

CARTOGRAPHIE AUTOMATIQUE DES COULÉES DE LAVE A PARTIR DES IMAGES SPOT — L'EXEMPLE DU SABANCAYA (PÉROU)

Annick LEGELEY-PADOVANI¹, Catherine MERING², David HUAMAN²
et Richard GUILLANDE³

Mots clés : analyse d'image, cartographie automatique, Morphologie Mathématique, SPOT, télédétection, volcans.

Résumé ⁴: les images SPOT XS et Panchromatique ont été utilisées conjointement pour cartographier les coulées de lave d'un volcan, Nevado Sabancaya (Sud Pérou). Cet objectif a été atteint grâce à la classification multispectrale non supervisée pour traiter les images XS; puis à des méthodes spécifiques d'analyse d'image (Morphologie Mathématique, filtrage par convolution) pour individualiser les coulées et les cartographier en fonction de leur texture, à partir des images SPOT Panchromatique.

I - INTRODUCTION

La cartographie de volcans potentiellement dangereux reste une donnée de base pour de nombreux édifices non étudiés [Bonneville, 1992].

Seul un petit nombre d'études françaises a été conduit dans le domaine de la cartographie. La cartographie du Piton de la Fournaise à la Réunion par Bonneville *et al.* [1989] et ceux de Vandemeulebrouck *et al.* [1989] sur l'Etna ont eu pour but de prouver l'utilité des images SPOT pour la cartographie géologique dans le domaine volcanique.

Bien que l'observation des volcans par télédétection soit pratiquée depuis longtemps, l'utilisation des images satellite par les géologues et volcanologues pour la cartographie se fait essentiellement par photo-interprétation, à l'instar de l'analyse des photographies aériennes [Rothery *et al.*, 1987; Gastellu *et al.*, 1990].

On se propose ici de produire le même genre de cartographie mais par séquences de traitements d'images. Ainsi, la cartographie est reproductible.

Le volcan Nevado Sabancaya, qui nous a servi d'exemple, est situé au Pérou à 16°13'S de latitude et 71°51'W de longitude sur l'axe volcanique sud-péruvien qui est aligné NW-SE. Il est en éruption depuis mai 1990.

Sur le plan cartographique, cet exemple est représentatif des volcans jeunes et actif, des Andes en altitude (6.000 mètres).

¹ ORSTOM, laboratoire de Géophysique, 70, route d'Aulnay - 93170 Bondy - FRANCE; Email : legeley@orstom.fr; Fax : 48 47 30 88

² Dépt. de Géotectonique, UPMC, BP 129 - 75252 Paris Cedex 05 - FRANCE; Fax : 44 27 50 85

³ Géosciences Consultants, 189, Bd Brune - 75014 Paris - FRANCE; Fax : 45 39 29 60

⁴ Travail et documents réalisés à l'aide du logiciel PLANÈTES - Laboratoire d'Informatique Appliquée, Bondy et du logiciel OSIRIS V2.0 - LATICAL/ESTEL.

II - PRINCIPE ET OUTILS D'ANALYSE D'IMAGES

A l'instar de la photo-interprétation, les traitements ont visé à faire ressortir des entités de plus en plus petites par focalisations successives sur des ensembles emboîtés spatialement.

1 - Principe de la méthode

1.1 - Détermination de la zone d'influence du volcan.

Pour focaliser l'analyse sur la zone d'intérêt, on s'apprête à extraire à partir de la scène SPOT XS une région sub-convexe correspondant à ce que l'on appellera la zone d'activité du volcan.

Cette démarche s'appuie sur la possibilité de discriminer automatiquement les états de surface correspondant à la zone d'activité par rapport à son environnement immédiat. Une telle démarche est pertinente si toutefois la zone n'est pas recouverte de façon uniforme par la neige, la glace ou encore la cendre en période post-éruptive. En effet, les différentes coulées ont des signatures spectrales très spécifiques. Sur une composition colorée on peut facilement distinguer les coulées d'après leur couleur (donc leur radiométrie) et par conséquent les différencier de leur environnement immédiat et entre elles [Bonneville, 1992].

Une fois déterminées les zones correspondant aux coulées, on trace le contour de la zone d'influence du volcan par analyse d'image. Nous avons donc eu recours à l'analyse d'image d'une part pour éliminer les taxons hors zone influence et d'autre part pour tracer un contour convexe et lisse matérialisant cette zone. Nous constituons ainsi un masque d'analyse qui sera utilisé par la suite dans les traitements : seuls les pixels de l'image intérieurs à ce masque seront traités.

1.2 - Individualisation des différentes coulées par délimitation de leurs contours et analyse de leur texture

La cartographie automatique des coulées passe par leur individualisation en terme de régions connexes. Cette opération a été effectuée uniquement par transformation d'image.

Les coulées se caractérisent aussi par leur texture visible sur les images SPOT Panchromatique. Cette texture est le reflet d'une genèse magmatique (composition chimique et la température de mise en surface), elle est plus contrastée sur le bord et le front des coulées. Notre démarche est de réaliser une discrimination systématique des textures afin d'individualiser chaque coulée dans l'espace.

On a représenté l'enchaînement des étapes de traitement sur la figure 1.

2 - Outils d'analyse

Nous avons utilisé trois familles de traitements numériques :

- une classification multidimensionnelle non supervisée pour obtenir des classes radiométriques homogènes à partir de la scène SPOT XS,
- des filtres directionnels de type gradient pour rehausser les contrastes perceptibles à l'intérieur des coulées,
- des transformations morphologiques binaires pour simplifier les formes et produire des cartes des coulées et de leur texture.

2.1 - Analyse multispectrale non supervisée

Nous avons choisi de ne pas superviser les classifications. Les classifications non supervisées permettent de segmenter les scènes multispectrales en zones "radiométriquement similaires" ce qui est suffisant pour différencier les coulées du reste des unités géologiques [Bonneville et al., 1989].

Nous avons utilisé la méthode des *Nuées Dynamiques à centres variables* [Diday, 1971] dont le seul paramètre à fixer est le nombre de classes à discriminer. Le nombre que nous avons retenu ici s'explique par le niveau de détail de la taxonomie que nous voulions obtenir. De plus, en télédétection les résultats de ces méthodes, utilisées de façon non hiérarchisée, ne sont interprétables que pour un nombre limité de classes.

Par ailleurs, nous avons fait le choix d'un nombre impair de classes, ce qui permet de réordonner plus aisément les classes suivant les projections de leur barycentre sur les variables de départ (canaux XS), et pouvoir interpréter ces classes par l'intermédiaire des grandeurs radiométriques.

2.2- Gradients directionnels locaux

Pour faire ressortir les fronts de coulées sur l'image SPOT Panchromatique, on a recours à la technique du filtrage directionnel par calcul du gradient et plus exactement du filtrage de Robinson [Robinson, 1977]. Sur la vue SPOT Panchromatique, qui est postérieure au début de l'éruption, les valeurs radiométriques sont rendues uniformes par le "soudage" de cendre sur l'ensemble du massif y compris les zones de glace et de neige. Le niveau de gris de l'image filtrée est égale au niveau de gris du gradient maximal dans les huit directions de la trame. Ce gradient "multidirectionnel" est obtenu par convolutions successives de l'image avec les masques classiques des huit gradients directionnels. L'information directionnelle est donc perdue sur l'image résultante. C'est pourquoi nous avons utilisé l'image "des directions" c'est à dire l'image où les pixels sont codés de 0 à 7 en fonction de la direction du gradient d'amplitude optimale. Ce choix nous permet de cartographier les directions et non plus seulement les limites des fronts de coulées.

2.3 - Morphologie Mathématique

Pour délimiter des formes au contour lisse telles qu'on les obtiendrait en cartographie par photo-interprétation nous avons utilisé les transformations d'images binaires qui sont celles de la Morphologie Mathématique à savoir :

- la dilatation et l'érosion,
- l'ouverture et la fermeture.

Ces deux dernières transformations permettent de simplifier les structures d'une image binaire en lissant les formes ou en éliminant les détails de faible surface par extension de la surface (*fermeture*) et diminution de la surface (*ouverture*). L'*ouverture* nous a été particulièrement utile pour déconnecter des entités faiblement connectées sur l'image de départ. A l'inverse la *fermeture* nous a permis de faire se rejoindre des entités voisines, pour l'obtention d'un masque sub-convexe [Serra, 1982].

Le lissage des contours extérieurs a été obtenu par itérations d'un *lissage majoritaire* jusqu'à idempotence [Willson, 1989], que l'on appelle ici *lissage ultime*.

Les transformations de base ne permettent pas à elles seules de nettoyer l'image, c'est-à-dire d'éliminer les entités de faible surface, sans modifier les contours. Seule la *reconstruction géodésique* a cette propriété [Coster et Chermant, 1989]. Elle a été utilisée à diverses étapes pour éliminer le bruit résultant de l'application des

transformations de base. On l'utilise également pour "boucher les trous" d'une entité connexe. En effet si l'on inverse l'image binaire, les trous sont assimilés à du bruit et donc éliminés par *reconstruction géodésique*. L'image de l'entité connexe "bouchée" est obtenue par une nouvelle inversion.

Ces traitements ont été utilisés en séquence comme le montre le schéma de la figure 1; la justification de cet enchaînement est développé au chapitre suivant.

III - PROCÉDURE

1 - Détermination du masque d'analyse

Sur la composition colorée standard effectuée à partir des canaux XS (fig. 2), on distingue en vert foncé les surfaces correspondant aux coulées entourant le cratère localisé au milieu de la zone blanche correspondant à la neige. Il est donc envisageable d'extraire automatiquement ces zones par classification multispectrale.

Nous avons donc constitué une composition colorée à partir des trois néo-canaux issus d'une *Analyse en Composantes Principales* sur les trois canaux de base [Vandemeulebrouck et al., 1992]. Comme prévu, cette transformation a pour effet d'augmenter les contrastes sur l'ensemble de la scène et en particulier sur la zone centrale (fig. 3). Il est donc envisageable de cartographier la zone des coulées par l'intermédiaire d'une classification multispectrale d'une part, à partir des canaux bruts et d'autre part, à partir des néo-canaux issus de l'*Analyse en Composantes Principales*.

En effectuant à partir des canaux bruts une classification par *Nuées Dynamiques par centres variables* en fixant à 11 le nombre de classes, après avoir testé les classifications d'un nombre croissant de classes, nous avons discriminé correctement la zone des coulées (fig. 4). Sur cette image nous avons sélectionné les classes qui correspondent à la zone d'activité. Comme il apparaissait encore des entités connexes hors de cette zone (fig. 6), nous les avons éliminées par *labellisation* (fig. 8).

Pour obtenir un plus grand détail de la zone centrale, nous avons effectué le même type de classification sur les néo-canaux en fixant le nombre de classes à 5 (fig. 5). Sur cette image classée nous avons sélectionné les classes qui correspondent la zone centrale. Une partie de l'entité résultante est hors de la zone d'activité, mais elle est très faiblement connectée à la partie intérieure à cette zone. Il a donc suffi d'opérer une ouverture de taille 1 avec un élément carré 3 x 3 (fig. 7) et la zone centrale a été extraite par *labellisation* (fig. 9).

On a fait l'union ensembliste des deux ensembles résultants. Pour obtenir une seule entité connexe et subconvexe qui sera le masque de mesure nous avons fait se rejoindre les entités par une *fermeture* de grande taille et, après avoir "bouché les trous" subsistants, nous avons opéré un lissage des contours par itération du *lissage ultime* (fig. 10).

2 - Individualisation des coulées et de leurs principales directions

A partir de l'image des coulées (fig 8 et 9) obtenue précédemment, on a procédé à l'individualisation des coulées en déconnectant par *ouverture morphologique* les coulées faiblement connectées sur l'image XS.

Pour chacune unité, les trous ont été "bouchés" par *reconstruction géodésique* et les contours lissés par *lissage majoritaire*. Sur la figure 11, chaque coulée est identifiée par *labellisation*.

3 - Cartographie des directions de coulées d'après la texture

Les textures des coulées sont particulièrement perceptibles sur l'image Panchromatique. Ces textures, "en peau d'éléphant", sont principalement dues au modelé des fronts et aux bords de coulées basaltiques perpendiculaires au sens de chaque coulées.

L'image SPOT Panchromatique est recalée sur l'image XS. On peut donc lui appliquer le masque d'analyse fabriqué en 1 (fig. 12).

Le filtrage du gradient de Robinson appliqué à cette image nous permet d'obtenir une image des huit directions locales du gradient maximal (cf schéma ci-contre). On a isolé chaque direction sur une image binaire au moyen d'un codage simple. On obtient ainsi huit images binaires où la direction représentée correspond aux pixels blancs. On constate que l'information directionnelle correspond à des plages plus ou moins denses correspondant à chaque direction. La figure 13 illustre l'image de la direction 1.

Pour obtenir des plages homogènes dans la perspective d'une cartographie des textures nous avons accentué la densité des points en pratiquant des *fermetures* de taille croissante alternées par des *reconstructions géodésiques* pour nettoyer progressivement l'image. Nous avons terminé le traitement par un *lissage majoritaire* pour améliorer les contours (fig. 14).

Pour représenter simultanément toutes les directions sur une même carte, nous avons dû procéder à un codage des images en puissance de 2 afin que l'image résultante de la somme des 8 images puisse être interprétée sans ambiguïté. On a recodé l'image résultante en ne conservant que les codes correspondant à une occurrence non nulle de pixels. Pour rendre exploitable le résultat final, on a d'une part éliminé les entités dont la surface est inférieure à 0,5% de la surface codée, et d'autre part recodé les entités restantes de façon continue.

La dernière opération a consisté à faire un choix de couleurs de façon à ce que la carte résultante (image et légende) soit lisible (fig. 15). L'idée qui préside à ce choix est de représenter les codes des directions pures (code de 0 à 7) par une couleur franche et les codes issus de la somme de deux directions voisines par une chromie voisine.

La carte finale consiste à masquer l'image résultante par l'image des formes des coulées (fig. 16). On obtient ainsi pour chaque coulée une carte de sa texture.

IV - CONCLUSION

C'est un objectif cartographique qui a guidé notre démarche de traitement d'image. Une partie de cet objectif s'est réalisée selon le modèle de la photo-interprétation. Pour individualiser les coulées nous avons, en effet, utilisé des transformations d'image qui permettent de séparer des entités, de lisser des contours comme on le fait par interprétation visuelle. Par contre, la cartographie des laves d'après leur texture qui a été automatisée ici ne peut pas se faire visuellement. Notre expérience montre donc que l'analyse d'image peut être un outil pour la cartographie thématique plus riche en possibilités que la seule photo-interprétation.

L'utilisation des scènes SPOT, pour l'analyse des volcans actifs, permet d'obtenir des renseignements géologiques sur des régions où l'éloignement, l'altitude du volcan (600m) et le manque de moyens logistiques rendent l'accès extrêmement difficile. Elle permet aux volcanologues de reconstituer l'histoire du volcan et d'évaluer les risques en cas d'activité éruptive.

BIBLIOGRAPHIE

- BONNEVILLE A., LANQUETTE A.M., PEJOUX R. & BAYON C., (1989) - Reconnaissance des principales unités géologiques du Piton de la Fournaise, La Réunion, à partir de SPOT 1; *Bull. Soc. Géol. Fr*, Paris, 8 (V), p. 1101-1110.
- BONNEVILLE A., (1992) - La surveillance des volcans par satellite; *La recherche*, 242, p. 404-413.
- CASADEVALL T.J., Editor, (1991) - First International Symposium on Volcanic Ash and Aviation Safety; Program and Abstracts, Seattle, Wa., *U.S. Geol. Survey*, Circular 1065, 58 pages.
- COSTER M. & CHERMANT J.-C., (1989) - Précis d'analyse d'images; *Ed. C.N.R.S.*, 560 pages.
- DIDAY E., (1971) - La méthode des Nuées Dynamiques; *Rev. Stat. Appl.*, 19 (2), p. 19-34.
- GASTELLU ETCHEGORY J.P., MEER MOHR (VAN DER) H., HANDAYA A. & SURJANTO W.J., (1990) - An evaluation of SPOT capability for mapping the geology and soils of Central Java; *Int. J. Remote Sensing*, 11 (4), p. 685-702.
- GUILLANDE R., THOURET J.-C., HUAMAN D. & LE GERN F. (1992) - L'activité actuelle du volcan Nevado Sabancaya (Sud Pérou) et l'évaluation des menaces et des risques : géologie, cartographie et imagerie satellitaire; *Rapport Min. Envir. et CNES, Document multigraphié*, 133 pages.
- ROTHERY D.A. & FRANCIS P.W., (1987) - Synergistic use MOMS-01 ans LANDSAT TM data; *Int. J. Remote Sensing*, 8 (3), p.501-508.
- ROBINSON X., (1977) - Edge detection by compass gradient mask; *CGIP*, 6, p. 492-501.
- SERRA J., 1982 - Image Analysis and Mathematical Morphology; *Ed. Academic Press*, 638 pages.
- VANDEMEULEBROUCK L. & PARSCAU J., (1989) - Utilisation de Landsat T.M. et d'un M.N.T. pour une analyse spectrale des laves sur l'Etna; *Bull. Soc. géol. France. Photo. télédétection*, Paris, 115, p. 43-47.
- VANDEMEULEBROUCK L., THOURET J.-C. & DEDIEU J.-P., (1993) - Reconnaissance par teledétection des produits éruptifs et des lahars sur et autour de la calotte glaciaire du Nevado del Ruiz, Colombie; *Bull. Soc. géol. France*. Paris, 164 (6), p. 795-806.
- WILLSON S.J., 1989 -.Convergence of iterated median riles; *IEEE. Comp. Graphics and Image Processing*, 47, p. 105-110.