région afin de créer des objets,
- 4- Classification des objets (supervisée) en fonction des attributs (forme, texture et indices spectraux), afin d'en extraire les unités correspondant aux dépôts et aux zones affectées.

L'exemple présenté dans la figure 2 met en évidence la différence entre la zone forestière ou la zone cultivée et la zone impactée par les dépôts pyroclastiques.

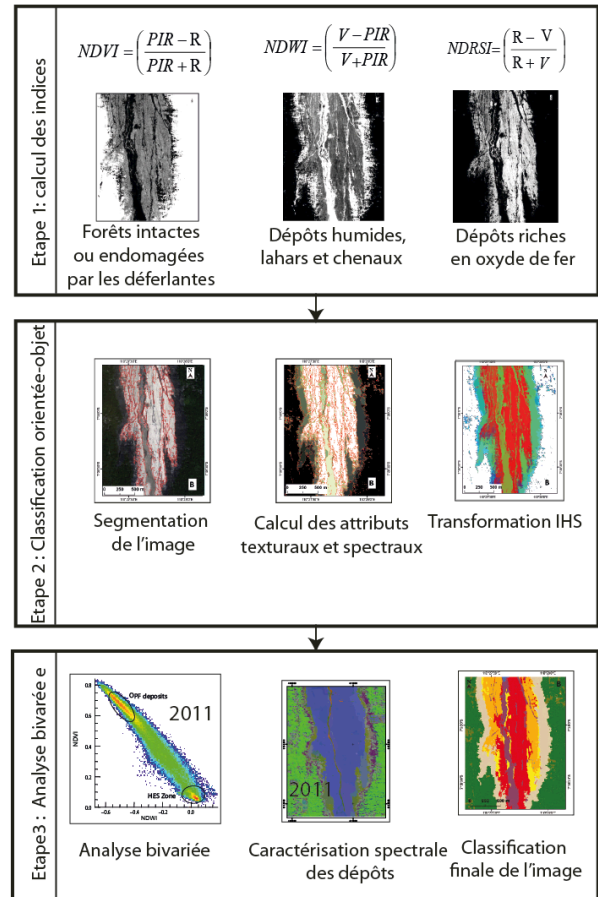


Figure 2 : Schéma de la méthodologie utilisée.

2.2.1. Détermination d'indices texturaux pour la classification des dépôts

Les indices spectraux comme l'indice de végétation sont mis en œuvre afin de sélectionner les meilleures bandes spectrales d'une part, et sol-végétation d'autre part. Le but est de faciliter l'étape segmentation du processus de la classification orientée-objet.

La première étape a consisté à déterminer des indices spectraux calculés à partir des images satellitaires pour chaque date. Ces indices permettent d'augmenter les contrastes entre le sol couvert par des dépôts pyroclastiques, des dépôts de lahar et la végétation affectées par les déferlantes. Nous avons utilisé trois indices spectraux :

- 1- Les zones d'écoulements pyroclastiques se caractérisent essentiellement par une végétation dévastée ou dégradée et peu dense (Efford et al., 2014). La végétation, poussant dans les zones endommagées (brulée, présence d'un feuillage brun), peut aussi être de nature différente de la végétation environnante et ainsi délimiter la zone affectée par les déferlantes.

L'utilisation de l'indice différentiel normalisé de végétation (NDVI; Rouse et al., 1974) nous a permis de séparer les forêts intactes de celles dévastées.

$$NDVI = \left(\frac{PIR - R}{PIR + R} \right) \quad (1)$$

avec PIR la valeur de la réflectance du pixel dans le canal proche infrarouge et R sa valeur pour le canal rouge.

2- Les dépôts canalisés (ex. les lahars) se caractérisent généralement par une teneur en eau assez différente et par conséquent une signature spectrale relativement différente des autres dépôts pyroclastiques généralement secs (Kerle and Oppenheimer, 2002).

Pour identifier les dépôts humides, nous utilisons l'indice teneur en eau par différence normalisée (NDWI) établi par McFeeters (1996). Le NDWI correspond à la différence normalisée de la bande verte (V) et de la bande proche-infrarouge (IR).

$$NDWI = \frac{V - PIR}{V + PIR} \quad (3)$$

3- Les dépôts pyroclastiques sont parfois riches en oxydes de fer qui leur donne une couleur brun-rougeâtre. Escadafal et Huete (1991) ont établi un Indice du Sol Rouge (NDRSI), qui permet de différencier les sols selon leur couleur en utilisant la différence normalisée des valeurs de la réflectance dans le rouge et dans le vert:

$$NDRSI = \frac{R - V}{R + V} \quad (4)$$

Madeira (1991) a montré que cet indice est positivement corrélé avec le teneur en oxydes de fer dans le sol. L'application de cet indice aux images nous a permis d'identifier les dépôts pyroclastiques riches en scories et devenues oxydées.

2.2.2 La classification orientée objet

La deuxième étape consiste à appliquer la classification orientée-objet de pseudo-bandes (NDVI, NDWI, NDRSI) sur les images (GeoEye-1 2010, GeoEye-1 2011 et Pleiades-1A 2012).

La méthode comprend deux étapes : la segmentation de l'image en objets (groupe de pixels) puis la classification des objets.

1. La segmentation a été réalisée avec le module «Feature Extraction» du logiciel ENVI Exelis5 et a comporté trois sous-étapes. La première sous-étape a été l'ajustement du niveau d'échelle pour délimiter des objets ou des segments d'image. Nous avons opté pour un niveau de 30 sur un total de 100 (en pourcentage). La seconde sous-étape a été le paramétrage du niveau de fusion des objets. Ce paramétrage a permis de résoudre la question de la sur-segmentation de l'image en regroupant les objets contigus présentant des valeurs radiométriques quasi-identiques. Nous avons choisi un niveau de 90 sur 100. La troisième sous-étape a permis d'affiner la segmentation; un seuillage a regroupé les segments adjacents ayant des valeurs d'indices spectraux similaires. Chaque objet est caractérisé non seulement par sa valeur radiométrique, mais également par des informations sémantiques nécessaires à l'interprétation d'une image comme la forme et la texture. Dans chaque cas, des tests visuels ont été effectués afin d'identifier les seuils de meilleure segmentation.

2. La classification d'images segmentées a été effectuée en trois étapes : (1) La classification supervisée de l'image se fonde sur un jeu de données de références définies à partir de la carte géologique établie par photo-interprétation par Thouret et al (2013) et appuyée par des observations de terrain. (2) La deuxième étape consiste à utiliser les informations de texture (calculée automatiquement sous ENVI Exelis5) et de valeurs seuils des indices spectraux qui séparent le mieux des classes de polygones au sein de la base de données créée précédemment. (3) Dans la dernière étape, des objets assignés incorrectement ou ceux qui ne sont pas encore classés sont assignés, manuellement, aux unités correctes.

La validation des classifications a consisté à établir une comparaison entre un certain nombre d'objets pour chacune des classes avec des formes identifiées sur la carte géologique de Thouret et al (2013).

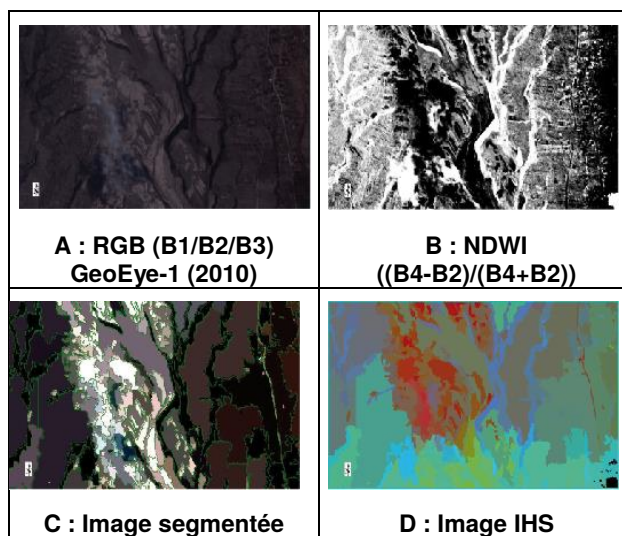


Figure 3 : Exemple de segmentation d'une zone impactée par les dépôts pyroclastiques. **A** : Extrait de l'image GeoEye-1 2010. **B** : Résultat de l'application de l'indice spectral de l'eau. **C** : Objets délimités par segmentation. **D** : Transformation IHS de l'image segmentée.

L'application de la transformation IHS (intensité, teinte, saturation) à la pseudo-image segmentée a permis de mettre en évidence la zone dévastée par les écoulements pyroclastiques ayant débordé sur les interfluves. En effet cette transformation est fondée sur trois paramètres : I, l'intensité attribuée à la luminance de la couleur; H, la teinte liée à la longueur d'onde prédominante; et S, la saturation qui exprime le degré de déviation par rapport au niveau de gris.

Comme le montre la figure 4, cette étape a mis en évidence quatre segments (zones) dans la vallée de Gendol-Opak qui ont été identifiés par Solikhin et al (2013) selon des critères topographiques, géomorphologiques et hydrologiques :

1- Le segment A correspond à un cône pyroclastique dévasté par les déferlantes à haute énergie, situé après la rupture de pente à 750 m d'altitude.

2- Le segment B correspond à une seconde rupture de pente et aux débordements des BAFs sur les interfluves.

3- Le segment C correspond à une zone de rétrécissement de la vallée avec des pentes relativement faibles (entre 3 et 4°).

4- Le segment D correspond à la partie canalisée de la rivière Gendol où les dépôts pyroclastiques sont guidés par la forme du chenal principal, dans des zones à faibles pentes (<3°).

Chacun de ces segments de la vallée a été traité séparément.

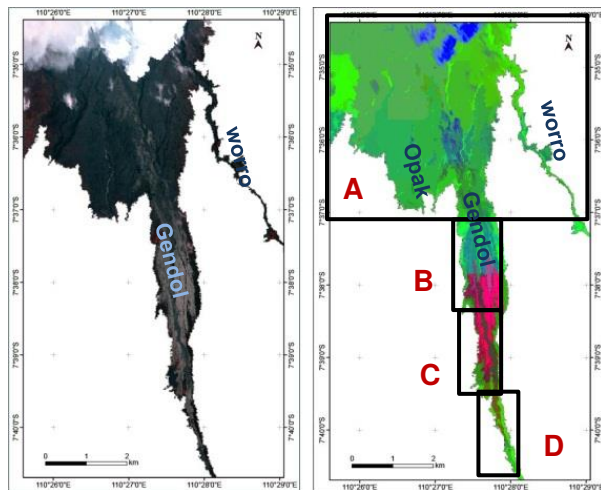


Figure 4 : Délimitation de la vallée de Gendol-Opak à partir de l'image GeoEye-1 du 15 novembre 2010 (à gauche). Sa transformation IHS (à droite) a permis d'identifier quatre segments (zones) topographiques, géomorphologiques et hydrologiques distinctes.

2.3. Évaluation de l'évolution spatiale et temporelle par une analyse bivariée

L'évaluation de modifications des unités des dépôts identifiées au cours de temps (2010-2012) est effectuée sur la base de l'analyse bivariée de trois indices spectraux NDWI, NDVI et NDRSI calculés à l'échelle de chaque objet et pour chaque date. Une représentation souvent utilisée est l'histogramme bivarié. L'analyse de l'histogramme de chaque image nous apporte d'avantage d'informations qui permettent de mieux attribuer chaque objet à une unité donnée.

L'analyse des histogrammes nous a permis de suivre l'évolution spatio-temporelle des unités de dépôts pendant trois ans après l'éruption de 2010.

3. Résultats

3.1. Cartographie des dépôts pyroclastiques

La méthode de classification appliquée aux trois images satellitaires a permis d'identifier 15 classes de dépôts pyroclastiques, de lahars et des zones affectées par les déferlantes, dans la vallée de Gendol-Opak.

La comparaison des unités obtenues pour l'année 2010 aux unités de dépôts de la carte géologique établie par Thouret et al (2013), montrent que de manière générale, 75 % des unités géologiques ont été retrouvées par classification orientée-objet.

Les résultats de la classification des trois images ont permis d'évaluer l'évolution temporelle et spatiale de dépôts pyroclastiques et des zones affectées par les déferlantes pour une période de trois ans (2010-2012).

La figure 5 présente un exemple d'évolution dans le segment A de la vallée de Gendol-Opak. Elle met en évidence la recolonisation rapide de la végétation dans la zone affectée par les déferlantes et le remaniement des zones des dépôts de BAFs en lahars dans la partie canalisée.

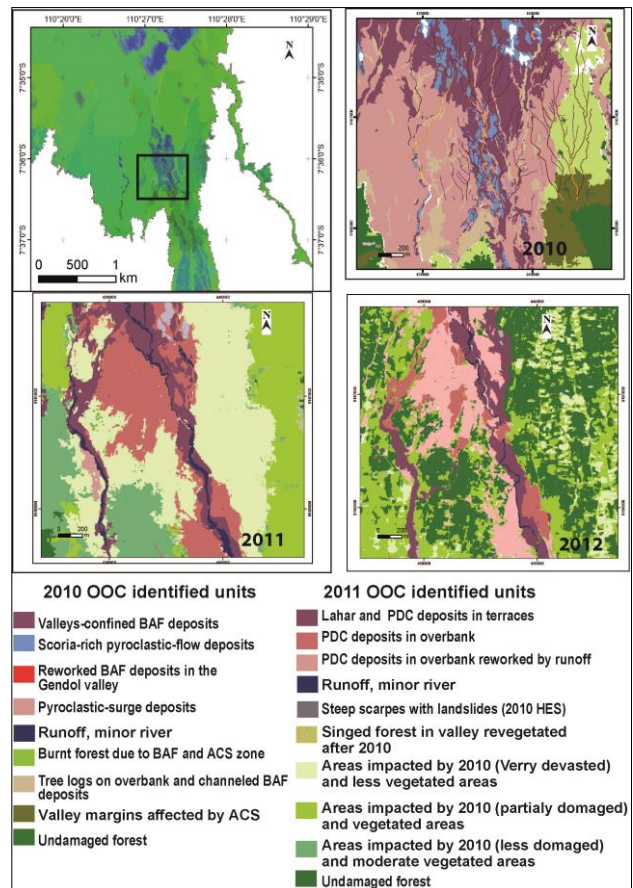


Figure 5 : Extrait de la cartographie des dépôts et leur évolution dans la zone amont de la vallée de Gendol-Opak (rectangle Asur l'image IHS de GeioEye-1 2010, Fig. 4). Les résultats de la classification orientée-objet des images d'indices spectraux des données satellitaires de 2010, 2011 et de 2012 sont représentés avec leurs légendes respectives (les unités de 2011 et 2012 sont définies par la même légende).

La très grande résolution spatiale de l'image Pléiades acquise en 2012 (rééchantillonnée à 0,5 m) et les larges bandes spectrales (notamment dans l'infrarouge : 200 nm) du capteur ont permis de mieux délimiter et identifier les dépôts pyroclastiques (BAFs) canalisés. On note que la bande infrarouge du capteur GeoEye a une largeur de 140 nm.

3.2. Evolution de dépôts pyroclastiques

Pour faciliter et synthétiser l'analyse de l'évolution temporelle de dépôts pyroclastiques, les unités des dépôts pyroclastiques ont été regroupées en quatre classes: les dépôts canalisés (BAFs), les dépôts ayant

débordés (OPFs), les forêts et les zones agricoles (affectées ou non par les déferlantes). L'évolution temporelle est représentée sous forme de l'analyse bivariée des indices spectraux calculés à l'échelle de chaque objet issu de la classification orientée-objet. Les figures 6 et 7 exposent une partie de ces résultats. Les indices NDWI et NDVI ont mis en évidence les zones affectées par les déferlantes ($NDWI < 0,2$ et $0,1 < NDVI < 0,3$) et la végétation indemne ($0,2 < NDWI < 0,4$; $NDVI < 0,16$).

Les indices NDWI et NDRSI nous ont permis de distinguer les dépôts canalisés ($NDRSI < -0,3$ et $0,1 < NDWI < 0,2$) des zones de forêts brûlées et zones affectées par les déferlantes (HES) ($NDRSI > 0,3$ et $NDWI < 0,1$). Un NDRSI proche de 0 a été attribué aux dépôts «rougeâtres», probablement riches en scories oxydées. Le graphe NDVI/NDWI en 2010 montre deux groupes : l'un attribué aux dépôts de blocs et cendres denses (BAFs) canalisés dans les vallées principales (NDVI et NDWI proches de 0), l'autre séparant les zones de forêts de celles affectées par les déferlantes. Les zones intactes se sont mises en évidence dans le diagramme (NDVI/NDWI).

Le histogramme bivarié NDWI/NDRSI indique deux groupes différents, attribués aux dépôts pyroclastiques riches en scories ($NDRSI < 0,1$) et aux dépôts pyroclastiques denses (BAFs) ayant débordé sur les interfluves ($NDWI < 0,12$ et $NDRSI < -0,3$).

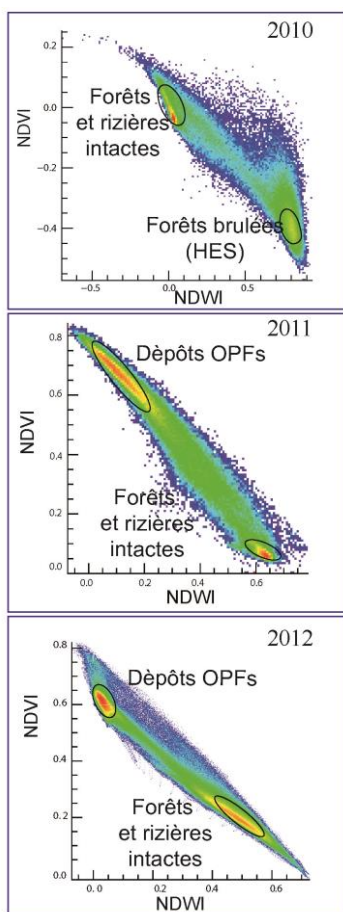


Figure 6 : Évolution temporelle (2010-2012) de l'histogramme bivarié NDVI/NDWI après l'éruption de 2010 dans la section A de la vallée de Gendol-Opak.

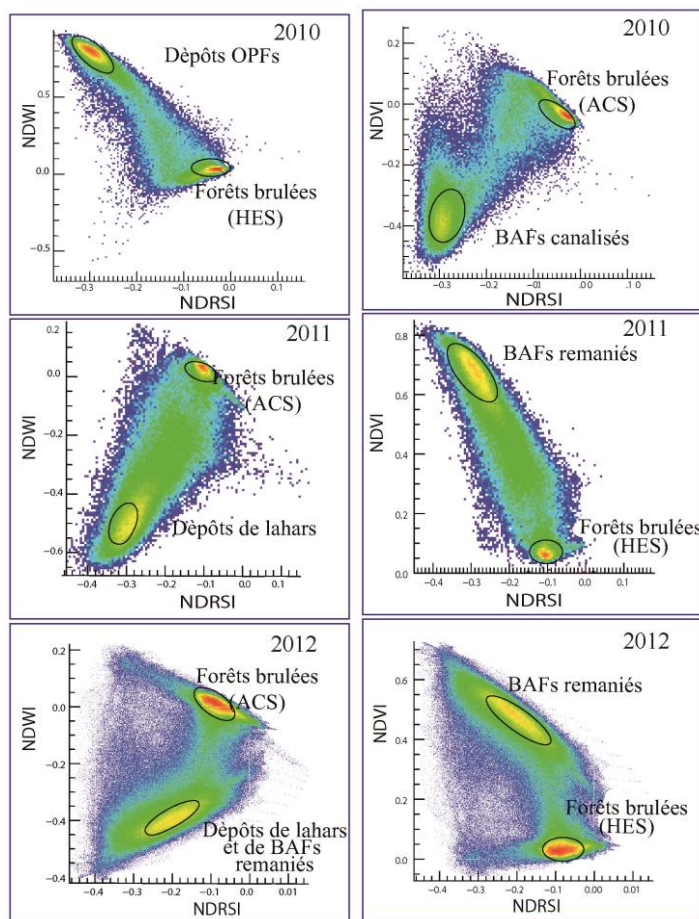


Figure 7 : Évolution temporelle (2010-2012) des histogrammes bivariés après l'éruption de 2010 dans la section A de la vallée de Gendol-Opak : un graphe NDWI/NDRSI (A gauche) et un graphe NDVI/NDRSI (A droite).

4. Discussions

L'analyse multi-temporelle des dépôts pyroclastiques a permis de suivre l'évolution de leur répartition spatiale dans la vallée de Gendol-Opak.

Cependant, l'identification de chaque type de dépôts pyroclastiques et de lahars a nécessité l'adaptation des seuils des valeurs des indices qui les caractérisent, en fonction de type de l'image et de l'année d'acquisition. La non-reproductibilité de mêmes seuils pourrait être due aux facteurs environnementaux (présence d'une nouvelle végétation et l'état de l'humidité de dépôt) et facteurs humains (reconstruction d'après éruption).

En 2011 et 2012, les graphes NDVI/NDWI montrent bien deux groupes (un groupe associé aux dépôts d'OPFs et un groupe associé aux forêts et rizières intactes). Les histogrammes de NDWI/NDRSI montrent deux groupes bien séparés contrastant avec les dépôts de lahars avec les zones et forêts endommagées par les ACS. Les histogrammes de NDVI/NDRSI distinguent les zones d'écoulement denses (BAFs) qui avaient débordé sur les marges des vallées de Forêts brûlées par les HES.

Dans le cas des images 2011 et 2012, le remaniement des dépôts par l'eau et la production de lahars dans la

zone amont (Segment C) a nécessité l'intégration d'autre information thématique dans le processus de classification, comme l'initiation du nouveau réseau hydrographique ou recolonisation de la végétation.

5. Conclusion

La classification orientée objets des informations spectrales extraites des images satellites optiques THR (comme GeoEye et Pléiades) acquises après l'éruption du volcan Merapi en 2010 a permis d'analyser l'évolution spatio-temporelle des dépôts pyroclastiques dans la vallée de Gendol-Opak. Les croisements des indices spectraux de caractérisation de l'eau, de la végétation et du sol rouge sont avérés des bons discriminants et ont permis de bien dégager les quatre types des dépôts pyroclastiques (BAFs canalisés, les dépôts ayant débordés, les dépôts des lahars et les zones de déferlantes). Ils ont aussi mis en évidence trois états de la végétation et des forêts bordant la vallée témoignant de l'étendu des déferlantes.

Les résultats obtenus montrent l'efficacité de l'identification et de la classification de dépôts pyroclastiques et de zones impactées par les déferlantes par rapport à l'utilisation des méthodes de classification traditionnelle pour l'étude des dépôts pyroclastiques d'un volcan actif.

L'intérêt de notre méthode est de définir des indices spectraux calculés sur des images optiques permettant de caractériser les dépôts pyroclastiques en fonction de leur teneur en oxyde de fer et de la présence de la végétation. En outre, la contribution principale de cet article consiste en la fusion des résultats de multiples processus, qui permet de s'affranchir du problème délicat de l'imagerie optique dans le cadre des éruptions d'un volcan actif.

Remerciements

Cette étude a été réalisée dans le cadre du projet CNES (TOSCA) intitulé «Suivi de l'activité éruptive et bilan d'érosion des dépôts éruptifs récents par télédétection et analyse de MNT». Les scènes d'images du satellite Pléiades ont été acquises avec le soutien du programme ISIS-CNES.

Références

Benz U., Hofmann P., Willhauk G., Lingenfelder I., Heynen M., 2004. Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 58: 239-258.

Carter A.J., Girina O., Ramsey M.S., Demyanchuk Y.V., 2008. ASTER and field observations of the 24 December 2006 eruption of Bezymianny Volcano, Russia. *Remote Sensing of Environment*, 112: 2569-2577.

Chavez P.S., 1996. Image-Based Atmospheric Corrections Revisited and Improved. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62(9): 1025-1036.

Charbonnier S.J., Germa A., Connor C.B., Gertisser R., Preece K., Komorowski J-C., et al., 2013. Evaluation of the 2010 pyroclastic density currents at Merapi volcano from high-resolution satellite imagery, field

investigations and numerical simulations. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 261: 295-316.

Dávila-Hernández N., Lira J., Capra-Pedol L., Zucca F., 2010. A normalized difference laharindex based on Terra/Aster and 1 Spot 5 images: an application at Colima Volcano, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. 28 (3): 630-644.

De Belizal E., Lavigne F., Hadmoko D.S., Degeail J.P., Dipayana G.A., Mutaqin B.W., Marfai M.A., Cquoquet M., Le Mauff B., Robin A.K., Vidal C., Cholik N., Nurnanning A., 2013. Rain-triggered lahars following the 2010 eruption of Merapi volcano, Indonesia: A major risk, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 261: 330-347.

Efford J.T., Bylsm, R.J., Clarkson B.D., Pittari A., Mauriohoo K., Moon V.G., 2014. Vegetation dieback as a proxy for temperature within a wet pyroclastic density current: A novel experiment and observations from the 6th August 2012 Tongariro eruption. *Journal of Volcanology and Geothermal Research (In Press)*.

Escadafal R., Huete A.R., 1991. Improvement in remote sensing of low vegetation cover in arid regions by correcting vegetation indices for soil «noise». *CRAS, Paris*, 312(2): 1385-1391.

Graettinger A.H., Ellis M.K., Skilling I.P., Reath K., Ramsey M.S., Lee R.J., Hughes C.G; McGarvie D.W., 2013. Multiple mapping techniques of glaciovolcanic regions: Remote sensing and field mapping of Askja (Dyngjufjöll), Iceland. *International Journal of Remote Sensing* 34: 7178-7198.

Gertisser R., Charbonnier S.J., Troll V.R., Keller J., Preece K., Chadwick J.P., Barclay J., Herd R.A., 2011. Merapi (Java, Indonesia): anatomy of a killer volcano. *Geology Today*, 27: 57-62.

Hadmoko D.S., Dipayana G.A., Sartohadi, Lavigne F., Marfai M.A., Suramtman S., 2013. Lahars at Merapi Volcano following 2010 eruption: geomorphic impacts and hazards assessment. IAG 2013. 23-26 Août, Paris, France.

Harris A.J.L., Ripepe M., Calvari S., Lodato L., Spampinato L., 2008. The 5 April 2003 explosion of Stromboli: timing of eruption dynamics using thermal data. In: Calvari, S., et al. (Ed.), *The Stromboli Volcano: An Integrated Study of the 2002-2003 Eruption*. AGU Geophysical Monograph Series, 182: 305-316.

Howell J.K., White, S.M., Bohnenstiehl, D.R., 2012. A modified basal outlining algorithm for identifying topographic highs in gridded elevation data, part 2: application to Springerville Volcanic Field. *Computers & Geosciences*, 49: 315-322.

Joyce K.E., Samsonov S., Manville V., Jongens R., Graettinger A., Cronin S.J., 2009. Remote sensing data types and techniques for lahar path detection: A case study at Mt. Ruapehu, New Zealand. *Remote Sensing of Environment*, 113: 1778-1786.

Kerle N., Oppenheimer C., 2002. Satellite remote sensing as a tool in lahar disaster management, *Disasters*, 26: 140-160.

Kerle N., Van Wyk de Vries B., 2001. The 1998 debris avalanche at Casita volcano, Nicaragua - Investigation of structural deformation as the cause of slope instability using remote sensing. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 105: 49-63.

- Komorowski J-C., Jenkins S., Baxter P., Picquout A., Lavigne F., et al., 2013. The Merapi 2010 eruption: An interdisciplinary impact assessment methodology for studying pyroclastic density current dynamics. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 261 (1): 260-294.
- Madeira J., 1991. Etude quantitative des relations constituants minéralogiques-réflexance diffuse des latosols brésiliens : application à l'utilisation pédologique des données satellitaires TM (région de Brasilia). Thèse de doctorat, Paris 6.
- McAlpin D., Meyer F.J., 2013. Multi-sensor data fusion for remote sensing of post-eruptive deformation and depositional features at Redoubt Volcano. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 259: 414-423,
- McFeeters SK., 1996. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7): 1425-1432.
- Nartha T.R., Kerle N., van Westen C.J., Jetten V.G. and Kumar K.V., 2012. Object-oriented analysis of multi-temporal panchromatic images for creation of historical landslide inventories. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 67: 105-119.
- Rouse J W., Haas RH., Shell JA., Deering DW., Harlan, JC., 1974. Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation. Final Report, Type III, NASA/GSFC, Greenbelt, MD.
- Smith G.A., Fritz W.J., 1989. Volcanic influences on terrestrial sedimentation. *Geology*, 17: 375-376.
- Solikhin A., Thouret J-C., Harris A., Liew SC., Gupta A., 2012. Geology, tectonics, and the 2002-2003 eruption of Semeru volcano, Indonesia: interpreted from high-spatial resolution satellite imagery. *Geomorphology* 138: 364-372.
- Solikhin A., Thouret J-C., Oehler J-F., Gupta A., Sayudi SD., Liew SC., 2013. Effects and extent of pyroclastic and lahar deposits of the 2010 Merapi eruption in one active catchment analyzed from HSR imagery. IAVCEI 2013 Scientific Assembly, Kagoshima, Japan, July 2013.
- Song C., Woodcock C.E., Seto K.C., Lenney M.P., Macomber S.A., 2001. Classification and Change Detection Using Landsat TM Data. When and How to Correct Atmospheric Effects?. *Remote Sensing of Environment*, 75: 230-244.
- Surono P., Pallister J., Boichu M., Buongiorno M.F., Budisantoso A, Costa F., Andreastuti S., Prata F., Schneider D., Clarisse L., Humaida H., Sumarti S, Bingnami C., Griswold J., Carn S., Oppenheimer C., Lavigne F., 2012. The 2010 explosive eruption of Java's Merapi volcano a "100-year" event. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 241-242: 121-135.
- Thouret J-C., Solikhin A., Budi Wibowo S., Hadmoko S. et al., 2013. Lahar characteristics and erosion measurements using multiparameter recording stations and DEMs in the Gendol catchment after the 2010 Merapi eruption. IAVCEI 2013 Scientific Assembly, July 20-24, Kagoshima, Japan.
- Thouret J-C., Lavigne F., 2000. Lahars: occurrence, deposits and behaviour of volcano-hydrologic flows. In Leyrit H. and Montenat C. (Eds), "Volcanoclastic rocks, from magmas to sediments". Gordon and Breach Publisher Science, Amsterdam, 151-174.
- Wessels ROL., Coombs M.L., Schneider D.J., Dehn J., and Ramsey MS., 2010. High-resolution satellite and airborne thermal infrared imaging of the 2006 eruption of Augustine Volcano. chapter 22 of Power, J.A., Coombs M.L., Freymueller J.T., eds., *The 2006 eruption of Augustine Volcano, Alaska: U.S. Geological Survey Professional Paper 1769*, 527-552.