

Découverte et interprétation d'ignimbrites basiques à Tanna (Vanuatu, SO Pacifique)

Jean-Philippe EISSEN, Claude ROBIN et Michel MONZIER

Résumé — Le développement pléistocène du complexe volcanique de Tanna comprend l'émission de deux séquences d'ignimbrites. Les clastes juvéniles des ignimbrites les plus anciennes sont inhabituellement basiques (SiO_2 : 53-58 %), et les verres qui les composent vont des andésites basiques à la limite dacites-rhyolites. Sur la base d'une étude minéralogique, les rôles respectifs des mélanges magmatiques et de la cristallisation fractionnée sont discutés pour expliquer ces variations. Les ignimbrites représenteraient l'émission massive et simultanée de plusieurs magmas cogenétiques caractérisés par des phases vitreuses dont les teneurs en silice sont 55-56, 59, 61-62 et 69%.

Discovery and interpretation of mafic ignimbrites at Tanna (Vanuatu, SW Pacific)

Abstract — Two voluminous ignimbritic sequences have been emitted during the Pleistocene edification of the Tanna volcanic complex. The composition of the juvenile clasts from the older ignimbrites is unusually mafic (SiO_2 : 53 to 58%) with glasses ranging in composition from basaltic andesite to dacite-rhyolite. The respective roles of magma mixing and fractional crystallization are discussed in order to explain these variations. The ignimbrites would represent massive and simultaneous outbursts of cogenetic magmas, whose glassy phases range in SiO_2 contents from 55-56, 59, 61-62 to 69%.

Abridged English Version — INTRODUCTION. — Subaerial pyroclastic eruptions involving large volumes of basaltic and/or intermediate magmas are scarce, and mafic ignimbrites are very rare ([1] to [5]). This paper describes a voluminous series of ignimbrites from Tanna (New Hebrides arc), the average composition of which is mafic.

GENERAL STRUCTURE OF TANNA (Fig. 1). — Tanna Island volcanics are subdivided into three groups [7]: the Early Pleistocene Green Hill and Tukosmeru Groups and the Late Pleistocene to Present Yenkahe Group which includes the Siwi Ignimbrite [8] and the active Yasur cone. Recent field and off-shore work [6] shows that a large part of the Green Hill and Tukosmeru volcanics belongs to the western slope of a large edifice now collapsed below sea-level. Along the eastern coast, remains of this volcano expose a voluminous ignimbrite sequence that we will call the Old Tanna ignimbrites (OTI) to distinguish it from the Siwi ignimbrite.

THE OTI AT SITES 16, 22 AND 23 (Fig. 1). — At site 22, transverse sections to the westward direction of the ash flows show lenses (4-6 m thick) mantled by a 5 m-thick sequence of ash and scoria layers. Numerous cauliflower bombs and quenched glassy clasts show evidence of hydromagmatism. At Lenambtain point (site 23), three indurated ash and lapilli units form a 40 m-high cliff and represent the major flows of the OTI. These tuffs include 20-40% of glassy blocks and bombs (Fig. 2; analyses Table 1), together with scoriaceous lapilli and pumice. Xenoliths are represented by limestone, lavas from the basement and blocks of a plagioclase-rich lava.

PETROLOGY. — The juvenile clasts show eutaxitic texture (banded and welded matrix, flattened glassy shards, Fig. 3). The compositions of 10 glassy blocks and bombs from sites 16, 22 and 23 range from 53.3 to 58.8 $\text{SiO}_2\%$ (Table I). These samples plot within the high-K differentiation trend of the island ([7], [9]). Except for the coexistence of bytownite (An_{85-87}) and labrador (An_{57-61}) in sample 22C, plagioclase compositions show a

Note présentée par Jean AUBOUIN.

narrow range (An_{52-62} , exceptionally up to An_{40} at rim) as well as clinopyroxene ($En_{40, 5-43}$; Wo_{39-42} ; Fs_{15-19}) and olivine (Fo_{60-61}). 112 microprobe analyses of glassy shards and laminations exhibit variations from 54 to 69% SiO_2 (Figs. 4 and 5) with peaks at 55-56, 59, 61-62 and 69% (averages reported in Table I).

PETROGENESIS. — Does the large compositional range observed for the bulk rock samples and the vitric components correspond to magma mixing or to various degrees of differentiation of the same parental magma? The results of mixing and crystal fractionation tests [11] are shown in Table II. For bulk rocks, two main types of juvenile blocks are observed: 1) Blocks constituted by welded shards of different compositions (samples 22B and 23C; Fig. 4), and 2) blocks with sub-homogeneous composition (e.g. 23B). Mixing tests conducted on these compositions clearly indicate that they are the homogenized equivalents of the heterogeneous ones (Table II A). For glasses, the same mixing and fractionation tests were applied to the average glass compositions. Mixing seems unlikely to reproduce the various compositions (Table II B) whereas crystal fractionation tests give excellent results (Table II C), except for the transition between 61 and 69 $SiO_2\%$ where an additional phase (probably Na-rich plagioclase) may be involved. However, some small-scale mixing can occur, as suggested by a few analyses between the peaks on Figure 4.

INTERPRETATIONS. — Several magmas characterized by glass compositions ranging from basaltic andesite to dacite-rhyolite represent the juvenile magmas of the OTI. Thus, these ignimbrites result from the fast emptying of a large magma body, the strong compositional gradient of which has been controlled by crystal fractionation. Mechanics of the eruption differ from a self-potentially explosive acidic magma as well as from that implying introduction of basalt in a differentiated magma chamber [10]. Mafic magmas are considered unable to feed large plinian eruptions. The hydromagmatic features of the deposits, especially in the lower layers, suggest that introduction of external water at the top of the magmatic column may have triggered the eruption.

INTRODUCTION. — Les éruptions pliniennes basaltiques et les écoulements ignimbritiques basiques rapportés dans la littérature demeurent exceptionnels ([1] à [5]), et bien que les éruptions pyroclastiques impliquant de larges volumes de magmas intermédiaires soient plus fréquentes, le phénomène ignimbritique reste une caractéristique des magmas dacitiques ou rhyolitiques riches en gaz. Au cours de recherches sur l'arc des Nouvelles-Hébrides [6], nous avons découvert à Tanna de volumineuses ignimbrites de composition moyenne basique. Cet article décrit ces roches et en propose, sur la base d'arguments pétrologiques, une interprétation.

STRUCTURE DE L'ÎLE DE TANNA. — Les formations volcaniques de Tanna ($19^{\circ}30'S$ - $169^{\circ}20'E$) sont divisées en trois groupes : les groupes Green Hill et Tukosmeru du Pléistocène inférieur, et le groupe Yenkahe du Pléistocène supérieur et récent, incluant une formation ignimbritique, l'ignimbrite Siwi, et le cône actif Yasur ([7], [8]) (fig. 1). Nos recherches à terre et en mer montrent que la plupart des pyroclastites des groupes Green Hill et Tukosmeru dans les parties centrale et septentrionale de l'île, ainsi que les laves de la côte est, constituaient les basses pentes occidentales d'un vaste appareil avant son effondrement sous le niveau de la mer. Au Pléistocène inférieur, son développement comprend l'émission d'une volumineuse séquence d'ignimbrites, jusqu'alors non signalée, que nous appellerons *ignimbrites anciennes de Tanna*, afin de les distinguer des écoulements

cendro-ponceux plus jeunes de la formation ignimbrétique Siwi. Leur répartition le long de la côte (sites 22, 23 et 16, *fig. 1*) s'accorde avec une origine à l'Est de l'île, aussi suggérée par de nouvelles données bathymétriques montrant un large massif effondré sous le niveau de la mer au large des côtes orientales de l'île [6].

DESCRIPTION DES IGNIMBRITES AUX SITES 16-22-23 (*fig. 1*). — Au site 22, des coupes transverses à la direction d'écoulement vers l'Ouest exposent des lentilles de 4 à 6 m d'épaisseur et quelques dizaines de mètres de longueur, de coulées de cendres grossières à lapilli trempés plus ou moins expansés, bombes, petites ponces (jusqu'à 60 % du volume) et blocs (5 %). Le caractère hydromagmatique de ces dépôts inférieurs (niveau 4 des coupes, *fig. 1*; éch. 16 et 22A-D, tableau I), est montré par les figures de trempe des lapilli et petites bombes en chou-fleur. Ils sont recouverts par 5 m de retombées de cendres et scories. Au site 16, une épaisse série de tufs cendreux argilisés au sommet de la coupe atteste l'âge ancien de ces pyroclastites.

A la pointe Lenambtain (site 23), trois unités, sur plus de 40 m d'épaisseur, représentent les écoulements majeurs de la séquence pyroclastique. Ces tufs comprennent un large pourcentage de blocs vitreux (20 % en moyenne, 35 à 40 % par endroits; *fig. 2*). Ces clastes, dont la taille atteint 70 cm, sont souvent désagrégés sur place suivant des fentes de retrait dues à un refroidissement rapide. Ces tufs renferment également des scories expansées et des ponces. Des passées vitreuses de quelques décimètres de long et 3 à 10 cm d'épaisseur correspondent à des zones soudées et étirées au sein des dépôts de la nuée. La matrice beige, formée de lapilli et cendres grossières, est indurée. Des débris de calcaire, des blocs de basalte, d'andésite et d'une roche cumulative à phénocristaux (5-10 mm) de labrador (analyse, tableau I) constituent les xénolithes.

CARACTÈRES PÉTROLOGIQUES. — *Géochimie et minéralogie.* — Neuf clastes juvéniles (blocs et bombes) allant du verre non vésiculé à la scorie expansée, ont été analysés (tableau I). Ces clastes ont une structure eutaxitique montrant des bandes irrégulières de fragments vitreux soudés et d'échardes plus ou moins compactées (*fig. 3*). Le pourcentage de phénocristaux est faible (2 à 6 %). Les minéraux sont limpides et ne présentent pas de signes de déstabilisation. Exceptée la présence conjointe de bytownite (An_{85-87}) et de labrador (An_{57-61}) dans l'échantillon 22C, les variations de composition observées sur les plagioclases sont limitées au domaine du labrador (An_{52-62}) avec de rares évolutions vers l'andésine en bordure de certains cristaux (jusqu'à An_{40}). Les variations de composition des clinopyroxènes sont elles aussi peu marquées ($En_{40,5-43}$; Wo_{39-42} ; Fs_{15-19}), et l'olivine (Fo_{60-61}) n'est pas réactionnelle. Les opaques renferment de 6 à 13 % de TiO_2 . Les compositions des échantillons analysés s'échelonnent de 53,3 à 58,8 % de SiO_2 et s'intègrent avec l'ignimbrite Siwi, à la série de différenciation riche en potassium de l'île ([7], [9]).

Composition des verres. — 112 analyses à la microsonde d'échardes et bandes vitreuses sont présentées sur les figures 4 et 5. Dans l'ensemble, les résultats montrent une large gamme de compositions, des andésites basiques jusqu'à la limite dacite-rhyolite. Suivant les échantillons, on remarque soit la coexistence de verres de compositions très différentes (*fig. 4*, éch. 22B et 23C), soit une composition nettement dominante (éch. 22C et 23B). Des pics à 55-56, 59 et 61-62% SiO_2 apparaissent, auxquels s'ajoute un petit pic à 69 %. Les moyennes de ces populations sont également présentées dans le tableau II.

PÉTROGENÈSE. — Le problème qui se pose quant à la signification de ces ignimbrites de composition inhabituelle est de savoir si les clastes de composition intermédiaire

TABLEAU I

Analyses de blocs juvéniles des ignimbrites anciennes de Tanna (Fe_2O_3^* = fer total; analyste Jo Cotten, ICP-AES, GDR GEDO, UBO Brest) et moyennes des verres analysés à la microsonde (pics de la figure 4) (FeO^* = fer total; Cameca SX 50, GDR GEDO, Brest). AB = andésite basique; AA = andésite acide; DR = dacite-rhyolite.

Bulk-rock chemical analyses of juvenile clasts from the OTI (Fe_2O_3^ as total iron) and average microprobe analyses of glasses (FeO^* as total iron). AB = basaltic andesite; AA = acid andesite; DR = dacite-rhyolite.*

Éch. Nb Anal.	Site 16			Site 22				
	16A	22A	22B	22C	22D	22AB 8	22AA1 15	22AA2 16
SiO_2	57,30	55,20	58,80	57,30	54,55	55,35	59,19	61,26
TiO_2	0,78	0,89	0,81	0,81	0,74	1,05	0,82	0,81
Al_2O_3	16,18	16,03	15,98	16,41	16,33	15,02	16,03	15,79
Fe_2O_3^*	9,15	10,83	8,51	8,87	9,23	—	—	—
FeO^*	—	—	—	—	—	10,19	7,45	7,08
MnO	0,16	0,20	0,17	0,17	0,17	0,20	0,18	0,16
MgO	2,61	3,70	2,38	2,89	4,05	4,07	2,46	1,82
CaO	6,00	7,77	5,66	6,48	7,51	7,77	5,40	4,33
Na_2O	4,08	3,32	4,05	3,81	3,18	3,70	4,14	4,26
K_2O	2,74	2,09	3,13	2,80	2,21	2,11	3,09	4,10
P_2O_5	0,42	0,35	0,52	0,47	0,39	—	—	—
LOI	0,53	-0,17	-0,19	0,02	1,01	—	—	—
TOTAL	99,95	100,21	99,82	100,03	99,37	99,46	98,76	99,59
Rb	38	32	48	42	34	—	—	—
Ba	1 140	436	600	545	453	—	—	—
La	13,5	10,0	14,8	13,4	11,2	—	—	—
Sr	537	495	536	583	580	—	—	—
Zr	99	89	118	105	88	—	—	—
V	238	330	198	237	246	—	—	—
Cr	3	20	15	26	90	—	—	—
Co	20	26	19	21	26	—	—	—
Ni	9	26	11	16	47	—	—	—

Éch. Nb Anal.	Site 23 (Lenambtain)								
	23A	23B	23C	23 G	Cumulat	23AB 23	23AA1 17	23AA2 7	23DR 3
SiO_2	53,30	58,60	55,80	57,00	54,10	56,33	59,63	62,41	68,69
TiO_2	0,79	0,79	0,78	0,80	0,70	0,75	0,80	0,73	0,70
Al_2O_3	16,68	15,87	15,92	15,69	18,51	16,32	15,85	16,02	12,97
Fe_2O_3^*	10,36	8,91	9,91	9,43	8,30	—	—	—	—
FeO^*	—	—	—	—	—	8,23	7,65	5,93	4,45
MnO	0,21	0,19	0,19	0,18	0,13	0,19	0,18	0,15	0,07
MgO	3,80	2,58	3,49	3,15	2,68	3,18	2,35	1,23	0,34
CaO	7,82	5,84	7,43	6,52	8,48	7,29	5,52	3,86	1,32
Na_2O	3,24	4,13	3,65	3,72	3,39	3,97	4,15	5,03	2,74
K_2O	1,90	2,83	2,32	2,59	2,03	2,33	3,06	3,73	7,12
P_2O_5	0,42	0,46	0,38	0,43	0,34	—	—	—	—
LOI	1,60	-0,16	0,39	-0,02	1,33	—	—	—	—
TOTAL	100,12	100,14	100,26	99,49	99,99	98,58	99,18	99,09	98,40
Rb	29	44	46	39	26	—	—	—	—
Ba	422	577	454	524	424	—	—	—	—
La	9,8	13,6	10,8	12,4	10,0	—	—	—	—
Sr	567	530	567	548	650	—	—	—	—
Zr	81	110	84	99	78	—	—	—	—
V	320	222	296	258	256	—	—	—	—
Cr	37	12	17	21	18	—	—	—	—
Co	28	20	25	23	22	—	—	—	—
Ni	24	10	18	17	20	—	—	—	—

correspondent à de véritables mélanges entre deux magmas, acide et basique, ou si chaque composition représente un degré de différenciation plus ou moins avancée d'un même magma parent. Dans le premier cas, l'hypothèse d'une injection de magma basique dans

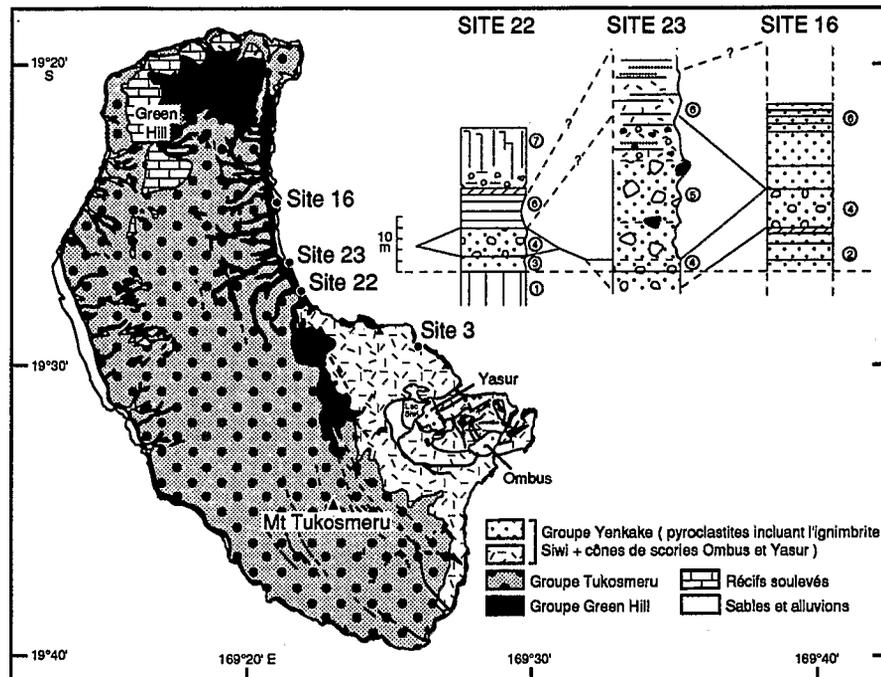


Fig. 1. — Carte géologique de Tanna d'après [7] et coupes synthétiques des ignimbrites anciennes aux sites 16, 22 et 23. 1 : Laves; 2 et 3 : Tufs cendreux à fragments vitreux (dépôts hydromagmatiques); 4 : Coulées pyroclastiques à bombes vitreuses et scories; 5 : Écoulements majeurs de la séquence ignimbritique; 6 : Retombées de cendres et lapilli; 7 : Coulée de lave.

Fig. 1. — Geological map after [7], and synthetic cross-sections of the OTI at sites 16, 22 and 23. 1: Lava flows; 2 and 3: Hydromagmatic deposits (ash) bearing vitric clasts; 4: Ash and scoria flow deposits bearing cauliflower bombs; 5: Main ignimbritic deposits of the OTI; 6: Ash and lapilli fall-out layers; 7: Lava flow.

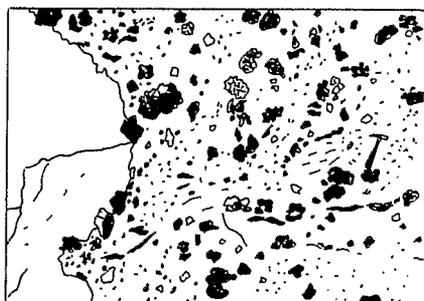


Fig. 2

Fig. 2. — Dépôts ignimbrites au site 23.

Fig. 2. — Ignimbrite deposits at site 23.

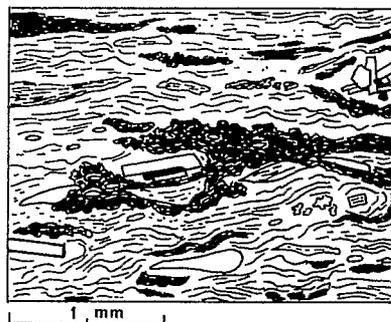


Fig. 3

Fig. 3. — Structure eutaxitique des clastes juvéniles au site 23.

Fig. 3. — Eutaxitic structure of OTI juvenile clasts at site 23.

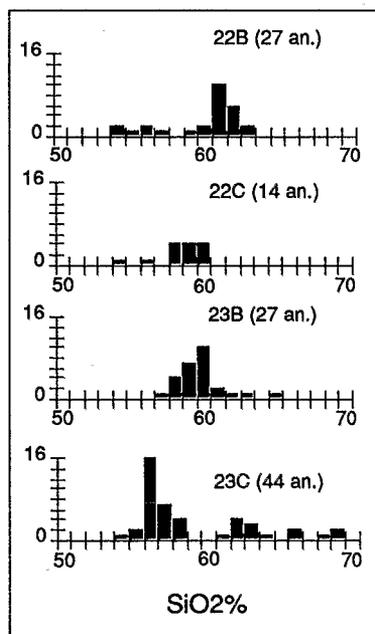


Fig. 4

Fig. 4. — Fréquence des teneurs en silice dans les verres analysés à la microsonde.

Fig. 4. — SiO_2 frequency histograms for microprobe analyses of glasses.

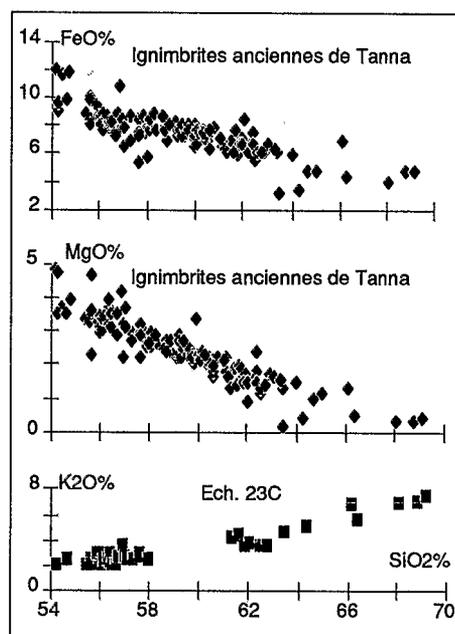


Fig. 5

Fig. 5. — Diagramme FeO/SiO_2 et MgO/SiO_2 pour les 112 verres analysés à la microsonde et K_2O/SiO_2 pour ceux de l'échantillon 23C.

Fig. 5. — FeO/SiO_2 and MgO/SiO_2 diagrams for 112 microprobe analyses of vitric fragments and K_2O/SiO_2 for glasses in sample 23C.

TABLEAU II

Exemples de tests de (A) mélanges entre les compositions des roches totales; (B) mélanges entre les compositions des verres; et (C) cristallisation fractionnée entre les compositions des verres. $\sum e^2$ = somme des carrés des écarts.

Examples of tests of (A) mixing between bulk rock compositions; (B) mixing between glass compositions and; (C) crystal fractionation between glass compositions.

	Mélange	Composants	$\sum e^2$	Écarts sur les traces			Résidu	
A : Roches	23 B =	89,1 % 22 B +	10,9 % 23 A	0,081	Très petits			positif
	23 G =	34,1 % 23 A +	65,9 % 23 B	0,096	Nuls			positif
	16 A =	76,8 % 22 B +	23,2 % 23 A	0,155	ou presque nuls			négatif
	16 A =	75,0 % 22 B +	25,0 % 22 D	0,391	Importants			négatif
	23 C =	15,6 % 22 B +	84,4 % 22 D	0,732	ou grands			négatif
	22 A =	7,3 % 22 B +	92,7 % 23 A	0,415	Très importants			négatif
	22 D =	23,4 % 22 B +	76,6 % 23 A	0,931	Très importants			négatif
	22 C =	30,4 % 22 A +	69,6 % 22 B	0,212	Forts			négatif
B : Verres	22 AA1 =	27,5 % 22 AB +	72,5 % 22 AA2	0,497	Petits			négatif
	22 AA2 =	19,0 % 22 AB +	81,0 % 23 AA2	0,924	sauf Cr et Sr			négatif
	23 AB =	72,0 % 22 AB +	28,0 % 23 AA2	1,420				négatif
	22 AA1 =	65,7 % 22 AB +	34,3 % 23 DR	2,647				négatif
	23 AA =	66,4 % 22 AB +	33,6 % 23 DR	2,354				négatif
	23 AA =	43,0 % 22 AB +	57,0 % 23 DR	7,901				négatif
C : Verres	Parent	Roche Fille	oliv.	pyrox.	plagio.	opaq.	$\sum e^2$	
	23 AB =	73,7 % 23AA1 +	0,2 % +	8,6 % +	15,6 % +	1,9 %	0,082	
	22 AB =	69,9 % 22 AA1 +	0,1 % +	14,6 % +	11,4 % +	4,0 %	0,086	
	22 AB =	58,9 % 22 AA2 +	0,3 % +	18,0 % +	18,1 % +	4,7 %	0,352	
	23 AB =	59,8 % 23 AA2 +	0,3 % +	14,8 % +	21,5 % +	3,6 %	0,172	
	23 AA1 =	81,2 % 23 AA2 +	0,0 % +	8,4 % +	8,1 % +	2,2 %	0,194	

un réservoir de magma acide, à l'origine du déclenchement des ignimbrites suivant le processus souvent évoqué depuis les travaux de Sparks et coll. [10], pourrait être retenue. En revanche, dans le second cas, les clastes juvéniles et les verres reflèteraient la vidange rapide d'une chambre magmatique à fort gradient de composition et un autre processus de déclenchement devrait donc être envisagé.

Relations cogénétiques entre les magmas observés. — A. Roches totales. — On observe deux sortes de clastes juvéniles : 1) des clastes hétérogènes; les analyses des échardes et flammes vitreuses qui les composent (22B et 23C, fig. 4; 23C, fig. 5) révèlent la juxtaposition et la soudure de verres de compositions différentes et 2) des échantillons de composition globale intermédiaire ou acide ayant des verres sub-homogènes (23B par exemple, fig. 4). Un calcul de mélange considérant les éléments majeurs et les traces [11] donne de très bons résultats et plaide en faveur d'un mélange homogénéisé à partir des échantillons hétérogènes précédents (tableau II A, première ligne). Ce résultat est conforté par les résultats médiocres des tests de cristallisation fractionnée correspondants (non présentés).

B. Verres. — L'observation de compositions dominantes dans les verres et de lacunes entre ces compositions suggère fortement que le passage entre deux pics successifs (fig. 4) est dû à un processus de cristallisation fractionnée et non à un mélange. Tous les tests de mélanges entre, d'une part le verre le plus acide ($\text{SiO}_2 = 68,7\%$) ou les verres andésitiques acides (moyennes AA) du tableau II et d'autre part les verres basiques (moyennes AB), dans le but d'obtenir les compositions intermédiaires, n'ont pas donné de résultats satisfaisants (tableau II B). Compte tenu qu'il s'agit de phases vitreuses, donc de liquides purs, et que seulement 9 éléments sont pris en compte (majeurs sans P_2O_5), de meilleurs résultats pourraient être attendus. Les écarts sur Fe, Al et Na et parfois K sont

systématiques et importants. En revanche, les tests de cristallisation fractionnée montrent d'excellents résultats (tableau II C). Le passage entre les verres à 61-62 % et ceux à 68-69 % de SiO₂ n'a pu être clairement précisé. Les tests de mélange sont négatifs. Comme les tests de cristallisation fractionnée à l'aide des minéraux dont nous disposons se sont avérés eux aussi négatifs, avec de grands écarts sur Na, Ca et Al, nous supposons l'intervention d'un plagioclase sodique non déterminé pour expliquer ces résultats.

INTERPRÉTATION. — Les compositions moyennes des pics de la figure 4 reportées dans le tableau I traduisent donc plusieurs degrés de différenciation obtenus par cristallisation fractionnée à partir d'un même magma parent. Certains clastes juvéniles apparaissent comme le mélange plus ou moins homogénéisé de ces magmas et quelques compositions intermédiaires entre les pics, suggèrent des mélanges entre zones vitreuses contiguës d'un échantillon, mais dans leur grande majorité les clastes sont formés de fragments vitreux soudés dont les compositions recouvrent l'intervalle allant des andésites basaltiques aux dacites très siliceuses. Les maximums de fréquences dans les verres à 55-56 %, 59 % et 61-62 % SiO₂, auxquels s'ajoutent quelques analyses vers 68-69 %, sont le reflet de la vidange rapide d'une large chambre zonée régie par la cristallisation fractionnée. Aucun indice ne permet de penser que le déclenchement de ces grandes éruptions pliniennes serait dû à l'introduction de basalte dans cette chambre. Les magmas basiques étant considérés incapables de donner de telles éruptions pyroclastiques sans un facteur extérieur comme l'introduction d'eau, c'est ce dernier processus, au demeurant suggéré par le caractère hydromagmatique des dépôts basaux, qui nous apparaît comme le plus probable.

Ce travail a été soutenu financièrement par l'U.R. 1F de l'ORSTOM et par un contrat du M.A.E. Il a bénéficié de l'aide des personnels de la Mission ORSTOM de Port Vila, du Service géologique de Vanuatu, du Gouvernement local de Tanna et du Commandant et de l'équipage du *N.O. Alis*. Nous remercions Marcel Bohn et Joseph Cotten pour leur aide apportée dans l'acquisition des analyses faites respectivement à la microsonde et à la torche à plasma, ainsi que Jacques Dupont, Patrick Maillet et René Maury pour leurs commentaires avisés de la version initiale de cette Note.

Note remise le 25 mai 1992, acceptée après révision, le 24 septembre 1992.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] G. P. L. WALKER et coll., *J. Volc. and Geotherm. Res.*, 21, 1986, p. 61-78.
- [2] J. MCPHIE et coll., *Bull. of Volcanol.*, 52, 1990, p. 334-354.
- [3] S. N. WILLIAMS, *Geology*, 11, 1983, p. 211-214.
- [4] M. MONZIER et coll., *C. R. Acad. Sci. Paris*, 313, série II, 1991, p. 1319-1326.
- [5] C. ROBIN et coll., Giant tuff cone and 12 km-wide associated caldera at Ambrym volcano (Vanuatu), *J. Volc. and Geotherm. Res.*, 1992 (sous presse).
- [6] Mission à Tanna en septembre 1990 et campagne océanographique CALIS (*N.O. Alis*, ORSTOM) du 13 au 31 mai 1991.
- [7] J. N. CARNEY et A. MACFARLANE *New Hebrides Geol. Surv. Reg. Reports*, 1979, 71 p.
- [8] A. NAIRN et coll., *New Zealand Geol. Surv. Reports*, G 134, 1988, 74 p.
- [9] C. COULON et R. MAURY, *Bull. Volcanol.*, 44-4, 1981, p. 661-680.
- [10] R. S. J. SPARKS et coll., *Nature*, 267, 1977, p. 315-318.
- [11] M. J. CARR, Igpét-Mac program, Terra Softa Inc., Somerset, N.J., U.S.A., 1991.

J.-P. E., C. R. et M. M. : U.R. 1F, ORSTOM;

J.-P. E. : Centre ORSTOM, B.P. n° 70, 29280 Plouzane;

C. R. et M. M. : Centre ORSTOM, B.P. n° A5, Nouméa, Nouvelle-Calédonie.