

Coexistence de lignées HK et MK dans les pyroclastites associées à la caldera d'Ambrym (Vanuatu - Arc des Nouvelles-Hébrides)

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

Résumé — L'étude des pyroclastites associées à la formation de la caldera d'Ambrym montre l'éjection simultanée de deux lignées magmatiques, des basaltes aux dacites, l'une riche en potassium (HK), l'autre moyennement potassique (MK). Cette dualité se retrouve dans l'évolution pétrologique du volcan où des laves post-caldera enrichies en potassium succèdent à une série pré-caldera moins potassique. Le large volume de basaltes impliqués dans l'événement pyroclastique et la coexistence de magmas HK et MK montrent que le stade caldera du développement volcanologique est aussi une étape clé de l'évolution pétrologique, en relation avec des changements géochimiques majeurs. Le problème concernant l'origine de ces variations est posé.

Coexistence of HK and MK series in the pyroclastics related to the Ambrym caldera (Vanuatu - New Hebrides island arc)

Abstract — The pyroclastics associated with the Ambrym caldera formation show the simultaneous outpouring of two magmatic series, from basalts to dacites, one high-K (HK), the other one medium-K (MK). This duality is also found in the petrologic evolution of the volcano where post-caldera high-K lavas succeed to a pre-caldera medium-K series. The large volume of basalts implicated in the pyroclastic event and the coexistence of HK and MK magmas suggest that the caldera stage of the volcanological development corresponds also to a key step of the petrological and geochemical evolution. The problem of the origin of these variations is stated.

Abridged English Version — INTRODUCTION. — K_2O content is probably the most used geochemical parameter for the classification of island arc magmas. Along the New Hebrides arc its behavior is not well understood [1]. In the middle of this arc, Ambrym volcano (Fig. 1) consists of three parts: an old edifice made of ankaramites in the north [2]; an hawaiian-type shield volcano ([3], [4]); a large recent tuff cone, cut by the caldera (Fig. 2). The present Note exposes the typology and the petrology of the hyaloclastites associated with the caldera formation. Beside the fact that the pyroclastics exhibit various magmatic compositions, this paper shows the coexistence of a high-K and a medium-K trends (HK and MK).

MORPHOLOGY AND PETROLOGY OF THE CLASTS FROM THE HYALOCLASTITES. — A synthetic section of the tuffs—whose facies range from typical surtseyan deposits to plinian ash flows and strombolian deposits—was already presented [3].

The surtseyan deposits include: 1. light-brown basaltic blocky shards (0.5-5 mm), aphyric and non-vesicular (Figs. 3 and 4), with cracks due to quenching (about 20% of some beds); 2. dark-brown to opaque basaltic glass fragments, with a low vesicularity (0 to 10%, sometimes up to 25%), which can represent the major part of the matrix; 3. translucent basaltic or basic andesitic glass, quite vesicular (25 to 80%) with Pl and Cpx phenocrysts (Figs. 5 and 6), which make up to 50% of some beds as coarse ashes or pumiceous lapillis; 4. glassy andesitic to dacitic angular fragments, non vesicular, with aphyric polygonal zones isolated in a glassy matrix rich in microliths (Fig. 7). In a few samples, palagonite may replace the margins of glass shards and give locally a light brown color to the matrix.

Note présentée par Jean AUBOUIN.

Typology of the ashes from the flows (SEM photos): 2 types of ash are dominant: 1. highly vesiculated (50 to 90%) droplets (*Fig. 8*), showing a fragmentation after cooling but not reworking after the deposit; 2. less vesiculated grains, with a rounded surface, characteristic of phreatomagmatic processes. Their smooth appearance results from chipping and pitting during the transport in the surge (*Figs. 9 and 10*). The mechanical mixing of the two facies has been observed.

Geochemistry and mineralogy. — The fresh glasses are mainly basaltic in composition (*Figs. 11 and 12*, Table). Subordinate basic andesites and dacites also occur. Two trends, a high-K and a medium-K, are observed on the K_2O/SiO_2 diagram. Despite the high-K content, typical of calc-alkaline rocks, these series exhibit a tholeiitic behavior in the $FeO^*:MgO/SiO_2$ and TiO_2/SiO_2 diagrams (*Figs. 13 and 14*). Gill [5] already noted the difficulty to classify the arc series.

The mineralogy from basaltic to basic-andesitic glasses is homogeneous: bytownite-anorthite (An_{80-91}), augite-salite (Wo_{43-44} ; $En_{40,5-44}$; Fs_{12-16}), olivine (Fo_{72-80}) and titanomagnetite (4-6,5% TiO_2). The MK dacitic glasses include are Fe-augite (Wo_{41-42} ; En_{29-33} ; Fs_{24-30}) and a few andesine ($\approx An_{35}$). The HK dacites exhibit titanomagnetite (12-14% TiO_2) and two clinopyroxenes (Wo_{41-42} ; En_{34-36} ; Fs_{21-24} ; and Wo_{43-45} ; En_{36-40} ; Fs_{16-19}).

DISCUSSION. — Volcanological and petrological interpretation of the tuffs: the evolution between the different facies is rather progressive than sharp, corresponding to variable amounts of water during a long-lasting event [4]. In a single sequence, variations of the water content are also demonstrated by the presence of two types of ashes (*Figs. 8 to 10*) and by the variations of their respective proportion. Petrologically, the pyroclastic eruption related to the caldera formation could be interpreted as follows: 1. draining of a MK series; 2. draining of a dominantly HK differentiated series (basalts to dacites) with subordinated amount of MK basalts; 3. emission of large amount of MK basaltic ash.

Such a chronology implies a complex zoned chamber or more probably two independent (superposed?) reservoirs, the upper levels giving the MK series and the lower one the HK magmas. On Figure 12, the MK trend corresponds to the pre-caldera rocks whereas the syn- and post-caldera lavas, are all of HK type. Thus, moreover its association with the emission of a large volume of basalts and the simultaneous ejection of two magmatic series, the caldera formation corresponds to a drastic change of the geochemical characteristics of the volcano, marked by the appearance of the HK series.

The K problem: crystal fractionation can easily explain the differentiation trends of both MK basalts to MK dacites, and HK basalts to HK dacites series. Nevertheless, the evolution from MK to HK basalts (and the origin the potassium needed for this enrichment, *Figs. 11 and 12*) represent a more complex problem. Fractionation calculation gives realistic results except for potassium. Different fusion rates in the source, as indicated by the La_N/Yb_N ratio (2.5 to 5.8) in the basalts, might better explain such variations.

I. INTRODUCTION. — La teneur en K_2O est le caractère géochimique sans doute le plus utilisé pour la classification des magmas des arcs insulaires, et la variable la plus souvent corrélée au contexte sismo-tectonique. Aux Nouvelles-Hébrides, le comportement du potassium dans les magmas apparaît extrêmement complexe [1] et mal expliqué. Situé au milieu de l'arc, Ambrym est un volcan actif comprenant 3 parties (*fig. 1 et 2*): un

appareil ancien composé d'ankaramites [2]; un volcan comparable par sa forme et ses dynamismes aux volcans boucliers hawaiiens lui succède ([3], [4]); enfin, un large cône de tufs construit sur ce volcan bouclier est recoupé par la caldera.

Le volume des tufs composant le cône supérieur — principalement des hyaloclastites — et leur rôle dans la formation de la caldera ont été discutés ([3], [4]). Cet article présente la typologie et la pétrologie des éléments constituant ces hyaloclastites. Outre le fait, déjà remarquable, que la série pyroclastique soit constituée par des magmas de compositions variées (basaltes et roches différenciées), les résultats montrent la coexistence de deux lignées hautement et moyennement potassiques : HK et MK.

II. MORPHOLOGIE ET PÉTROLOGIE DES ÉLÉMENTS CONSTITUANT LES HYALOCLASTITES. — Une coupe synthétique des tufs [3] comprend de bas en haut : 1. Des dépôts à caractère phréatomagmatique plus ou moins marqué : coulées pyroclastiques indurées à lapillis vitreux, bombes trempées et scories légères, niveaux de déferlantes et retombées de cendres à lapillis accréctionnés; 2. Des hyaloclastites en bancs, caractéristiques de dynamismes surtseyens, avec coulées de cendres interstratifiées. 3. Des coulées de cendres. 4. Des dépôts stromboliens liés à des centres éruptifs localisés sur la fracture bordière de la caldera, comme le Woosantapalip (fig. 2). Au laboratoire, les observations ont surtout porté sur les hyaloclastites de la séquence intermédiaire et les coulées de cendres.

Morphologie des clastes vitreux des dépôts surtseyens. — Ils peuvent être distingués selon la forme, le degré de vésicularité, la couleur ou encore le degré de cristallisation, ce dernier caractère étant corrélé à des variations de composition chimique. Essentiellement, nous distinguons (fig. 3 à 7) : 1. Des verres brun-clair au microscope, de 0,5 à 5 mm de large, non vésiculaires (fig. 3 et 4), en polyèdres anguleux parcourus de craquelures dues à la trempe, et souvent concentrés suivant des alignements parallèles à la stratification. Ils représentent globalement 20 % du volume des dépôts surtseyens. La composition de ces verres généralement aphyriques est basaltique. De rares individus montrent de l'olivine squelettique (fig. 4) et/ou du plagioclase; 2. Des échardes de verre, brun-foncé à opaques en lame mince, également de composition basaltique, montrant habituellement peu de vacuoles : 0 à 10 %; parfois jusqu'à 25 %. Ces échardes, de forme aciculaire avec des lamelles légèrement ondulées, renferment de petites cristallites; elles peuvent constituer la majeure partie de la matrice des échantillons; 3. Des verres clairs

TABLEAU

Moyennes des analyses de verres réalisées à la microsonde
(CAMECA du Centre de Recherche de Mesures Physiques de l'Université de Clermont-Ferrand).

Averages of microprobe analyses of glasses.

	1		2		3		4		5		6		7	
	B MK MOY. (27)	E-T	B int. MOY. (17)	E-T	B HK MOY. (21)	E-T	AB MK MOY. (4)	E-T	AB HK MOY. (5)	E-T	DAC MK MOY. (6)	E-T	DACHK MOY. (18)	E-T
SiO ₂	49,74	0,72	50,59	0,64	49,92	0,65	53,49	0,48	53,12	0,73	67,11	0,86	66,19	1,32
TiO ₂	0,80	0,12	1,02	0,11	0,95	0,15	1,19	0,08	0,90	0,12	0,32	0,06	0,39	0,09
Al ₂ O ₃	15,10	0,94	14,32	0,93	15,13	0,71	14,17	0,73	16,23	0,36	15,93	0,82	15,14	0,31
FeO*	11,14	1,45	12,40	0,74	11,54	1,18	11,50	0,40	9,57	0,56	3,63	0,24	3,64	0,60
MnO	0,22	0,06	0,26	0,15	0,24	0,05	0,26	0,04	0,22	0,03	0,10	0,02	0,12	0,05
MgO	5,63	0,87	4,77	0,35	4,75	0,49	4,57	0,10	3,57	0,36	0,19	0,04	0,50	0,16
CaO	10,87	0,96	9,72	0,24	9,39	0,54	9,00	0,29	7,86	0,26	3,20	0,32	1,67	0,35
Na ₂ O	2,52	0,39	2,83	0,27	2,70	0,21	3,01	0,36	2,87	0,45	5,35	0,29	3,89	0,75
K ₂ O	0,97	0,19	1,33	0,11	1,89	0,23	1,04	0,08	2,53	0,23	2,97	0,26	5,36	0,30
Total	96,99	1,01	97,25	0,72	96,52	0,66	98,21	0,67	96,85	0,71	98,79	0,14	96,89	1,21

(translucides en LN) à degré de vésicularité variable (25 à 80 %) renfermant souvent des phénocristaux de clinopyroxène et plagioclase (fig. 5 et 6). Il s'agit de basaltes et d'andésites basiques constituant 50 % de certains niveaux sous forme de cendres grossières et de petits lapillis ponceux; 4. Des clastes vitreux anguleux, non vacuolaires présentant des zones polygonales aphyriques craquelées, isolées par un fond vitreux surchargé en microlites (fig. 7). Les compositions sont celles d'andésites et de dacites.

L'altération de la matrice confère une couleur brun-ocre à une partie des bancs. La palagonite est aussi représentée dans quelques échantillons ainsi que des zéolites dans les interstices. Dans ces échantillons, la bordure des clastes vitreux est transformée tandis que le cœur reste généralement inaltéré.

Typologie des cendres composant les coulées. — Des clichés au MEB réalisés sur des échantillons provenant des coulées de cendres montrent deux types dominants de cendres et petits lapillis : 1. Des fragments de gouttes très vésiculées (50 à 90 %). Les parois intactes des vésicules (fig. 8), et la forme hérissée de ces débris attestent que la fragmentation s'est faite après refroidissement, pendant le transport et qu'il n'y a pas eu d'usure, donc de remaniement, après le dépôt. 2. Des grains moins vésiculés, montrant une surface mammelonnée irrégulière, caractéristique de processus phréatomagmatiques. Ils sont recouverts d'une pellicule adhérente de cendres très fines (débris d'échardes vésiculées) et de matériel d'altération. Les surfaces émoussées, mais non polies (fig. 9 et 10), sont la conséquence du piquetage des grains pendant le transport dans la nuée [6]. Un mélange mécanique entre les deux types de grains a été observé, du verre translucide (facies « magmatique ») entourant des grains de facies phréatomagmatique.

Géochimie et minéralogie. — Toutes les analyses utilisées dans cet article ont été faites sur des verres non altérés. L'essentiel de ces verres — aphyriques ou partiellement cristallisés — ont une composition basaltique (98 analyses, fig. 11 et tableau). Des andésites basiques et des dacites sont représentés en moindre proportion. En outre, 64 échantillons (dont 13 clastes vitreux de la série pyroclastique) ont été analysés en roche totale dans le but d'une étude pétrologique globale de l'appareil (fig. 12).

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. 2. — Carte schématique d'Ambrym montrant la caldera et en grisé l'appareil ancien.

Fig. 2. — Schematic map of Ambrym island showing the limits of the caldera and the old edifice in greyish.

Fig. 11. — Diagramme K_2O/SiO_2 pour les verres de la série pyroclastique d'Ambrym; 98 analyses microsonde et 13 analyses par I.C.P. (analyste Jo Cotten, G.D.R. G.E.D.O., U.B.O. Brest). Les losanges évidés correspondent aux moyennes du tableau.

Fig. 11. — K_2O/SiO_2 diagram of the glasses of the Ambrym pyroclastic series; 98 microprobe analyses and 13 I.C.P. analyses. The open diamonds correspond to the averages of Table.

Fig. 12. — Diagramme K_2O/SiO_2 pour l'ensemble des laves du volcan (64 analyses I.C.P.; Jo Cotten).

Fig. 12. — K_2O/SiO_2 diagram of all the lavas of the volcano (64 I.C.P. bulk rock analyses).

Fig. 13. — Diagramme $FeO^* : MgO/SiO_2$ (98 analyses microsonde de verre et 64 analyses RT). Losanges noirs = verres de la série pyroclastique; losanges évidés = coulées de laves ante- et post-caldera.

Fig. 13. — $FeO^* : MgO/SiO_2$ diagram of all the data (98 microprobe glass and 64 I.C.P. bulk rock analyses). Closed diamonds = glasses of the pyroclastic series; Open diamonds = ante- and post-caldera lava flows.

Fig. 14. — Diagramme TiO_2/SiO_2 pour l'ensemble des données; mêmes symboles que pour la figure 13.

Fig. 14. — TiO_2/SiO_2 diagram of all the data; same symbols as for Figure 13.

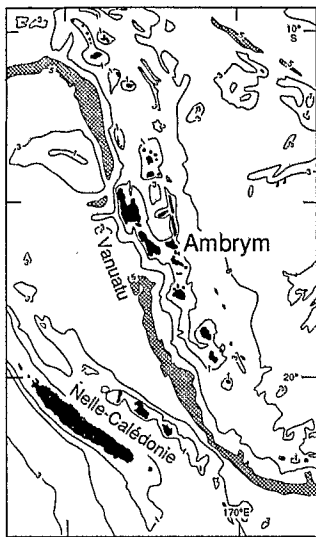


Fig. 1

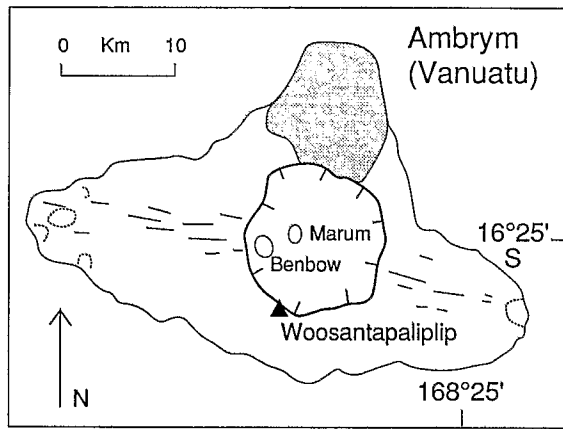
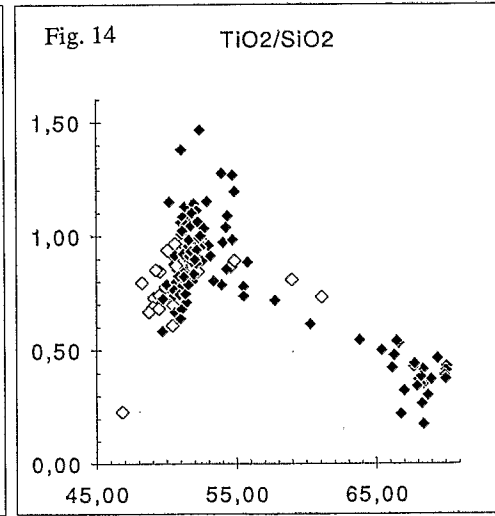
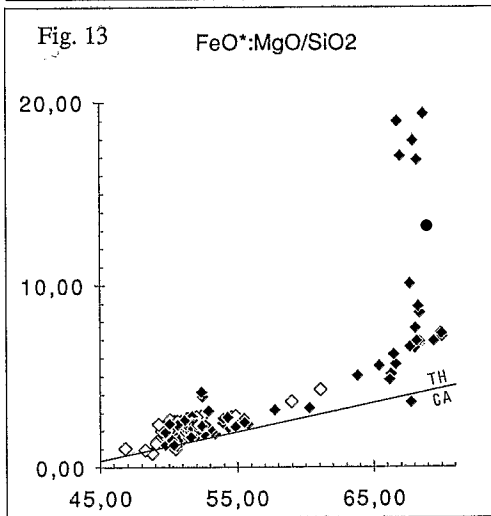
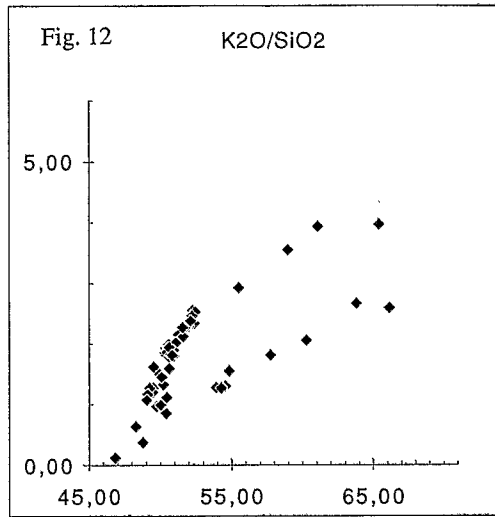
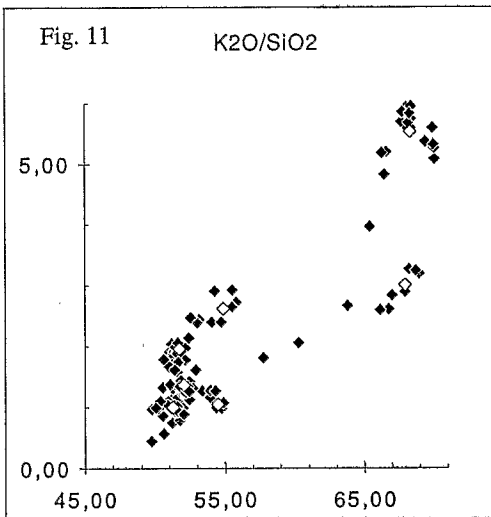


Fig. 2



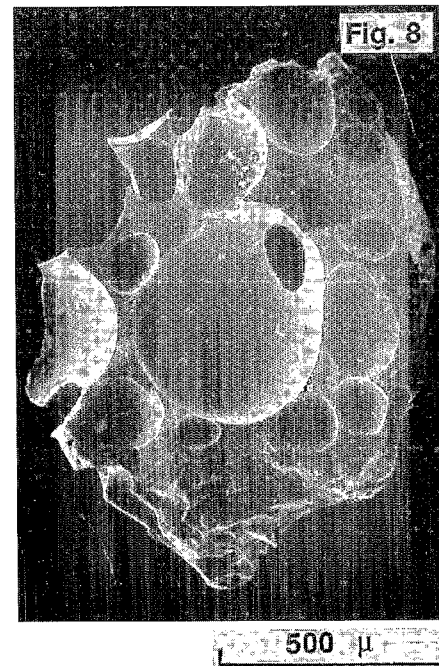
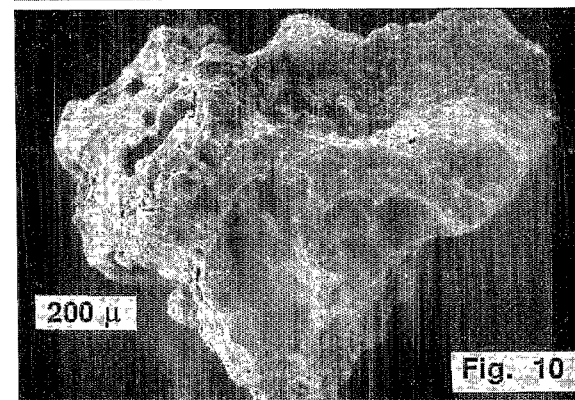
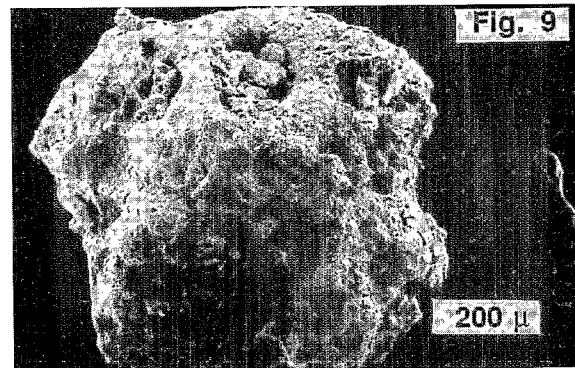
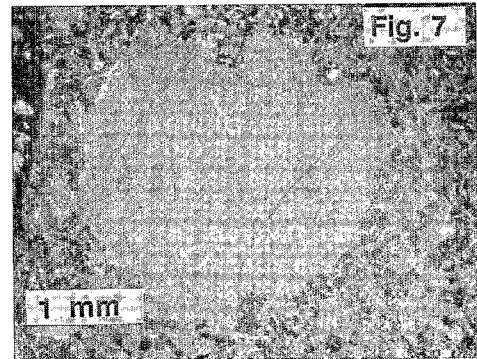
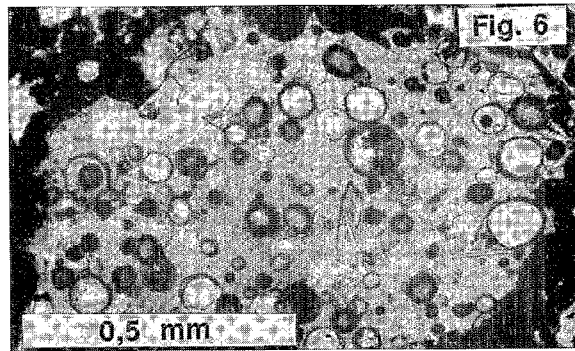
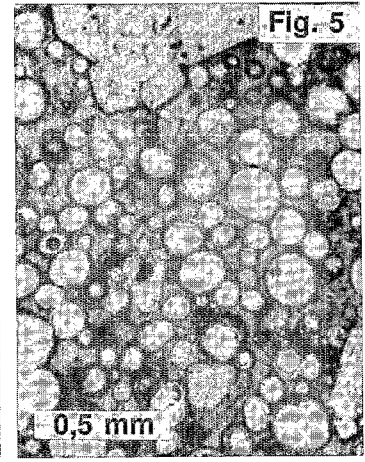


Planche II

Fig. 3 à 7. — Clastes vitreux de bancs de faciès surtseyens; description dans le texte.

Figs. 3 to 7. — Vitric clasts of the surtseyan facies beds; see the text for the description.

Fig. 8 à 10. — Photographies au microscope électronique de cendres (coulées cendreuseuses de la série pyroclastique d'Ambrym); MEB « CAMBRIDGE 360 », C.R.M.P., Clermont-Ferrand (photos : J. M. Montel).

Figs. 8 to 10. — SEM photographs of the ashes (ash flows of the Ambrym pyroclastic series).

Sur le diagramme K_2O/SiO_2 , la série pyroclastique se subdivise en deux lignées de différenciation HK et MK. Malgré ces teneurs élevées en potassium, typiques de lignées calco-alcalines d'arc, les deux séries ont un net comportement tholeitique si on s'en tient aux relations $FeO^* : MgO/SiO_2$ et TiO_2/SiO_2 (fig. 13 et 14). Les teneurs en Al_2O_3 , relativement faibles, sont également celles de roches tholéitiques. Cette ambiguïté réapparaît lorsque l'on se propose de classer les verres basaltiques aphyriques les moins potassiques (colonne 1, tableau), magma parent des deux lignées? Gill [5] souligne de telles contradictions et la difficulté à classer les séries d'arcs.

La minéralogie des verres basaltiques renfermant un faible pourcentage de cristaux et celle des andésites basiques sont les mêmes, qu'il s'agisse de l'une ou l'autre des lignées : bytownite-anorthite (An_{80-91}), augite-salite (Wo_{43-44} ; $En_{40,5-44}$; Fs_{12-16}), olivine (Fo_{72-80}) et titanomagnétites (4-6,5 % TiO_2). Les minéraux ne montrent pas de zonage prononcé, exceptés de rares plagioclases à zonage inverse (An_{67-76}).

La minéralogie des verres dacitiques MK s'accorde avec leur caractère différencié : rares augites ferrifères (Wo_{41-42} ; En_{29-33} ; Fs_{24-30}) et petits cristallites d'andésine ($\approx An_{35}$). Les dacites de la série HK se distinguent par la présence de deux clinopyroxènes (Wo_{41-42} ; En_{34-36} ; Fs_{21-24} ; et Wo_{43-45} ; En_{36-40} ; Fs_{16-19}), le pyroxène calcique et magnésien étant plus riche en Ti et Al, et par celle de titanomagnétite (12-14 % TiO_2). L'olivine en micrograins est riche en fer (Fo_{42-44}). De rares phénocristaux de labrador ont été notés ainsi que de l'andésine présentant un zonage inverse (An_{34-45}).

III. DISCUSSION. — *Interprétation volcanologique et pétrologique des tufs.* — Le passage entre les différents faciès représentés dans les tufs n'est pas franc mais correspond plutôt à une évolution progressive des dynamismes éruptifs, en relation avec des quantités variables d'eau, au cours d'une éruption prolongée [4]. Au sein d'une même séquence, le rôle variable joué par l'eau est également perceptible, les différences de vésicularité entre les deux types de cendres (fig. 8 à 10) et leurs proportions respectives dans les écoulements étant des fonctions du caractère plus ou moins phréatomagmatique de l'éruption.

Les variations de la teneur en K peuvent être suivies au cours des quatre phases composant l'événement pyroclastique : 1. Coulées pyroclastiques de base : vidange de magmas dacitiques de la série MK (tableau, colonne 6). 2. Émission des produits surtseyens hétérogènes dans lesquels des clastes de magma juvénile basaltiques MK et HK coexistent avec d'autres clastes juvéniles d'andésites basiques et de dacites HK (tableau, colonne 7). 3. Les coulées de cendres de la partie supérieure sont quant à elles constituées de basaltes dont les teneurs en K_2O sont intermédiaires ou se rapportent à la série MK, tout comme, 4. les basaltes des formations stromboliennes du sommet.

Ces variations géochimiques reconnues dans les pyroclastites du stade caldera soulignent un changement majeur de la géochimie du volcan : sur la figure 12, l'évolution pétrologique globale de l'appareil montre la superposition de deux lignées de différenciation HK et MK comparables à celles observées pour les verres. Toutefois, sur cette représentation, les laves post-caldera font toute partie du trend supérieur à signature

HK. Outre le fait qu'elle est associée à un large volume de basaltes et à l'éjection simultanée de deux lignées magmatiques, la formation de la caldera marque un changement radical des caractères géochimiques du volcan (apparition de la lignée HK).

L'évolution pétrologique au cours de l'éruption pyroclastique associée à la caldera peut donc s'interpréter de la façon suivante : 1. Vidange d'une série MK en cours de différenciation; 2. Vidange d'une suite différenciée HK (basaltes, andésites basiques et dacites) avec accessoirement des basaltes MK; 3. Emission d'une grande quantité de basaltes MK sous forme de cendres. Une telle chronologie implique la présence d'une chambre zonée complexe sous le volcan, ou plus probablement de deux réservoirs séparés (superposés?). La lignée la moins potassique, mise en place la première, proviendrait des parties les plus hautes. Des niveaux plus profonds (de cette chambre unique ou de cet ensemble) seraient le siège du passage des basaltes MK aux basaltes HK (à grande profondeur) puis de l'individualisation de la lignée HK (*cf.* ci-dessous).

Le problème du potassium. — L'ensemble des données analytiques suggèrent que les deux lignées de différenciation, des basaltes MK aux dacites MK d'une part, et des basaltes HK aux dacites HK d'autre part, peuvent aisément s'expliquer par un processus de cristallisation fractionnée. En revanche, les problèmes concernant le passage continu des basaltes MK vers les basaltes HK (*fig.* 11 et 12) et l'origine du potassium nécessaire à cet enrichissement sont plus complexes. Les verres basaltiques dont la teneur en K_2O dépasse 1,3 % renferment généralement un nombre variable de minéraux; nous avons donc effectué un calcul de fractionnement, entre les basaltes MK et les basaltes HK. Une séparation de 9,6 % cpx, 6,3 % pl, 0,7 % ol et 0,6 % mt suffit à expliquer le comportement des éléments majeurs pour un accroissement de la teneur en SiO_2 de 51,28 à 52,02 %, à l'exception toutefois du potassium dont les variations calculées ne reflètent pas celles des analyses. Le rapport La_N/Yb_N , qui varie de 2,5 à 5,8 pour l'ensemble des basaltes, semble indiquer par ailleurs que la fusion partielle joue aussi un rôle important et peut être à l'origine de la distribution du K. Les écarts de la teneur en K auraient alors une origine profonde et seraient probablement liés à des modifications majeures du contexte sismo-tectonique local de l'arc au moment de (ou peu avant) la formation de la caldera. Une étude géochimique plus complète, actuellement en cours, et des mesures isotopiques devraient apporter une solution définitive à ce problème.

Note remise le 27 juin 1991, acceptée après révision le 3 octobre 1991.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] A. MACFARLANE et coll., 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.
- [2] G. J. MCCALL et coll., *Bull. Volcanol.*, 34, 1970, p. 681-696.
- [3] M. MONZIER et coll., *C. R. Acad. Sci. Paris*, 1981 (sous presse).
- [4] C. ROBIN et coll., *Geology* (soumis).
- [5] J. GILL, *Orogenic Andesites and Plate Tectonics*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1981, 390 p.
- [6] G. HEIKEN et K. WOHLETZ, *Volcanic ash*, Univ. of California Press, 1985, 246 p.

C. R., M. M. et J.-P. E. : UR 1F, ORSTOM, B.P. n° A5, Nouméa, Nouvelle Calédonie;
 C. P. : Université française du Pacifique, B.P. n° G4, Nouméa, Nouvelle-Calédonie;
 G. C. : Université et U.A. 10 C.N.R.S., 5, rue Kessler, 63038 Clermont-Ferrand.