

# Une méthode d'évaluation et de zonation des risques volcaniques à la Soufrière de Guadeloupe, Antilles Françaises

D. WESTERCAMP

*Service géologique des Antilles, B.R.G.M., BP 394, 97200 - Fort de France, Martinique, F.W.I.*

## ABSTRACT

It is shown, firstly, that evaluation and then zoning of volcanic risks depends on a large number of factors, some of which are difficult to estimate in the present state of our knowledge. It is therefore repeatedly stressed that it is necessary to continue geological studies in order to arrive at a quantification of the problems. Evaluation and then zoning of risks are based, first of all, upon the geological history of the Madeleine-Soufrière massif itself, for in the West Indies each recent volcanic structure has its own specific characteristics. Eruptions of other andesite volcanoes were, however, utilised when regional geology and its static aspect did not supply valid reference elements. Risks are arranged in a hierarchy in terms of the rough probabilities that the phenomena will occur, their types of occurrence and their effects. Particular attention is given to the problem of nuées ardentes which are especially feared in this region where the catastrophic eruption of Mt Pelée in 1902 is still clearly remembered. It is shown, *inter alia*, that the risk of nuée ardente phenomena of the 1902 Mt Pelée type is very slight for the Soufrière of Guadeloupe.

## RESUME

On montre en premier lieu que l'évaluation puis la zonation des risques volcaniques dépend d'un grand nombre de facteurs, certains étant difficilement contrôlables dans l'état actuel de nos connaissances. On insiste donc à plusieurs reprises sur la nécessité de poursuivre les études géologiques pour arriver à une quantification des problèmes. L'évaluation puis la zonation des risques sont basées en priorité sur l'histoire géologique du massif Madeleine-Soufrière, car dans les petites Antilles, chaque édifice volcanique récent a des caractéristiques

qui lui sont propres. Toutefois, on a exploité les éruptions de volcans andésitiques étrangers lorsque la géologie régionale, et son côté statique, ne livraient pas d'éléments de référence valables. On arrive à une hiérarchisation des risques en fonction de la probabilité grossière d'occurrence des phénomènes, de leur type de mise en place, et de leurs effets. On s'intéresse tout particulièrement au problème des nuées ardentes, phénomènes particulièrement craints dans ces régions, où le souvenir de l'éruption cataclysmale de la montagne Pelée en 1902 est très vivace. On montre entre autres que le risque de phénomènes de nuées ardentes type Pelée 1902 est très faible à la Soufrière de Guadeloupe.

## INTRODUCTION

Evaluer les risques potentiels d'un volcan endormi et établir un zonage des régions menacées par une reprise éventuelle de son activité, revêt une importance primordiale dans les zones peuplées et industrialisées.

Ce type de travail est réalisé systématiquement depuis de nombreuses années notamment:

- en U.R.S.S., (VLODAVETZ, 1960)
- en Indonésie, Java en particulier, (NEUMANN VAN PADANG, 1960).
- en Nouvelle-Zélande, (SEARLE, 1964).
- aux Etats-Unis, pour les volcans des Cascades Ronges (CRANDELL et MULLINEAUX, 1967; HYDE, 1970) de l'Alaska, et d'Hawaï (MCDONALD, 1958; BOLT *et al.*, 1975; MULLINEAUX et PETERSON, 1974). Et plus récemment en Italie (*cf.* BARBERI et GASPARINI, 1976).



TABLEAU 1 - Liste des principaux facteurs intervenant dans l'évaluation et la zonation des risques volcaniques.

Facteurs fixes (naturels)		<ul style="list-style-type: none"> <li>- morphologie du volcan             <ul style="list-style-type: none"> <li>. surface et raideur des pentes</li> <li>. forme et stabilité des vallées</li> <li>. découpage des cotes</li> </ul> </li> <li>- Géologie de l'édifice volcanique ; éruptions historiques</li> </ul>
Facteurs intermédiaires (socio-économiques)		<ul style="list-style-type: none"> <li>- degré de développement économique de la région</li> <li>- importance de l'implantation humaine</li> <li>- qualité des voies de communication</li> </ul>
Facteurs variables	non - volcaniques	<ul style="list-style-type: none"> <li>- fluctuation des nappes aquifères</li> <li>- conditions climatiques (vents, pluviosité)</li> <li>- modifications du relief (action de l'érosion et de l'activité humaine)</li> </ul>
	volcaniques	<ul style="list-style-type: none"> <li>- phénomènes volcaniques (cendres, coulées de lave, lahars, ...)</li> <li>. probabilité d'occurrence</li> <li>. ampleur, vitesse de mise en place</li> <li>. lieu d'ouverture de la cheminée</li> <li>. effets directs</li> <li>. effets indirects (dépendent aussi des facteurs variables non-volcaniques et fixes)</li> </ul>

leurs qu'ils se sont développés indépendamment les uns des autres à des rythmes différents.

On sait par l'observation de nombreuses éruptions historiques ou l'étude de dépôts anciens que les volcans «andésitiques» émettent des laves chimiquement très différentes selon des processus éruptifs identiques, et *vice versa*. Dans ce deuxième cas la température des produits peut être assez constante (cf MAURY *et al.*, 1974).

Ces remarques suggèrent que le comportement éruptif d'un magma «andésitique» dépend en premier lieu de sa teneur en gaz. Un des constituants majeurs des gaz magmatiques dans le volcanisme «andésitique» est l'eau. Il s'agirait essentiellement d'eau météorique (ou d'eau de mer) qui a pu gagner la profondeur en fonction de la perméabilité et de la fracturation régionale (TONANI, 1971; MCBIRNEY, 1973). Une partie de cette eau pourrait se trouver piégée lors de la mise en place à faible profondeur d'intrusions magmatiques et s'incorporer plus ou moins abondamment à elles et à différents stades de leur évolution. (cf. D. WESTERCAMP et B. MERVOYER, 1974, p. 18 à 22).

ment à elles et à différents stades de leur évolution. (cf. D. WESTERCAMP et B. MERVOYER, 1974, p. 18 à 22).

La comportement d'un volcan dépend donc étroitement de son environnement structural lithologique et géothermal qui lui confère des caractéristiques propres.

La meilleure façon d'évaluer les types de phénomènes éruptifs dont un volcan pourra être le siège dans le futur, est donc d'étudier son comportement passé, géologique et historique.

Le raisonnement statistique, basé sur les éruptions historiques de l'ensemble des volcans d'une même province structurale (TOMBLIN, 1971) ou du monde (WALKER, 1974) est complémentaire. Cependant une telle approche aboutit à des conclusions discutables lorsqu'elles sont appliquées à un volcan donné, en raison des grandes différences individuelles entre ces volcans.

Dans cette optique, deux types de documents sont nécessaires à l'évaluation des risques à la Soufrière de Guadeloupe:

- la description des éruptions historiques,

— la carte géologique détaillée du volcan complétée par des coupes stratigraphiques fines et représentatives.

### Les éruptions préhistoriques de la Soufrière (S.L.) de Guadeloupe

**Introduction** - Une esquisse géologique du massif de la Soufrière (s.l.) a été réalisée à partir des levés de terrain (en partie interprétés) de B. MERVOYER en 1973, (Fig. 1). Un complément d'étude sur le terrain a été exécuté en avril 1976 par l'auteur dans le cadre de l'intervention du Service Géologique des Antilles pendant la crise de la Soufrière.

Les observations effectuées (Fig. 2) ont été relativement ponctuelles. Des compléments d'étude seront nécessaires, principalement dans la partie est du massif. Des coupes détaillées (forages, falaises, etc.) et des études poussées au laboratoire

seront aussi indispensables pour transformer la présente esquisse en un document définitif.

**Histoire géologique du massif Madeleine-Soufrière** - La Soufrière de Guadeloupe est le sommet actif d'un vaste ensemble volcanique récent englobant la région de la Madeleine (de REYNAL, 1966; B. MERVOYER, 1974). Ce massif Madeleine-Soufrière s'est établi dans la période géologique récente (peut-être moins de 100 000 ans) à cheval sur les monts Caraïbes au Sud et sur le flanc du Matélie au Nord (carte 1).

Son édification peut se résumer en 5 stades:

1 - émission de nuées ardentes, cendres et ponces, coulées de lave au niveau des dômes tardifs Liquin et Lafitte (région sud et sud-est).

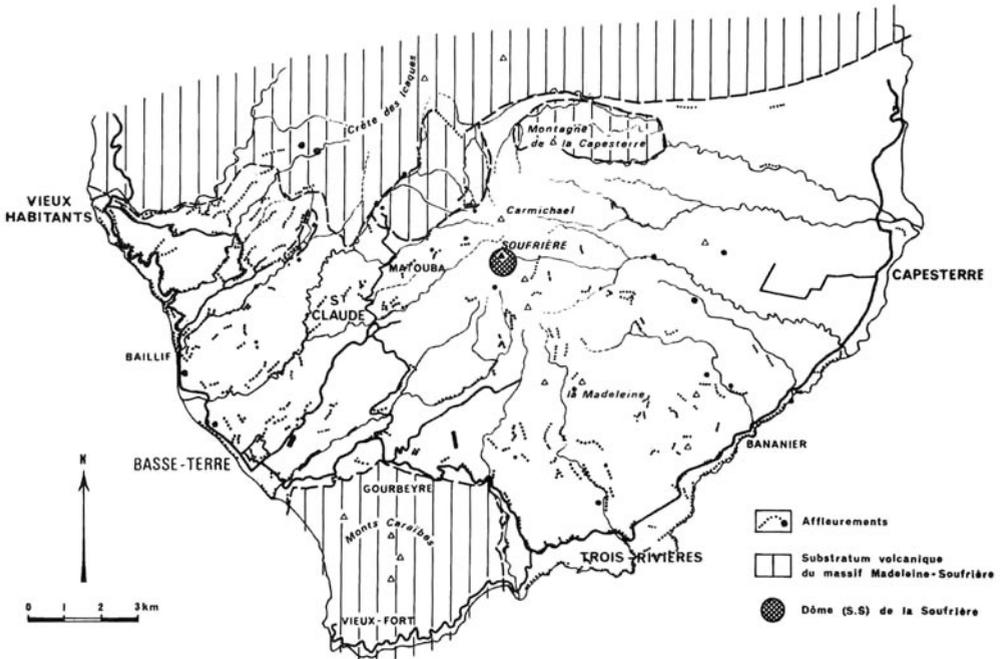


FIG. 2 - Carte des affleurements visités par B. MERVOYER, complétés par D. WESTERCAMP dans le massif Madeleine-Soufrière.

2 - 1ère phase d'activité du Carmichael qui émet vers l'Est et le Nord-Ouest des brèches scoriacées à matrice cendreuse (morne aux Barbus, Petit et Grand Sans-Toucher). Ces brèches sont localement recouvertes d'une formation ponceuse bien développée dans la région de Basse-Terre (Pintade) mais aussi au Sud du massif (Bananier et anse à la Fontaine). Elle correspondrait à une vaste éruption datée par  $C^{14}$  sur des bois carbonisés récoltés in situ à < 35 000 B.P. à Pintade (M. FEULLARD, comm. pers.).

3 - le dynamisme du massif commence à changer. Une période d'activité plus effusive se développe à grande échelle dans les secteurs nord et sud du massif.

- édification du Carmichael (*s.s.*) et de la Grande Découverte auxquels on associe les dépôts de cendres et lapilli qui recouvrent le flanc caraïbe de la Basse-Terre jusqu'à Malendure,

- coulées de lave inférieures de la Madeleine (Trois Rivières, Grande Pointe, Tabaco)

Des lahars sans bois datable, se mettent en place à la périphérie des coulées de lave. Ils résulteraient en grande partie du remaniement secondaire des zones bréchiennes meubles des coulées.

L'activité effusive continue au niveau de la Soufrière *sensu stricto* (morne Joseph, l'ensemble du Bassin Bleu, du Parnasse de la Chasse Sébastopole) et dans le secteur de la Madeleine (fond Gravois, crête à Racoon, morne Marie Galandais, Boudoute et Habitée). Une phase plus visqueuse permet la mise en place du dôme de la Madeleine, mise en place qui s'accompagne de l'émission de nuées ardentes.

Des lahars datés par  $C^{14}$  sur des bois non carbonisés à -3500 et -2800 ans B.P. (M. FEULLARD, comm. pers.) se mettent postérieurement en place.

La partie haute du massif s'édifie par empilement de coulées de lave courtes et épaisses, et dépôts de nuée ardentes (Nez Cassé, morne Amic, morne Goyavier, chute du Galion, plateau de la Grande Chasse, crête du Carbet).

Conjointement une fissure de direction E.NE-S.SW s'ouvre plus au Sud, sur la-

quelle s'alignent trois volcans monogéniques:

- le dôme du Piton l'Herminier  
- le cône pyroclastique du Gros Foucas et sa coulée de lave débordante

- le double cône des mornes Graine-Verte et Lenglet duquel l'imposante coulée de lave du plateau du Palmiste est issue.

4 - une phase d'activité explosive, limitée en puissance se produit au Sud de l'actuelle Soufrière. Les cônes pyroclastiques ponceux de l'Echelle et de la Citerne en constituent les deux principaux témoins. Des dépôts de cendres et de lapilli découverts récemment à Capestesse pourraient être liés à cette phase d'activité.

5 - construction du dôme proprement dit de la Soufrière avec émission de nuées ardentes limitées. Des dépôts de ponces proches du dôme (Savanne à Mulets et Hauts de St Claude: BRUET, 1953) ou remaniés à la périphérie du cœur du massif (Bassin Bleu) pourraient se rattacher à cet épisode. Leur âge a été évalué par  $C^{14}$ , sur des bois carbonisés associés, à 1550 ans  $\pm$  40 A.D. (DOREL *et al.*, 1973).

*Les éruptions historiques de la Soufrière de Guadeloupe* (cf. LACROIX, 1904, p. 56 à 71)

Plusieurs manifestations volcaniques ont eu lieu depuis la colonisation de la Guadeloupe en 1635, qui tranchent sur le régime fumerollien connu «depuis toujours» autour du sommet. Les descriptions des témoins, scientifiques ou non, suggèrent qu'il s'agit à chaque fois d'une série plus ou moins importante d'éruptions phréatiques précédées et accompagnées de secousses sismiques, à l'instar de la crise sismo-volcanique de 1976.

- en 1696, le P. LABAT parle de tourbillons intermittents de fumée noire, épaisse et sulfurée s'échappant d'une fente affectant le sommet du dôme. Sa description évoque l'activité qu'avait le puits Tarissan en août 1976 entre les explosions phréatiques proprement dites. Ceci suggère qu'à cette époque la Soufrière de Guadeloupe n'était pas en régime fumerollien

«normal» et venait peut-être d'être le siège d'une éruption phréatique comparable à celles qui se sont produites ultérieurement.

— la première manifestation de surface importante date de 1797. Plusieurs explosions phréatiques ont lieu entre le 29 septembre et le 2 octobre, l'activité se poursuit à un rythme ralenti durant l'hiver jusqu'à l'explosion du 26 avril 1798.

Cette explosion provoque un effondrement à froid d'une partie du dôme qui glisse dans les hauts de plusieurs rivières, interrompant leurs cours. Cet événement unique de faible ampleur, connu sous le nom «d'éboulement Faujas», s'apparente au lahars du 8 juillet 1976 qui a interrompu le cours de la rivière du Carbet. L'interprétation prudente de LACROIX (1904), qui voit dans cet «éboulement» l'émission d'une petite nuée ardente, paraît peu vraisemblable.

— 1809: éruption phréatique de faible importance, avec projection de blocs, cendres et eau subordonnée à une forte activité fumerolienne.

— la deuxième manifestation de surface importante commence le 3 décembre 1837, par une explosion phréatique violente accompagnée de sourds grondements. Une nouvelle fissure est créée dans le dôme qui crache ensuite continuellement des «cendres» et de la vapeur d'eau sulfureuse. Le 12 février 1838 une éruption violente de boue se produit provoquant un petit lahars dans la direction de l'éboulement Faujas. Des tremblements de terre étaient ressentis nombreux dans l'ensemble de la Basse-Terre. Ils laissent supposer à l'instar de la crise sismo-volcanique de 1976, une activité sismique globale très soutenue, en parallèle avec les manifestations de surface.

— plusieurs explosions phréatiques se produisent entre les 20 et 27 octobre 1956 qui émettent «cendres» et vapeur d'eau.

— la crise sismo-volcanique de 1976 n'est pas sans rappeler les aspects de celles ayant eu lieu dans le passé.

— importante crise sismique, comme en 1837,

— éruptions phréatiques violentes avec émission de matériaux volcaniques,

polygéniques plus ou moins hydrothermalisés, arrachés au conduit éruptif (comme en 1797, 1837 et 1956),

— production de lahars primaires (comme en 1797).

#### *Commentaire relatif à l'histoire volcanique du massif Madeleine-Soufrière*

Dans l'état actuel de nos connaissances, l'histoire volcanique de la Soufrière de Guadeloupe montre:

— que les événements explosifs les plus violents (brèches du Carmichaël, ponces de Basse-Terre), ont eu lieu au début de la construction du massif Madeleine-Soufrière.

— que les phases volcaniques effusives et les phénomènes de remaniement qui les affectent sont dominants dans l'édification de ce massif.

— qu'aucun dépôt récent fiable à un phénomène de nuées ardentes<sup>(1)</sup> paroxysmales n'est connu à la périphérie du massif. La rareté des bois carbonisés, fréquents habituellement à la base des coulées pyroclastiques de grande ampleur et dans les dépôts du nuage volcanique qui accompagne leur mise en place, est significatif à ce point de vue. Il repose le problème de l'origine des brèches pyroclastiques et des lahars, encore récemment liés à la mise en place et au remaniement de nuées ardentes péleennes (MAURY *et al.*, 1974).

— toutes les éruptions historiques (depuis 1635) sont de type phréatique, précédées et accompagnées de crises sismiques importantes.

#### *Choix des phénomènes à envisager et estimation des probabilités à leur assigner*

On ne reconnaît pas, dans l'étude actuelle de la Soufrière, de cycle répétitif ou de schéma évolutif net, qui aurait permis de prévoir la phase ultérieure.

(1) La question des différents types de nuées ardentes est envisagée en détail au paragraphe «Nuées ardentes» (p. 440)

On est donc réduit à considérer que tout phénomène volcanique ayant eu lieu dans l'histoire du massif Madeleine-Soufrière peut survenir à nouveau. Plus il a eu lieu récemment et abondamment, plus il a de chance de se reproduire, à la condition essentielle que le contexte géothermal du volcan n'ait pas été modifié entre temps de façon sensible.

De l'ensemble de ces remarques appliquées à l'histoire volcanique du massif Madeleine-Soufrière, on déduit:

— que toute modification de l'équilibre tectonique du massif, lié ou non à une remontée de magma en profondeur, est susceptible de provoquer une éruption phréatique en surface. *A fortiori* on peut supposer que les changements internes du volcan conduisant à une éruption magmatique seront précédés inévitablement des phénomènes phréatiques.

— que les phénomènes effusifs visqueux (coulées de lave et dômes) et la construction de cônes de pyroclastites sont plus probables que les phénomènes explosifs paroxysmaux.

#### *Hierarchisation des risques en fonction des facteurs volcaniques variables*

De deux phénomènes volcaniques ayant la même possibilité d'occurrence, le plus dangereux est de toute évidence celui qui:

— menace la plus grande surface géographique,

— apparaît le plus brusquement, sans signes précurseurs nets, ou interprétables comme tels dans l'état actuel de la prévision,

— se développe le plus rapidement, — a les effets sur les population et infrastructures économiques les plus destructeurs.

#### *Définition du risque en fonction de l'ensemble des facteurs*

Il se trouve qu'à la Soufrière, les phénomènes les plus probables n'entraînent que des risques faibles, et que les phénomènes cataclysmiques sont peu probables; mais il faut, dans la perspective de la protection

civile, envisager l'ensemble de ces éventualités.

## ZONATION DES RISQUES

### *Introduction*

La zonation des risques consiste à délimiter les régions menacées par les phénomènes volcaniques, directs ou indirects, retenus.

Elle doit tenir compte des facteurs suivants:

- le type de mise en place de chaque phénomène envisagé,
- l'ampleur maximale qu'on peut attribuer à chacun d'eux,
- l'intervention du relief,
- le rôle des conditions atmosphériques,
- l'emplacement du cratère futur.

### *Emplacement du cratère futur*

L'hypothèse la plus probable dans le cas de la Soufrière et des stratovolcans en général, consiste à situer l'ouverture de la cheminée au coeur du volcan.

Le cratère s'ouvrirait donc sur la fissure hypothétique majeure qui a déjà émis le Carmichaël, la Madeleine, la Citerne, l'Échelle et le dôme *s.s.* de la Soufrière (*cf.* carte 1), à proximité de ce dernier. Selon que l'ouverture aura lieu dans le dôme (cas des éruptions phréatiques historiques), à sa périphérie (schéma de la montagne Pelée et du Mèrapi), ou dans la zone des fumerolles (opinion de L. BARRABE), les secteurs menacés en priorité ne seront pas les mêmes. En effet, les reliefs topographiques proches jouent le rôle d'écran vis-à-vis des phénomènes explosifs, ou d'obstacle dans le cas des phénomènes effusifs, plus ou moins efficaces selon leur importance (Fig. 3).

### *Remarques générales sur l'ampleur maximale des phénomènes à zoner*

Pour chaque phénomène on évaluera l'ampleur maximale à craindre en admet-

tant qu'elle peut être du même ordre que pour les plus fortes manifestations de même type survenues dans le passé. Cela conduit pour les phénomènes effusifs ou les remaniements secondaires, à délimiter les zones où se rencontrent de tels produits, issus de la Soufrière. Ceci ne s'applique pas aux phénomènes explosifs provoquant une onde de choc, qui ne laissent pas de traces dans la géologie. Pour les lahars dont l'amplitude dépend du volume d'eau et de cendres disponibles (facteurs variables non géologiques) une telle dé-

marche n'est possible qu'en cas d'observations historiques.

Dans le cas contraire, on doit chercher à travers des exemples bien connus d'éruptions de volcans andésitiques, où les phénomènes que l'on suppose possibles à la Soufrière ont eu lieu, les arguments nécessaires à la zonation. La recherche de lois empiriques pour les phénomènes contrôlés par des facteurs indépendants des dynamismes éruptifs, est particulièrement intéressante en raison de leur caractère généralisable.

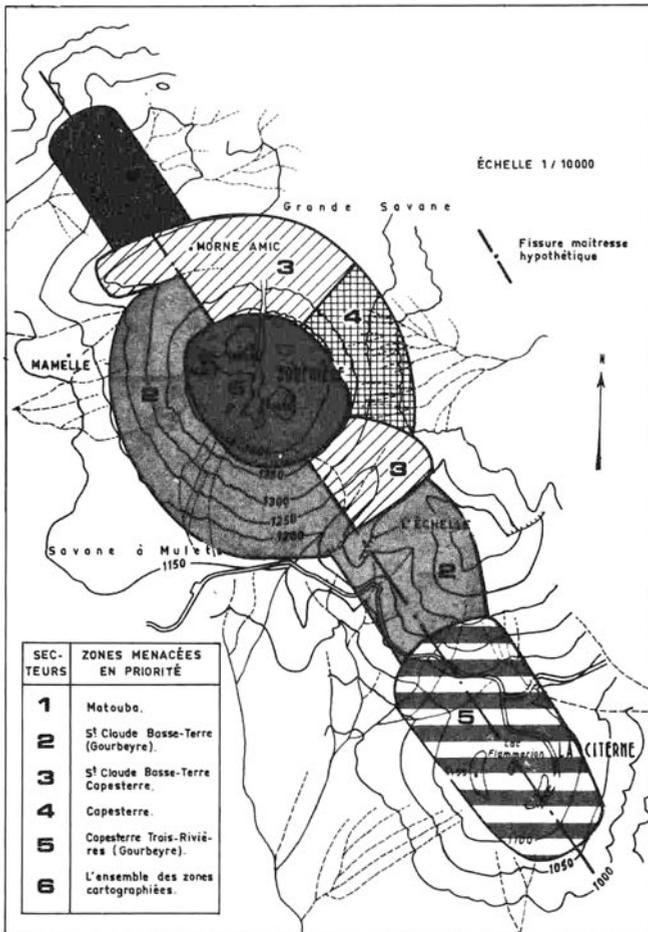


FIG. 3 - Correspondance probable entre les zones menacées et le secteur d'ouverture de la cheminée volcanique.

### Eruptions phréatiques

Lors de toutes les éruptions historiques de ce type, les phénomènes ont été de courte durée (l'explosion dure quelques dizaines de minutes) et de faible ampleur (projection de blocs à quelques centaines de mètres de la fissure mère), le panache de «cendres» et de vapeur qui se développe au-dessus du cratère (3 000 m au-dessus du sommet pour l'éruption du 22 sept. 76: M. FEUILLARD, comm. pers.) est rabattu sur les régions sous le vent, et dépose une pellicule de quelques centimètres à quelques millimètres d'épaisseur d'une poussière grise.

Cette poussière est entièrement constituée de matériaux anciens arrachés au substratum du volcan (MARINELLI, 1976). On reconnaît dans la «cendre» du 30 août 76, des fragments d'andésite à orthopyroxène dominant sur la clinopyroxène et l'olivine. Certaines mésostases contiennent parfois un peu de verre frais, ce qui est tout à fait habituel dans les laves connues par ailleurs dans le massif Madeleine-Soufrière. Une grande proportion des fragments est argilisée, ou silicifiée, jusqu'à effacer complètement les textures cristallines anciennes; la pyrite est abondante dans ces fragments et les plages de zéolites ne sont pas rares.

La fraction fine est essentiellement constituée de cristobalite accompagnée de pyrite, plagioclase, kaolinite, smectite et illite.

Plusieurs modèles explicatifs des éruptions phréatiques ont été proposés (GOGUEL, 1953 et 1975; FYTIKAS et MARINELLI, 1976). A la Soufrière de Guadeloupe on retient le modèle tectonique en raison de l'association étroite: crise sismique - éruptions phréatiques. Une remontée de magma concomitante est possible, ses effets modificateurs sur l'environnement géothermal s'ajoutant à ceux provoqués par la crise sismique. La fracturation de la partie profonde du volcan puis provoque la remontée rapide d'aquifères profonds chauds qui perturbent l'équilibre superficiel pression lithostatique - pression de la vapeur d'eau à cette profondeur (ARAMAKI *et al.*, 1976). La fracturation plus superficielle du cône, peut par ailleurs agrandir la cellule convective de l'eau surchauffée et lui permettre de gagner une zone superficielle où la pression de la vapeur devient supérieure à la pression lithostatique.

On ne peut déterminer d'une manière simple la profondeur de l'explosion, dont les produits s'échappent par une fissure, la cohésion du dôme empêchant la formation d'un cratère (on a proposé pour un cratère une relation liant la profondeur du

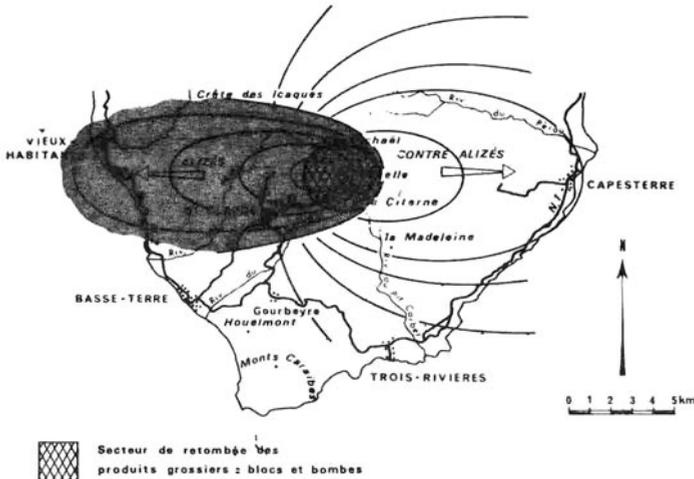


FIG. 4 - Répartition des produits volcaniques consécutifs aux explosions phréatiques et aux émissions de cendres et lapilli sous l'action des alizés et contre-alizés.

foyer au diamètre, qui ne peut être appliquée ici). La connaissance précise du profil thermique en profondeur serait précieuse ainsi que celle des matériaux projetés.

Compte tenu de l'ensemble des éruptions phréatiques historiques, il ne semble pas que les conditions soient réunies pour le moment à la production d'éruptions phréatiques de grande ampleur. Leur effets sont assimilés à ceux d'éruptions limitées à cheminée ouverte (cendres, lapilli et bombes) ou à de petites nuées ardentes verticales. Un cercle de 2 Km de rayon autour du dôme pourrait limiter la zone dangereuse (ARAMAKI *et al.*, 1976) (Fig. 4).

### Coulées de lave et dômes

Les coulées de lave dans le massif Madeleine-Soufrière sont dans la majorité des cas des masses de lave massive, ceinturées de blocs, de quelques centaines à quelques kilomètres de long, de largeur variable selon le substratum et d'une épaisseur de 50 à 100 m.

Ce type de coulées, très visqueuses, avance de quelques mètres par jour, voire moins. L'étude du rapport - longueur de la coulée/altitude du point de sortie (WALKER, 1974) - montre qu'elles sont d'autant plus courtes qu'elles ont un point de sortie élevé, et qu'elles sont récentes (Fig. 5). On en déduit que les coulées de lave

issues du sommet ne devraient pas s'étendre à plus de 3 km de distance du cratère.

L'action directe des dômes est encore plus limitée. Les phénomènes secondaires d'avalanches incandescentes des dômes et des fronts de coulées, probables en raison de la morphologie actuelle du volcan et de l'épaisseur des masses de lave en mouvement, sont évoqués dans le paragraphe consacré aux nuées ardentes (*s.l.*).

### Nuées ardentes (*s.l.*)

Introduction - Les deux éruptions catastrophiques de la Soufrière de St Vincent et de la montagne Pelée en 1902 rendent l'approche objective du problème des nuées ardentes aux Antilles difficile. On a tendance à craindre en effet, que toute éruption volcanique dans cette région ne débouche irrésistiblement sur des phénomènes paroxysmaux de ce type. Cette crainte est d'autant plus vive, qu'on ne sait pas, dans l'état actuel de nos connaissances prévoir leur arrivée par les méthodes de surveillance géophysiques et géochimiques. On sait toutefois que le développement d'une éruption volcanique en région d'arc insulaire ou de marge continentale, ne conduit pas inévitablement à la production de nuées ardentes (*cf.* Tableau 2). Encore une fois cela dépend du volcan lui-même.

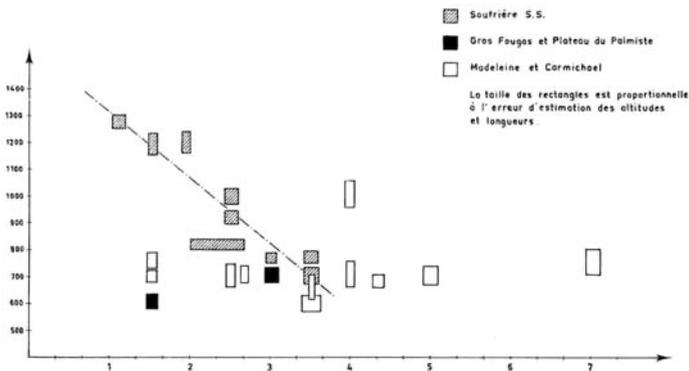


FIG. 5 - Relations altitude d'émission/longueur, pour les coulées de lave du massif Madeleine-Soufrière.

TABLEAU 2 - Pourcentage d'éruptions historiques «à nuées ardentes» pour quelques volcans d'arc insulaire et de marge continentale.

Nom du volcan	Nombre total d'éruptions historiques*	Nombre d'éruptions ayant produit des nuées ardentes*	Rapport de fréquence en %	Chimie de la lave
MÉRAPI (Java)	33 (de 1000 à 1872)	10	30 %	Basalte
	17 (de 1872 à 1949)	6	35 %	Andésite
SAKURA JIMA (Japon)	< 40 (depuis 708)	1 (1939)	2,5 %	Andésite
ASAMA (Japon)	< 50	2	4 %	Andésite
USU (Japon)	6	1	16 %	Dacite
COLIMA (Mexique)	10	2	25 %	Andésite
MONTAGNE - PELÉE (Martinique)	4	2	50 %	Andésite
SANTA-MARIA (Guatemala)	5	2	40 %	Andésite
FUEGO (Guatemala)	< 20 (de 1799 à 1957)	1 (1932)	5 %	Andésite

\* d'après le catalogue of the active volcanoes in the world (Roma, int. Ass. volc.)

Les différents types de nuées ardentes: généralités - La description du phénomène de nuées ardentes dans la littérature (ANDERSON et FLETT, 1903; LACROIX, 1904; PERRET, 1935; MOORE et MELSON, 1969, etc.) suggère plusieurs catégories de nuées ardentes, d'origine et de violence variable, associées (J. KIENLE, comm. pers.) ou non au cours de la même phase éruptive. Plusieurs classifications dynamiques du phénomène ont été proposées (LACROIX, 1930; NEUMANN VAN PADANG, 1933; COTTON, 1944, MC GREGOR, 1952) dont celle en trois types - Mérapî - St Vincent - Pelée (ESCHER, 1933; MC DONALD, 1972) qui est préférée ici (Fig. 6).

Les dépôts ont aussi des caractéristiques distinctives (MC GREGOR, 1952) qu'on commence à reconnaître sans ambiguïté sur le terrain (CRANDELL et MULLINEAUX, 1973; FRANCIS *et al.*, 1974; HYDE, 1975; ROOBOL et SMITH, 1976), (*cf.* Tableau 3).

La prévision du risque de nuées ardentes - LACROIX (1904) et PERRET (1935) signalent que des phénomènes lumineux ont eu lieu au cratère avant les premières nuées ardentes paroxysmales des éruptions de 1902 et 1929 à la montagne Pelée. Il semble bien établi que ces lueurs sont liées à la présence d'un dôme embryonnaire dans le cratère (MC GREGOR, 1952) qui était assez haut pour être vu à travers «l'échancrure» du cratère de la montagne Pelée la veille de la catastrophe du 8 mai 1902 (LACROIX, 1904). Sur le plan volcanologique le stade nuée ardente paroxysmale correspondra à l'arrivée en surface de la colonne magmatique, situation qui créerait les conditions à un nouveau type de dégazage du magma. On aurait là un facteur de prévision des nuées ardentes paroxysmales (si elles doivent avoir lieu) précieux dans l'hypothèse où le sommet du volcan est observable dans les bonnes conditions.

La prévision du risque de nuées arden-

tes Mériapi (*s.l.*) est différent puisque leur production est intrinsèquement lié à la mise en place préalable de masses importantes de laves incandescentes (coulées de lave et dômes).

Les dépôts de nuées ardentes à la Soufrière de Guadeloupe - Le faible pourcentage de dépôts de nuées ardentes (*s.l.*) dans le massif Madeleine-Soufrière (inférieur à 30% en volume, parties remaniées par les lahars comprises) indiquerait comme nous l'avons vu précédemment que

la probabilité d'une éruption avec production de nuées ardentes n'est pas à la Soufrière de Guadeloupe du même ordre de grandeur qu'à la montagne Pelée où ces produits atteignent 90% en volume.

Le faible pourcentage de dépôts primaires, et l'absence d'études détaillées des affleurements ne permettent pas à l'heure actuelle de faire vraiment la part de ce qui revient à tel type, ou à tel autre, ou d'avoir une idée précise de leur répartition géographique.

On peut toutefois faire les remarques suivantes:

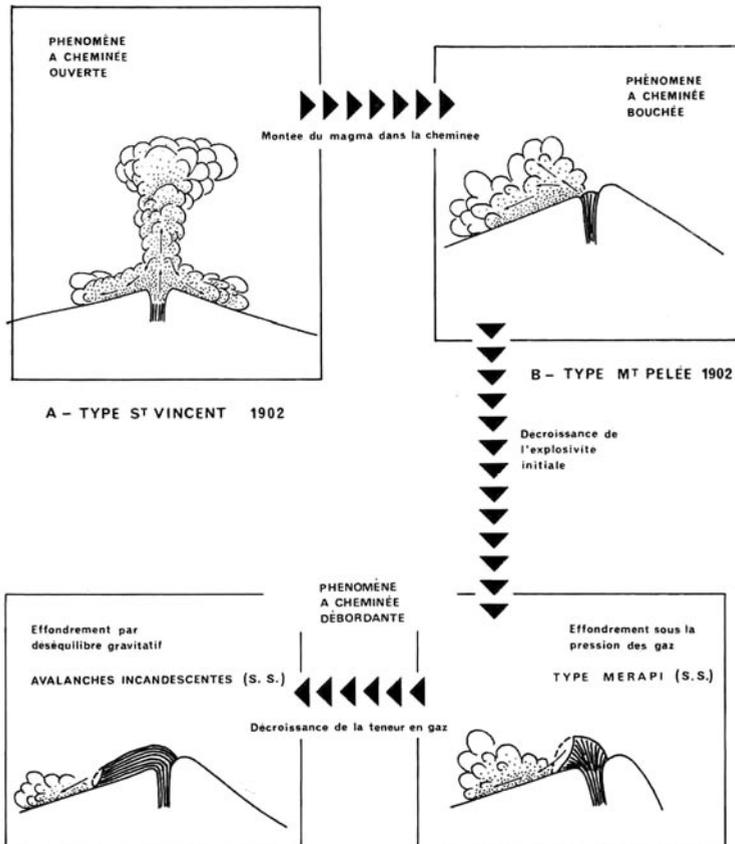


FIG. 6 - Les principaux types de nuées ardentes.

TABLEAU 3 - Quelques caractères distinctifs des différents types de nuées ardentes.

	Caractéristique des dépôts primaires grossiers	Caractéristiques physiques				
		Dynamisme	Effet de soufle	Vitesse	Bruits	
Pelée 1902	<ul style="list-style-type: none"> <li>grande richesse en cendres</li> <li>présence de bois carbonisés</li> <li>texture scoriacée à ponceuse des blocs</li> <li>fissures verticales de dégazage (élimination des cendres).</li> </ul>	phénomène explosif oblique ou horizontal à cheminée bouchée	très important	50 à 100 m/s	explosion	
St Vincent 1902	<ul style="list-style-type: none"> <li>texture massive des blocs</li> <li>absence de gros blocs (sup. à 1 m de diamètre).</li> <li>présence de bombes et scories grossières à surface oxydée.</li> <li>présence de bois carbonisés.</li> </ul>	phénomène explosif vertical à cheminée ouverte.	variable	10 à 60 m/s	explosion	
Méropi (S.S.)  Avalanches incohesives	<ul style="list-style-type: none"> <li>texture massive des blocs</li> <li>présence de blocs énormes à prismation radiale grossière perpendiculaire aux épontes</li> </ul>	effondrement de masses de lave	pression des gaz ↓ instabilité gravitative.	faible ↓ nul	30 m/s ↓ 10 m/s	silencieux ↓ "roulement" sourd.

— les blocs de lave de brèches pyroclastiques remaniées ou non, sont généralement peu scoriacés. Certains présentent des prismations normales à leur bordure. L'association fréquente de ces dépôts avec des coulées de lave et des dômes importants incline à penser qu'ils résultent en grande partie de nuées ardentes de type Méropi (*s.l.*).

— On ne connaît pas de dépôts primaires de nuées ardentes loin du cratère (bordure de mer au niveau de Basse-Terre et de Capesterre) alors qu'y subsistent abondamment et bien conservés des dépôts meubles de coulées ponceuses (carrère Pintade de Basse-Terre par exemple). Ceci indique que si des nuées ardentes de type Pelée 1902 ont eu lieu, elles ont été, au pire, peu abondantes.

— Les dépôts de brèche d'explosions reliables à l'activité précoce du Carmichaël paraissent limités à sa périphéries. Ils pourraient résulter de l'émission de nuées ardentes de type St Vincent; c'est tout ce que l'on peut dire actuellement.

**Zonation des risques dus aux nuées ardentes de type St Vincent** - La zonation des risques dus aux nuées ardentes proxymales de

type St Vincent dépend exclusivement de l'explosion initiale verticale, facteur non contrôlable.

L'étude géologique de la Soufrière de Guadeloupe indique seulement pour l'instant, qu'il est peu probable que des produits bréchiques massifs de ce type aient atteints Basse-Terre.

Que ce soit au Mt Kelud (Java) ou à la Soufrière de St Vincent, les dégâts occasionnés ont été sérieux jusqu'à 7 km du cratère. C'est l'ordre de grandeur que l'on peut retenir provisoirement en cas d'éruption de ce type à la Soufrière de Guadeloupe.

Les retombées de nuées ardentes verticales laissent des portions étroites de terrain intactes entre des secteurs complètement détruits (éruptions du Papan-daian en 1772 et du Semerou en 1885, Java; d'après VERBECK et FENNEMA, 1896 - cité par LACROIX, 1904, p. 367). On en conclut que les nuées ardentes de ce type produisent peu d'effets de soufle (il y a probablement des gaz toxiques chauds) et que seuls leurs dépôts sont menaçants pour les habitations.

Au-delà du cercle de 7 km, la retombée sur un large secteur du nuage de cendres et graviers accompagnateurs, est considéré

plus comme une nuisance pour les populations que comme présentant un danger mortel.

Zonation des risques dus aux nuées ardentes de type Pelée 1902, et aux coulées de ponces - Ces deux phénomènes volcaniques, bien qu'assez différents au niveau du mécanisme dynamique, sont traités ensemble car ils menacent plus ou moins les mêmes zones.

Leur caractéristique commune est d'être de moins en moins assujettis au relief au fur et à mesure qu'on se rapproche du lieu d'émission: les nuées ardentes de type Pelée 1902 en raison d'une expulsion initiale dirigée, les coulées de ponces à cause des masses énormes émises (100 à 1000 fois plus volumineuses que celles des nuées ardentes péléennes) et de leur grande mobilité (expansion des gaz).

Ces deux phénomènes menacent l'ensemble des zones du massif qui ne sont

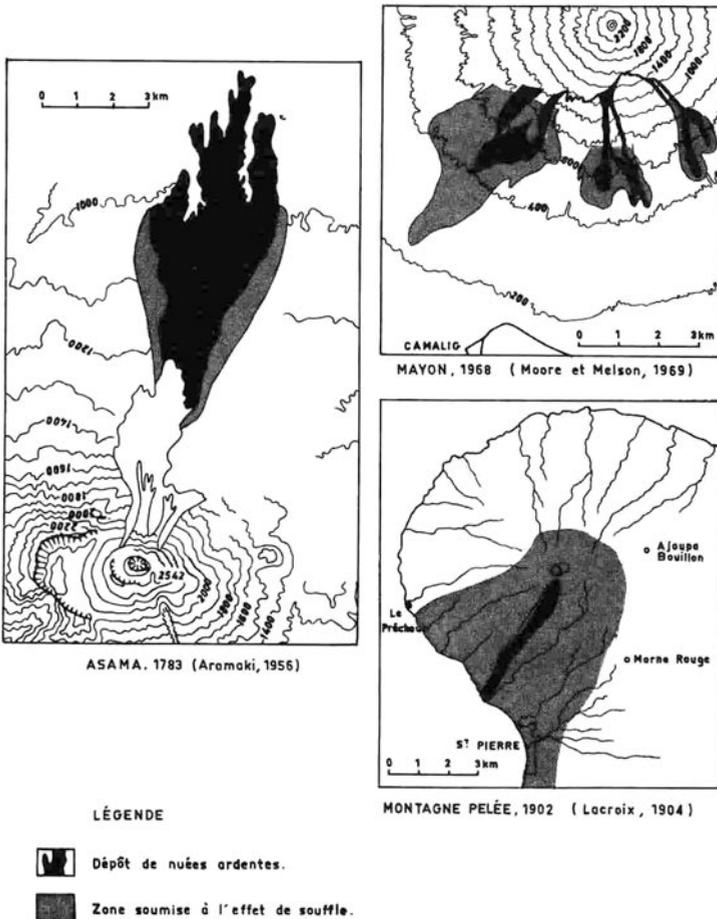


FIG. 7 - Dépôts et zones soumises à l'effet de souffle des nuées ardentes pour quelques volcans d'arc insulaire.

pas protégées par des reliefs importants:

— les coulées de ponces puisqu'on retrouve en abondance des affleurements en bordure de mer,

— les nuées ardentes par comparaison avec la tragédie de St Pierre de Martinique en 1902 puisque le volcan lui-même ne donne pas d'indication à ce sujet.

La mise en place des nuées ardentes de type Pelée 1902, provoque un déplacement de l'atmosphère environnante en raison de la très forte vitesse initiale impulsée au mélange de blocs, cendres et gaz. Cette «onde de choc» peut être destructrice bien au-delà du dépôt de la brèche proprement dite (Fig. 7). On sait toutefois que le relief est un écran efficace à son action et c'est en fonction de ce facteur que la zonation des secteurs menacés par l'effet de souffle, a été établie.

En raison du caractère non contrôlable

du facteur «explosion initiale» les limites sont toutefois plus indicatives qu'autre chose (Fig. 8).

La mise en place d'une coulée de ponces et d'une nuée ardente péleenne s'accompagne d'un vaste nuage de gaz, cendres (et graviers) qui, contrairement à la brèche proprement dite, n'est pas sensible au relief, mais au vent. L'action de ce nuage dense est beaucoup plus dangereuse pour les populations et les installations, que celle des cendres et lapilli émis par explosion «à cheminée ouverte» au cratère, en raison des plus fortes températures de dépôt (350 à 400°C: MAURY *et al.*, 1972) et des gaz toxiques.

Les régions sous le vent sont les seules réellement menacées par ce phénomène. Statistiquement il met en danger pratiquement l'ensemble du massif Madeleine-Soufrière.

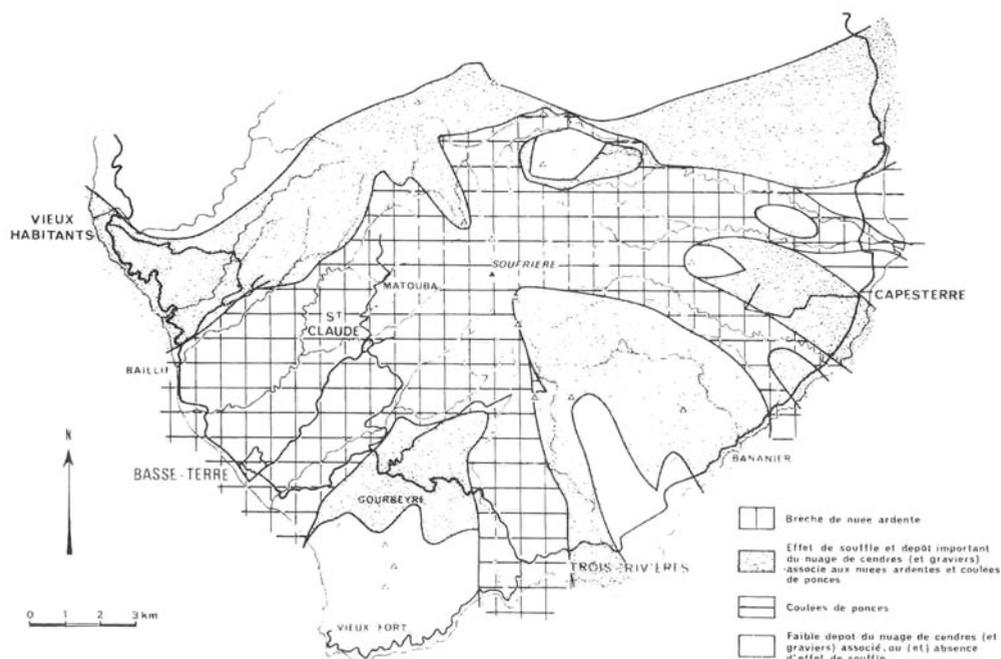


FIG. 8 - Zonation des dépôts et des zones soumises à l'effet de souffle des nuées ardentes de type Pelée 1902 et des coulées de ponces.

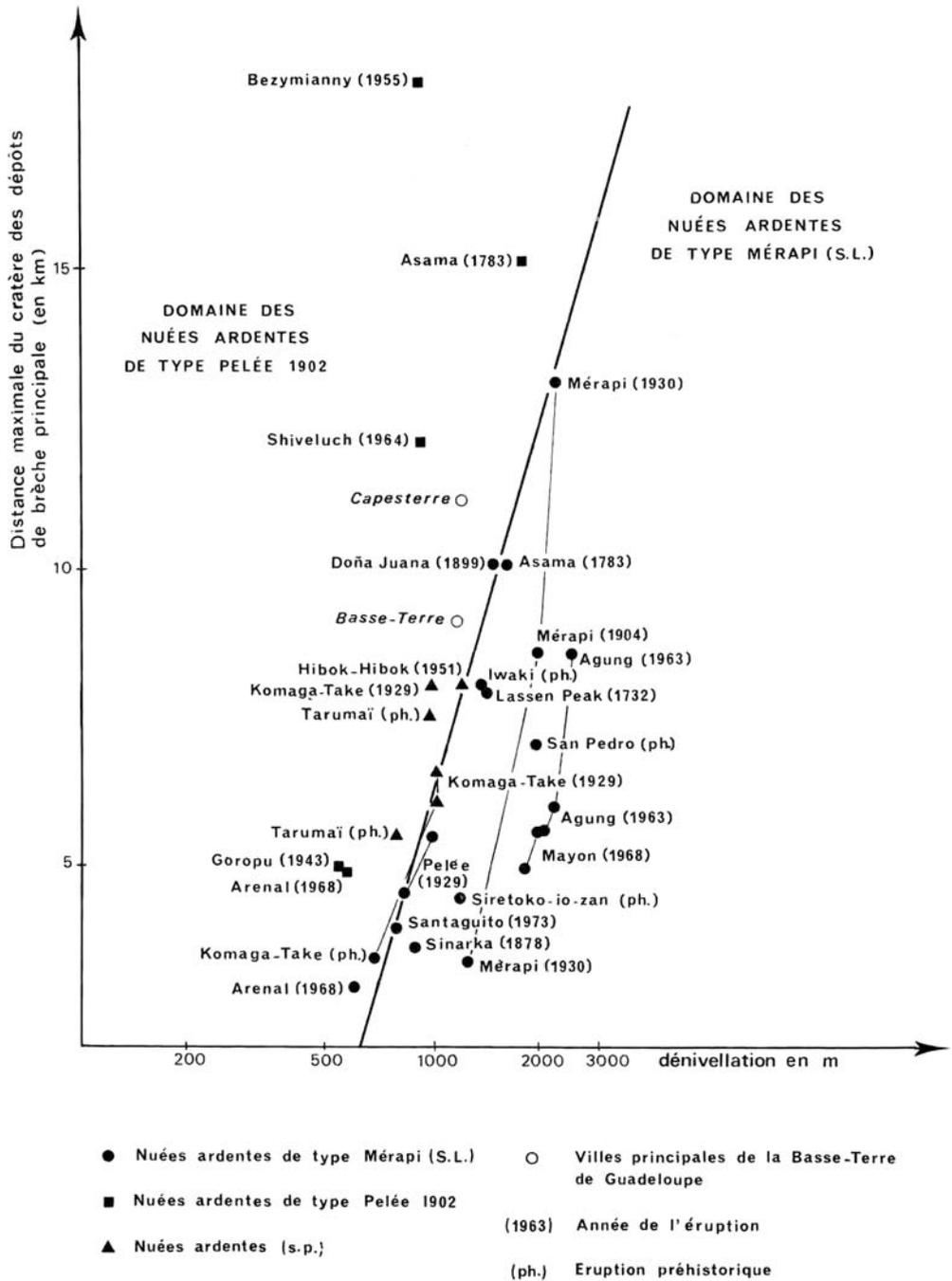


FIG. 9 - Relation dénivellation/distance parcourue par les nuées ardentes (s.l.).

Zonation des risques dus aux nuées ardentes de type Mérapî: avalanches incandescentes de dômes et de front de coulées - Les nuées ardentes de type Mérapî et les avalanches incandescentes de dômes et de front de coulées ont respectivement peu et pas d'énergie cinétique de départ.

Soumises avant tout à la force de gravité, la distance qu'elles parcourent dépend essentiellement de la dénivellation. Les volcans qui sont le siège de ces phénomènes se caractérisent sur la plan topographique par une décroissance régulière des pentes, du sommet à la base, selon un profil concave. On peut donc espérer, en raison du caractère universel du facteur principal, trouver une relation générale valable pour tous les volcans «andésitiques».

En effet à partir des données exploitables relevées dans la littérature, les nuées ardentes de type Mérapî et autres avalanches incandescentes sont séparées des nuées ardentes paroxysmales par une droite dans un diagramme:

distance parcourue par la brèche principale/log. dénivellation (Fig. 9).

Cette droite délimite donc deux secteurs:

— celui situé entre la droite et l'axe des ordonnées - distance, caractérise les nuées ardentes à explosion initiale dirigée,

— celui compris entre la droite et l'axe des abscisses - dénivellation, groupe les nuées ardentes et avalanches incandescentes qui ont été gênées dans leur progression (colline, coude de rivière, etc.) ou qui, trop pauvres en cendres et gaz, «glissaient» sur le substratum au lieu de «rouler» (PERRET, 1935).

Ce diagramme aide à évaluer:

— le type de nuées ardentes qui est à l'origine de dépôts préhistoriques,

— les risques encourus par l'ensemble des villes et bourgades situées sur les flancs d'un volcan actif. Par exemple, pour la Guadeloupe, on en déduit que les villes de Capesterre et de Basse-Terre sont à l'abri du dépôt de la brèche principale du type Mérapî. La deuxième étant toutefois

suffisamment proche de cette droite pour être très menacée par l'effet de souffle et les retombées du nuage de cendres et graviers associé.

Il permet de réaliser une zonation fondée sur un critère contrôlé du risque majeur, en traçant la limite sur la carte topographique point par point, chaque point appartenant à la droite (Fig. 10).

#### *Cendres, lapilli et lahars*

Effets directs des cendres et lapilli - La dernière éruption magmatique connue, rapportée au XVI<sup>e</sup> siècle par datation absolue au C<sup>14</sup> a émis de grandes quantités de cendres et de lapilli. Dans le secteur NW de St-Claude elles se seraient accumulées sur une dizaine de mètres (BRUET, 1953). L'étude des dépôts consécutifs à l'activité du cône pyroclastique de la Citerne, et du Carmichaël, révèle que des bombes volcaniques de plusieurs kilogrammes sont confinées à proximité immédiate de la bouche éruptive. Les éléments fins sont sensibles aux alizés, fréquents dans la région et aux contre-alizés. Ils se déposeront donc en bandes d'autant plus étroites que les vents seront violents (cf. Fig. 4). L'émission même très abondante de cendres ne présente pas de danger direct pour les populations. Leur long trajet dans l'air assure un refroidissement rapide et les incendies ne sont pas à craindre. Il convient seulement de prendre des précautions pour éviter la détérioration des habitations, des voies communications, des stocks d'eau potable, etc.

Les effets secondaires sont, en revanche, beaucoup plus dangereux. L'accumulation de ces cendres sur les pentes déboisées du volcan proches du sommet peut créer les conditions au déclenchement de lahars dévastateurs.

Lahars: Généralités - Les lahars résultent de la mobilisation par des eaux, des dépôts antérieurs de brèches meubles diverses (dépôts de nuées ardentes, s.l., brèches de coulées, ponces, éboulis instables, alluvions). Ils empruntent les

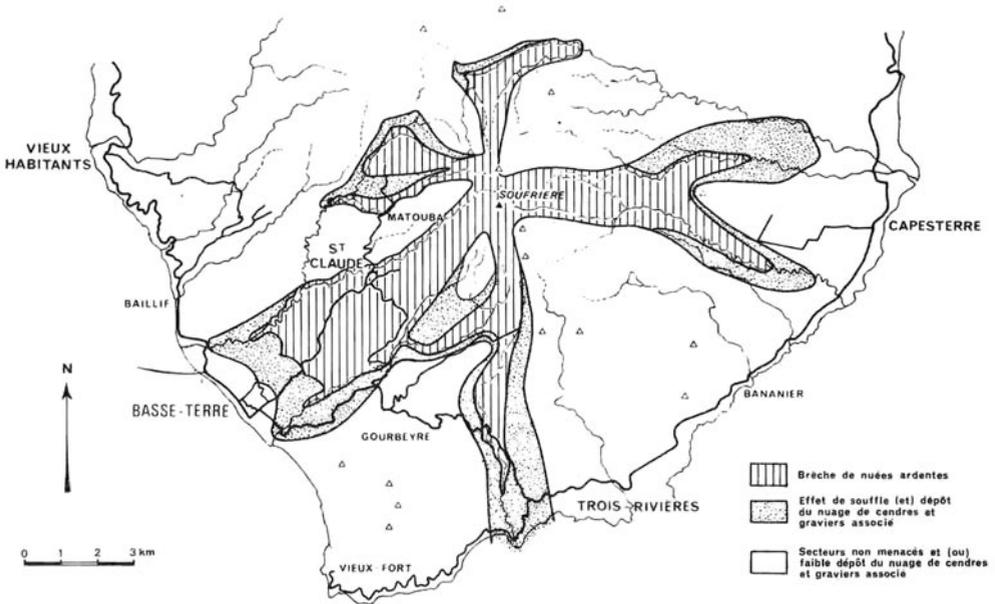


FIG. 10 - Zonation des dépôts et des zones soumises à l'effet du souffle des nuées ardentes de type Mérapî (s.l.).

vallées existantes, arrachant et emportant tout sur leur passage. Quand les vallées s'élargissent et deviennent moins encaissées au niveau des plaines côtières ils débordent les rives et ravagent ces régions particulièrement peuplées. Leur brusque arrivée en mer peut occasionner, comme les nuées ardentes, de petits raz de marée d'une amplitude maximale de 4 à 5 m, qui mettent en danger bateaux, installations portuaires, habitations côtières, etc. En Basse-Terre de Guadeloupe quelques zones étroites sont concernées par ce phénomène indirect.

A la Soufrière de Guadeloupe, les lahars peuvent se produire par:

- explosion de vapeur au sommet; c'est l'exemple de l'éboulement Faujas lors de l'éruption phréatique de 1797.
- secousses sismiques très superficielles qui décollent des terrains gorgés d'eau.
- altérations de vastes pentes rocheuses en argile mouvante, sous l'action des fumerolles.

- «déversement» de la nappe phréatique par glissement des terrains encaissant, dans le haut des vallées.

- rupture de barrage des lacs naturels perchés.

- glissement à la suite de pluies abondantes des dépôts de cendres, lapilli, ponces, accumulés sur des pentes déboisées.

Zonation des lahars consécutifs aux dépôts de cendres et lapilli - Compte tenu de la morphologie du volcan, des éruptions historiques et des risques très probables d'émission abondante de cendres et lapilli en cas d'éruption magmatique à la Soufrière de Guadeloupe, c'est la dernière cas envisagé au paragraphe précédent qui pourrait être le plus dangereux.

A la Soufrière de Guadeloupe, seules les pentes proches du sommet et dépourvues de végétation haute répondent aux critères de formation de tels lahars (MARINELLI, 1969).

La zonation a été réalisée en supposant une hauteur de lahar de 40 m dans les vallées encaissées diminuant de moitié environ au début de l'étalement dans les basses plaines. Par comparaison avec les éruptions historiques du volcan Kelut (Java) (ZEN et HADIKUSUMO, 1965) un tel front de lahar correspond plus ou moins au déversement dans les hautes vallées de 10 millions de m<sup>3</sup> d'eau chargée de cendres.

La forte pluviosité au sommet de la Soufrière (8 à 10 m d'eau par an), peut engager deux actions contraires:

- assurer un lessivage régulier des cendres avant qu'elles n'aient atteint l'épaisseur critique,
- assurer l'imprégnation rapide et intense nécessaire au déclenchement du lahar, des cendres accumulées pendant les courtes périodes de sécheresse.

Compte tenu de la surface relativement

réduite des bassins de réception, il ne devrait pas y avoir de risques sérieux tant que les produits pyroclastiques n'auront pas atteint une épaisseur de 2 mètres environ, côté est du sommet et de 3 à 4 m côté ouest.

## CONCLUSION

La Soufrière de Guadeloupe est la partie récente d'un vaste système volcanique, le massif Madeleine-Soufrière qui a eu une activité magmatique imposante pendant les 50 000 dernières années. La grande jeunesse de ce strato volcan, l'uniformité pétrographique de ses laves, etc. indiquent qu'il n'est pas au bout de son évolution et que l'éventualité d'une éruption magmatique dans un avenir plus ou moins proche est fort possible.

Toutefois un tel événement apparai-

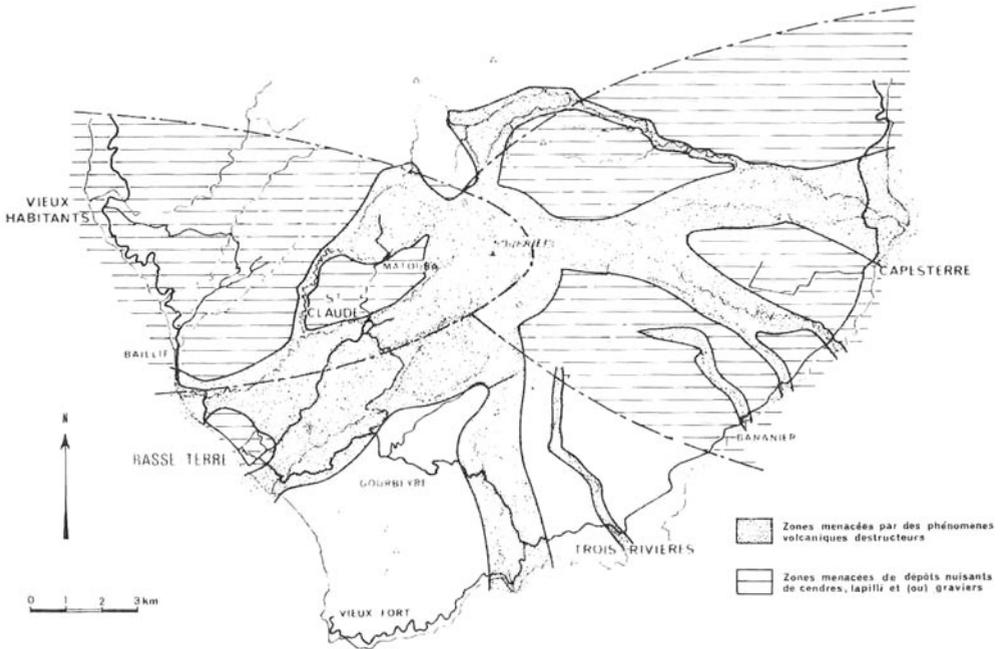


FIG. 11 - Les zones menacées à la Soufrière de Guadeloupe par les risques volcaniques, probables et très probables, cumulés.

TABLEAU 4 - Evaluation en termes de probabilité grossière, des risques volcaniques à la Soufrière de Guadeloupe.

	1	2	3	4	5
Explosion phréatique Lahars primaires					
Construction de dômes					
Mise en place de coulées de lave					
Emission de cendres, lapilli, ponces et bombes volcaniques					
Avalanches incandescentes de fronts de coulées de lave					
Nuées ardentes de type Mérapî					
Lahars secondaires					
Coulées de ponces					
Nuées ardentes verticales de type St-Vincent 1902					
Nuées ardentes paroxysmales dirigées de type Pelée 1902					

1 - quasi certain

3 - probable

5 - très peu probable

2 - très probable

4 - peu probable

trait comme un fait nouveau par rapport au dynamisme dont la Soufrière est le siège depuis 1635 (colonisation des Antilles françaises) puisque les seuls phénomènes volcaniques qui se sont produits dans la période historique ont été de type phréatique. La fréquence de telles éruptions à raison d'environ deux par siècle, rend leur reproduction quasi certaine dans les années à venir.

Il ne fait aucun doute qu'une éruption magmatique sera catastrophique pour l'économie de la Basse-Terre, même si les phénomènes volcaniques y sont en priorité effusifs, comme l'indique l'histoire géologique du massif Madeleine-Soufrière (Fig. 11). Il faut en outre souligner que les zones menacées s'agrandiront dans le ou les secteurs où se développera l'éruption au fur et à mesure que la morphologie sera modifiée.

L'éventualité de phénomènes paroxysmaux ne peut être rejetée. En particulier l'émission de coulées de ponces qui a déjà

eu lieu abondamment au commencement de la construction du massif. Par contre, craindre avant tout des nuées ardentes de type Pelée 1902, ne paraît pas justifié *a priori*, puisqu'aucun dépôt sur l'ensemble du volcan n'a pu être lié pour l'instant à ce type de paroxysme.

Les phénomènes les plus dangereux en cas d'éruption magmatique restent les nuées ardentes de type Mérapî (*s.l.*) et les lahars. Mais entre leur apparition et le début de l'éruption existe nécessairement un délai qui rend une prévision possible.

L'évaluation des risques, en terme de probabilité grossière, est ainsi hiérarchisée pour l'ensemble des phénomènes possibles (Tableau 4).

L'évaluation vraiment quantitative et une zonation précise des risques nécessitent, comme nous l'avons indiqué à plusieurs reprises, des études de terrain et de laboratoire plus poussées. C'est à ce prix que la méthode de travail développée



dans cette note et les premiers résultats qui en découlent, pourront servir le plus efficacement les responsables de la prévision volcanologique et de la sécurité civile dans leur tâche en période de crise, et guider le développement socio-économique de la région en temps normal.

#### REMERCIEMENTS

Ce travail s'appuie essentiellement sur deux rapports scientifiques inédits réalisés par l'auteur dans le cadre du Service géologique des Antilles, à la demande de la préfecture de Guadeloupe.

1) *Le risques volcano-sismique à Soufrière de Guadeloupe.* demandé début avril 1976, suite à l'intense crise sismique de mars 1976, et remis à la fin du même mois.

2) *Evaluation et zonation des risques volcaniques à la Soufrière de Guadeloupe,* commandé début mai et remis début juillet au lendemain de la première explosion phréatique du 8 juillet.

Il tient compte de discussions particulièrement fructueuses avec J. GOGUEL, Vice-président du B.R.G.M., B. MERVOYER, EURAFREP, sur les travaux duquels la partie géologique développée ici, s'appuie essentiellement, J. KIENLE, University of Alaska, M. FEUILLARD, I.P.G., C. ALSAC, Ch. WEBER et J. VARET, tous trois du B.R.G.M.

Je tiens à remercier tout particulièrement S. COTTEZ, Directeur du Service géologique des Antilles, pour sa confiance et son soutien inébranlables, depuis la rédaction des deux rapports préliminaires jusqu'à la mise au point de la présente note.

#### BIBLIOGRAPHIE

ANDERSON T., et FLETT J.S., 1903, *Preliminary Report on the Recent Eruption of the Soufrière in St Vincent and of a Visit to Mount Pelée, in Martinique.* Proc. Roy. Soc. of London, LXX, p. 423-445.  
ANTOINE P., 1975, *Carte Zermos la grave n. 7, notice explicative* - B.R.G.M..  
ARAMAKI S., BARBERI F., COULOMB J., FISKE R.,

GASPARINI P., GUILLEMIN C., PRESS F., SIGVALDASON G., 1976, *Rapport du Comité international sur la Soufrière de Guadeloupe* (non publié), CNRS, Gif-sur-Yvette.  
BAKER P.E., 1969, *The Geological History of Mt Misery Volcano, St Kitts, West Indies.* Overseas Geol. and Min. Res., 10, p. 207-230.  
BARBERI F., et GASPERINI P., 1976, *Volcanic Hazards.* Bull. Intern. Ass. Engineer. Geology, n. 14, p. 217-232.  
BOLT B.A., HORN W.L., McDONALD R.F., 1975, *Geological Hazards.* Spinger - Verlag, Berlin, Heidelberg, New-York, 315 pp.  
BRUET E., 1963, *L'âge absolue de la dernière grande éruption péleenne de la Soufrière de Guadeloupe.* Bull. Volcanol., 13, série II, p. 105-108.  
COTTON C.A., 1944, *Volcanoes as Landscape Forms.* Whitcombe et Tombs, Christchurch et London.  
CRANDELL D.L., et MULLINEAUX D.R., 1967, *Volcanic Hazards at Mount Rainier, Washington.* U.S. Geol. Surv. Bull., 1238, 26 pp.  
———, 1973, *Pine Creek Volcanic Assemblage at Mount St Helens Washington.* U.S. Geol. Surv. Bull., 1383-A, p. 1-21.  
DOREL J., ESCHENBRENNER S., FEUILLARD M., 1972, *Les volcans actifs de la Guadeloupe et de la Martinique, Petites Antilles.* Bull. Volcanol., 26, série II, p. 359-381.  
ESCHER B.G., 1933, (1) *On a Classification of Central Eruptions According to Gaz Pressure of the Magma and Viscosity of the Lava;* (2) *on the Character of the Mèrapi Eruption in Central Java.* Leid. Geol. Meded., Deel VI, Af. I., p. 45-58.  
FOURNIER d'ALBE, M., 1974, *Séminaire régional sur la surveillance et la prédiction de l'activité volcanique - Basse-Terre de Guadeloupe.* Rapport UNESCO (non publié).  
FRANCIS P.W., ROOBOL M.J., WALKER G.P.L., COBBOLD P.R., COWARD M., 1974, *The San Pedro and San Paolo Volcanoes of Northern Chile and Their Hot Avalance Deposits.* Geol. Rundschau, 63-1, p. 357-388.  
FYTIKAS M., et MARINELLI G., 1976, *Geology and Geothermics of the Island of Milos (Greece).* Inst. Geol. and Min. Res., Athens.  
GRUNEVAL H., 1965, *Géologie de la Martinique.* Mémoire pour servir à l'explication de la carte géologique détaillée de la France, Paris, 144 pp.  
GUNN B.M., ROOBOL M.J., et SMITH A.L., 1974 - *Petrochemistry of the Pelean Type Volcanoes of Martinique.* Geol. Soc. Am., Bull., 85, p. 1023-1030.  
HYDE J.H., 1975 - *Upper Pleistocene Pyroclastic-flow Deposits of Lahars South of Mount St Helens Volcano, Washington.* U.S. Geol. Surv. Bull., 1383-B, p. 1-18.

- LACROIX A., 1904, *La montagne Pelée et ses éruptions*. Paris, Masson, 662 pp.
- , 1930, *Remarques sur les matériaux de projection des volcans et sur la genèse des roches pyroclastiques qu'ils constituent*. Livre jubilaire 1830-1930, centenaire de la Société géologique de France. Tome II, p. 431-473. Paris.
- LEWIS J.F., 1964 - *Mineralogical and Petrological Studies of Plutonic Blocks from the Soufrière Volcano, St Vincent, B.W.I.* Unpubl. D. Thesis, Oxford University, 270 pp.
- , 1973, *Petrology of the Ejected Plutonic Blocks of the Soufrière Volcano, St Vincent, West-Indies*. Jour. Petrol., 14, p. 81-112.
- MARINELLI G., 1969, *Cameroun: développement des recherches volcanologiques*. UNESCO, n. de série 1581/BMS - RD/SCE, Paris, 19 pp.
- , 1976, *Sur la «cendre» projetée à la Soufrière (Guadeloupe) en août 1976*. C.R. Ac. Sc., série D, séance du 8 nov. 1976, p. 110-111.
- MAURY R., MERVOYER B. et WESTERCAMP D., 1974, *Température de mise en place des pyroclastites fossilifères de la montagne Pelée, Martinique et de la Soufrière de Guadeloupe*. VII. conf. géol. des Caraïbes, Pointe-à-Pitre.
- MCBIRNEY A.R., 1974, *Factors Governing the Intensity of Explosive Andesite Eruptions*. Bull. Volcanol., 37-3, special issue, p. 443-453.
- MCDONALD G.A., 1958, *Barriers to Protect Hills from Lava Flows*. Pacific Science, 12, p. 258-277.
- , 1972, *Volcanoes*. Prentice - Hall, Inc., Englewood cliffs, N.J.
- MCGREGOR A.G., 1962, *Eruptive Mechanism: Mt Pelée, the Soufrière of St Vincent and the Valley of Ten Thousand Smokes*. Bull. Volcanol., 12, p. 49-74.
- MERVOYER B., 1974, *Généralités sur le volcanisme récent et actuel de la Basse-Terre*. Livret-guide d'excursions dans les Antilles françaises. VII. conf. géol. des Caraïbes, Pointe-à-Pitre.
- MOORE J.G., et MELSON W.G., 1969, *Nuées ardentes of the 1968 Eruption of Mayon Volcano, Philippines*. Bull. Volcanol. 33-2, p. 600-620.
- MULLINEAUX D.R., et PETERSON D.W., 1974 - *Volcanic Hazards on the Island of Hawai*. U.S. Geol. Surv. unpubl., open-file report 74-239.
- NEUMANN VAN PADANG M., 1933 - *De Vitbarsiting van den Merapi (Midden Java) in de Jaren 1930-1931*. Vulk et Seism. Meded., 12 Batavia, p. 1-116.
- , 1960 - *Measures Taken by the Authorities of the Vulcanological Survey to Safeguard the Population from the Consequences of Volcanic Outbursts*. Bull. Volcanol., série II, 23, p. 181-192.
- PERRET F.A., 1935, *The Eruption of Mt Pelée, 1929-1932*. Carn. Inst. of Washington, publ. 458, 126 pp.
- REA J.W., 1974, *The Volcanic Geology and Petrology of Montserrat, West-Indies*. J. Geol. Soc., 130, p. 341-366.
- REYNAL A. de, 1966, *Carte géologique détaillée explicative de la France; département de la Guadeloupe et notices explicatives*. Paris.
- ROOBOL M.J., et SMITH A.L., 1976, *Mount Pelée, Martinique: A Pattern of Alternating Eruptive Styles*. Geology, 4, p. 521-524.
- ROWLEY K.C., 1974, *The Late Pleistocene Fall Deposits of Soufrière, St Vincent*. 7e conf. géol. des Caraïbes, Pointe-à-Pitre.
- SEARLE E.J., 1964, *Volcanic Risk in the Auckland Metropolitan District*. N.Z. Journ. Geol. and Geophys., 7, p. 94-100.
- SIGURDSSON H., 1972, *Partly Welded Pyroclast Flow Deposits in Dominica, Lesser Antilles*, Bull. Volcanol., XXXVI-1, p. 148-163.
- TONANI F., 1971, *Concepts and Techniques for the Geochemical Forecasting of Volcanic Eruption. The Surveillance and Prediction of Volcanic Activity*. UNESCO, Paris, p. 145-166.
- TOMBLIN J.F., 1964, *The Volcanic History and Petrology of the Soufrière Region (Ste-Lucie)*. Unpubl. D. phil. Thesis, Oxford, University, 213 pp.
- , 1971, *West Indian Volcanic Eruptions and the Hazard to Human Populations*.
- VLODAVETZ V.I., 1960, *Principes de la division régionale volcanique en U.R.S.S.* Bull. Volcanol., série II, 23, p. 145-150.
- WALKER G.P.L., 1974, *Volcanic Hazards and the Prediction of Volcanic Eruptions*. Geol. Soc. Lond. misc. publ., 3, p. 23-41.
- WESTERCAMP D., 1972, *Contribution à l'étude du volcanisme en Martinique*. These IIIè cycle, Université Paris Sud, Orsay, 278 pp.
- , 1974, *La Martinique*, Livret guide d'excursions dans les Antilles français. 7e conf. géol. des Caraïbes, Pointe-à-Pitre.
- , 1975, *Petrology of the Volcanic Rocks of Martinique, West-Indies*. Bull. Volcanol., XXXIX-2, p. 1-26.
- , et MERVOYER B., 1974, *Les séries magmatiques de la Martinique et de la Guadeloupe*. 7e conf. géol. des Caraïbes, Pointe-à-Pitre.
- ZEN M.T., et HADIKUSUMO D., 1965 *The Future Danger of Mt Kelut (Eastern Java - Indoneisa)*. Bull. Volcanol., 28, p. 275-282.

Ms. made available to the LAVCEI Publication Office for the press July 1979