



HAL
open science

Une phase éruptive exceptionnelle dans l'histoire récente du Piton des Neiges (île de la Réunion) : l'éruption de "la dalle soudée"

Guy Kieffer, Pierre-Yves Gillot, Yves Cornette, Christian Germanaz, Pierre
Nativel

► To cite this version:

Guy Kieffer, Pierre-Yves Gillot, Yves Cornette, Christian Germanaz, Pierre Nativel. Une phase éruptive exceptionnelle dans l'histoire récente du Piton des Neiges (île de la Réunion) : l'éruption de "la dalle soudée". Comptes Rendus de l'Académie des Sciences Serie II, 1993, 317, pp.835-842. hal-02079327

HAL Id: hal-02079327

<https://hal.univ-reunion.fr/hal-02079327v1>

Submitted on 26 Mar 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Une phase éruptive exceptionnelle dans l'histoire récente du Piton des Neiges (île de la Réunion) : l'éruption de la « dalle soudée »

Guy KIEFFER, Pierre-Yves GILLOT, Yves CORNETTE,
Christian GERMANAZ et Pierre NATIVEL

Résumé – Une séquence de produits, superposant coulées pyroclastiques, coulées de lave et projections soudées (« dalle soudée »), affleure sur les versants nord, ouest et sud du Piton des Neiges, où leur volume est estimé à 20 km³. De nature mugéaritique, ils ont été émis lors d'une phase éruptive majeure, terminée par la formation de la caldeira II. Datés à 223 000 ans (K/Ar) et grâce à leurs relations chronostratigraphiques, ils permettent de préciser le schéma d'évolution morphostructurale du massif lors de sa période à laves différenciées alcalines.

An exceptional eruptive phase in the recent history of the Piton des Neiges volcano (Réunion island): the eruption of the "dalle soudée" (welded slab)

Abstract – A sequence of products, superposing pyroclastic flows, lava flows and welded ejecta ("dalle soudée"), outcrops on the northern, western and southern flanks of the Piton des Neiges, where their volume is estimated at 20 km³. They have a mugearitic composition. They were emitted in the course of a major eruptive phase ended by the caldeira II formation. Dated back to 223,000 years (K/Ar) and along with their chronostratigraphical relationships, they allow construction of the schema of the morphostructural evolution of the volcano during its period with differentiated alkaline lavas.

Abridged English Version – INTRODUCTION. – The Piton des Neiges volcano is a strato-volcano characterized by a hawaiian type evolution. It has known two main phases (Upton and Wadsworth, 1972; Nativel, 1978): one more than 2.1 to 0.43 Ma old with tholeiitic and transitional basalts (McDougall, 1971) and another 0.35 Ma to less than 0.030 Ma old (Gillot and Nativel, 1982) with differentiated alkaline lavas.

The more differentiated products appeared (Nativel, 1978; Rocher, 1990) in the course of explosive eruptions, some of which resulted in one or several caldeiras (Chevalier and Vatin-Pérignon, 1982; Kieffer, 1990). These eruptions have emitted pyroclastites (Billard, 1974; Kieffer, 1990) among which the formations linked to the "dalle soudée" (welded slab) event.

I. "DALLE SOUDÉE" AND ASSOCIATED FORMATIONS. – Previously described as "breccoid lava" (Billard, 1974), the "dalle soudée" is known in the Maïdo and the Roche Ecrite areas (fig. 1). It is the upper level of a product sequence whose synthesis is demonstrated in a section in the edge of Grand Bénare planèze, with from the bottom to the top (fig. 2):

– Whitish levels with brown or black pumiceous blocks interpreted as pyroclastic flows (Kieffer, 1990). They are considered as homologous with benmoreitic or trachytic (Nativel, 1978) formations outcropping on the western flank of the volcano (figs. 1 et 3).

– A formation with quenched bombs of an aphyric lava, xenoclasts and granular inclusions. It has covered the western flank of the volcano and the Plaine des Fougères, N of the Salazie Cirque. Some bombs exhibit magma mixing figures. It was emitted with water involvement and a large proportion corresponds to pyroclastic flows.

– A thick (10 to 20 m) aphyric lava flow, with magma mixing and granular inclusions. On the Grand Benare Planeze, it seems to constitute a single unit of about 30 km². Its equivalent

Note présentée par Jean AUBOUIN.

exists at the Roche Ecrite and the Plaine des Fougères. It corresponds to a mugearite (sample 57 b, table I). It is 223,000 years old (table II).

– The “*dalle soudée*” extends over 7 to 8 km² at the Maïdo and 3 to 4 km² at the Roche Ecrite. There are other outcrops on the Grand Benare Planeze and the Plaine des Fougères. This level concerns an area of more than 100 km².

It is constituted by variously sized pieces (up to 0.50 m) of a mugearitic aphyric lava (sample Ma 7,300, table I), with some xenoclastes and granular inclusions. It is interpreted as the products of huge lava fountains which were able to flow and weld themselves after falling.

The “*dalle soudée*” is the ultimate main formation of the Grand Benare Planeze, Roche Ecrite and Plaine des Fougères.

2. GENETIC RELATIONSHIPS BETWEEN THE FORMATIONS STUDIED. – The pumiceous pyroclastic flows (whitish levels) of the studied section were emitted a long time before the formations linked to the “*dalle soudée*”.

These latter formations have shown interesting relationships. The blocky formation with quenched bombs outcrops only beyond the extension of the lava flow unit (*fig. 3*). Then, it appears locally topped by the “*dalle soudée*”. In this case, it is possible to observe the change, from bottom to top, from a coarse breccia to a less coarse deposit richer in juvenile fragments. When the material is almost totally made up of juvenile fragments, it becomes welded (*fig. 4*).

The “*dalle soudée*” exhibits close relationships with the lava flow which surmounts the formation with quenched bombs. Its characteristics imply that the “*dalle soudée*” ejecta fell on the surface of still-molten lavas.

These observations indicate that the settings of these three formations are closely linked. We point out that their young magma corresponds to the same aphyric lava with granular inclusions and magma mixing.

3. THE “DALLE SOUDÉE” ERUPTION. – The eruption began with a large available volume of superficial water. The first period produced several cubics kilometres of the formation with quenched bombs. The progressive exhaustion of the water changed the eruption style. There occurred a large lava flood, which produced the wide lava flow level. At the same time, huge lava fountains covered an area of more than 10 km radius with fluid ejecta which fell on lava flows that were still in motion.

The total emitted volume can be estimated at about 20 km³. Its emission ended in a collapse that resulted in a 8 to 10 km wide caldeira.

4. VOLCANO-STRUCTURAL IMPLICATIONS. – The “*dalle soudée*” eruption was a major eruptive event. The caldeira so produced can be compared to the previously recognized *caldeira II* (Chevalier and Vatin-Pérignon, 1982).

Caldeira II is probably a polyphase depression. There were at least three important phases of explosive eruptions, each of them ended by calderic collapse. The first, more than 223,000 years old, is responsible for pyroclastic flows of the volcanos western flank. The second corresponds to the “*dalle soudée*” event. The third, dated at 188,000 years, has emitted ignimbritic flows on the eastern flank of the volcano (Gillot and Nativel, 1982; Kieffer, 1990).

CONCLUSION. – The 223,000-years-old “*dalle soudée*” event corresponds to a *turning point event* in the morphostructural evolution of the volcano. The large caldeira that is has formed became the catchment basin of further eruption products, except on the eastern side where erosion has opened up the palaeo-cirques of Béboung and Béhouve.

INTRODUCTION. – Strato-volcan polygénique à évolution de type hawaïen, le Piton des Neiges (île de la Réunion) a connu deux grands stades (Upton et Wadsworth, 1972; Nativel, 1978) : une phase à basaltes à affinités tholéïtiques ou transitionnels, vieille de plus de 2,1 à 0,43 Ma, et une phase à laves différenciées alcalines, datant de 0,35 Ma (McDougall, 1971) à moins de 0,030 Ma (Gillot et Nativel, 1982). La première a édifié un volcan-bouclier complexe, qui fut ensuite partiellement coiffé par les produits de la seconde. On peut estimer à moins de 10 % la part des matériaux différenciés dans le volume total (émergé) du massif. Ces derniers forment une série, au caractère sodique bien exprimé, allant des basaltes aux trachytes.

Les produits alcalins les plus différenciés sont apparus à plusieurs reprises (Nativel, 1978; Rocher, 1990) lors d'éruptions très explosives dont certaines furent à l'origine d'une ou plusieurs caldeiras (Chevalier et Vatin-Pérignon, 1982; Kieffer, 1990). Leur élaboration et les conséquences morphostructurales de leur émission impliquent l'existence d'une chambre magmatique subsuperficielle. Ces caractères constituent une originalité par rapport aux volcans des îles Hawaii dont l'évolution, au stade différencié, n'a jamais atteint celui de la caldeira. Ces éruptions ont mis en place des quantités de pyroclastites (Billard, 1974; Kieffer, 1990), parmi lesquelles les formations liées à l'épisode de la “*dalle soudée*”.

1. « DALLE SOUDÉE » ET FORMATIONS ASSOCIÉES. – La « *dalle soudée* », décrite comme « *lave bréchoïde* » (Billard, 1974) dans la zone du Maïdo et à la Roche Ecrite (*fig. 1*), termine une séquence de produits dont la synthèse semble réalisée dans une coupe située vers 2600 m d'altitude, au bord de la planèze du Grand Bénare. Cette coupe montre de bas en haut (*fig. 2*), au-dessus des empilements de coulées du rempart de Mafate :

– Des *niveaux blanchâtres à blocs ponceux* bruns ou noirs, interprétés comme des coulées pyroclastiques (Kieffer, 1990). Épais d'une dizaine de mètres, ces niveaux sont considérés comme les homologues de formations benmoréitiques ou trachytiques (Nativel, 1978), affleurant en divers points du versant occidental du Piton des Neiges (*fig. 1 et 3*).

– Une *formation à bombes trempées* d'une lave aphyrique, avec des xénoclastes, des enclaves grenues, etc., dans une matrice cendro-graveleuse ocre et altérée. Elle s'est déversée sur tout le versant occidental du massif où son épaisseur peut dépasser la dizaine de mètres, soit sur près de 40 km du N au S, entre le Dos d'Ane et Saint-Pierre. Nous l'avons retrouvée en abondance sur la Plaine des Fougères, au N du cirque de Salazie. Certaines bombes présentent des figures de mélange. Elle montre des dispositions supposant la mise en place de nappes successives qui se sont ravinées. Ses caractères permettent de l'interpréter comme des matériaux émis avec la participation d'eau (phréatomagmatisme), et dont une bonne proportion correspond à des coulées pyroclastiques (nuées retombantes).

– Une *coulée de lave* aphyrique, comportant également figures de mélange et enclaves grenues. Son épaisseur (10 à 20 m) la distingue des nappes de lave sous-jacentes à l'allure de « *millefeuille* ». Elle constitue un niveau sommital unique, entre le N du Maïdo et le Petit Bénare, soit sur près de 30 km². Son équivalent existe sur plusieurs kilomètres carrés autour de la Roche Ecrite. On retrouve une lave comparable dans la Plaine des Fougères.

Cette coulée (éch. 57 b, tableau I) correspond à une mugearite (DI=56,37) pauvre en phénocristaux de première génération. Les feldspaths sont surtout des labradors (An₆₅₋₅₅ ou des andésines An₄₅₋₄₀). On y note quelques anorthoses. La composition des olivines avoisine Fo58. Les clinopyroxènes sont des augites (Ca44–Mg42–Fe+Mn14) ou des salites (Ca45–Mg38–Fe+Mn17). Les minéraux opaques sont des titano-magnétites.

Une datation K/Ar lui attribue l'âge de 223 000 ans (éch. 57 b, tableau II).

– La « *dalle soudée* » repose sur ce niveau de coulées. Elle est absente dans la coupe étudiée, mais affleure à proximité. Elle recouvre 7 à 8 km² au Maïdo et 3 à 4 km² à la

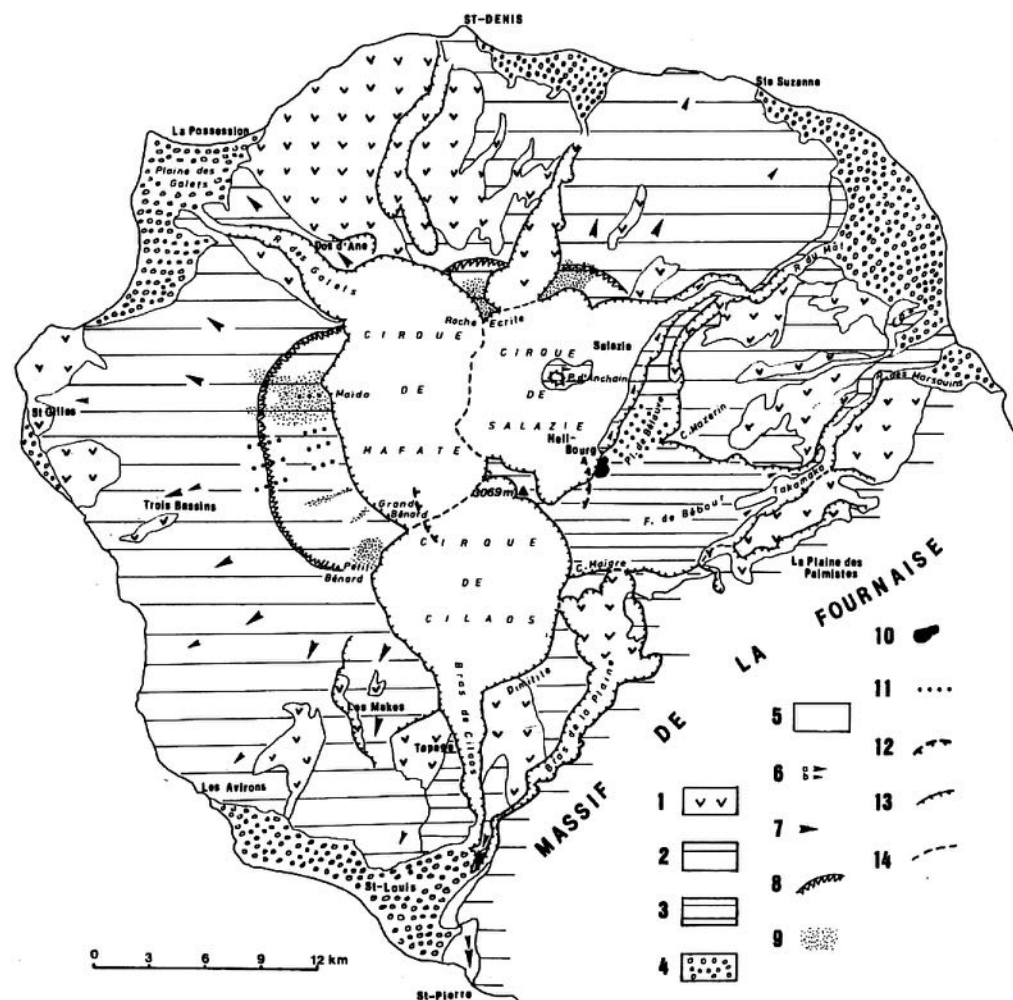


Fig. 1. - Carte du Piton des Neiges et formations étudiées (7, 8 et 9). 1 : Produits des phases basaltiques anciennes. 2 : Formations alcalines antérieures à l'éruption de la « dalle soudée ». 3 : Formations postérieures à l'éruption de la « dalle soudée ». 4 : Plaines littorales. 5 : Matériaux de fond de cirque. 6 : Coulées pyroclastiques ; a : de plus de 220 000 ans, b : de 188 000 ans. 7 : Formation à bombes trempées. 8 : Coulée de lave surmontant la formation à bombes trempées. 9 : « Dalle soudée ». 10 : Dôme-coulée. 11 : Nuée ardente trachytique. 12 : Limite de la caldeira II. 13 : Rempart. 14 : Ligne de crête.

Fig. 1. - Sketch of Piton des Neiges and studied formations (7, 8 and 9). 1: Old basaltic products. 2: Alkaline formations predating the "dalle soudée" eruption. 3: Formations postdating the "dalle soudée" eruption. 4: Littoral plains. 5: Material of cirque bottom. 6: Pyroclastic flows; a: more than 220.000 years old, b: 188.000 years old. 7: Formation with quenched bombs. 8: Lava flow surmounting the formation with quenched bombs. 9: "Dalle soudée" (Welded slab). 10: Dome flow. 11: Trachytic nuée ardente. 12: Caldeira II limit: 13: Rampart. 14: Topographic ridge.

Roche Ecrüe. Nous en avons retrouvé un large affleurement entre le Grand (2896 m) et le Petit (2600 m) Bénare. D'autres plaquages existent sur la planète du Grand Bénare, entre le rempart de Mafate (depuis 2600 m) et la RF9 (vers 1700 m). Des témoins en ont été identifiés dans la Plaine des Fougères. Au total, ce niveau s'étend sur plus de 20 km de distance et, par delà ses discontinuités, il concerne une surface supérieure à 100 km².

Absente ou mince de quelques centimètres au sommet de crêtes de progression de la coulée sous-jacente, elle s'épaissit dans les dépressions pour atteindre plusieurs mètres.

TABLEAU I
Analyses chimiques
Chemical analysis

Échantillon	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	H ₂ O ⁺	H ₂ O ⁻
57 b	52,46	15,54	1,84	1,50	12,33	0,28	1,69	5,37	4,86	2,58	0,60	0,22	-
Ma 7 300 . .	51,05	15,40	2,15	4,41	7,40	0,23	3,25	5,93	5,05	2,01	0,73	0,67	0,76

TABLEAU II
Analyses K/Ar
K/Ar analysis

Échantillon	K (%)	⁴⁰ Ar* (%)	⁴⁰ Ar* (10 ¹¹ at.g ⁻¹)	Age (ka)
57 b	2,261	19,6	5,27	223 ± 4
		16,0	5,18	219 ± 4

K% : valeur moyenne de trois mesures (erreur relative 1,0%). Les Constantes Conventionnelles Internationales ont été utilisées pour le calcul de l'âge.

K% : average of three measures (relative error 1.0%). International Conventional Constants have been used for the age calculation.

Dans la zone du Maïdo, elle surmonte la partie supérieure bréchique de cette coulée. A la Roche Ecrüe, comme entre le Grand et le Petit Bénare, elle constitue une couche décimétrique directement collée sur la lave massive.

Elle est constituée de fragments de lave de toutes tailles, jusqu'à 50 cm de diamètre, soudés dans une matrice plus ou moins compacte. A l'exception de quelques xénoclastes et enclaves grenues, ces fragments proviennent d'une même lave (éch. Ma 7 300 in Nativel, 1978 ; tableau I) mugéaritique (DI=55,93), à mélanges de magmas, semblable à celle des bombes trempées et de la coulée des niveaux précédents.

Son interprétation est permise par l'examen des fragments de lave : on rencontre une proportion appréciable d'éléments étirés ou torsadés qui correspondent à un matériel d'abord projeté, puis soudé. Elle paraît composée des produits de fontaines de lave retombés encore fluides pour donner des nappes qui ont pu fluer sur de courtes distances (jusqu'à quelques centaines de mètres?), soit sous le seul effet de la gravité, soit à la façon de coulées pyroclastiques, grâce à la participation de gaz. Beaucoup de fragments, arrondis sous l'effet du mouvement, offrent des aspects en boules. On observe aussi des fluidités traduisant l'écoulement.

La « dalle soudée » représente la dernière formation des planètes du Grand Bénare, de la Roche Ecrüe et de la Plaine des Fougères, malgré quelques coulées issues d'éruptions sporadiques postérieures.

2. LIENS GÉNÉTIQUES ENTRE LES FORMATIONS DÉCRITES. - Les coulées pyroclastiques à éléments ponçoux de la partie inférieure de la coupe ont leurs homologues sur le versant occidental, où ils sont recouverts par la formation à bombes trempées (zone de Saint-Pierre) (fig. 3). Parfois, comme au Grand Bénare ou à la Roche Ecrüe, ce sont des coulées mugéaritiques ou benmoréitiques qui supportent les produits postérieurs.

Les trois niveaux sommitaux ont révélé des liens génétiques. La formation à bombes trempées n'affleure qu'au-delà de l'extension du niveau de coulées qui la coiffe sous le rempart de Mafate (fig. 2). Elle supporte alors parfois la « dalle soudée » avec laquelle

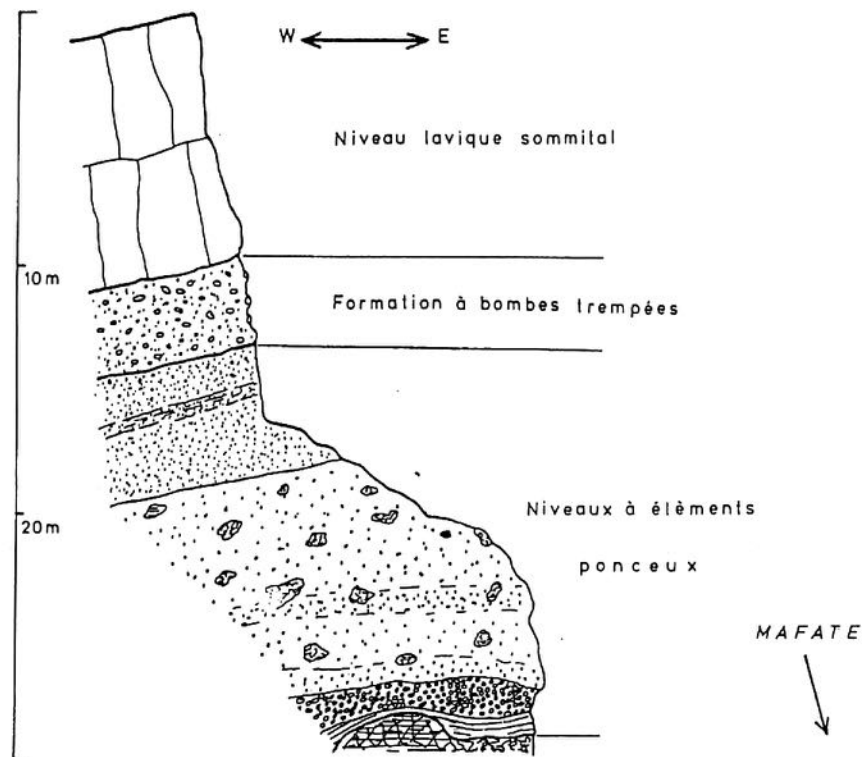


Fig. 2. - Coupe sommitale du rempart de Mafate, vers 2600 m d'altitude.
Fig. 2. - Summit section of the Mafate rampart, about 2,600 m a.s.l.

elle montre une relation directe. On remarque des variations verticales dans les coupes ou ces deux produits sont associés (fig. 4). De la base, en 1 ou 2 m, on passe en continu d'une brèche, à bombes trempées et xénoclastes, à un dépôt plus fin et riche en magma frais. On finit par avoir affaire à un matériau constitué d'éléments juvéniles. Dans ce cas, ceux-ci ne sont plus trempés et leur forme étirée devient celle de projections fluides. Cette partie passe à un niveau sommital de « dalle soudée », résultat de la soudure des éléments juvéniles (route du Maïdo, vers 1920 m, Ravines la Source et Bernica, vers 1750 m).

La « dalle soudée » montre aussi des liens étroits avec le niveau de coulées. Elle le recouvre souvent par l'intermédiaire d'une couche de fragments scoriacés (type «aa»). Mais, à la Roche Ecrite et près du Petit Bénare, ses éléments sont collés dans la partie superficielle continue (type « pahoehoe ») de la lave sous-jacente. Ce caractère suppose que les projections s'abattirent à la surface de laves encore en fusion.

Ces observations impliquent que la formation à bombes trempées, le niveau des coulées et la « dalle soudée » sont liés sur les plans chronologique et phénoménologique. Il faut ajouter que leur magma correspond à une même lave aphyrique à mélanges de magmas et enclaves grenues.

3. L'ÉRUPTION DE LA « DALLE SOUDEE ». - Ces trois formations ont été émises au cours d'une seule phase éruptive.

L'abondance des éléments trempés implique que l'éruption s'est déclenchée alors qu'il existait de l'eau superficielle disponible. Elle a débuté par l'émission de la formation à bombes trempées. L'épuisement de l'eau changea le style de l'éruption qui, de

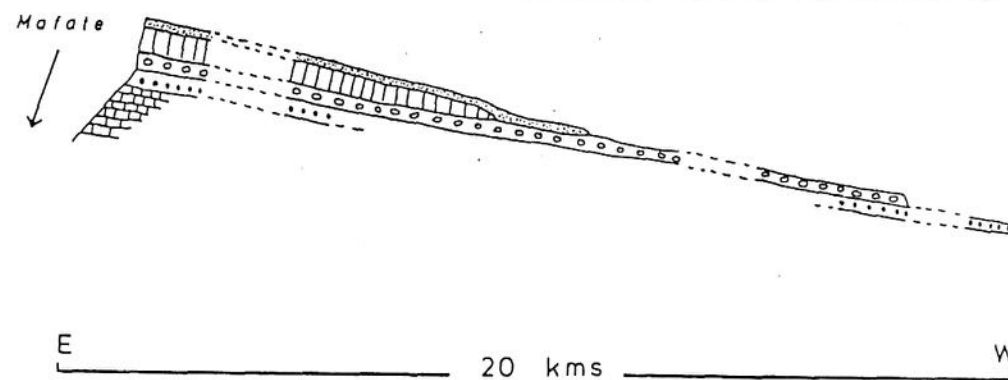


Fig. 3. - Rappports stratigraphiques entre les formations étudiées : coulées pyroclastiques anciennes (points), formation à bombes trempées (cercles), niveau lavique sommital (hachures larges) et « dalle soudée » (pointillé).

Fig. 3. - Stratigraphic relationship between formations studied: old pyroclastic flows (points), formation with quenched bombs (circles), summit lava level (large hachures) and "dalle soudée" (stipple).

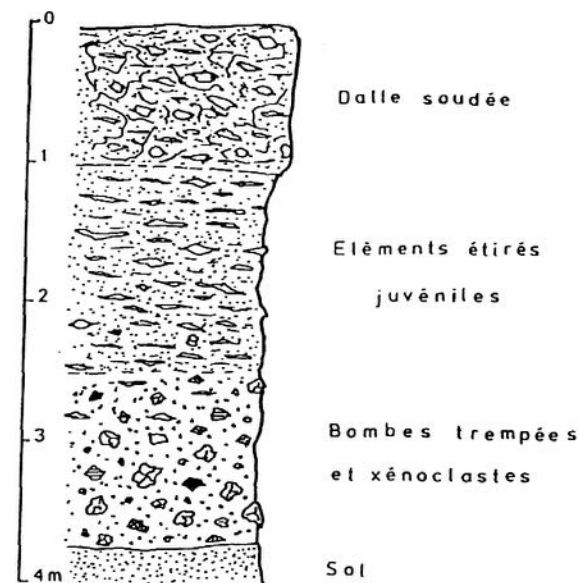


Fig. 4. - Passage de la formation à bombes trempées à la « dalle soudée ».
Fig. 4. - Change from the formation with quenched bombs to the "dalle soudée".

phréatomagmatique, devint magmatique. Il se produisit une inondation lavique, à l'origine du niveau de coulées de la Planèze du Grand Bénare, de la Roche Ecrite et sans doute de la Plaine des Fougères. En même temps, des fontaines de lave, sans doute hautes de plusieurs kilomètres, recouvrirent de projections une zone de plus de 10 km de rayon.

Ce déroulement explique que la formation à bombes trempées se trouve sous le niveau de coulées, alors que les projections entièrement juvéniles, avec la « dalle soudée », le surmontent (fig. 3).

Les caractères des témoins de ces événements permettent de penser qu'ils se sont déroulés sans arrêt notable (quelques jours à quelques mois?). Le volume de matériaux

libérés peut être estimé à une *vingtaine de kilomètres carrés*. Leur émission a été suivie par l'effondrement du centre du volcan pour former une caldeira de 8 à 10 km de diamètre.

On peut remarquer la présence de mélanges de magmas dans tous les produits de cet épisode, ce qui a permis de supposer que nous avons affaire à une phase éruptive commandée par des processus liés à de tels mélanges.

4. IMPLICATIONS VOLCANO-STRUCTURALES. – L'éruption de la « dalle soudée » a été un événement majeur de l'histoire récente du Piton des Neiges. La caldeira dont il est à l'origine peut être assimilée à la *caldeira II* (Chevalier et Vatin-Pérignon, 1982).

Nous pouvons préciser le schéma de l'évolution récente du Piton des Neiges. Nous nous trouvons en présence de trois stades d'éruptions explosives, qui ont chacun émis des pyroclastites et furent logiquement à l'origine d'effondrements caldeiriques, de sorte que la caldeira II devrait être une dépression *polyphasée*. Le premier, plus vieux que 223 000 ans, est responsable de coulées pyroclastiques du versant ouest, mais aussi peut-être du versant nord où un âge supérieur à 220 000 ans a été estimé à Sainte Suzanne (Deniel et al., 1992). Le second correspond à l'épisode de la « dalle soudée ». Le troisième, daté à 188 000 ans, a émis les ignimbrites du versant oriental (Gillot et Nativel, 1982; Kieffer, 1990).

CONCLUSION. – La « dalle soudée » correspond au dernier faciès d'une séquence de dépôts mis en place lors d'une phase éruptive exceptionnelle, vieille de 223 000 ans. Cet épisode est un *événement charnière* dans l'évolution morphostructurale du volcan. La caldeira qu'il a engendrée est devenue le réceptacle d'une grande part des produits des éruptions postérieures, sauf du côté est où existaient de larges ouvertures, en particulier avec les paléo-cirques de Bébourg et de Bélouve.

Note remise le 3 mai 1993, acceptée après révision le 16 juillet 1993.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- G. BILLARD, *Carte Géologique de la France*, La Réunion, BRGM, 4 feuilles 1/50 000, not., 1974, 40 p.
- L. CHEVALIER et N. VATIN-PÉRIGNON, Volcano-structural evolution of Piton des Neiges, Réunion Island, Indian Ocean, *Bull. Volc.*, 45, 4, 1982, p. 287-298.
- C. DENIEL, G. KIEFFER et J. LECOINTRE, New ^{230}Th - ^{238}U and ^{14}C age determinations from Piton des Neiges volcano, Réunion. A revised chronology for the differentiated series, *J. Volc. Geotherm. Res.*, 51, 1992, p. 253-267.
- P.-Y. GILLOT et P. NATIVEL, K-Ar chronology of the ultimate activity of Piton des Neiges volcano, Réunion Island, Indian Ocean, *J. Volc. Geotherm. Res.*, 13, 1982, p. 131-146.
- G. KIEFFER, Évolution dynamique et structurale récente (phase IV) du Piton des Neiges (Ile de la Réunion, Océan Indien), *Volcanisme de la Réunion*, CRV Clermont-Ferrand, 1990, p. 163-186.
- I. McDOUGALL, The Chronology and evolution of the younger volcanic island of Réunion, Indian Océan, *Géochim. Cosmochim. Acta*, 35, 1971, p. 261-288.
- P. NATIVEL, Volcans de la Réunion. Pétrologie, Faciès zéolite (Piton des Neiges). Sublimés (Piton de la Fournaise), *Thèse Doct. d'État*, Orsay, Univ. Paris-Sud, 1978, 510 p.
- P. ROCHER, Évolution structurale du massif du Piton des Neiges, *Volcanisme de la Réunion*, CRV Clermont-Ferrand, 1990, p. 145-162.
- B. G. J. UPTON et W. J. WADSWORTH, Aspects of magmatic evolution on Réunion Island. *Phil. Trans. R. Soc. London*, A 271, 1972, p. 105-130.

G. K. : URA n° 1562 et CRV, 5, rue Kessler, 63038 Clermont-Ferrand Cedex, France ;

P.-Y. G., Y. C. et P. N. : CEN Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette, France ;

C. G. : Lycée de Saint-Louis, 97450 La Réunion.