

Analyse tomomorphométrique d'un édifice volcanique récent : Misti (Pérou)

Tomomorphometric analysis of a recent volcanic cone: Misti (Peru)

Fredy F. Garcia-Zuniga^{a*}, Jean-François Parrot^{b**}

^a Esa 7072, université Paris 6, B. 129, T. 26-16, E. 1, 4, place Jussieu, 75252 Paris cedex 05, France

^b Orstom, 213, rue Lafayette 75010 Paris, France

Abstract—The geomorphological evolution of a Quaternary volcanic cone can be shown through a tomomorphometric analysis. The pattern recognition parameters that characterise the successive horizontal cross-sections emphasise two superimposed ensembles that are in accordance with the respective influence of the two fitted cones that compose the Misti stratovolcano. The older part of this structure was affected by a collapse of its southeastern flank, where the new cone was later emplaced. The influence of the more recent parts of the volcano and the contribution of the related volcanic materials appear mainly at the summit. (© Académie des sciences / Elsevier, Paris.)

Peru / Misti / DTM / geomorphology / tomomorphometry

Résumé — L'évolution géomorphologique d'un appareil volcanique quaternaire peut être suivie à partir de l'analyse des paramètres qui caractérisent les différentes tranches d'altitude de ce volcan. Les paramètres utilisés dans le cas du volcan Misti mettent en évidence deux ensembles superposés qui correspondent à l'influence respective des deux cônes emboîtés qui composent ce strato-volcan. La partie la plus ancienne de l'appareil a dû être affectée par un effondrement de son versant sud-est, zone dans laquelle s'est ensuite développé le cône récent. L'influence de la partie la plus récente de l'édifice volcanique et de l'apport de ses matériaux se manifeste surtout dans la région sommitale, comme l'indique notamment le changement brutal de direction des axes principaux des tranches d'altitude, qui enregistrent une rotation d'environ 35° au-dessus de 4 650 m. (© Académie des sciences / Elsevier, Paris.)

Pérou / Misti / MNT / géomorphologie / tomomorphométrie

Abridged version

A tomomorphometric method was developed and applied to the Misti volcano, southern Peru (*figure 1*). From the bottom (4 050 m) to the top (5 650 m), the volcanic cone was divided into horizontal cross-sections in 100 m intervals. Pattern recognition parameters were chosen in order to emphasise the differences that characterise each cross-section.

Among the parameters retained, are the surface, S , and the perimeter, P , values that give rise to the definition of the circularity index, CI , and the ratio perimeter versus surface, RPS .

A precise computation of the surface, S , is provided by

former research of the pixels belonging to the border, in order to consider the corresponding pixels as half part of the pixels lying in the surface (Parker, 1993). The computation of the perimeter requires a comparison with a template that indicates the distance values according to the different configurations encountered (Freeman, 1961; Weshler, 1981). Equations (1) and (2) respectively give the two indexes previously mentioned.

It is also useful to compare the shape with the convex zone that circumscribes it. Various algorithms (Preparata et Shamos, 1985) have been proposed to define a convex hull. The

Note présentée par Claude Jaupart.

Note remise le 17 juin 1998, acceptée après révision le 14 septembre 1998.

* E-mail : fredy.garcia@lgs.jussieu.fr

** E-mail : parrot@lgs.jussieu.fr

C. R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la terre et des planètes / Earth & Planetary Sciences
 1998. 327, 457-462

Fonds Documentaire ORSTOM

Cote : B * 15881 Ex : 1

457



method developed by Akl (1979), based on Jarvis' procedure (Jarvis, 1979) has been used. The parameter RSC generally used corresponds to the ratio surface of the component Nb_p (number of pixels of the component) versus the total number of pixels describing the convex region S_c (equation (3)).

This index is too sensitive to be used in the present case. We have defined here the parameter *RCI* (Ratio *PCo* versus *P*) that enhances better the differences observed between the different horizontal cross-sections. Equation (4) gives this parameter, where *PCo* corresponds to the perimeter of the convex region.

Moreover, numerous indexes use a comparison between the studied shape and regular shapes, such as square, rectangle, and circle. This approach requires research into the centre of mass (CM) of the studied shape (equation (5)). In the present study, two parameters seem to be well adapted to the problem: the direction of the principal axis PA and the ratio *RLL* (ratio length versus width of the rectangle circumscribing the shape). PA corresponds to the greatest distance between the CM and a pixel belonging to the border. The clockwise orientation is defined in degrees, the origin being located to the north. It allows us to define the direction DIR of this axis (0° to 180°). PA and the axis perpendicular to PA is used to research the length *Lo* and the width *La*, of the rectangle. It is then possible to define the parameter *RLL* expressed by formula (6).

The contour levels (figure 2) are extracted from the Digital Elevation Model (DEM). The closed contours correspond to the volcanic cone. They are filled with the value 1, the background being set at 0. All these cross-sections are shown in a single image (figure 3) to which the method is applied. The algorithm developed gives a label to each component and supplies the corresponding parametric values (table).

All the cross-sections are roughly convex. The values of *CI* and *RLL* confirm this observation, but the differences are weak. The parameter *RCI* (figure 4) shows that the bottom contours are more irregular (85.2–92.6) than the contours located near the summit (93–98.3). Furthermore, the variation of the direction DIR of the principal axis PA indicates a change of about 35° from the lower to the upper part. From the altitude 4 050 to 4 650 m, DIR is between 64° and 78° , whereas, between 4 750 and 5 650 m, this value ranges from 102° to 111° . The occurrence of DIR values in two families emphasises the heterogeneous character of the volcano (figure 5). The evolution of *RCI* also illustrates these differences, the contours being more and more regular towards the top.

The Misti volcano (figure 1, B) is located on the intersection of the southern border of the Chachani caldera oriented NE-SW

and the ancient structures of NW-SE orientation that separate the Arequipa Basin and the Altiplano (Garcia et al., 1997a, 1997b). The first stage of the Misti evolution was directed by collapse and normal faults linked to the caldera structure giving rise to the development of a drainage network. Based on morphologic characteristics, the Misti volcano can be separated into two sectors. The first, situated below 4 650 m, was formed by Holocene and Upper Pleistocene avalanche deposits and debris flows that cover essentially the western and southwestern flank (Thouret et al., 1995, 1996; Garcia et al., 1997a, 1997b). The upper part corresponds to the modern cone and was formed by lava flows and pyroclastic deposits dated $78\,000 \pm 3\,500$ years BP (Kaneoka and Guevara, 1984), overlain by tephra and ashes dated $33\,870 \pm 800/1\,460$ years BP (Thouret et al., 1995, 1996). Gullies filled by pyroclastic flows dated $1\,920 \pm 200$ years BP are observed in the lower part (Thouret et al., 1995). Finally, the recent cone has been covered with pyroclastic deposits produced during the last eruptions since the 15th century (Hantke and Parodi, 1966; McLelland et al., 1989).

The difference between the lower and upper part of the volcano is underlined in the field by the nature and the age of the materials, the caldera structure and the erosion degree. On the other hand, the method used has shown that this heterogeneity is also emphasised by a significant change in the direction of the principal axis. The last orientation is in accordance with the NW-SE Andine direction since 35 000 years BP and the main morphological units of this region.

The emplacement of the recent cone in the collapse zone affecting the southeastern flank of the ancient cone, led to the direction change observed by means of the superposition of the recent cone onto the ancient cone. The remaining part of this ancient cone reaching 5 825 m (A in figure 3) outcrops northwestwards. The recent cone (B and C in figure 3) describes a horseshoe shape open to the south. Field observations on the summit show that the recent deposits overlie the ancient cone discordantly.

Thus, a tomomorphometric analysis describing the parameters that characterise different horizontal cross-sections, can be used to study the geomorphological features and the evolution of a recent volcanic structure. This analysis of the Misti volcano, has shown the heterogeneous characteristics of this structure, and furthermore, an important change in the direction of the axis of the elongated horizontal cross-sections, from the bottom to the top of this volcano.

1. Introduction

Une analyse des tranches d'altitude, ou analyse tomomorphométrique d'un cône volcanique d'âge Quaternaire à Actuel, à l'aide de paramètres descriptifs de formes, apporte des éléments d'informations géomorphologiques, voire géotectoniques facilement quantifiables. Cette approche objective est appliquée (figure 1) à l'étude du

volcan Misti (Sud du Pérou). Dans ce cas, les paramètres descriptifs utilisés concernent essentiellement la surface et le périmètre de ces tranches d'altitude, ainsi que les rapports entre ces paramètres, la recherche du centre de gravité et de la direction de l'axe d'allongement passant par ce centre, l'indice de convexité et les rapports longueur/largeur du rectangle qui inscrit la forme. Dans cet article, les tranches d'altitude ont été définies tous les

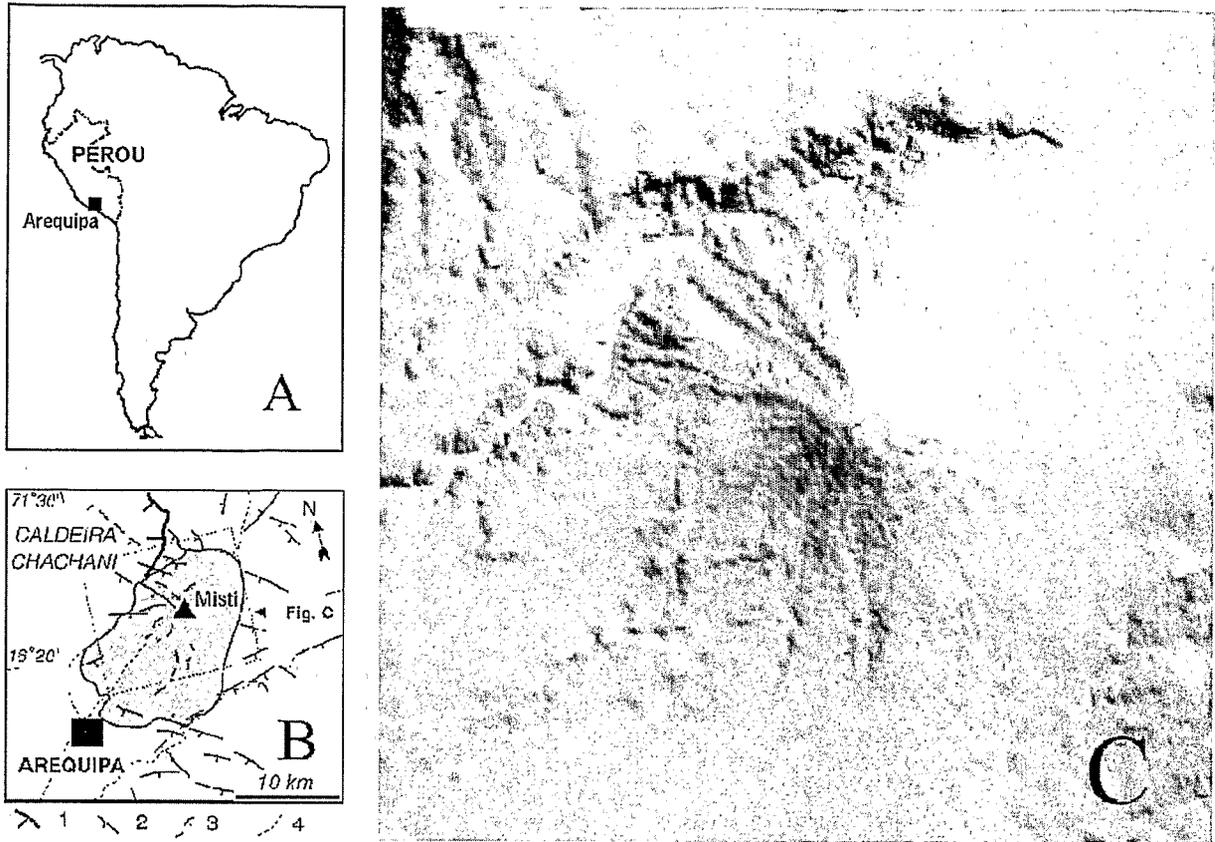


Figure 1. A. Localisation du Volcan Misti, Sud du Pérou. B. Caractéristiques volcano-tectoniques du volcan (1 : bordure de caldeira ; 2 : faille normale ; 3 : zone de *collapse*, 4 : rivières). C. Estompage du MNT (orientation 45°, angle 45°).

A. Location map of Misti Volcano, southern Peru. B. Volcano-tectonic features of the Misti (1: caldera border; 2: normal fault; 3: collapse zone; 4: rivers). C. Shaded DTM (orientation 45°, angle 45°).

100 m, depuis la partie intermédiaire du cône volcanique (4 050 m) jusqu'à son sommet (5 650 m). Les données hypsométriques au-dessous de 4 000 m n'ont pas été utilisées, dans la mesure où le domaine géomorphologique est différent.

2. Description des paramètres utilisés

2.1. Surface et périmètre (S , P)

Le calcul de la surface S est obtenu en estimant que les pixels (Nb_p) qui décrivent le périmètre P valent la moitié des pixels (Nb_i) situés à l'intérieur de la forme (Parker, 1993). La surface peut alors être exprimée en m^2 , en multipliant la somme $Nb_p + Nb_i$ par la valeur de la surface d'un pixel.

La longueur du périmètre P est définie par une comparaison avec un patron, qui indique la valeur des distances en fonction de la configuration que ce pixel et ses voisins décrivent (Freeman et Shapiro, 1961 ; Weshler, 1981).

Ces deux paramètres (surface et périmètre) permettent de définir un rapport S/P qui peut s'exprimer de deux manières différentes :

– indice de circularité :

$$CI = (P^2/S) \times 100 \quad (1)$$

– rapport périmètre/surface :

$$RPS = (P/S) \times 100 \quad (2)$$

Le paramètre CI sera d'autant plus faible que la forme sera régulière (4π , soit 12,56, pour un cercle, 16 pour un carré). RPS soulignera les irrégularités du contour.

2.2. Indice de convexité (RSC et RCI)

De nombreux algorithmes ont été proposés pour décrire une région convexe (Preparata et Shamos, 1985). La méthode de Akl (1979), basée sur la technique de Jarvis (1973), a été utilisée.

Le paramètre RSC correspond au rapport entre la surface de l'élément et celle de la plus petite région convexe qui circonscrit complètement cet élément. L'indice de convexité RSC est égal à :

$$RSC = (Nb_p/S_c) \times 100 \quad (3)$$

où Nb_p est le nombre total de pixels de l'élément et S_c le nombre de pixels décrivant la région convexe.

Mais, dans le cas présent, cet indice se révèle trop sensible pour être utilisé. Ceci nous a amenés à définir un paramètre (*RCI*), qui souligne mieux les différences observées entre les différentes tranches d'altitude. Il s'agit en fait du rapport entre le périmètre de l'objet étudié (*P*) et le périmètre de la surface convexe (*PCo*) qui le circonscrit.

$$RCI = (PCo/P) \times 100 \quad (4)$$

2.3. Centre de masse (CM)

Les paramètres précédents ne recourent qu'aux propriétés intrinsèques de la forme étudiée. Mais il est également possible de caractériser une forme en la comparant avec une forme géométrique simple, telle qu'un cercle, un carré ou un rectangle, et de mesurer le degré de recouvrement entre ces deux formes. Cette approche nécessite de calculer le centre de masse CM de la surface étudiée. Les coordonnées de CM (X_c, Y_c) sont égales à :

$$X_c = \frac{1}{Nb_p} \sum_{i=1}^{Nb_p} X_i \quad Y_c = \frac{1}{Nb_p} \sum_{i=1}^{Nb_p} Y_i \quad (5)$$

où Nb_p est le nombre de pixels formant l'objet, X_i et Y_i les coordonnées du pixel i .

Dans la présente étude, deux paramètres se sont révélés plus spécialement adaptés à la problématique : la direction de l'axe majeur et le rapport longueur/largeur du rectangle inscrivant la forme étudiée.

2.4. Axe principal (PA), rectangle inscrit et rapport longueur/largeur (RLL)

L'axe principal PA correspond à la plus grande distance rencontrée entre le centre de masse CM et un pixel appartenant au périmètre de la forme. Il est possible de définir l'orientation de cet axe. Cette orientation est définie en degrés codés de 0 à 360 dans le sens horaire, l'origine étant située au nord (0°). Elle permet de définir la direction DIR de cet axe entre 0 et 180°. L'axe principal permet également de calculer la largeur La et la longueur Lo du rectangle orienté qui inscrit la forme. Il est ainsi possible de définir un rapport RLL (longueur/largeur) exprimé sous la forme :

$$RLL = (Lo/La) \times 100 \quad (6)$$

3. Procédure

Les courbes de niveau, qui forment un ensemble de lignes fermées s'échelonnant de la base au sommet de l'édifice, sont extraites une à une du modèle numérique de terrain (figure 2) de 600 × 600 pixels. La taille de l'arête du pixel est de 30 m. Les surfaces et leurs périmètres sont codés avec la valeur 1, le fond étant fixé à 0. L'ensemble des sections binaires est replacé dans une seule image soumise au traitement de calcul des différents paramètres (figure 3). L'algorithme affecte une étiquette à chacune de ces formes et fournit, pour chacune d'entre elles, les valeurs paramétriques obtenues (tableau).

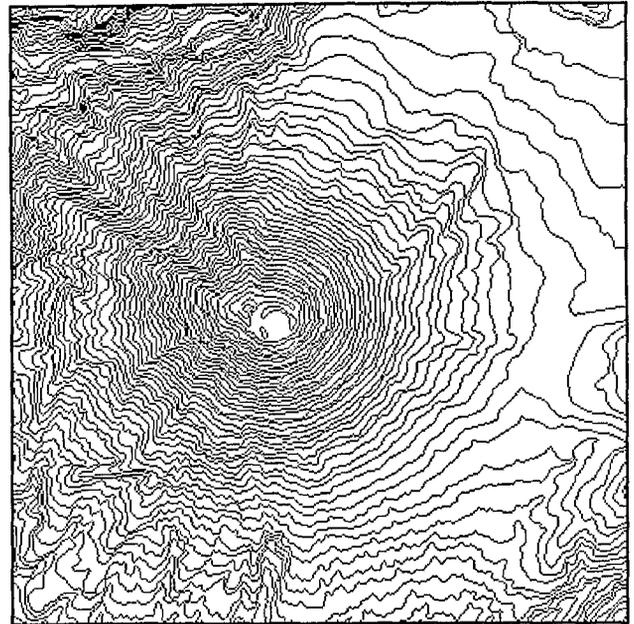


Figure 2. Courbes de niveau (équidistance 50 m).

Contour levels, 50 m interval.

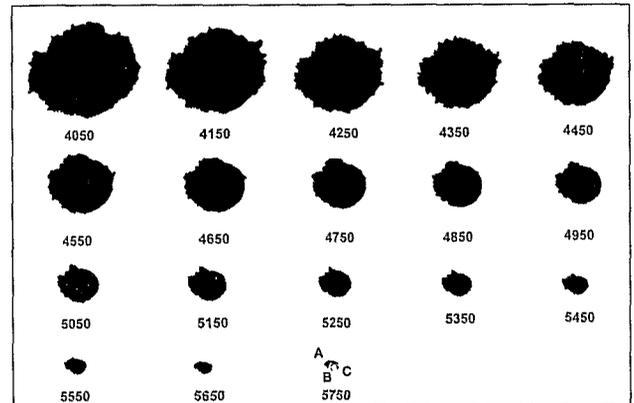


Figure 3. Sections du cône volcanique (altitude en mètres).

Horizontal cross-sections of the volcanic cone (altitude in metres).

4. Interprétation des résultats

Les tranches d'altitude successives d'un cône volcanique régulier doivent en théorie décrire des cercles concentriques superposés dont les paramètres, indépendamment de la taille, restent constants. Toute variation dans la valeur des paramètres traduira donc la présence d'irrégularités morphologiques.

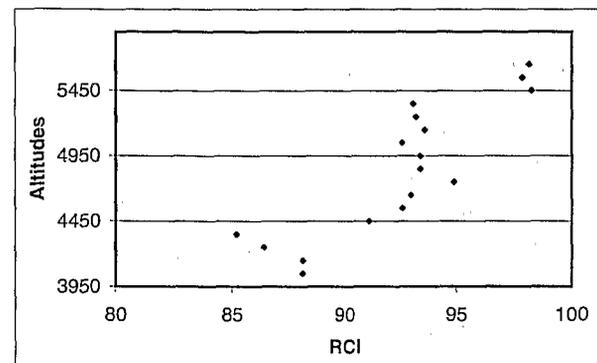
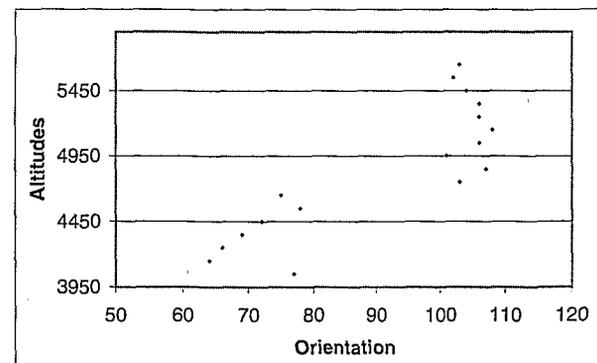
L'évolution des paramètres enregistrée dans le cas du Misti indique que l'on n'a pas affaire à un cône parfaitement régulier. Si l'indice de convexité *RSC* montre que les sections sont presque toutes convexes, celles-ci deviennent toutefois de plus en plus circulaires vers le sommet. Les valeurs de *CI* et *RLL* confirment ce fait, mais les différences sont trop faibles pour être exploitées. En revanche, le paramètre *RCI* souligne non seulement ces différences, mais encore met en évidence le caractère compo-

Tableau. Résultats obtenus par tranche d'altitude. Les surfaces *S* sont données en mètres carré.Results of every horizontal cross section. Surfaces, *S*, are in square-metres.

| Altitude | <i>S</i> | <i>Nb_p</i> | <i>P</i> | <i>PCo</i> | <i>CI</i> | <i>RSC</i> | <i>RLL</i> | <i>DIR</i> | <i>RCI</i> |
|----------|----------|-----------------------|----------|------------|-----------|------------|------------|------------|------------|
| 5 750 | 2 484 | 311 | 89 | | 25 | 58 | 53 | 93 | |
| 5 650 | 9 873 | 1 139 | 114 | 112 | 11 | 95 | 68 | 103 | 98,2 |
| 5 550 | 16 830 | 1 925 | 147 | 144 | 11 | 95 | 70 | 102 | 97,9 |
| 5 450 | 24 345 | 2 771 | 178 | 175 | 11 | 95 | 72 | 104 | 98,3 |
| 5 350 | 34 236 | 3 887 | 216 | 201 | 12 | 95 | 76 | 106 | 93,1 |
| 5 250 | 44 883 | 5 080 | 249 | 232 | 12 | 94 | 80 | 106 | 93,2 |
| 5 150 | 57 501 | 6 493 | 281 | 263 | 12 | 94 | 80 | 108 | 93,6 |
| 5 050 | 71 658 | 8 079 | 312 | 289 | 12 | 94 | 81 | 106 | 92,6 |
| 4 950 | 88 812 | 9 996 | 346 | 323 | 12 | 95 | 82 | 111 | 93,4 |
| 4 850 | 107 973 | 12 138 | 382 | 357 | 12 | 95 | 84 | 107 | 93,4 |
| 4 750 | 129 942 | 14 559 | 411 | 390 | 12 | 96 | 84 | 103 | 94,9 |
| 4 650 | 155 304 | 17 426 | 458 | 426 | 12 | 96 | 89 | 75 | 93 |
| 4 550 | 187 236 | 20 995 | 512 | 474 | 12 | 95 | 88 | 78 | 92,6 |
| 4 450 | 224 946 | 25 211 | 573 | 522 | 13 | 94 | 84 | 72 | 91,1 |
| 4 350 | 273 654 | 30 654 | 682 | 581 | 15 | 93 | 84 | 69 | 85,2 |
| 4 250 | 327 996 | 36 716 | 737 | 637 | 15 | 93 | 85 | 66 | 86,4 |
| 4 150 | 398 646 | 44 592 | 808 | 712 | 15 | 93 | 83 | 64 | 88,1 |
| 4 050 | 489 402 | 54 704 | 885 | 780 | 14 | 94 | 83 | 77 | 88,1 |

site de l'édifice étudié. L'évolution de ce paramètre en fonction de l'altitude (figure 4) répartit les tranches d'altitude en trois groupes distincts. Les contours de la base du cône volcanique, de 4 050 à 4 350 m, sont plus irréguliers (de 85,2 à 88,1) que ceux de la partie sommitale située au dessus de 5 350 m (de 97,9 à 98,3). Les valeurs du groupe intermédiaire (de 4 450 à 5 350 m) sont comprises entre 91,1 et 94,9. Cette observation semble indiquer à elle seule que le Misti correspond à un édifice volcanique comprenant au moins deux entités. Quoique de manière plus discrète, le paramètre *CI* confirme cette répartition. La première entité, située à la base de l'édifice, est plus fortement érodée que celle qui coiffe l'ensemble. En première approximation, les valeurs rencontrées pour *RCI* et *CI* dans le groupe intermédiaire pourraient traduire le passage d'une entité bien individualisée à l'autre. Cette interprétation semble confirmée par l'évolution du paramètre *DIR* en fonction de l'altitude (figure 5), qui permet de séparer l'édifice en deux ensembles. Entre 4 050 et 4 650 m, l'orientation est comprise entre 64 et 78 ; entre 4 750 et 5 650 m, elle est comprise entre 102 et 111°. Le regroupement, dans un éventail de direction étroit, de chacun des deux ensembles et le hiatus existant entre ces deux groupes de valeurs soulignent bien le caractère composite du cône volcanique et valident l'interprétation d'une zone de transition entre les deux entités décrites précédemment. En fonction des résultats obtenus par l'analyse tomomorphométrique, l'observation des tranches d'altitude reportées dans la figure 3 permet de suivre l'évolution morphologique du volcan Misti.

L'étude des coupes successives montre qu'à partir de 4 550 m une forme circulaire se superpose aux formes

**Figure 4. Évolution du paramètre *RCI* en fonction de l'altitude.**Relationship between *RCI* and altitude.**Figure 5. Évolution de l'orientation en fonction de l'altitude.**

Relationship between the orientation of the principal axis and the altitude.

irrégulières qui caractérisent la base de l'édifice. Le centre de gravité de cette forme circulaire ne coïncide pas avec celui de la base et entraîne, par voie de conséquence, le changement d'orientation révélé par le paramètre *DIR*. La forme circulaire ne recouvrant jamais totalement les formes irrégulières héritées de la base, cette orientation se maintient jusqu'au sommet de l'édifice. Cette analyse nous permet donc de mettre en évidence et de souligner le caractère composite, jusqu'à présent non signalé, du Misti et de proposer un schéma volcano-génétique qui s'intègre dans le cadre tectonique de la région et prend en compte l'ensemble des données qui la concernent.

Des failles et des effondrements ont provoqué la déstabilisation de l'ancien appareil et un fort développement du réseau de drainage (figure 1, B). Cet ensemble, étalé vers l'ouest et le sud-ouest du volcan, se compose de coulées pyroclastiques datées $33\,870 \pm 1\,800/1\,460$ années BP et $1\,920 \pm 200$ années BP (Thouret et al. 1995, 1996) et par des coulées de laves datées $78\,000 \pm 3\,500$ années BP (Kaneoka et Guevara 1984). La mise en place d'un nouveau cône, dans la zone effondrée au sud-est de l'ancien édifice, correspond à une réactivation des structures et à une reprise du volcanisme, caractérisée par une activité volcanique centrale du cône moderne (Hantke et Parodi, 1966).

6. Références

- Akl S.G. 1979. Two remarks on a convex hull algorithm, *Info. Proc. Lett.*, 8, 108-110
- Freeman H. et Shapiro R. 1961. On the encoding of arbitrary geometric configuration, *IEEE Trans. Electronic Computers*, EC-10, 260-268
- Garcia F., Baudemont F., Chorowicz J., Huaman D. et Parrot J.-F. 1997a. Morfologia cuantitativa y Morfoestructural del Volcan Misti. Una aplicación de la topografía digital a los riesgos de inestabilidad volcanica (Sur del Peru), *Bol. Soc. Geol. Perú*, 1, 443-448
- Garcia F., Chorowicz J. et Legros F. 1997b. La Caldera Chachani, gran centroexplosivo Plioceno-holoceno del sur del Perú ? Identificación y evolución en imágenes de satélite LANDSAT y radar ERS, *Bol. Soc. Geol. Perú*, 1, 449-454
- Hantke J.N. et Parodi A. 1966. *Catalogue of the active volcanoes of the world. Part XIX: Colombia, Ecuador and Peru*, IA VCEI, Naples, 73 p.
- Jarvis RA. 1973. On the identification of convex hull of a finite set of points in a plane, *Info. Proc. Lett.*, 2, 18-21
- Kaneoka I. et Guevara C. 1984. K-Ar age determination of late Tertiary and Quaternary andean volcanic rocks, Southern Peru, *Geochem. J.*, 18, 233-239
- McLelland L., Simkim T., Summers M., Nielsen E. et Stein T.C. 1989. *Global Volcanism 1975-1985*, Natural Museum of Natural History, Prentice Hall, New Jersey, 655 p.
- Parker J.R. 1993. *Practical computer vision using C*, John Wiley & Sons, New York, 476 p.
- Preparata F.P. et Shamos M.I. 1985. *Computational Geometry: an introduction*, Springer Verlag Ed., 398 p.
- Thouret J.-C., Legros F., Gourgaud A., Salas G., Juvigné E., Gilot E., Uribe M. et Rodriguez A. 1995. Un exemple de prévision des risques volcaniques au Pérou méridional (région d'Arequipa), fondé sur l'étude de l'activité éruptive récente du strato-volcan El Misti, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 320, série IIa, 923-929
- Thouret J.-C., Legros F., Gourgaud A. et Macedo M.-L. 1996. El Misti stratovolcano, south Peru: Eruptive history and implications for hazard assesment, in : *3rd ISAG*, St Malo, France, p. 251-254
- Wechsler H. 1981. A new and fast algorithm for estimating the perimeter of objects for industrial vision tasks, *Computer Graphics and Image Processing*, 17, 375-385

5. Conclusion

Le suivi de l'évolution géomorphologique d'un appareil volcanique récent peut être fait à l'aide d'une analyse tomomorphologique, décrivant de manière objective l'ensemble des paramètres qui caractérisent les différentes tranches d'altitude du volcan étudié. Dans le cas du Misti, les paramètres de reconnaissance de forme utilisés permettent, pour la première fois et à partir de critères objectifs, de mettre en évidence le caractère composite de cet édifice volcanique, formé par deux ensembles. Le premier correspond à un ancien appareil localisé à la base et sur la partie nord-ouest du volcan. Le second appartient à un nouveau cône, formé à l'occasion d'un effondrement, qui affecte la partie sud-est de l'ancien édifice. La superposition de ces deux cônes est notamment mise en évidence par le regroupement de la direction des axes principaux des tranches d'altitude en deux ensembles, l'un situé à la base de l'édifice, l'autre au sommet. Par ailleurs, ces deux ensembles présentent un changement de direction d'environ 35° . Chacune des directions de ces deux ensembles correspond à celles des principales structures géologiques et géomorphologiques de cette région andine.