

Comptes rendus de
l'Académie des sciences.
Série 2, Mécanique,
physique, chimie, sciences de
l'univers, sciences de la [...]

Académie des sciences (France). Auteur du texte. Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série 2, Mécanique, physique, chimie, sciences de l'univers, sciences de la terre. 1993.

1/ Les contenus accessibles sur le site Gallica sont pour la plupart des reproductions numériques d'oeuvres tombées dans le domaine public provenant des collections de la BnF. Leur réutilisation s'inscrit dans le cadre de la loi n°78-753 du 17 juillet 1978 :

- La réutilisation non commerciale de ces contenus est libre et gratuite dans le respect de la législation en vigueur et notamment du maintien de la mention de source.

- La réutilisation commerciale de ces contenus est payante et fait l'objet d'une licence. Est entendue par réutilisation commerciale la revente de contenus sous forme de produits élaborés ou de fourniture de service.

[CLIQUER ICI POUR ACCÉDER AUX TARIFS ET À LA LICENCE](#)

2/ Les contenus de Gallica sont la propriété de la BnF au sens de l'article L.2112-1 du code général de la propriété des personnes publiques.

3/ Quelques contenus sont soumis à un régime de réutilisation particulier. Il s'agit :

- des reproductions de documents protégés par un droit d'auteur appartenant à un tiers. Ces documents ne peuvent être réutilisés, sauf dans le cadre de la copie privée, sans l'autorisation préalable du titulaire des droits.

- des reproductions de documents conservés dans les bibliothèques ou autres institutions partenaires. Ceux-ci sont signalés par la mention Source gallica.BnF.fr / Bibliothèque municipale de ... (ou autre partenaire). L'utilisateur est invité à s'informer auprès de ces bibliothèques de leurs conditions de réutilisation.

4/ Gallica constitue une base de données, dont la BnF est le producteur, protégée au sens des articles L341-1 et suivants du code de la propriété intellectuelle.

5/ Les présentes conditions d'utilisation des contenus de Gallica sont régies par la loi française. En cas de réutilisation prévue dans un autre pays, il appartient à chaque utilisateur de vérifier la conformité de son projet avec le droit de ce pays.

6/ L'utilisateur s'engage à respecter les présentes conditions d'utilisation ainsi que la législation en vigueur, notamment en matière de propriété intellectuelle. En cas de non respect de ces dispositions, il est notamment passible d'une amende prévue par la loi du 17 juillet 1978.

7/ Pour obtenir un document de Gallica en haute définition, contacter utilisationcommerciale@bnf.fr.

Croissance des volcans : l'effet de la mise en place des systèmes intrusifs

Caroline MARTEL, Jean-François LÉNAT et Ariel PROVOST

Résumé — La contribution des systèmes intrusifs à la croissance et à la forme des édifices volcaniques n'a jamais été abordée de façon quantitative. Il est cependant reconnu, dans les volcans érodés, que les intrusions peuvent constituer l'essentiel du matériel de l'édifice en profondeur et, sur les volcans actifs, des déformations permanentes sont enregistrées lors des épisodes intrusifs. Nous décrivons une approche préliminaire, applicable au cas des boucliers basaltiques, qui montre que la mise en place des systèmes intrusifs a un effet significatif sur la forme et la hauteur des édifices.

Growth of volcanoes: the effect of dike complex injection

Abstract — The contribution of intrusive systems to the growth and shape of volcanoes has never been studied in a quantitative way. However, it is recognized, from eroded edifices, that intrusions contribute significantly to their volumes at depth. Moreover, permanent deformations are recorded on active volcanoes, during intrusive events. Here, we describe a preliminary approach, applicable to basaltic shield volcanoes, to evaluate the significance of intrusions on edifice shape and height.

Abridged English Version — INTRODUCTION. — Magmas reach the surface through intrusive systems, which are dike swarms in the case of shield volcanoes. Each dike may represent the feeder of an eruptive event, or the product of an intrusive event without eruption. Active volcanoes show that dike injections are common and regular phenomena (Decker, 1987; Lénat, 1989). Eroded shield volcanoes confirm that intrusive systems constitute a large part of volcano substructures (Walker, 1987).

This study presents a simplified model of the effect of dike injections on the shape of shield volcanoes. Data and constraints on dike features come from studies of ancient and active volcanoes; the central cone of Piton de la Fournaise volcano (Réunion Is.) is used as a reference for modelling.

INTRUSIVE SYSTEM FEATURES. — Koolau volcano (Hawaii) is one of the best exposed sites for dike-complex study because of marked erosion and flank landslides (Moore, 1964; Moore *et al.*, 1989). Outcrops allow study of the central zone (caldera) and one of the rift zones. For our modelling, we apply Walker's observations (Walker, 1987) that intrusive complexes represent a large part (up to 85%) of shield-volcano substructure, that dikes are about 50 cm thick on average and that they can be considered as subvertical.

Dike injections and associated surface displacements can be recorded by active-volcano monitoring: a dike-forming injection in a Kilauea volcano (Hawaii) rift zone induces permanent deformations, corresponding to its accommodation inside the edifice, and earthquake swarms, propagating from central zone upwards and laterally (Yang *et al.*, 1992; Klein *et al.*, 1987). These data give complementary information on dike-complex features: dikes start from the magma chamber and their calculated thicknesses are comparable to the observed ones.

THE CENTRAL CONE OF PITON DE LA FOURNAISE VOLCANO (RÉUNION). — The recent activity of Piton de la Fournaise volcano is concentrated on the central cone and along the NE and

Note présentée par Jean-Louis LE MOUËL.

SE rift zones. Seismological and deformation data indicate that intrusions emanate from a shallow magma reservoir at 1-3 km depth (Lénat and Bachèlery, 1990). Eruptions along the rift zones suggest that magma is injected from the central reservoir in the manner of hawaiian or icelandic fissure eruptions.

The central cone (400 m high on a basal diameter of less than 4 km) is characterized by a network of radial and concentric cracks around the two summit craters (concentric fissures are generally not eruptive) (*fig. 1*) (Bachèlery *et al.*, 1983). Radial fissures are particularly concentrated in the North and South directions, which characterize the first portions of the NE and SE rift zones. If building of the central cone were only the result of effusive activity, it should be oriented along the same N-S direction. Intriguingly, however, its elongation is perpendicular (*fig. 1*). The following is an attempt to explain this feature by the oriented addition of deformation by dike injections.

MODELLING. — Considering that the central cone is about 3,000 years old (Bachèlery, 1981) and magma injection frequency is 1 per year for the recent period, we simulate the injection of 3,000 dikes. Deformations are calculated using Okada's model (Okada, 1985); designed for faults, it applies to dikes by assimilation to tensile faults. Analytical expressions are presented for surface displacements due to tensile faults in an isotropic and elastic half-space. The magma chamber is represented by a point at a certain depth, from where the intrusions develop upwards and laterally. Deformation calculations are made at every node of a planar grid for each intrusion (*fig. 2*). The displacement vectors are then summed for the successive intrusions.

Several tests of 3,000 dikes each are realized as follows: geometric parameters (length, height and thickness) are chosen at random, following a gaussian distribution with variable mean and standard deviation. Dips are vertical and strikes are taken from a flat or a gaussian distribution.

RESULTS AND DISCUSSION. — The study of a sample case serves to illustrate the order of magnitude and geometry of effects due to the development of an intrusive system. Poisson's coefficient is taken as 0.25. The source of intrusions is fixed at 3 km depth. Dikes average 3,000 m long, 2,500 m high and 75 cm thick; their dips are subvertical and their strikes are completely random. Deformation defines a regularly sloping dome of 142 m height and more than 10 km radius. Maximum horizontal displacements are 144 m. The dome extension can be reduced, by decreasing the source depth or the mean dike length.

In order to obtain a deformation dome with an extension that compares with that of Piton de la Fournaise central cone, a set of parameters has been defined as indicated on figure 3. The induced deformation dome is 72 m high, with 4 km radius. Horizontal displacements are asymmetrical: equal to zero at the centre, they reach 130 m along E-W axes, 1 km away from the centre, and 29 m in the opposite direction. We can note a constriction of some deformation-dome contours along the N-S direction, which compares with a similar characteristic of Piton de la Fournaise central cone.

This modelling shows that intrusions can contribute to about 20% of the central cone height. Its paradoxical E-W elongation can also be explained by the deformations.

CONCLUSIONS AND PROSPECTS. — These modellings show that the development of intrusive systems in basaltic shield volcanoes should not be disregarded in studies of edifice height and morphology. As a preliminary study, it needs sophistication and more realistic constraints, considering a dip for dikes, flank mobility or buttressing, magma-chamber deformation cycles,

lava-flow modelling, etc. Application of this modelling to other kinds of volcanism on the telluric planets could allow a better understanding of volcano erection and evolution.

INTRODUCTION. — Les magmas atteignent la surface à la faveur de systèmes intrusifs. Dans le cas des boucliers basaltiques, auxquels nous nous intéresserons principalement ici, ces systèmes sont, en subsurface, essentiellement constitués d'essaims de dykes, chaque dyke représentant l'alimentation d'une éruption ou d'un épisode intrusif non suivi d'éruption.

L'enregistrement de l'activité des volcans boucliers indique que la mise en place de dykes est un phénomène fréquent et régulier (Decker, 1987; Lénat, 1989). L'observation de boucliers basaltiques érodés confirme qu'avec le temps, les systèmes intrusifs constituent une fraction importante de l'infrastructure du volcan (Walker, 1987).

Le travail présenté ici constitue une étude préliminaire de l'effet de la mise en place de systèmes intrusifs sur la forme des volcans basaltiques. Les données et les contraintes sur les caractéristiques des intrusions sont déduites des études de systèmes anciens ou actifs. Le cône central du Piton de la Fournaise (Réunion) sert de référence à la modélisation. Le modèle développé par Okada (Okada, 1985) permet de simuler la mise en place de dykes parallélépipédiques et de calculer les déplacements engendrés en surface.

CARACTÉRISTIQUES DES SYSTÈMES INTRUSIFS. — Les dykes ne sont observables qu'à la faveur de l'érosion ou d'accidents tectoniques (murs de calderas ou de cratères). Un des sites où le système intrusif est parmi les mieux exposés est celui du Koolau (Hawaï), âgé de 2 Ma environ; l'érosion et des cicatrices de glissements de flanc (Moore, 1964; Moore *et al.*, 1989) permettent l'étude d'une partie de sa structure, jusqu'à environ 2 km de profondeur. Les affleurements donnent accès à la zone centrale (caldera) et à une « rift zone ». Dans l'optique de notre modélisation, nous ne retiendrons de l'étude de Walker (Walker, 1987) que 3 points principaux : les complexes intrusifs constituent une proportion importante, parfois dominante (jusqu'à 85 %), de l'infrastructure des volcans boucliers, ces dykes sont généralement subverticaux, et leur épaisseur moyenne est de 50 cm.

La surveillance des volcans actifs permet d'enregistrer la mise en place de dykes et les déplacements associés en surface : la mise en place d'une intrusion dans une « rift zone » du Kilauea (Hawaï) est caractérisée par un essaim de séismes migrant progressivement depuis la zone centrale vers le haut et latéralement (Yang *et al.*, 1992; Klein *et al.*, 1987). A l'aplomb de ces intrusions sont enregistrées des déformations permanentes, qui correspondent à leur accommodation dans l'édifice. La modélisation de ces déformations permet d'approcher les caractéristiques géométriques des dykes. Ces données apportent des informations complémentaires sur les caractéristiques des complexes de dykes : les intrusions partent du réservoir central et les épaisseurs calculées sont du même ordre de grandeur que celles observées en surface.

LE CAS DU CÔNE CENTRAL DU PITON DE LA FOURNAISE (RÉUNION). — L'activité récente du Piton de la Fournaise est surtout concentrée sur le cône central et le long des « rift zones » NE et SE. Les données sismologiques et de déformation confirment l'hypothèse d'un foyer magmatique à faible profondeur (1 à 3 km sous le sommet) (Lénat et Bachèlery, 1990). Des éruptions le long des « rift zones » suggèrent que le magma est drainé depuis le réservoir, suivant un processus similaire à celui des éruptions fissurales des volcans hawaïens ou islandais.

Le cône central, haut d'environ 400 m pour une base d'un diamètre moyen un peu inférieur à 4 km, est caractérisé par un réseau de fissures radiaires et concentriques (ces dernières étant généralement peu éruptives) autour des deux cratères sommitaux (Bachelery *et al.*, 1983). La distribution des fissures radiaires n'est pas isotrope : on remarque des concentrations au SW, à l'Est et surtout au Nord et au Sud. Ces derniers secteurs marquent le départ des « rift zones » NE et SE. Perpendiculairement à ces deux directions préférentielles, on note un allongement général E-W du cône central (*fig. 1*).

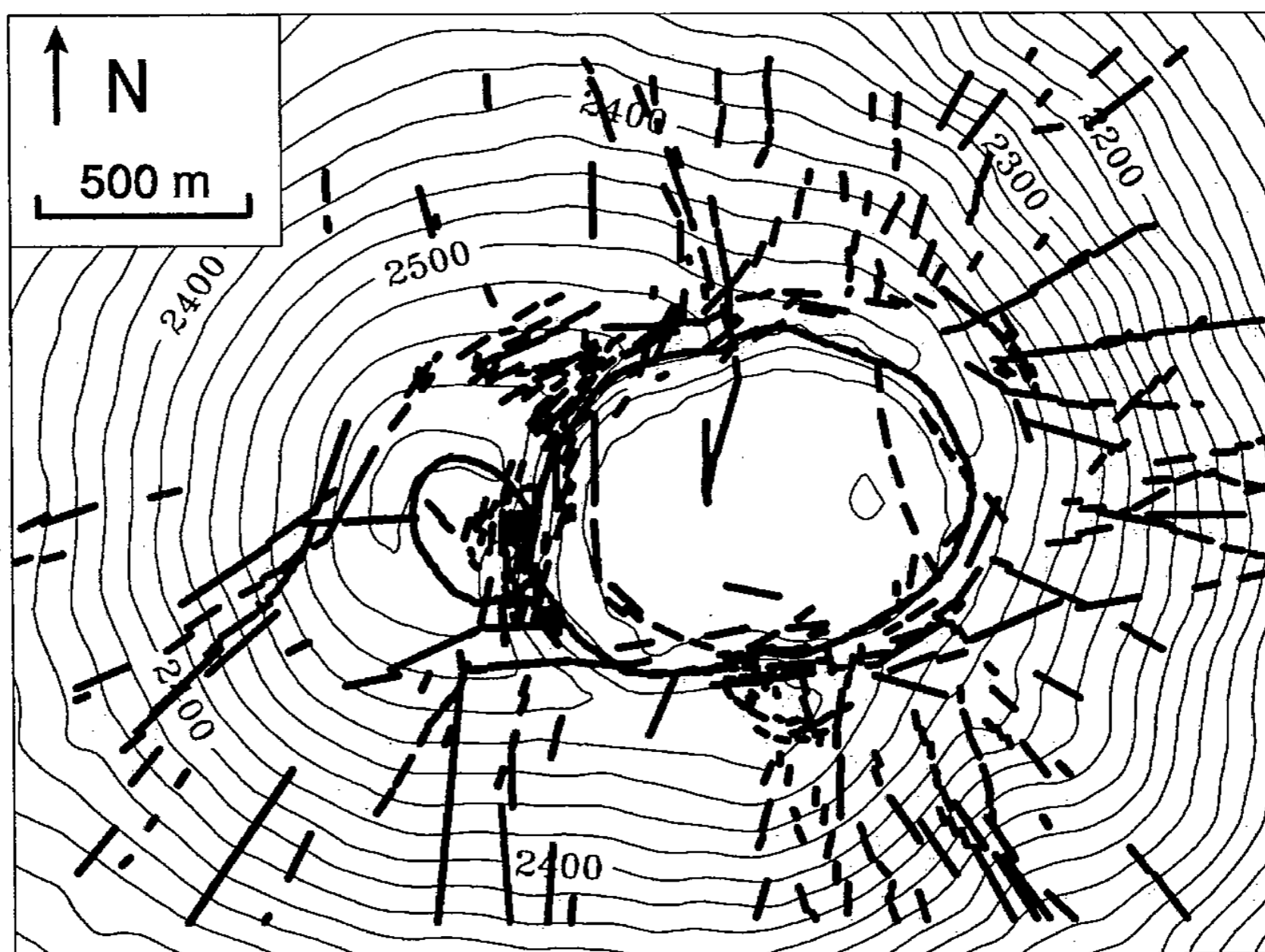


Fig. 1. — Topographie et réseau fissural du cône central du Piton de la Fournaise (d'après Lénat et Bachelery, 1990). Les courbes de niveau sont en mètres.

Fig. 1. — Topography and fissure network of Piton de la Fournaise central cone (after Lénat and Bachelery, 1990). Altitude contours in metres.

Cet allongement E-W est inattendu; en effet, si la construction du cône était uniquement due à l'activité effusive, il serait orienté suivant l'axe N-S, le long duquel les fissures éruptives sont les plus fréquentes. Ceci nous amène à considérer l'effet à long terme des déformations imposées par la mise en place de dykes dans le réseau fissural.

MODÉLISATION. — En estimant l'âge du cône central à environ 3 000 ans (Bachelery, 1981) et la fréquence des crises à 1 par an pour la période récente, nous simulerons la mise en place d'environ 3 000 dykes, à partir d'une zone réservoir centrée à 2 km de profondeur. Les caractéristiques géométriques des intrusions sont variables, mais doivent être de l'ordre de grandeur de celles observées sur le terrain ou déduites des modélisations. Le modèle devra tenir compte des concentrations préférentielles suivant la direction N-S. Les déformations sont calculées à partir du modèle d'Okada, (Okada, 1985). Établi à l'origine pour des failles, il est applicable aux dykes par assimilation à des failles en distension. Des expressions analytiques permettent de calculer les déplacements en surface dus à des failles en tension dans un demi-espace isotrope et élastique. Ces expressions ne sont valables que pour des dykes (ou failles) à plongement nul, ce qui constitue une des

limites des modèles présentés ici. Les caractéristiques générales de la modélisation sont les suivantes : le réservoir magmatique est assimilé à un point situé au centre de la zone et à une profondeur déterminée, d'où partent les intrusions, latéralement et vers le haut. Les calculs de déformation sont effectués aux nœuds d'une grille plane, pour chaque intrusion (*fig. 2*), et les déplacements élémentaires sont accumulés au fur et à mesure des intrusions successives.

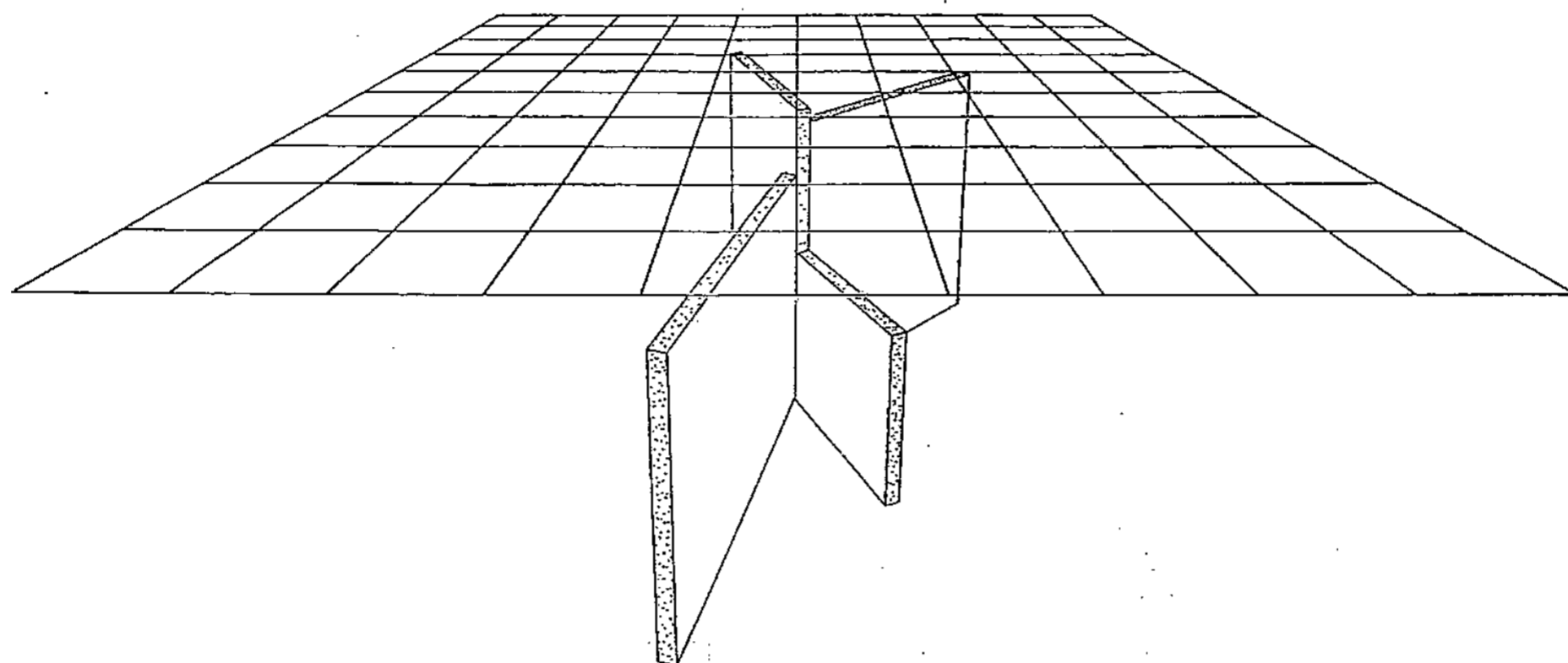


Fig. 2. — Schéma explicatif du modèle utilisé pour simuler le système intrusif. Les intrusions sont assimilées à des parallélépipèdes rectangles (4 sont représentées ici). Elles se développent à partir d'un point assimilé au réservoir magmatique. Les caractéristiques des parallélépipèdes sont tirées au sort suivant des critères définis *a priori* (*cf.* texte). Les déplacements sont calculés aux nœuds d'une grille plane.

Fig. 2. — Sketch showing the basic features of the models. Each intrusion is modelled as a rectangular parallelepiped (4 are shown here). All the intrusions start from the same point, which represents the magma reservoir. The characteristics are chosen at random, according to *a priori* criteria (*cf.* text). Displacements are calculated at nodes of a planar grid.

Plusieurs tests ont été réalisés à partir de ce modèle afin d'évaluer les effets de divers paramètres. Chaque test comporte 3 000 tirages de dykes, dont les paramètres géométriques sont aléatoires : la longueur, la hauteur et l'épaisseur des dykes sont tirées au sort suivant une loi gaussienne, avec une moyenne et un écart-type fixés. Les pendages sont verticaux et les azimuts peuvent avoir une loi de distribution plate ou gaussienne autour d'une valeur déterminée. Pour chaque essai, nous calculons les composantes verticale et horizontales des déplacements cumulés.

RÉSULTATS ET DISCUSSION. — L'étude d'un cas typique permet de cerner l'ordre de grandeur et la géométrie des effets liés au développement d'un système intrusif. Le coefficient de Poisson des matériaux de l'édifice est pris égal à 0,25. Une source de départ des intrusions est fixée à 3 km de profondeur. Les dykes ont une longueur, une hauteur et une épaisseur moyennes de respectivement 3 000 m, 2 500 m et 75 cm; leur pendage est subvertical et leur azimut totalement aléatoire. La déformation résultante crée un dôme de pente régulière, d'une hauteur de 142 m et d'un rayon supérieur à 10 km. Les déplacements horizontaux, essentiellement radiaux, atteignent 144 m. L'extension latérale du dôme peut être réduite en diminuant la profondeur de la source des intrusions ou en réduisant la longueur moyenne des dykes.

Pour obtenir un dôme de déformation d'extension comparable à celle du cône central du Piton de la Fournaise, un jeu de paramètres a été choisi comme indiqué sur la figure 3. Le dôme de déformation ainsi obtenu a une hauteur de 72 m et un rayon

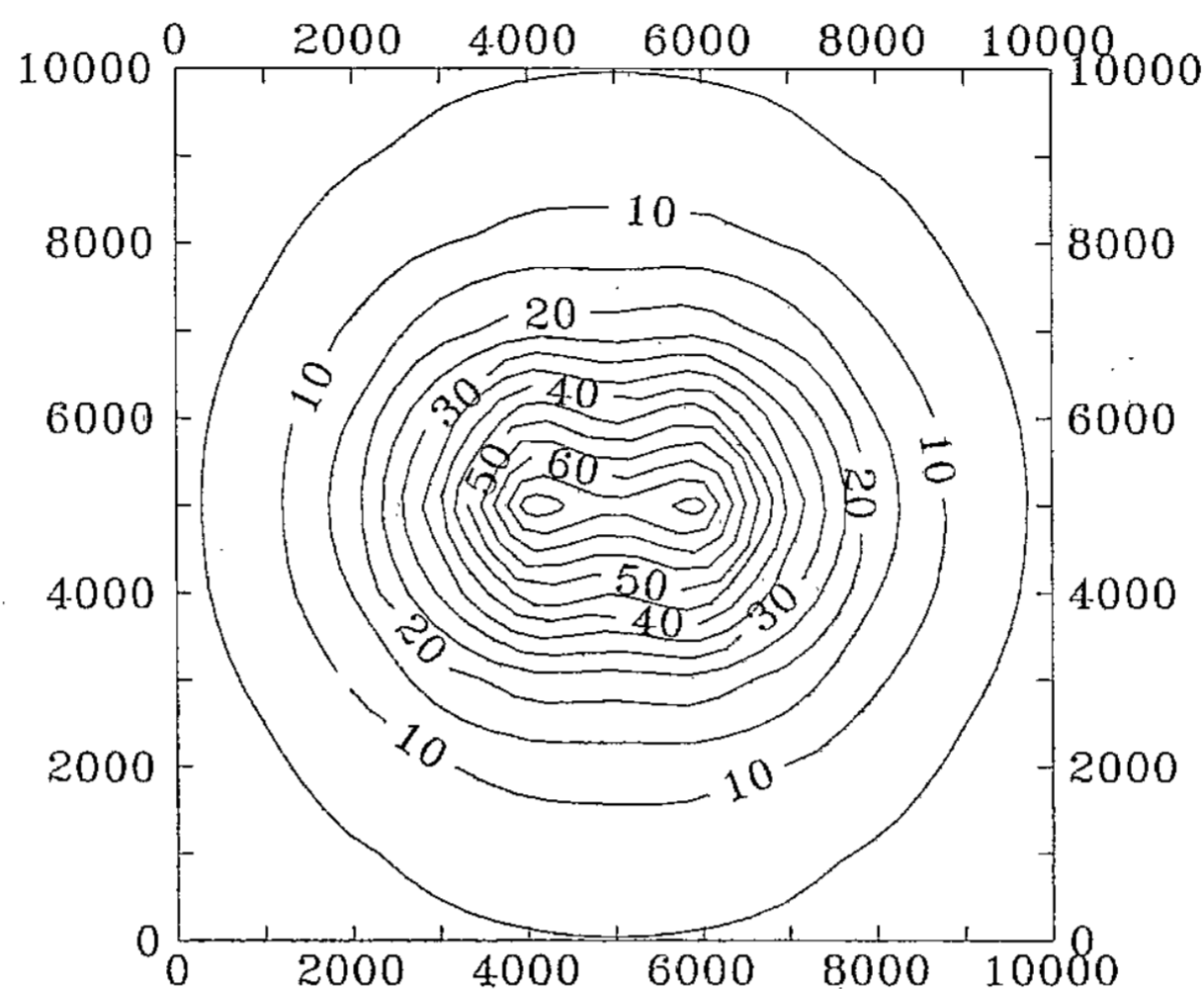


Fig. 3. — Carte des déplacements verticaux (en mètres) pour un modèle simulant le cône central du Piton de la Fournaise. La source magmatique est fixée à 2 km de profondeur, la longueur moyenne des dykes est de 750 m, leur épaisseur moyenne est de 75 cm et leur pendage est vertical. L'anisotropie de répartition des fissures est traduite par une distribution gaussienne des azimuts géographiques des dykes (écart-type de 25 degrés autour des azimuts 0 et 180).

Fig. 3. — Map of vertical displacements (in metres) for a model of the central cone of Piton de la Fournaise. The magma source is fixed at 2 km depth, the dikes are 750 m long, 75 cm thick and their tilts are vertical. The anisotropy of fissure distribution is represented by a gaussian distribution of the strikes (0 and 180 degrees, with a standard deviation of 25 degrees).

d'environ 4 km. Les déplacements horizontaux sont dissymétriques : nuls au centre, ils atteignent 130 m à 1 km du centre suivant l'axe E-W, et 29 m perpendiculairement. Du fait de l'anisotropie des intrusions, le dôme de déformation n'est plus régulier, mais présente un allongement E-W, perpendiculaire à la direction majeure des intrusions. On note une constriction du relief selon l'axe N-S du dôme de déformation, qui peut être rapprochée d'un trait similaire observable sur le cône central du Piton de la Fournaise, en particulier sur sa face nord.

Ce modèle indique donc que la mise en place des intrusions aurait une contribution de l'ordre de 20 % dans l'élévation du cône central. De plus, le paradoxe de l'allongement E-O de ce dernier serait expliqué par les déformations. S'agissant d'une première approche, seuls les principaux traits morphologiques du cône central ont été abordés. Il serait envisageable, pour une étude plus détaillée, de compléter le modèle en tenant compte du plongement des dykes et de la plus grande mobilité du flanc Est. Un modèle complet devrait aussi simuler la construction par écoulements laviques.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES. — Les modèles présentés démontrent que le développement des systèmes intrusifs, dans les boucliers basaltiques, a une influence significative sur la croissance et la morphologie des édifices.

L'approche utilisée peut être développée pour intégrer des contraintes plus réalistes : plongement des dykes, mobilité ou blocage d'un flanc, cycles de déformation du réservoir magmatique et simulation des coulées. On pourrait aussi l'étendre à d'autres types de volcanisme, en vue d'une meilleure compréhension de l'édification des volcans sur les planètes telluriques.

Note remise le 19 novembre 1992, acceptée le 12 janvier 1993.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- P. BACHÈLERY, J.-P. GRATIER et L. CHEVALLIER, Caractères structuraux des éruptions historiques du Piton de la Fournaise, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 296, série II, 1983, p. 1345-1350.
- P. BACHÈLERY, Le Piton de la Fournaise (Ile de la Réunion) : étude volcanologique, structurale et pétrologique, *Thèse*, Univ. Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, 1981, 273 p.;
- R. W. DECKER, *Dynamics of hawaiian volcanoes: an overview*, U.S. Geol. Surv. Prof. Pap., 42, 1987, p. 997-1018.
- F. W. KLEIN, R. Y. KOYANAGI, J. S. NAKATA et W. R. TANIGAWA, *The seismicity of Kilauea's magma system*, U.S. Geol. Surv. Prof. Pap., 1350, 1987, p. 1019-1185.
- J.-F. LÉNAT, Patterns of volcanic activity of Piton de la Fournaise (Réunion Island, Indian Ocean). A synthesis based on monitoring data between 1980 and July 1985, and on historic records since 1930, *Proceedings in Volcanology*, Springer-Verlag, 1, Contr. 19, 1988, p. 312-338.
- J.-F. LÉNAT et P. BACHÈLERY, Structure et fonctionnement de la zone centrale du Piton de la Fournaise, in *Le volcanisme de la Réunion-Monographie*, J.-F. LÉNAT éd., publié par le Centre de Recherches Volcanologiques, Clermont-Ferrand, 379 p., 1990, p. 257-296.
- J. G. MOORE, *Giant submarine landslides on the Hawaiian Ridge*, U.S. Geol. Surv. Prof. Pap., 501-D, 1964, p. 95-98.
- J. G. MOORE, D. A. CLAGUE, R. T. HOLCOMB, P. W. LIPMAN, W. R. NORMARK et M. E. TORRESAN, Prodigious submarine landslides on the Hawaiian Ridge, *J. Geophys. Res.*, 94, B12, 1989, p. 17465-17484.
- Y. OKADA, Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 75, 1985, p. 1135-1154.
- G. P. L. WALKER, *The dike complex of Koolau volcano, Oahu: internal structure of a hawaiian rift zone*, U.S. Geol. Surv. Prof. Pap., 41, 1987, p. 961-993.
- X. M. YANG, P. M. DAVIS, P. T. DELANEY et A. T. OKAMURA, Geodetic analysis of dike intrusion and motion of the magma reservoir beneath the summit of Kilauea volcano, Hawaii, *J. Geophys. Res.*, 97, B3, 1992, p. 3305-3324.

Centre de Recherches Volcanologiques, Université Blaise Pascal, OPGC
et CNRS-URA n° 10, 5, rue Kessler, 63038 Clermont-Ferrand Cedex, France.