

## Découverte d'un large anneau de tufs basaltiques associé à la formation de la caldera d'Ambrym (Vanuatu, SW Pacifique)

Michel MONZIER, Claude ROBIN, Jean-Philippe EISSEN et Christian PICARD

**Résumé** — Une épaisse série de pyroclastites basiques reposant sur un édifice effusif est associée à la formation de la caldera d'Ambrym (12 km de diamètre). Cette série comporte à la base des coulées pyroclastiques et des dépôts phréatomagmatiques, qui passent graduellement à des hyaloclastites de type surtseyen, puis à des coulées de cendres au sommet. Ces produits correspondent à la vidange, au cours d'une éruption cataclysmique complexe, d'un réservoir basaltique présentant un début de différenciation par cristallisation fractionnée. Le rôle de l'eau, fondamental dans le déclenchement et l'évolution de cette éruption, explique le caractère fortement explosif des dynamismes, surprenant pour un magma basaltique.

### A large basaltic tuff ring associated with the Ambrym caldera (Vanuatu, SW Pacific)

**Abstract** — A thick basaltic pyroclastic series surrounding the Ambrym caldera is presented. The gradual evolution from pyroclastic flow deposits and typical phreatomagmatic deposits at the base of the series to surtseyen type hyaloclastites, and then to ash flow deposits, indicates the role of water in the triggering and the evolution of the eruption. The volume and the petrology of these products suggest the emptying—during a long-lasting multistage eruption—of a basaltic reservoir in which incipient differentiation by fractional crystallization was occurring. The authors associate this series with the formation of the caldera of Ambrym, whose size, 12 km diameter, is exceptional for a basaltic volcano.

**Abridged English Version** — INTRODUCTION. — Basaltic magma-water interaction is a widely studied topic in maar ([1] to [5]), surtseyen ([6] to [9]) and submarine explosive ([10], [11]) volcanisms. On Ambrym island (New Hebrides arc) (Fig. 1), a thick pyroclastite series including many hyaloclastites shows a complex sequence from maar deposits to surtseyan and then subaerial ash flow deposits. This remarkable succession, clearly related with the formation of the caldera, has been studied with the aim to determine the eruptive dynamisms responsible for this event.

**GENERAL STRUCTURE.** — In the central part of the New Hebrides volcanic arc, Ambrym is a stratovolcano, 50 km long, 35 km wide, and 1,800 m high relative to the nearby sea bottom [12]. The island is crowned by a 12 km diameter caldera, where two active cones stand: Mounts Marum and Benbow [13] (Fig. 2).

Along the NW, S and NE coasts a voluminous porphyritic basalt series outcrops ([13] to [15]). These low viscosity lava flows have gentle dips ( $\sim 2^\circ$ ) and constitute a basal edifice similar to hawaiian shield volcanoes. Above this basal series, the volcano slopes (average  $10^\circ$ ; locally up to  $19^\circ$ ) consist of a thick series of tuffs. The lack of topographic steps and the numerous gullies which dissect the flanks, as well as our field observations, show that no lava flows are interstratified in this series of tuffs here called the Ambrym Pyroclastic Series (APS). Black ashes from the Marum and Benbow cones, as well as a few lavas which overflow the caldera wall are clearly posterior to the caldera formation. In summary, the main cone of Ambrym volcano consists of a shield volcano, topped by a large tuff cone with steeper slopes. The tuff cone is about 24 km wide and its volume is estimated about  $80 \text{ km}^3$  (Fig. 3). Before the caldera formation the summit of the basal volcano raised  $\sim 400 \text{ m}$  in altitude.

Note présentée par Jean AUBOUIN.

THE AMBRYM PYROCLASTIC SERIES. — Despite poor outcrops, a synthetic section of the APS is proposed as follows:

— The lower sequence recognized over some 50 m of thickness at sites 57 and 60 (*Fig. 2*) consists of several sub-horizontal indurated massive units of coarse ashes, including lapillis and blocks. Juvenile magma is present as vitric clasts, cauliflower bombs and centimetre sized pumices. Pyroclastic surge layers occur in this sequence, whose phreatomagmatic characteristics are often well marked by ash layers bearing abundant accretionary lapillis.

— The second sequence, well developed on the southern slope, is widely distributed over the cone. It was also observed as metric sized xenoliths in recent maar deposits up to the western end of the island (site 50, *Fig. 2*). Commonly, it consists of a well stratified and sorted sequence of brownish coloured hyaloclastites, with alternating coarse/fine lapilli and ash tuff layers ranging from a few centimetres up to 2 m in thickness. Typical facies shows fresh vitric fragments in almost horizontal arrangements or scattered in subordinate glassy matrix (shards and granules) with palagonite. Ash flow deposits occur at the upper part of the brownish tuff.

— The third sequence (sites 39 and 65, *Fig. 2*) consists of ash flow deposits (several 10 m thickness, in beds a few metres thick). These products are homogeneous and free of xenoliths. Although they include uncharcoalized plant fragments, the dynamism of their emplacement may be compared to that of ignimbrites and should correspond to voluminous successive outpourings during a long-lasting plinian eruption.

— On the southern slopes, a fourth sequence consists of ash and scoria deposits, up to 200 m thick, from the Woosantapaliplip cone (*Fig. 2*).

The average analysis of 51 juvenile glass fragments of the APS from sites 29, 39, 50 and 65 shows a moderately evolved, slightly alkaline, arc basalt composition. Subordinate, more differentiated basic-andesite and dacite glasses appear in sites 39 and 60.

DISCUSSION AND CONCLUSION. — Considering the large volume of tuffs, their organization and their relationship with the ring fracture, we associate the APS to the caldera event. The progressive evolution of eruptive dynamisms corresponds to a cataclysmic multi-stage eruption including an initial phreatomagmatic phase, a surtseyan phase, and a plinian phase. The role of water, which is dominant in the first two sequences, declines afterwards. The original structure of the volcanic complex and the significance devoted to the APS contrast drastically with the model proposed previously in which quiet subsidence consecutive to lava flow drainage was the dominant mechanism [14]. The explosive character of the event, unusual for a basaltic volcano, results from major magma/water interaction. Complementary work will refine this scheme and determine the origin of the water and the age of the event, which would not seem exceptional as part of the recent volcanism of the New Hebrides island arc [16].

---

I. INTRODUCTION. — Un des aspects les plus étudiés de l'hydrovolcanisme basaltique est la formation des maars ([1] à [5]). Le volcanisme surtseyen ([6] à [9]), et le volcanisme explosif des monts sous-marins peu profonds ([10], [11]), représentent deux autres volets importants de l'interaction entre magma et eau. Lors d'une étude de terrain en septembre 1990 sur l'île d'Ambrym (arc des Nouvelles-Hébrides), une épaisse série de pyroclastites basaltiques a été reconnue, reposant sur un édifice lavique. Nous présentons ici les produits composant cette série, remarquable par son association avec une grande caldera et par la succession des dynamismes éruptifs qu'elle traduit (coulées pyroclastiques,

produits phréatomagmatiques de type « maar », puis surtseyens et enfin coulées de cendres aériennes).

II. GÉNÉRALITÉS. — Ambrym est une île de la zone centrale de l'arc des Nouvelles-Hébrides (*fig. 1*), culminant à 1 270 m. Avec son soubassement immergé, elle forme un strato-volcan basaltique de 50 km de long sur 35 km de large, et de 1 800 m de hauteur par rapport aux fonds attenants [12]. Le volcanisme le plus ancien est représenté au Nord de l'île par les laves et pyroclastites basaltiques à tendance ankaramitique des Monts Tuvio et Vetlam ([13], [14]) (*fig. 2*). Au Sud de ces édifices, le cône principal s'est installé sur une fracture N 105 transverse à l'arc. Ce cône est tronqué par une caldera circulaire de 12 km de diamètre, dont l'escarpement très peu érodé varie de quelques dizaines de mètres à environ 450 m de hauteur. Les produits de l'activité post-caldera, essentiellement issus de deux cônes de cendres et scories encore actifs, les Monts Marum et Benbow, ont en partie comblé la dépression caldérique, entraînant une légère inclinaison vers l'Est de son plancher, de 700 à 550 m d'altitude.

III. STRUCTURE DU CÔNE PRINCIPAL. — Une série de basaltes plus ou moins porphyriques, comprenant en particulier une grande quantité de basaltes à phénocristaux millimétriques à centimétriques de labrador, affleure le long des côtes NW, S et NE du cône principal ([14], [15]). Les pendages de cette série sont très faibles ( $\sim 2^\circ$ ), et compatibles avec ceux des laves d'un volcan bouclier de type hawaïien. Les dynamismes sont aussi les mêmes : laves de très faible viscosité (type pahoehoe), nombreux pillows et tunnels au niveau de la mer. Les flancs et le sommet de ce volcan de base sont masqués par des produits pyroclastiques plus récents. Étant donnée la faible viscosité des laves, une accentuation de ses pentes vers l'intérieur est à exclure. Si l'on admet une valeur constante de  $2^\circ$  et un diamètre de 24 km au niveau de la mer (*fig. 3*), le sommet de ce volcan bouclier devait culminer vers 400 m.

Très vite en s'éloignant des côtes, les pentes moyennes du cône principal s'accroissent (9 à  $13^\circ$  en général et jusqu'à  $19^\circ$  sur certains versants). D'épais dépôts pyroclastiques composent la totalité des flancs jusqu'au rebord de la caldera où ils sont recoupés par la fracture circulaire (*fig. 2* et 3). Ces pyroclastites ont une ampleur qui n'avait pas été mise en évidence lors des études antérieures. Le ravinement intense qui les affecte, l'absence de planèzes et de ressauts topographiques, ainsi que nos observations de terrain indiquent qu'aucune coulée n'est interstratifiée dans cette série, que nous appellerons « Série Pyroclastique d'Ambrym » (SPA). Un manteau de cendres et lapillis gris-noirs dû à l'activité du Marum et du Benbow recouvre la SPA tandis que des coulées débordant la limite de la caldera, ou émises sur les flancs de l'édifice à la faveur des fractures N 105, empruntent certains talwegs jusqu'à la mer. Ces produits récents sont clairement postérieurs à la formation de la caldera.

*La structure du cône principal d'Ambrym comprendrait donc un appareil lavique surbaissé surmonté d'un anneau de tufs à pentes plus fortes.* A l'origine, le volume de l'anneau de tufs devait être de l'ordre de  $80 \text{ km}^3$ ; ce calcul simplifié ne tient pas compte de la présence de l'édifice ancien occupant le nord de l'île. Une irrégularité majeure affecte le secteur NE de cet anneau, où une certaine quantité de matériel pyroclastique semble s'être effondrée sous le niveau de la mer (*fig. 3*).

IV. LA SÉRIE PYROCLASTIQUE D'AMBRYM (SPA). — 1. *Description des affleurements.* — Sur les flancs du cône, les dépôts de tufs ont des pendages radiaires voisins de ceux des

pentés (10-20°) alors qu'à proximité des côtes NW, SW et SE les pendages sont généralement faibles (quelques degrés au maximum). Malgré des conditions d'affleurements peu favorables, les principaux faciès composant la SPA ont été reconnus. Une coupe synthétique de la série comprend quatre séquences :

A. *Une séquence inférieure*, affleurant sur la côte NW sur environ 50 m de hauteur (sites 57 et 60) (*fig. 2*). Elle est formée en majeure partie par plusieurs coulées massives, indurées, subhorizontales, de cendres grossières (~50 % vol.), renfermant des lapillis et des blocs représentés par des clastes vitreux ou des bombes en chou-fleur (~15 %) et des xénolithes (~20 %). Outre les bombes et les lapillis de verre trempés, le magma juvénile est représenté par du matériel expansé (scories très vésiculées et ponces centimétriques : ~15 %). Des niveaux de déferlantes, constitués des mêmes éléments, sont intercalés à la base de ces formations. Intercalée entre ces coulées, une séquence constituée par de nombreux horizons de cendres stratifiés, comprenant de fréquents niveaux de lapillis accrétonnés centimétriques et des passées de lapillis vitreux noirs, correspond sans ambiguïté à des dépôts phréatomagmatiques de type « maar ».

B. *Une seconde séquence*, constituant probablement la majeure partie de l'anneau de tufs, est largement distribuée sur l'ensemble du cône. Elle affleure le long de la côte SE (site 29), dans la montée de Lalinda à la caldera, et a été retrouvée jusqu'à l'extrémité ouest de l'île, sous forme d'enclaves décimétriques à métriques dans des dépôts de maar récents (site 50) (*fig. 2*). Cette séquence est constituée de tufs de couleur brun-ocre caractéristique en bancs massifs de quelques centimètres à 2 m de puissance. Ils montrent fréquemment des alignements épais de quelques centimètres, de clastes vitreux noirs, millimétriques, ainsi que de nombreux xénolithes, le tout emballé dans une matrice formée de fragments vitreux parfois palagonitisés. Ces tufs correspondent à un dynamisme éruptif surtseyen. Au site 29, des coulées de cendres en bancs massifs, brun-ocre, de 3 à 6 m de puissance, affleurent sur 15 à 20 m d'épaisseur au sommet de cette séquence.

C. *Une troisième séquence*, reconnue sur la côte NE (site 39) et sur le flanc NW du cône vers 70 m d'altitude (site 65) (*fig. 2*). Elle est formée par des coulées de cendres, en bancs de quelques mètres d'épaisseur. Ces dépôts homogènes, non classés, ne contiennent pratiquement pas de xénolithes. Ils sont moins altérés que ceux de la séquence médiane et conservent souvent leur couleur originelle grise. Dans ces cendres, des lapillis vitreux vésiculaires sont souvent rassemblés en passées lenticulaires atteignant 5 cm d'épaisseur et 2-3 m de longueur. L'observation des éléments constituant ces dépôts atteste qu'ils n'ont pas été remaniés : lapillis non émoussés et cendres vitreuses hérissées d'aspérités aciculaires. Bien que ces pyroclastites renferment de nombreux débris de plantes non carbonisés, le dynamisme de leur mise en place est un dynamisme d'écoulement et doit être comparable à celui d'ignimbrites non soudées. Ces dépôts résultent vraisemblablement

#### EXPLICATIONS DES PLANCHES

##### *Planche I*

Fig. 1. — Localisation d'Ambrym (Vanuatu) dans l'arc insulaire des Nouvelles-Hébrides.

Fig. 1. — Location of Ambrym (Vanuatu) in the New Hebrides island arc.

Fig. 3. — Esquisse schématique du complexe volcanique d'Ambrym.

Fig. 3. — Diagram of the Ambrym volcanic complex.

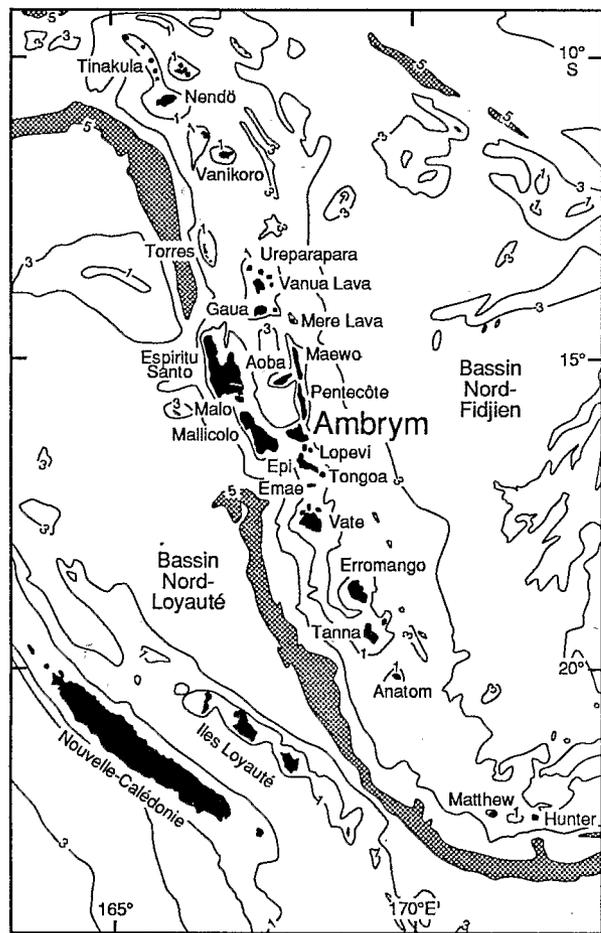


Fig. 1

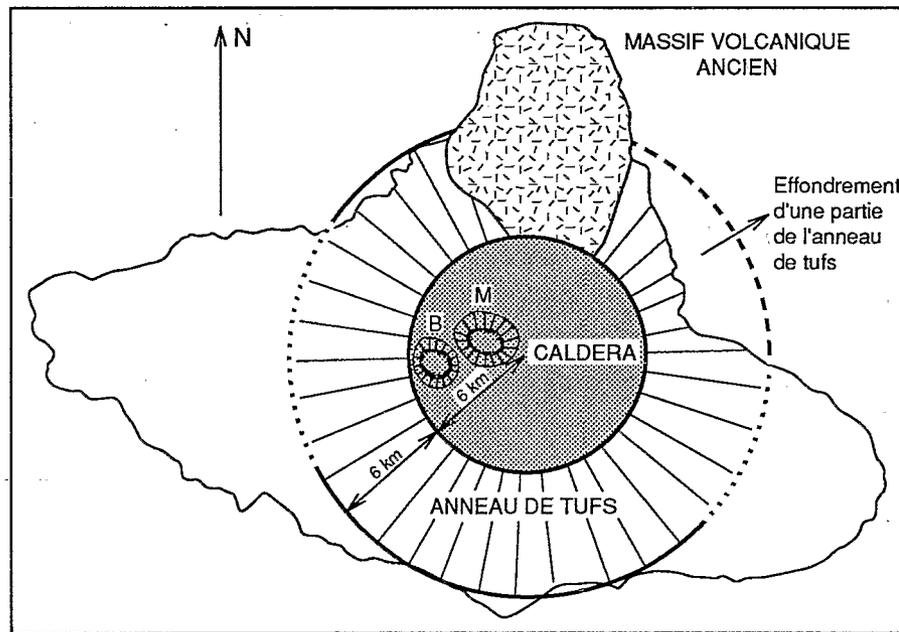


Fig. 3

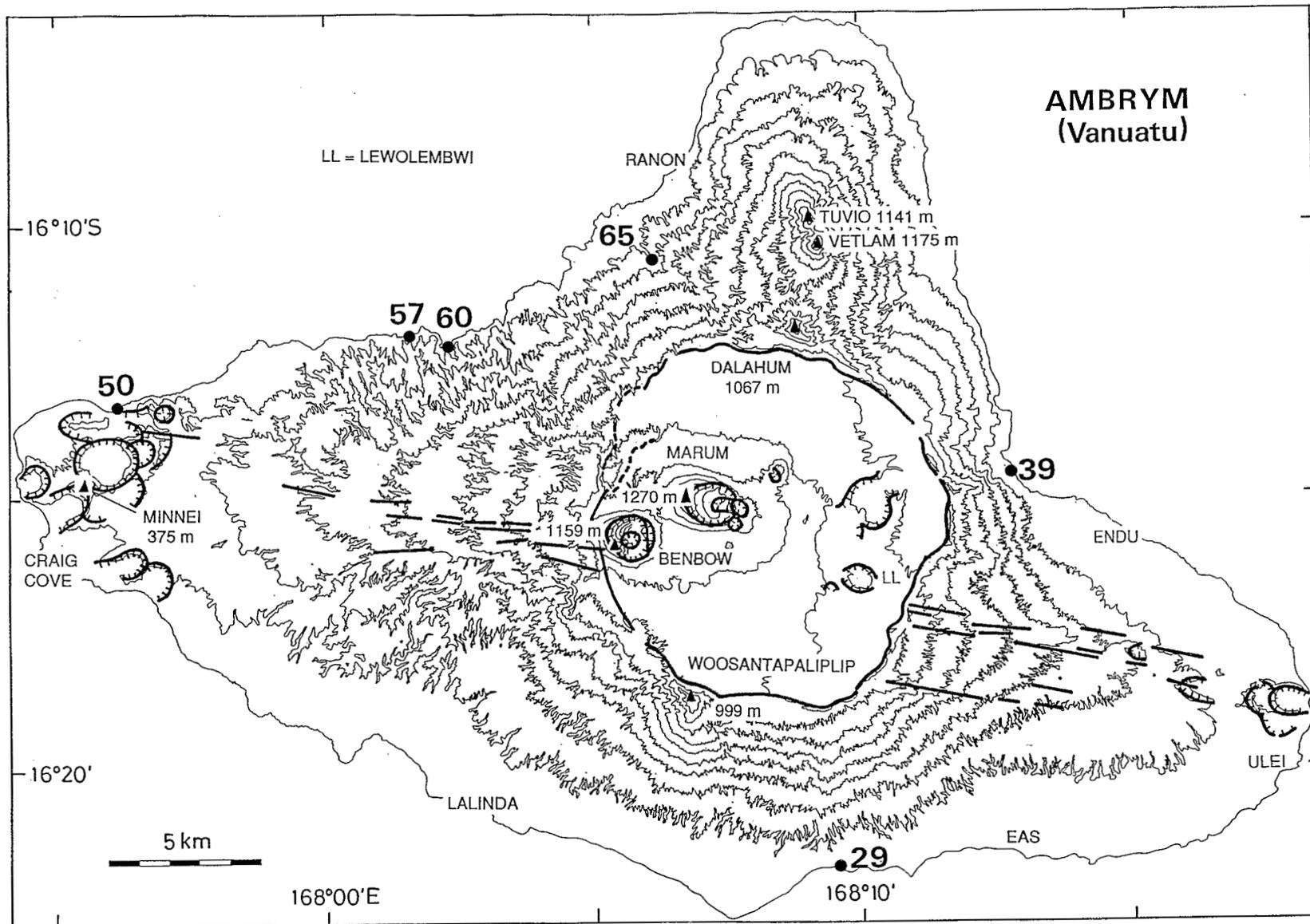


Fig. 2

## Planche II

Fig. 2. — Carte topographique d'Ambrym. Les principales structures volcaniques (caldera, cônes, maars, fissures) sont figurées en gras. Équidistance des courbes de niveau : 100 m. Les numéros indiquent les sites d'échantillonnage discutés dans le texte.

Fig. 2. — *Topographic map of Ambrym. In bold, the main volcanic features (caldera, cones, maars, fissures). The curve equidistance is 100 m. Sampling sites cited in the text are reported.*

d'émissions massives de cendres riches en eau, au cours d'une éruption plinienne prolongée.

D. *Une quatrième séquence*, épaisse d'environ 200 m correspond sur le versant sud aux dépôts du cône de cendres du Woosantapaliplip, recoupé par la caldera (fig. 2).

2. *Pétrologie des fragments vitreux.* — 98 analyses ont été effectuées à la microsonde sur des débris juvéniles vitreux des pyroclastites. Les fragments, faiblement colorés en jaune, ou noirs, sont soit massifs et craquelés, soit vésiculaires, ces diverses formes coexistant généralement. Une composition moyenne, calculée sur 51 analyses des sites 29, 39, 50 et 65, donne :  $\text{SiO}_2$  : 49,98 % ;  $\text{TiO}_2$  : 0,91 % ;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  : 14,85 % ;  $\text{FeO}^*$  : 11,74 % ;  $\text{MnO}$  : 0,24 % ;  $\text{MgO}$  : 5,08 % ;  $\text{CaO}$  : 9,99 % ;  $\text{Na}_2\text{O}$  : 2,70 % ;  $\text{K}_2\text{O}$  : 1,38 % ;  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  : 0,02 % ;  $\text{NiO}$  : 0,03 % ; total : 96,92 %. Ces fragments incluent souvent quelques cristaux d'olivine (Fo 72-82), d'augite calcique et de bytownite dont la présence n'a pas d'influence notable sur leur composition chimique globale, en ce qui concerne les éléments majeurs. La composition moyenne est celle d'un magma basaltique d'arc, peu différencié et relativement alcalin. Au site 39, des verres juvéniles plus évolués (andésites basiques et dacites), renfermant des cristaux (Pl, Cpx, Ol) en proportions variables, coexistent avec ces échardees basaltiques. Enfin, seuls des verres dacitiques presque aphyriques ont été observés dans les échantillons du site 60. L'émission simultanée de verres basaltiques plus ou moins riches en phénocristaux et de magmas de compositions nettement différentes suggère la vidange rapide d'un vaste réservoir basaltique partiellement différencié.

V. DISCUSSION ET CONCLUSION. — Le passage entre les quatre séquences de la SPA n'est pas franc mais correspond plutôt à une évolution progressive des dynamismes éruptifs au cours d'une éruption cataclysmique prolongée. Par le volume des produits émis, leur organisation et leur relation avec la fracture circulaire, nous relierions cet événement à la formation de la caldera. Il débute par l'émission des pyroclastites de la séquence inférieure, à caractères phréatomagmatiques parfois bien marqués et passe progressivement à un volcanisme de type surtseyen (seconde séquence), puis plinien (troisième séquence). Le rôle de l'eau, prépondérant dans le déclenchement de l'éruption et les deux premières phases, décroît par la suite. Le cône strombolien Woosantapaliplip (quatrième séquence), ainsi qu'une épaisse coulée visqueuse, débordant la caldera à la manière d'un dôme-coulée sur le versant NW de l'édifice, confirment la diminution du rapport eau/magma dans les dernières phases de l'éruption. L'activité des cônes post-caldera Marum et Benbow, caractérisée par des éruptions pliniennes rythmiques, s'inscrit dans le prolongement de cette évolution. Par contre, la découverte d'un maar intracaldera (cratère Lewolembwi, fig. 2) entouré d'un anneau de tufs d'environ 1 km de diamètre et situé sur une fracture N 105 jalonnée d'événements phréatomagmatiques, ainsi que l'existence de nombreux maars littoraux récents aux extrémités W et E de l'île, montrent que l'interaction magma-eau demeure, localement, encore importante aujourd'hui.

La stratigraphie et le schéma évolutif proposés ici diffèrent notablement de ceux admis jusqu'à présent pour le cône principal d'Ambrym. En particulier, ils remettent en cause

un mécanisme faisant *exclusivement* intervenir une subsidence « tranquille » par émissions massives de laves [14], difficilement concevable d'ailleurs, compte tenu des grandes dimensions de la caldera (12 km de diamètre). Les travaux en cours permettront d'affiner le modèle de formation de la caldera, de préciser le rôle de l'eau, d'en discuter l'origine, et de déterminer l'âge, probablement très récent de cet événement ([14], [16]). Si l'on considère le nombre important de grandes structures caldériques sous-marines, sub-émergées ou aériennes, situées le long de l'arc des Nouvelles-Hébrides [16], l'hydrovolcanisme basaltique de type Ambrym associé à des éruptions cataclysmales est sans doute le trait le plus marquant du volcanisme récent de cet arc.

Nous remercions le Gouvernement de Vanuatu ainsi que nos collègues Charley Douglas, Claude Reichenfeld et Francis Bondoux du Centre ORSTOM de Port-Vila (Vanuatu) pour leur aide constante lors de la préparation et la réalisation de notre mission de septembre 1990 sur Ambrym.

M. M. et J.-P. E. sont membres du GDR 910 « Genèse et Évolution des Domaines Océaniques ».

Note remise le 15 avril 1991, acceptée après révision le 25 septembre 1991.

#### RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] C. D. OLLIER, *Bull. Volcanol.*, 31, 1967, p. 45-73.
- [2] R. V. FISCHER et A. C. WATERS, *Amer. J. Sci.*, 268, 1970, p. 157-180.
- [3] V. LORENZ, *Bull. Volcanol.*, 37, 1973, p. 183-204.
- [4] J. KIENLE et coll., *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 7, 1980, p. 11-37.
- [5] R. V. FISHER et H. U. SCHMINCKE, *Pyroclastic rocks*, Springer Verlag, 1984, p. 1-472.
- [6] S. THORARINSSON et coll., *Bull. Volcanol.*, 27, 1964, p. 1-11.
- [7] G. P. L. WALKER et R. CROASDALE, *Bull. Volcanol.*, 35, 1972, p. 303-317.
- [8] B. P. KOKELAAR, *J. Geol. Soc. London*, 140, 1983, p. 939-944.
- [9] B. P. KOKELAAR, *Bull. Volcanol.*, 48, 1986, p. 275-289.
- [10] J. HONNOREZ et P. KIRST, *Bull. Volcanol.*, 39, 1975, p. 1-25.
- [11] R. BATIZA et coll., *J. Geophys. Res.*, 89, 1984, p. 8371-8390.
- [12] T. E. CHASE et B. A. SEEKINS in H. G. GREENE et F. L. WONG éd., *Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources Earth Science Series*, Houston, Texas, 8, 1988, p. 35-36.
- [13] A. MACFARLANE éd., *Geological map of Pentecost and Ambrym*, New Hebrides Geological Survey, Sheet 6, 1976.
- [14] G. J. H. MCCALL et coll., *Bull. Volcanol.*, 34, 1970, p. 681-696.
- [15] P. QUANTIN, *Archipel des Nouvelles-Hébrides; Atlas des sols et de quelques données du milieu*, 18 feuilles et 11 notices, 1978, ORSTOM éd., Paris.
- [16] A. MACFARLANE et coll., 1988, in H. G. GREENE et F. L. WONG éd., *Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources Earth Science Series*, Houston, Texas, 8, 1988, p. 45-91.

M. M., C. R. et J.-P. E. : *Équipe de Recherche « Volcans et Environnement volcanique »*,  
UR 1 F, Centre ORSTOM, B. P. A 5, Nouméa Cedex, Nouvelle-Calédonie;  
C. P. : Université française du Pacifique, B.P. G 4, Nouméa Cedex, Nouvelle-Calédonie.