Proposition d'une méthode d'évaluation et de cartographie des risques liés aux lahars sur le volcan Merapi (Java, Indonésie)

Franck Lavigne, Jean-Claude Thouret

▶ **To cite this version:**

Franck Lavigne, Jean-Claude Thouret. Proposition d'une méthode d'évaluation et de cartographie des risques liés aux lahars sur le volcan Merapi (Java, Indonésie). Revue de Géographie Alpine / Journal of Alpine Research, 1994, 82 (4), pp.151–166. 10.3406/rga.1994.3781 . hal-02476172

HAL Id: hal-02476172
https://hal.science/hal-02476172

Submitted on 3 Feb 2021

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

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

Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Revue de géographie alpine

Proposition d'une méthode d'évaluation et de cartographie des risques liés aux lahars sur le volcan Merapi (Java, Indonésie)

Monsieur Franck Lavigne, M. Jean-Claude Thouret

Citer ce document / Cite this document :

Lavigne Franck, Thouret Jean-Claude. Proposition d'une méthode d'évaluation et de cartographie des risques liés aux lahars sur le volcan Merapi (Java, Indonésie). In: Revue de géographie alpine, tome 82, n°4, 1994. pp. 151-166;

doi : https://doi.org/10.3406/rga.1994.3781

https://www.persee.fr/doc/rga_0035-1121_1994_num_82_4_3781

Fichier pdf généré le 22/04/2018

BY: creative commons

Abstract

Abstract : A proposal for assessing and mapping lahar-related hazard zones on the volcano Mount Merapi (central Java, Indonesia). About 440 000 people live at risk in areas prone to pyrodastic flows and lahars on the west and south flanks of the active stratovolcano Merapi. At least 23 major eruptions of the 61 reported eruptions since the mid- 1500's (V.S.I., 1990) have triggered lahars which killed about 7 000 people. The hazard-zone map of Merapi produced by the Volcanological Survey of Indonesia (1978) identifies three areas referred to as the forbidden zone, first danger zone and second danger zone, according to the different types of volcanic hazards. This map should now be revised, because its scale (1/100 000) lacks the detail necessary to accurately delimit the hazard zones, in particular valley channels likely to be swept by lahars. In addition, the map does not include social and economic factors which render people vulnerable and may lead to severe loss of life and property. Thus, a proposal is made for a combined appraisal and detailed mapping of hazard zones based on : (1) the characteristics, distribution, and sedimentology of recent deposits, and geometry of valley channels likely to be affected by lahars ; (2) social characteristics of people at risk

Résumé

Résumé : Sur les flancs du Merapi, strato-volcan actif de l'île de Java, plus de 440 000 personnes vivent dans des zones menacées par des coulées pyroclastiques à blocs et cendres (nuées ardentes) et des lahars (coulées de débris et de boue). Sur les 61 éruptions du volcan recensées depuis 5 siècles (V.S.I., 1990), au moins 23 éruptions majeures ont été accompagnées de lahars, qui ont laissé un solde de 7 000 victimes. Une carte des zones menacées par l'activité du Merapi (V.S.I., 1978), divise les flancs du volcan en trois zones, dites « interdites », de « premier » puis de « second danger », en fonction de leur exposition aux différentes menaces volcaniques. Ce document devrait être révisé, car son échelle (1/100 000) ne permet pas de délimiter précisément les vallées menacées et il ne tient pas compte des différents facteurs de vulnérabilité des personnes et des biens. Nous proposons une méthode fondée sur un micro-zonage cartographique des secteurs affectés par les lahars (1/10 000), à partir de la distribution des dépôts récents, la sé- dimentologie des matériaux remobilisables et la morphométrie des chenaux des vallées empruntées par les écoulements. Le second volet de cette méthode est l'étude des facteurs de vulnérabilité de la population, des biens et de l'économie régionale. Menées conjointement, les deux recherches permettront de dresser une carte détaillée et intégrée des risques associés aux lahars, utili- sable par les responsables de la prévention des risques et de la gestion d'une crise volcanique au Merapi.

BY: $ = creative commons

Proposition d'une méthode d'évaluation et de cartographie des risques liés aux lahars sur le volcan Merapi (Java, Indonésie)

Franck Lavigne*et Jean-Claude Thouret**[1]

Mots-clés : Indonésie, volcan Merapi, lahars, cartographie, prévention des risques, analyse de vulnérabilité.

Keywords : Indonesia, Merapi volcano, mapping, risk prevention, analysis of vulnerability

Résumé : Sur les flancs du Merapi, strato-volcan actif de l'île de Java, plus de 440 000 personnes vivent dans des zones menacées par des coulées pyroclastiques à blocs et cendres (nuées ardentes) et des lahars (coulées de débris et de boue). Sur les 61 éruptions du volcan recensées depuis 5 siècles (V.S.I., 1990), au moins 23 éruptions majeures ont été accompagnées de lahars, qui ont laissé un solde de 7 000 victimes. Une carte des zones menacées par l'activité du Merapi (V.S.I., 1978), divise les flancs du volcan en trois zones, dites « interdites », de « premier » puis de « second danger », en fonction de leur exposition aux différentes menaces volcaniques. Ce document devrait être révisé, car son échelle (1/100 000) ne permet pas de délimiter précisément les vallées menacées et il ne tient pas compte des différents facteurs de vulnérabilité des personnes et des biens.

Nous proposons une méthode fondée sur un micro-zonage cartographique des secteurs affectés par les lahars (1/10 000), à partir de la distribution des dépôts récents, la sédimentologie des matériaux remobilisables et la morphométrie des chenaux des vallées empruntées par les écoulements. Le second volet de cette méthode est l'étude des facteurs de vulnérabilité de la population, des biens et de l'économie régionale. Menées conjointement, les deux recherches permettront de dresser une carte détaillée et intégrée des risques associés aux lahars, utilisable par les responsables de la prévention des risques et de la gestion d'une crise volcanique au Merapi.

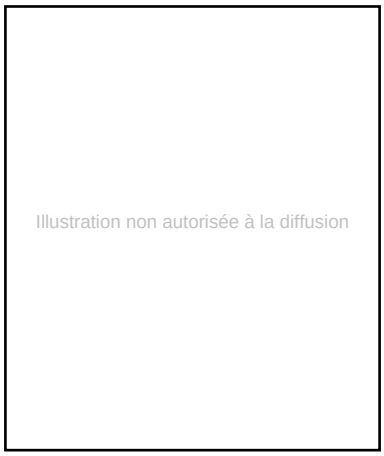
Abstract : A proposal for assessing and mapping lahar-related hazard zones on the volcano Mount Merapi (central Java, Indonesia). About 440 000 people live at risk in areas prone to pyroclastic flows and lahars on the west and south flanks of the active stratovolcano Merapi. At least 23 major eruptions of the 61 reported eruptions since the mid-1500's (V.S.I., 1990) have triggered lahars which killed about 7 000 people. The hazard-zone map of Merapi produced by the Volcanological Survey of Indonesia (1978) identifies three areas referred to as the forbidden zone, first danger zone and second danger zone, according to the different types of volcanic hazards. This map should now be revised, because its scale (1/100 000) lacks the detail necessary to accurately delimit the hazard zones, in particular valley channels likely to be swept by lahars. In addition, the map does not include social and economic factors which render people vulnerable and may lead to severe loss of life and property.

Thus, a proposal is made for a combined appraisal and detailed mapping of hazard zones based on : (1) the characteristics, distribution, and sedimentology of recent deposits, and geometry of valley channels likely to be affected by lahars ; (2) social characteristics of people at risk

1. C.R.V.-URA 10-CNRS** et CERAMAC*, Université Blaise Pascal-Clermont II, 29 Bd. Gergovia, 63000 Clermont-Ferrand.

Persée creative commons

and assessment of potential loss of property, cultivated land, and economic goods at risk. The aim of such an approach is to provide a better assessment of lahar-related hazard zones which can be used by decision makers in the event of increasing eruptive activity and crisis on Mount Merapi.



1. Cicatrice probable de la caldera d'avalanche (Faille de Kukusan) et accidents cassants N45 et N135-165 ; 2. Collines de Gendol : dépôts d'avalanche de débris ; 3. Dôme actuel et coulées de lave andésitique historiques ; 4. Piémonts et vallées empruntés par les lahars ; 5. Dépôts de cendres d'origine phréato-magmatique de Gumuk et de Simbasari ; 6. Ellipses des retombées attendues (isoplète 1,6 cm) pour une colonne éruptive de 14 km de hauteur.

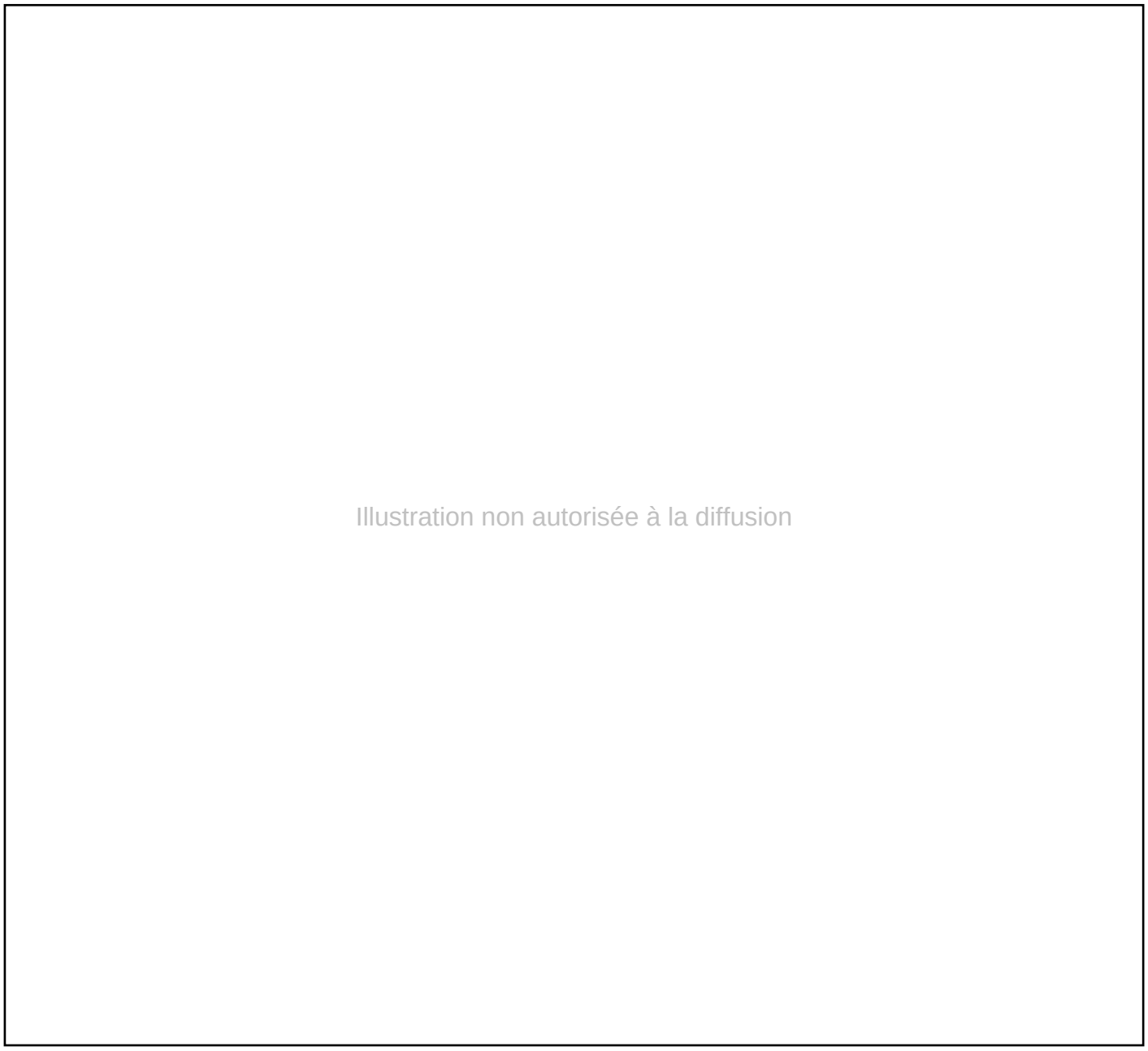
Introduction

Sur les flancs du Merapi (7°33'S-110°27'E, 2965 m), le volcan le plus actif et dangereux de l'Indonésie (d'après les critères volcanologiques et démographiques, *in* Crandell et al., 1984), vivent 1 300 000 personnes. La densité moyenne, de 1500 habitants au km², s'avère extrêmement élevée, d'autant plus que le cône sommital (au-dessus de 1 500 m) n'est pas habité en permanence. Environ 440 000 personnes habitent dans les zones menacées par des écoulements pyroclastiques ou des lahars (coulées de débris et de boue, concentration en sédiments ≥ 60 % en volume). A titre d'exemple, la dernière éruption modérée à « nuées ardentes » du 22 novembre 1994 s'est soldée par 63 victimes et des dommages évalués à 3,5 millions de francs (F. Lavigne et V.S.I., com. pers.)

Trois types de lahars sont distingués selon leur mode de déclenchement et leur source en eau (Neall, 1976 ; Lavigne, 1993) : lahars primaires issus de la liquéfaction d'écoulements pyroclastiques, lahars générés par la vidange d'un lac et lahars secondaires pluviaux. Tous s'écoulent le long des vallées jusqu'à 20-30 km du dôme sommital (Fig. 1) et ils se produisent aussi pendant les phases de repos du volcan, à la suite de la remobilisation des matériaux pyroclastiques par de fortes pluies. L'évaluation de cette menace demeurant difficile (Tabl. I), nous proposons une méthode fondée sur le micro-zonage cartographique dans deux secteurs-pilotes, associé à une étude de vulnérabilité des personnes et des biens dans les zones exposées (Tabl. II).

I. Evaluation de la menace et zonage traditionnel autour du Merapi

L'évaluation de la menace passe par une analyse de l'extension, du volume et de la récurrence des lahars historiques. Nous préférons le terme de menace ou phénomène naturel menaçant à



celui d'aléa, dont l'origine étymologique ne convient pas à l'acception communément admise du risque naturel (= phénomène naturel créateur de dommage x endommagement potentiel des biens et des personnes).

1. Extension, récurrence des lahars historiques et dommages engendrés

Du fait de l'abondance de matériaux mobilisables sur les flancs ouest et SW du Merapi, les lahars constituent la principale menace le long des 12 principales rivières radiales qui débouchent

Tableau I : Evaluation des dommages liés aux éruptions historiques du Merapi au XX^{e} siècle

Crise volcanique au XX^{e} Siècle	Pertes humaines EP écoulements pyroclastiques - L lahars	Nombre de villages affectés	Nombre de Lahars primaires recensés
1902-04	16 (EP)	3	-
1920-21	35 (EP)	1	3 (12/10/1920)
1922	-	-	-
1930-31	1369 (EP + L)	42	plusieurs dizaines 19/12/30, 2/1 & 27/4 1931
février 1932	-	-	5 (17 février)
1942-43	-	-	-
1953-54	64 (EP)	6	-
1955-58	-	-	-
1961	8 (EP + L)	10	3 (27-28 novembre)
1967-68	-	-	-
janvier 1969	3 (EP + L)	26	4 (7-8 janvier)
1973-75	9 (L)	plusieurs dizaines	-
novembre-décembre 1976	29 (L)	plusieurs dizaines	2 (25 novembre)
janvier 1979	-	-	-
juin 1984	-	-	-
février 1992	-	-	-
22 novembre - 7 décembre 1994	63 (EP)	4	-

sur le piémont ouest et dans la plaine de Yogjakarta vers le Sud (Fig. 1 & 2). Au Merapi, les lahars sont déclenchés par deux processus : (1) les lahars primaires proviennent de la liquéfaction d'écoulements pyroclastiques canalisés ; (2) les lahars pluviaux (chauds et synéruptifs ou froids et post-éruptifs) surviennent lorsque le seuil pluviométrique atteind 40 mm/h durant au moins 2 heures lors de la mousson, de novembre à mars[2]. Malgré l'état fragmentaire des informations disponibles, les dégâts causés par les 17 éruptions du XX^{e} siècle ont été estimés (Tabl. I ; Simkin et al., 1981 ; V.S.I., 1990). Au XX^{e} siècle, plus de 1500 personnes ont trouvé la mort, une centaine de villages ont été entièrement ou partiellement détruits, près de 2800 maisons ont été rasées et les terres cultivées perdues se comptent en milliers d'hectares. La récurrence des lahars est de 10 à 30 ans pour les écoulements majeurs et de 4 à 6 ans pour les secondaires ($\leq 1 \times 10^{6}$ m^{3}). Le volume approximatif des futurs lahars et les cotes d'écoulement en un point donné

2. Depuis 5 siècles, 23 des 61 éruptions recensées (V.S.I., 1990) auraient déclenché des lahars, qui ont provoqué des pertes humaines et matérielles considérables lors des éruptions majeures en 1849, 1871-73 et 1930-31 (1370 morts). Des lahars meurtriers ont également été déclenchés lors d'éruptions modérées en 1672 (3000 morts), 1822-23, 1832-35, 1902-1904, 1920, 1953-54 et 1976.

Opérations	Thèmes de recherche	Objectifs poursuivis	Outils et réalisations
Géologie et géomorphologie des vallées et des dépôts de lahars	Distribution des dépôts pyroclastiques et lahariques récents	Déterminer les vallées et chenaux les plus empruntés par les lahars récents Repérer et calculer le volume des dépôts des coulées pyroclastiques de 1984, 1992 et 1994 pour évaluer la trajectoire des futurs lahars pluviaux	Cartes des dépôts pyroclastiques récents et des lahars au 1/10 000 Exégèse des textes historiques et des cartes existantes Photo-interprétation et télédétection (images SPOT 2 et radar)
Morphométrie des vallées exposées	Etude morphologique et morphométrique détaillée des vallées menacées (Putih, Krasak, Bojong, Kuning, Gendol)	Disposer de données géométriques sur les chenaux (largeur, pente, hauteur des berges) avant le passage des prochains lahars	- Profils longitudinaux - Profils transversaux réitérés dans une ou deux vallées menacées
Sédimentologie et études géotechniques des matériaux mobilisables	Etude physique et sédimentologique des matériaux remobilisables	- Evaluer le volume de matériaux remobilisables dans les vallées - Analyser les caractères physico-hydriques des téphras : épaisseur, granulométrie, cohésion, densité, teneur en eau et vitesse d'infiltration	Extension, géométrie et caractéristiques lithologiques des matériaux remobilisables Analyses sédimentologiques et géotechniques Profils réitérés et morphométrie des chenaux empruntés

Tableau II
Méthode d'évaluation des risques liés aux lahars du Merapi.
A - Micro-zonage cartographique des zones exposées aux écoulements

peuvent être évalués par la corrélation de la distribution de leurs dépôts récents (à partir d'une image SPOT 2 XS, Fig. 2) avec trois magnitudes d'éruptions survenues dans le passé : éruption majeure, Indice d'Explosivité Volcanique VEI > 3, volume de téphras 4 x 10^7 m^3, comme en 1930-31 ; éruption modérée VEI 2-3, 1-4 x 10^7 m^3, comme en 1953-54 et 1961 ; éruption mineure VEI 2, 1-4 x 10^6 m^3, comme en 1969, 1984, 1992 et 1994 (V.S.I., 1989, 1990 et com. pers. ; Simkin et al., 1981 ; GVN, 1994).

A la différence des lahars du Kelud (Java est), générés par la vidange synéruptive d'un lac de cratère, les lahars du Merapi ont une moindre proportion d'eau (≤ 20 % en poids), une vitesse

Population vulnérable	- Répartition et densité de la population dans les zones menacées, notamment les vallées - Evolution démographique et prévisions socio-démographiques	- Déterminer les facteurs socio-démographiques de la vulnérabilité de la population selon divers scénarios - Evaluer le nombre potentiel de victimes, de blessés et de sans-abris potentiels	- Cartes des densités de population au 1/10 000 - Documents et cartes de l'évolution récente et de la dynamique de la population (migrations)
Biens mobiliers et immobiliers vulnérables	- Site et localisation - Architecture et matériaux de construction	- Déterminer le type et le nombre des bâtiments d'habitation, scolaires, sanitaires, religieux et artisanaux - Localiser et évaluer le nombre de bâtiments capables de résister au passage d'un lahar - Estimer le coût des pertes éventuelles	- Cartes de densité et évolution de l'habitat dans les zones menacées - Cartes de la qualité du bâti et du type de constructions hétérogènes - Estimation du coût direct (réparation) et indirect (remplacement) des bâtiments
Infrastructures et activités économiques vulnérables	- Infrastructures, aménagements, équipements, réseaux de communications et d'informations - Terres agricoles et forêts - Entrepôts et bâtiments à vocation agro-alimentaire et artisanale	- Recenser les infrastructures menacées par les lahars - Evaluer la Surface Agricole Utilisable menacée et la valeur des différentes productions - Estimer le coût des dégâts éventuels	- Carte des infrastructures avec hiérarchisation selon le niveau d'exposition aux lahars - Cartes intégrées et évolutives de type S.I.G. - Cartographie de la SAU menacée, selon la valeur des productions
Objectif final de prévention	Evaluer les scénarios éruptifs possibles pour élaborer des plans de contingence et d'évacuation	Repérer l'accès aux zones de refuge et de secours selon divers scénarios pour déceler les blocages éventuels	Elaborer des plans d'évacuation précis et de secours en cas de catastrophes selon les scénarios

Tableau II B
Facteurs de vulnérabilité des personnes et des biens dans les vallées menacées

(quelques m/s) et un débit (maximum 825 m^3/s) plus faibles et ils se déposent plus près du sommet (Lavigne & Thouret, 1994). En conséquence, les caractéristiques morphométriques englobent une surface recouverte de quelques centaines d'hec-

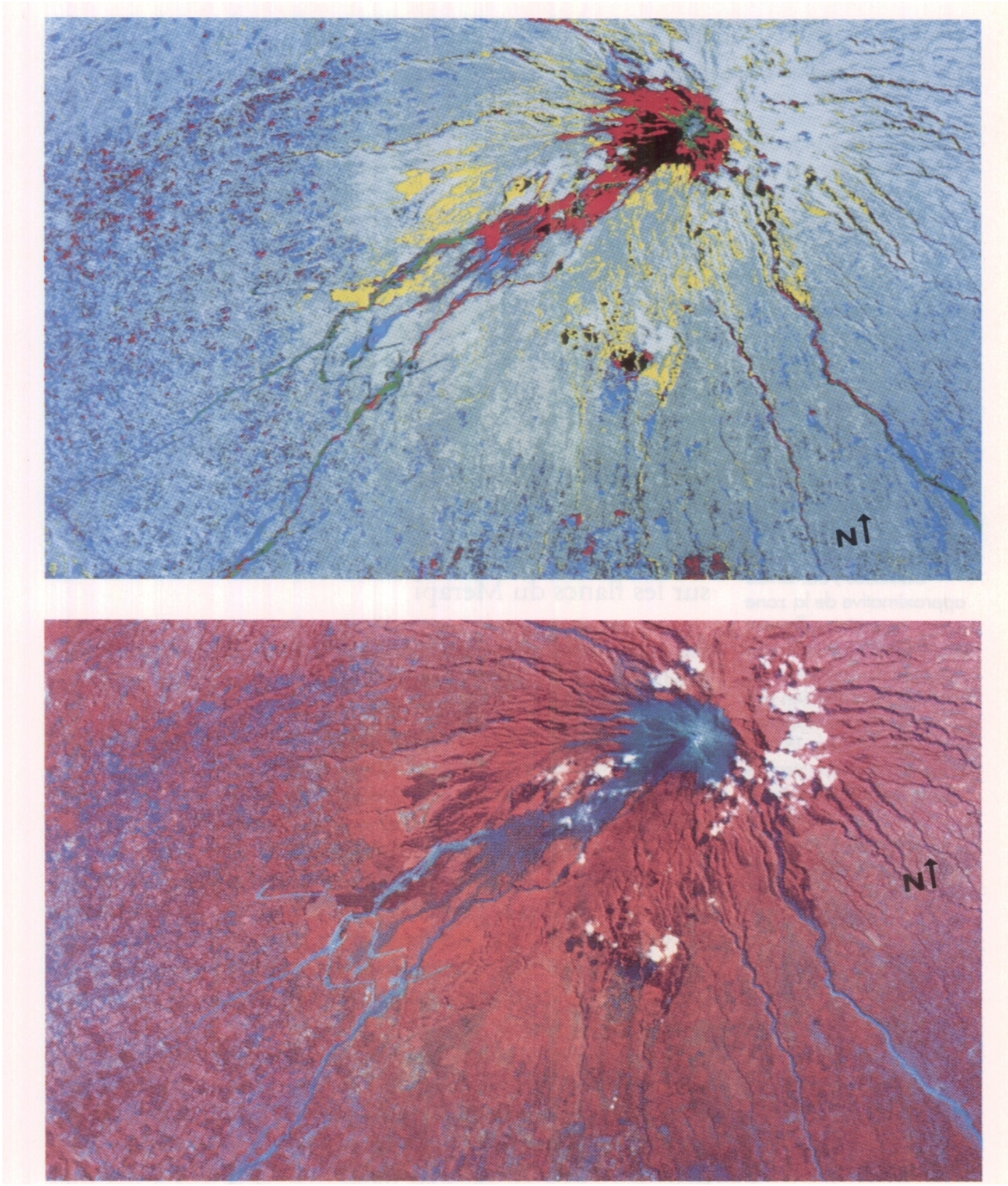


Figure 2
A. Image SPOT 2 XS (9/08/1990) centrée sur le Merapi, canal infra-rouge (échelle 1/80 000 environ).
B. Distribution de certains produits pyroclastiques et des dépôts de lahars autour du Merapi, repérés sur une image SPOT 2 XS (9/08/1990) et classés par traitement statistique (logiciel Planète).
Couleur rouge = dépôts de nuées ardentes ; orange = dépôts de nuées remaniées ; vert = dépôts de lahars récents ; bleu marine = dépôts de lahars plus anciens ; jaune = cendres épaisses.

tares par vallée, une longueur généralement inférieure à 20 km et une épaisseur de 0,5 à 5 m. Leur faciès non compacté contient des blocs denses en vrac (issus des « nuées ardentes »), hétérométriques et anguleux jusqu'à grande distance, dans une matrice sablo-graveleuse, très pauvre en argile. En revanche, à l'instar de ceux du Kelud, les lahars du Merapi (grossiers, à clastes prédominants, avec une concentration en sédiments Cv ≥ 60 % en volume) se transforment rapidement en écoulements hyperconcentrés (Cv 40-60 %) et au-delà en écoulements torrentiels (Cv ≤ 40 %). Ces écoulements de transition engendrent des inondations par débordements fréquents sur les pentes faibles des cônes de déjection qui forment les piémonts ouest et sud du Merapi. Ces écoulements provoquent donc des dégâts considérables à une distance bien supérieure à celle des lahars grossiers, davantage chenalisés dans les gorges radiales à l'amont du strato-volcan.

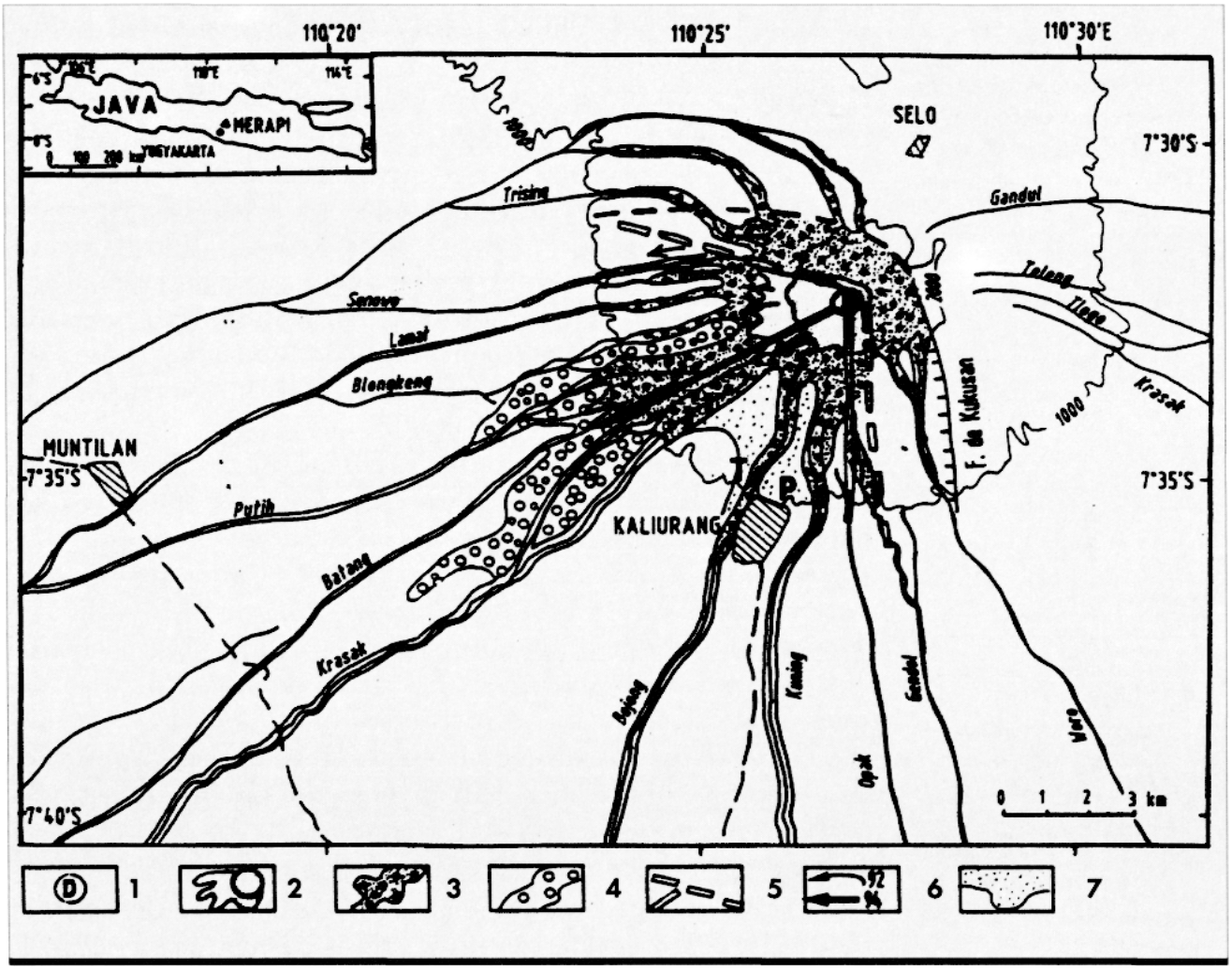
Figure 3
Carte préliminaire de zonage des menaces volcaniques principales autour du strato-cône du Merapi (révision des documents du V.S.I., 1978, 1989).

1. Dôme actuel (andésite) ; 2. Flanc instable du dôme et talus de blocs écroulés ; 3. Ecoulements pyroclastiques à blocs et cendres fréquents ; 4. Ecoulements pyroclastiques potentiels (« nuées ardentes ») ; 5a. Limite probable des explosions latéralement dirigées à déferlantes associées ; 5b. Limite approximative de la zone exceptionnellement affectée par une explosion dirigée du type Mont St. Helens ; 6. Direction des écoulements pyroclastiques de 1992 et 1994 ; 7. Zone recouverte par les produits de déferlantes et par les coulées pyroclastiques du 22 novembre au 7 décembre 1994.

2. Le zonage actuel des menaces volcaniques sur les flancs du Merapi

Sur la carte des zones menacées par l'activité du Merapi (V.S.I.-Pardyanto et al., 1978, 1/100 000), le volcan et ses piémonts sont divisés en trois secteurs (Fig. 1 & 3).

- (1) la zone interdite, correspondant à la partie supérieure de l'édifice volcanique, est fréquemment affectée par des écoulements pyroclastiques et des projections de téphras, y compris balistiques. Alors que ce secteur devrait être abandonné en permanence, il rassemblait en 1990 plus de 50 000 personnes.
- (2) la zone de premier danger regroupe les régions pouvant être menacées lors d'éruptions violentes (pliniennes, péléennes ou vulcaniennes) par des retombées ou par des lahars. Elles sont censées être hors d'atteinte des écoulements pyroclastiques et des coulées de lave. Au moins 86 000 personnes peuplaient cette zone en 1990.
- (3) la zone de second danger correspond aux lits majeurs et aux rives des cours d'eau radiaux drainant les flancs du volcan, surtout vers l'Ouest et le Sud. Les manifestations des lahars, des écoulements torrentiels et des crues peuvent les affecter, y compris entre 20 et 30 km du sommet. La population installée dans cette zone dépassait 110 000 personnes en 1990. Il faut doubler ce chiffre si l'on considère la population potentiellement affectée par les retombées de lapilli et de cendres à partir de panaches éruptifs élevés, dans un rayon de 6 à 15 km vers le Nord, l'Ouest et le Sud (Fig. 1).



Le taux de croissance variable de la population et les migrations internes ou externes ne permettent pas d'évaluer avec certitude les effectifs directement menacés. Cependant, sur le secteur SSW du volcan affecté par l'éruption du 22 novembre 1994, dans un rayon de 4 à 12 km autour du dôme sommital, F. Lavigne a comptabilisé environ 68 500 personnes : 15 400 dans la zone interdite, 13 500 dans celle de premier danger et 39 600 dans celle de second danger.

3. Ce zonage traditionnel devra être révisé pour plusieurs raisons

• (1) La carte élaborée pour le Merapi, comme les autres cartes de menaces en Indonésie, suit une approche géologique : elle définit les zones d'extension potentielle de plusieurs types de menaces en fonction de la nature des éruptions reconnues dans le passé et de la distribution de leurs produits (surtout ceux de

l'éruption de 1930-31). Ce type de carte, fréquemment utilisé, représente uniquement les limites extrêmes supposées pour le champ d'action de chaque menace, sans calcul statistique de la récurrence (cf. §1., ci-dessus).

On considère que les éruptions explosives seront dirigées verticalement, mais des explosions latéralement dirigées et des écoulements pyroclastiques (déferlantes) correspondant à des effondrements partiels de dômes en construction ont couramment lieu au Merapi : elles ont pour conséquence d'influencer la trajectoire et la dynamique des lahars qui leur ont succédé.

• (2) La préparation traditionnelle d'une carte des menaces volcaniques en Indonésie repose sur plusieurs présupposés (Kusumadinata *in* Crandell, 1984) qu'il convient de réviser :
— *les futures éruptions se produiraient dans le cratère principal ou dans un autre cratère qui a été actif dans le passé.* La possibilité d'ouverture de nouveaux évents n'est donc pas prise en considération. Or, de fréquents changements de points de sortie se sont produits récemment au Merapi (1942-43, 1967, 1984, 1992, 1994) et le dôme actuel en croissance quasi-continue depuis 1989 a d'abord recouvert le dôme précédent vers le NW en 1990-92, puis vers le SW depuis l'été 1994[3].
— *la morphologie du volcan ne changerait pas de manière appréciable entre la date de préparation de la carte et celle de la prochaine éruption.* Or, la morphologie des chenaux susceptibles d'être empruntés par des lahars a subi de fortes modifications depuis 1978, date de parution de la carte (par exemple dans la Kali Putih : Sumaryono, 1992). Les nuées ardentes qui s'écoulaient vers le SW depuis une trentaine d'années (à partir des dômes croissant dans le cratère de 1961 égueulé dans cette direction) ont pris une nouvelle direction vers l'Ouest en 1992, du fait de la croissance du dôme actuel vers l'WNW. Depuis 1994, ce dôme croît vers le SSW en débordant la paroi sud du cratère et des écoulements pyroclastiques ont été observés dans cette direction (22 novembre-7 décembre 1994 ; GVN, 1994 et Fig. 3). Ils sont maintenant attendus sur le flanc sud, déjà fragilisé par la fracturation et l'altération hydrothermale (bassin amont de la Kali Gendol). La déstabilisation du flanc sud fournirait des matériaux volumineux pour les lahars potentiels. Des vallées peu parcourues par les lahars depuis plus de 30 ans risquent d'être empruntées dans un avenir proche, comme celles qui, drainant le flanc sud, débouchent dans la plaine de Yogyakarta (ville de 500 000 habitants en 1990 ; Fig. 1 & 2).

3. Ce dôme instable, dont le volume est estimé à 10-11 x 10^6 m^3 (Kelfoun et al., 1994, 1995), a menacé le flanc WNW (nuées ardentes de février 1992, Kali [=rivière] Senowo et Sat), puis le flanc SW (nuées ardentes de novembre 1994, Kali Bojong et Krasak) et menace actuellement le flanc sud (Kali Gendol et Kuning : Fig. 1 & 3).

• (3) Comme la plupart des cartes existantes, l'échelle adoptée (1/100 000) est trop petite pour permettre un véritable zonage des menaces et des risques volcaniques en général et des lahars en particulier. Il est préférable de dresser une carte de menaces, puis une carte de risques à grande échelle (1/5 000 à 1/2000e) dans les zones urbanisées très exposées, à l'instar de la Kali Code (Thouret, 1990 ; Thouret & Laforge, 1994).

II. Méthodologie pour le micro-zonage et l'évaluation de la vulnérabilité dans les zones exposées aux lahars

1. Le micro-zonage cartographique

Le micro-zonage des lahars s'appuiera sur les analyses de récurrence effectuées, sur les estimations des dommages recensés au cours des dernières éruptions étudiées et sur la distinction concernant la dynamique d'écoulement et ses effets, opérée entre les lahars primaires et les lahars secondaires ou pluviaux.

Le tableau II-A présente les grandes étapes de l'élaboration d'un micro-zonage cartographique des lahars au Merapi. L'objectif de la méthode est de disposer de données quantitatives précises (volume de matériaux pyroclastiques remobilisables dans les vallées, données morphométriques des chenaux susceptibles d'être parcourus, etc.), directement applicables à l'élaboration de scénarios. Ceux-ci pourront s'appuyer sur un Modèle Numérique de Terrain précis (C.R.V., Université Blaise Pascal : Kelfoun, 1994), créé par ISTAR à partir d'un couple d'images SPOT 2 Panchromatiques (résolution 10 m), et sur une ortho-image, obtenue par le couplage d'une scène SPOT 2 P du 15/06/1987 et d'un M.N.T. La précision de ce dernier document permettra de localiser les lieux où les débordements et les défluviations sont possibles. Ces phénomènes fréquents sont dus à la faible pente des cônes de déjection volcano-détritiques formés au pied du strato-cône et à la faible profondeur des chenaux et des berges, dont les cotes altimétriques sont fréquemment dépassées par les écoulements habituels des lahars.

Dans le cas des lahars pluviaux, les plus fréquents, l'analyse porte sur quatre paramètres caractérisant les pluies capables de mobiliser les matériaux et de déclencher leur écoulement : l'intensité pluviométrique enregistrée, la durée de la pluie de l'évé-

nement déclencheur, la précipitation totale de l'événement et la précipitation la plus intense enregistrée durant 10 minutes d'une forte averse. A l'heure actuelle, un seuil d'intensité pluviométrique unique de 40 mm de pluies tombées en 2 h sert de référence au V.S.I. pour prévoir le déclenchement d'un lahar. Or, un tel seuil varie en fonction d'autres facteurs comme la durée de l'averse et les paramètres morpho-sédimentologiques (Tabl. II-A). Quelques seuils d'intensité pluviométrique devront faire l'objet de calculs statistiques, en fonction de l'altitude, sur les pentes du Merapi.

2. Evaluation de la vulnérabilité dans les zones menacées par les lahars

La seconde phase dans l'évaluation des risques consiste à étudier les différents facteurs de vulnérabilité à l'intérieur des zones menacées. Trois groupes de facteurs seront approchés au moyen d'enquêtes (Tabl. II-B).

• (1) *Les facteurs socio-démographiques de la vulnérabilité des populations*
La densité de la population dans les zones menacées par les lahars constitue le principal facteur quantitatif de la vulnérabilité. La première démarche consiste à collecter des données démographiques, surtout le nombre d'habitants de chaque commune (*desa*), et si possible des villages et des hameaux (*dusun*). En Indonésie, cette étape préliminaire s'avère particulièrement longue et difficile (Lavigne, 1993), car les statistiques concernant les *dusun* ne sont pas toujours centralisées au niveau du *desa*. Cette banque de données rend ensuite possible l'élaboration d'une carte de répartition de la population au 1/10 000. La superposition de cette carte avec celle des zones menacées permettra ainsi d'évaluer le nombre de sinistrés potentiels lors du passage du prochain lahar important. Une telle carte devra être régulièrement remise à jour, compte-tenu des migrations et de la forte croissance démographique sur les flancs du volcan (environ 0,5 % par an dans la zone la plus exposée aux lahars).

• (2) *Les facteurs techniques et fonctionnels de la vulnérabilité des biens*
Une étude détaillée du type d'habitat, de la qualité du bâti et des matériaux de construction dans les zones exposées aux lahars devra compléter les précédentes investigations. La qualité du

bâti pourra être évaluée de manière précise par une cartographie de détail (1/5 000 à 1/2 000 dans la Kali Code, à proximité de Yogyakarta) et par des enquêtes portant sur les maisons d'habitation, les entrepôts et les bâtiments scolaires, religieux, hospitaliers ou à vocation industrielle. Le tableau II-B rappelle les opérations et les thèmes de cette investigation, les techniques employées et les réalisations attendues. A cet inventaire technique s'ajoutera un recensement des organismes et des moyens mis en oeuvre pour les secours en cas de crise et de catastrophe (postes de secours, personnel, bâtiments, réseaux de communications et d'énergie, flux d'informations et d'alerte, etc).

• (3) *Les facteurs de vulnérabilité économique*
La troisième étape de la méthode proposée consiste en une évaluation de la vulnérabilité des infrastructures, équipements et moyens de production dans la zone menacée : routes, chemins de fer, barrages, industries, commerces et terres agricoles. Cette évaluation a un double objectif : (1) estimer le coût des pertes éventuelles et leurs conséquences directes et indirectes sur l'économie régionale ; (2) repérer l'accès aux zones de refuge et aux secours selon divers scénarios pour déceler les blocages éventuels en cas de crise et de catastrophe. Plusieurs documents peuvent être ainsi réalisés à partir du cadastre, de photos aériennes et d'enquêtes : carte des terres cultivables menacées selon la valeur des productions, infrastructures endommageables classées selon l'impact des dommages potentiels et leurs conséquences socio-économiques, etc.

L'ultime étape de cette méthode d'évaluation des risques sera la superposition de tous les documents précédents, pour une corrélation spatiale sur un support cartographique évolutif de type S.I.G., appuyé sur un M.N.T. Nous envisageons de réaliser un document détaillé sur deux secteurs-pilotes choisis dans la région peuplée et affectée depuis la fin de 1994 : vallée de la Kali Bojong, à proximité de la ville de Kaliurang et en aval, vallée de la Kali Code, dans le périmètre urbain de Yogyakarta.

Conclusion : intérêts et difficultés de la méthode proposée

A l'heure actuelle, la plupart des cartes dites de risques autour des volcans actifs comportent deux défauts : leur échelle est trop petite, comme au Merapi (1/100 000) et elles ne représen-

tent le plus souvent que les phénomènes volcaniques menaçants. Ce genre de document doit évoluer vers une carte de risque intégrée, rassemblant les données géologiques classiques, les calculs statistiques de récurrence (Newhall, 1984), mais aussi les facteurs socio-démographiques, économiques et techniques de la vulnérabilité dans les zones menacées (D'Ercole, 1991 ; Thouret & D'Ercole, 1995).

L'intérêt majeur de cette méthode d'évaluation des risques est l'élaboration d'un document intégré à grande échelle (1/10 000 à 1/2 000) et évolutif. Ce document préparé en 1994-95 pourra être directement utilisable par les scientifiques, mais aussi par les autorités responsables de la prévention des risques et de l'évacuation en cas d'alerte. Néanmoins, cette méthode se heurte à des difficultés, à l'amont comme à l'aval des investigations.

A l'amont, l'évaluation des risques associés aux coulées pyroclastiques et aux lahars requiert une très bonne connaissance des mécanismes de déclenchement et de la dynamique de ces écoulements. Au Merapi, le volcan le plus étudié de Java (Berthommier, 1990, Berthommier et al., 1992, Vincent, 1992), on ne disposait que de rapports descriptifs de quelques lahars. Or, ces 10 dernières années ont vu s'accomplir des progrès remarquables dans ce domaine d'étude grâce aux travaux du Sabo Technical Center (Yogyakarta), un organisme transposant en Indonésie les techniques de surveillance japonaises les plus sophistiquées (S.T.C., 1992) : capteurs de précipitations mesurant l'intensité des pluies en 1 h, 30 et 10 minutes, limnimètres dans les rivières, détecteurs de lahars par télémétrie et caméra-vidéo, etc. Toutefois, les données actuellement disponibles ne concernent que des lahars de petit volume, responsables de dommages limités.

A l'aval des investigations, les études de vulnérabilité proposées demeurent incomplètes, car elles ne prennent pas en compte plusieurs facteurs sociaux de la vulnérabilité des populations (mobilité, origine sociale, niveau d'instruction, cohésion et stabilité des groupes sociaux, etc). De même, les facteurs culturels devraient faire l'objet d'investigations spécifiques, telles que la perception et la connaissance des phénomènes naturels et des risques par la population (D'Ercole, 1991). Cependant, il s'agit d'une recherche pluri-disciplinaire à long terme qui requiert la collaboration de géologues, géographes, sociologues, juristes,

etc. Conduit par exemple en Californie pendant et après les crises sismiques (Mileti, ed., 1993) ou aux Philippines autour du volcan Pinatubo (Punongbayan & Tungol, 1994), ce type de recherche n'est pas encore engagé dans la région du Merapi.

Références bibliographiques

BERTHOMMIER P., 1990. — *Etude volcanologique du Merapi (Centre-Java). Téphrostratigraphie et chronologie - produits éruptifs.* Thèse, Université Blaise Pascal, Clermont-Fd., 223 p.

BERTHOMMIER P., BAHAR I., BOUDON G., CAMUS G., GOURGAUD A., LAJOIE J. & VINCENT P.M., 1992. — Le Merapi et ses éruptions : importance des mécanismes phréatomagmatiques. *Bull. Soc. géol. Fr.*, **163**, 5, 635-644.

CRANDELL D.R., BOOTH B., KUSUMADINATA K., SHIMOZURU D., WALKER G.P.L. & WESTERCAMP D., 1984. — *Sourcebook for volcanic-hazard zonation.* UNESCO, 97 p., Paris (see *Indonesia*, by Kusumadinata K., pp. 55-60).

D'ERCOLE R., 1991. — *Vulnérabilité des populations en face des risques volcaniques. Le cas de la région du Cotopaxi (Equateur).* Thèse I.G.A., Université J. Fourier Grenoble I, 459 p.

GVN Bull., 1994. — Merapi 1994 eruption, *Bull. Global Volcanism Network*, vol. **19**, 10, p. 2-3 and 11, Smithsonian Institution, Washington.

KELFOUN K.,1994. — *Evaluation des menaces en domaine volcanique actif à l'aide de la modélisation numérique. Application au volcan Merapi (Java, Indonésie).* Mémoire DEA Sciences de la Terre et de l'Atmosphère, Option Terre, Université Blaise Pascal-Clermont II, 81 p.

KELFOUN K., THOURET J.-C., GOURGAUD A., CAMUS G., VINCENT P.M., BOURDIER J.-L. & BOUDON G., 1994. — Growth and destruction of the Merapi summit dome (Central Java) : contribution of satellite imagery to hazard assessment. *Intern. Volcanol. Congress, IAVCEI*, Ankara (Abstract & Poster), 6-12 September 1994.

KELFOUN K., THOURET J.-C., LAVIGNE F., VINCENT P.-M., CAMUS G. & GOURGAUD A., 1995. — Le strato-volcan Merapi (Java) : méthodes d'évaluation des menaces liées aux écoulements pyroclastiques et aux lahars. *Géologues*, sous presse.

LAVIGNE F., 1993. — *Evaluation des risques associés aux lahars du Merapi, Java, Indonésie.* Mémoire DEA, Géographie physique et volcanologie, Université Blaise Pascal-Clermont II, 198 p.

LAVIGNE F. & THOURET J.-C., 1994. — Les lahars du Merapi (Java) : occurrence, dynamismes et risques associés. (Résumé p.135) *15è Réunion Ann. Sciences de la Terre*, Nancy, 26-28 avril 1994.

MILETI D.S., editor, 1993. — The Loma Prieta, California, Earthquake of October 17, 1989 Societal Response - Public response. *U.S. Geol. Survey Prof. Paper* **1553-B**, 69 p.

NEALL V.E., 1976. — Lahars as major geologic hazards. *Bull. Inter. Assoc. Eng. Geol.* **14**, 233-240.
NEWHALL C.G., 1984. — Semi-quantitative assessment of changing volcanic risk at Mount St. Helens, Washington. *Open-File Report* **84-272**, *U. S. Geol. Survey*, 29 p.
PUNUNGBAYAN R.S. & TUNGOL N.M., 1994. — *Impacts of the 1993 lahars and long-term lahar hazards and risks around Pinatubo volcano.* Philvolcs, Manille, 40 p.
SABO TECHNICAL CENTER, 1992. — *Volcanic Hazard Map of Mount Unzen, Japan* (1/25 000). Tokyo.
SIMKIN T., SIEBERT L., MCCLELLAND L., BRIDGE D., NEWHALL C., LATTER J.H., 1981. — *Volcanoes of the World.* Smithsonian Institution, Hutchinson Ross Publ., 232 p.
SUMARYONO A., 1992. — Nuees ardentes deposit and its subsequent runoff through channel. *Proc. Intern. Confer. Geography in the ASEAN region*, 31 August-3 September 1992, Yogyakarta, 9 p.
THOURET J.-C., 1990. — Les risques volcaniques et volcano-glaciaires dans les montagnes peuplées : identification, cartographie, évaluation. *Bull. Assoc. Géogr. Fra.*, **2**, 133-148.
THOURET J.-C., 1994. — Prévision des menaces et évaluation des risques volcaniques, IV, pp. 267-283, *in* J.-L. Bourdier, éditeur, *Le Volcanisme*, Manuels et Méthodes 25, Editions BRGM, Orléans.
THOURET J.-C. & LAFFORGE C., 1994. — Hazard appraisal and hazard-zone mapping of flooding and debris flowage in the Rio Combeima valley and Ibagué city, Tolima department, Colombia. *Geojournal*, 34-4, 407-413.
THOURET J.-C. & D'ERCOLE R., 1995. — Vulnérabilité aux risques naturels en milieu urbain : effets, facteurs et réponses sociales. Soumis aux *Cahiers des Sciences Humaines*, ORSTOM, Paris.
VINCENT P. M., 1992. — *Rapport de mission DRM en Indonésie* (1-18 novembre 1991) : évaluation de la situation au Merapi, 34 p., inédit.
V.S.I.- PARDYANTO L., REKSOWIROGO L.D., MITROHARTONO F.X.S. & HARDJOWARSITO S.H., 1978. — *Volcanic hazard map, Merapi volcano, central Java* (1/100 000). Geol. Survey of Indonesia, II, 14, Ministry of Mines, Bandung.
V.S.I.- WIRAKUSUMAH A.D., JUWARNA H. & LOEBIS H., 1989. — *Geologic map of Merapi volcano, Central Java* (1/50 000). Direktorat Vulkanologi, VSI, Ministry of Mines & Energy, Bandung.
V.S.I., VOLCANOLOGICAL SURVEY OF INDONESIA, 1990. — *Gunung Merapi.* n°**122**, 24 p., Direktorat Vulcanologi, Ministry of Mines & Energy, Bandung.