

Tentative de modélisation des lahars induits à Quito (Equateur) par une éruption cendreuse du volcan Pichincha

Résumé : Bâtie à 2 800 mètres d'altitude au flanc du volcan actif Pichincha (4 700 mètres), la ville de Quito encourt la menace d'une éventuelle éruption cendreuse, qui répéterait celle de 1660. Outre leurs conséquences directes (paralysie de la circulation, arrêt de la distribution d'eau potable, éventuels effondrements d'immeubles), les dépôts de cendres de 10 et 20 cm d'épaisseur pourraient provoquer une série de lahars dus aux profondes modifications de la dynamique du ruissellement sur les versants et aux fortes précipitations induites par la projection en altitude de poussières jouant le rôle de noyaux de condensation. Les volumes de boue mobilisés et susceptibles d'entrer dans la ville ont été évalués selon trois hypothèses (basse, moyenne, haute) en fonction de paramètres raisonnablement plausibles : pluie journalière de fréquence de retour décennale (52 mm) ; coefficient de ruissellement de 70 % ; mobilisation de 30 % des cendres déposées. On a tenté de cartographier l'extension dans la ville des quelque 25 lahars importants et simultanés auxquels on peut s'attendre à la suite d'une telle éruption cendreuse. La validité des hypothèses retenues est ensuite discutée. Ces hypothèses gagneraient à être confrontées aux observations effectuées après l'éruption de 1991 du Pi-

natubo aux Philippines, où des conditions similaires à celles envisagées semblent avoir été réunies.

Abstract : An attempt at modelling lahar flows in Quito (Ecuador) caused by the eruption of ashes from the volcano, Mount Pichincha. Located at an altitude of 2800 metres on the slopes of the active volcano, Mount Pichincha (4700 metres), the city of Quito lives with the risk of an eruption of ashes which could be a repeat of the eruption of 1660. In the event of such an eruption during the rainy season (October to June), heavy rainfall on the 10 to 20 cm thick ash deposits could be expected to cause multiple lahar flows in the urban area.

Estimates of the volume of mud which could be expected to affect the city were made for three hypotheses based on reasonably plausible parameters: daily rainfall for the ten-year return period (52 mm), a runoff coefficient of 70 %, and 30 % erosion of ash deposits. Some 25 large and simultaneous lahar flows were thus estimated and mapped. The validity of the assumptions adopted for these estimates was then discussed. It is suggested that the results of the study be compared with observations made after the 1991 eruption of the volcano Pinatubo in the Philippines.

Pierre Peltre*

Mots-clés :
Quito, Equateur,
volcan Pichincha,
lahar, éruption
cendreuse,
modélisation

Keywords :
Quito, Ecuador,
volcano, Pichincha,
lahar flows, ash
eruption, modelling

* ORSTOM. UR Enjeux de l'urbanisation, 72 route d'Aulnay - 93143 Bondy Cedex - France

Fonds Documentaire ORSTOM

Cote : B*9234 Ex : 1

Fonds Documentaire ORSTOM



010009234

Bâtie à 2 800 mètres d'altitude au flanc du volcan Pichincha (4 700 mètres), la capitale de l'Équateur (un million d'habitants) vit sous la menace de risques morphoclimatiques, sismiques et volcaniques importants. Deux types de risques sont liés à la proximité des volcans : l'un, de gravité faible ou moyenne, mais très fréquent, est dû à la dynamique érosive naturelle des versants du volcan Pichincha, et pose de sérieux problèmes d'aménagement de l'environnement urbain (cf. Peltre, 1992). L'autre, plus rare mais beaucoup plus dangereux, menacerait en cas d'éruption du volcan Cotopaxi le sillon intrandin, en voie d'urbanisation rapide, de puissants lahars dus à la fonte d'une partie de ses neiges (cf. D'Ercole, 1991).

Par ailleurs, le Pichincha, situé à moins de 15 kilomètres de la ville, conserve une activité géothermique certaine¹ et sa dernière éruption importante, en 1660, aurait déposé sur la ville environ 40 cm de cendres d'après les chroniques de l'époque. Selon des études vulcanologiques récentes (INEMIN et prof. Barbieri, Italie) les nuées ardentes d'une éventuelle éruption ne menaceraient directement qu'une mince frange de la ville au SW, et seulement dans le cas peu probable d'une éruption de magnitude très supérieure à celles survenues au cours des 2 000 dernières années.

Par contre toute éruption d'amplitude moyenne ou même assez faible devrait laisser sur la ville et sur les pentes qui la dominent un dépôt de cendres d'épaisseur variable selon l'importance de l'éruption et la direction des vents en altitude à ce moment-là. Ce dépôt de cendres provoquerait la paralysie des transports, l'arrêt probable de la distribution d'eau potable, et éventuellement des effondrements de maisons au cas où il atteindrait une très forte épaisseur² ; mais surtout il couvrirait la totalité des versants du Rucu Pichincha qui dominent directement la ville, et modifierait considérablement la dynamique des *quebradas* qui la traversent³. Si l'on ajoute à ceci que la projection massive de cendres dans la haute atmosphère provoque en général des pluies violentes par la multiplication des noyaux de condensation en altitude, on comprendra qu'il faille s'attendre à de nombreux lahars secondaires à l'éruption, au pied des pentes du Pichincha.

A partir d'une étude historique de la fréquence et de l'extension des crues boueuses d'origine purement climatique⁴, nous avons tenté d'estimer l'ampleur de ces lahars secondaires en fixant des hypothèses relativement basses — et donc très plausibles — pour l'épaisseur du dépôt de cendres, les caractéristiques de la

1. Une explosion géothermique localisée a tué en 1993 deux géologues de l'Ecole Polytechnique Nationale, descendus dans la caldeira du Guagua Pichincha pour y suivre des mesures d'activité.

2. Plus de 25 cm selon la carte de risques du volcan Guagua Pichincha de l'Ecole Polytechnique Nationale; cf. quotidien Hoy du 21 novembre 1988.

3. Ravins à écoulement sporadique, entaillés de 2 à 3 mètres dans les cendres volcaniques.

4. Menée par dépouillement de la presse quotidienne de 1900 à 1988 (cf. Peltre, 1989, 1992).

pluie accompagnant une éruption et les coefficients de ruissellement dans ces conditions très particulières.

Méthode

Le mécanisme de la mobilisation par la pluie d'une couche de cendres fraîchement tombées, de texture farineuse et très peu structurées, est pelliculaire ; c'est-à-dire qu'une pellicule très fine de cendres s'imbibe d'eau en un temps très court, atteint sa limite de liquidité, et se met à couler sur la pente pendant que le phénomène se répète immédiatement dans la couche sous-jacente⁵. Ceci signifie que l'infiltration est extrêmement faible dans un pareil cas, et le coefficient de ruissellement très élevé, de même que le temps de concentration de la crue est très court. Cela signifie également que le volume de cendres susceptibles d'être mobilisées ne dépend pas directement de l'épaisseur du dépôt dès lors que ce dernier dépasse un certain seuil, mais plutôt des caractéristiques de la pluie qui le mobilise.

Pour calculer le volume de boue qui pourrait affecter la ville au débouché de chaque *quebrada*, nous avons choisi les hypothèses suivantes :

— *épaisseur du dépôt de cendres* : les chroniques du XVII^e siècle font état de 40 cm de cendres, et disent que les animaux mourraient dans les champs, faute d'herbe à brouter ; cependant les vulcanologues ayant récemment étudié le Pichincha pensent que ce chiffre est très exagéré, et qu'il faut s'attendre plutôt à un dépôt de 10 à 15 cm d'épaisseur, compte tenu de la direction Est-Ouest des vents dominants⁶. Nous avons donc supposé un dépôt uniforme de 10 cm sur l'ensemble des pentes du Rucu Pichincha.

— *caractéristiques de la pluie associée à l'éruption* : on sait que la très forte densité des noyaux de condensation que constituent les cendres projetées en altitude provoque la condensation très rapide de la quasi-totalité de la vapeur d'eau présente dans l'atmosphère à ce moment-là ; il faut donc s'attendre à des pluies relativement exceptionnelles, mais les mesures font totalement défaut pour apprécier quelle fréquence d'occurrence prendre en compte. Nous avons supposé une pluie journalière de fréquence de retour décennale, correspondant à 52 mm, avec une intensité maximale de 35 mm/h durant une heure⁷ (qui conditionne le mécanisme de mobilisation des cendres par la pluie), valeur qui nous a paru plausible en cas d'éruption en saison des pluies.

5. P. Pourrut (hydrologue Orstom), communication orale.

6. Déclarations du prof. F. Barbieri à la télévision; conférence de l'Ing. Aguilera (INEMIN) aux 11^{èmes} journées de Géographie, Quito, Casa de la Cultura

7. cf. Pourrut 1989

Tableau 1 : Lahars secondaires dus à la chute de cendres en cas d'éruption du Pichincha

Quebrada	1 Superf. Km ²	2 Long. Cours Km	3 Vol. Cendres (m ³) Chute 10 cm (1)	4 Vol. Pluie (m ³) 1 heure, 52 mm	5 Vol. lahar 10 cm	6 Vol. lahar 10 cm + "nettoyage" ⁽²⁾	7 Vol. lahar 20 cm + "nettoyage" ⁽²⁾
Rumiurcu	11,67	9,10	1 167 000	606 840	774 888	919 661	1 269 761
Bellavista	0,62	1,10	62 000	32 240	41 168	58 668	77 268
Atucucho	2,87	5,10	287 000	149 240	190 568	271 704	357 804
Pulida Grande	2,50	4,80	250 000	130 000	166 000	242 364	317 364
S.N.	0,43	1,20	43 000	22 360	28 552	47 643	60 543
La Pulida Chico	3,00	5,60	300 000	156 000	199 200	288 291	378 291
La Esperanza	1,31	3,70	131 000	68 120	86 984	145 848	185 148
Las Delicias	0,47	2,00	47 000	24 440	31 208	63 026	77 126
Yacupugru	1,44	4,00	144 000	74 880	95 616	159 252	202 452
Runachanga	1,15	3,70	115 000	59 800	76 360	135 224	169 724
S. Vicente	0,77	2,40	77 000	40 040	51 128	89 310	112 410
La Concepción	0,66	2,80	66 000	34 320	43 824	88 369	108 169
Osorio	0,06	0,50	6 000	3 120	3 984	11 939	13 739
Caicedo	1,27	3,40	127 000	66 040	84 328	138 419	176 519
Mirador	0,34	1,10	34 000	17 680	22 576	40 076	50 276
Chimichamba	0,18	0,80	18 000	9 360	11 952	24 679	30 079
Manzanachupa	0,95	2,10	95 000	49 400	63 080	96 489	124 989
Rumichaca	0,72	2,90	72 000	37 440	47 808	93 944	115 544
Nunguilla	0,82	2,60	82 000	42 640	54 448	95 812	120 412
Rumipamba	6,97	6,30	697 000	362 440	462 808	563 035	772 135
S.N.	0,69	2,00	69 000	35 880	45 816	77 634	98 334
De la Comunidad	0,91	2,60	91 000	47 320	60 424	101 788	129 088
Pambachupa	1,06	3,30	106 000	55 120	70 384	122 884	154 684
Vásconez	0,77	2,60	77 000	40 040	51 128	92 492	115 592
El Armero	0,77	2,70	77 000	40 040	51 128	94 083	117 183
S.N.	0,32	1,10	32 000	16 640	21 248	38 748	48 348
Miraflores	1,96	3,00	196 000	101 920	130 144	177 871	236 671
EL Tejar	0,57	1,50	57 000	29 640	37 848	61 712	78 812
Manosalvas	0,13	0,90	13 000	6 760	8 632	22 950	26 850
Jerusalem	4,99	4,40	499 000	259 880	331 336	401 336	551 036
Navarro	2,18	2,10	218 000	113 360	144 752	178 161	243 561
S. José	0,82	1,00	82 000	42 640	54 448	70 357	94 957
Alcantarilla	4,14	2,70	414 000	215 280	274 896	317 851	442 051
La Raya	1,17	1,50	117 000	60 840	77 688	101 552	136 652
Yacubata	0,82	1,30	82 000	42 640	54 448	75 130	99 730
Chahuarpata	1,22	2,80	122 000	63 440	81 008	125 553	162 153
Rinconada	0,76	1,80	76 000	39 520	50 464	79 100	101 900

Hypothèses :

(1) Chute de cendres de 10 cm selon l'hypothèse minima de l'INEMIN - Pour 30% de cendres mobilisables

Pluie journalière de fréquence décennale = 52 mm ; intensité de 35 mm/h durant une heure - Coefficient de ruissellement de 70 %

(2) Une fois démarré l'écoulement, on a supposé un effet de "nettoyage" du lit fonction de la longueur du cours, et proportionnel au volume des matériaux mobilisés lors de la crue boueuse de la Gasca (= 52 500 m³)

Crue boueuse de la Gasca :

Volume des matériaux solides estimé à 52 500 m³ ; si l'on ajoute 1/3 d'eau, on aboutit à un volume estimé du flux de 70 000 m³

— *coefficient de ruissellement* : nous avons vu que le mécanisme de mobilisation des cendres fraîches implique une très faible infiltration, et une élévation considérable du pourcentage d'eau qui ruisselle ; un coefficient de ruissellement global de 70 % a donc été supposé, constituant probablement une valeur sous-estimée selon P. Pourrut. Cette valeur mériterait d'être sérieusement affinée dans l'espace (selon la pente principalement) et par rapport à l'évolution dans le temps des caractères physiques de la couche de cendre, évolution probablement rapide mais dont on sait encore peu de chose.

— *volume maximum de cendres mobilisables* : les mécanismes en jeu font appel principalement à l'intensité horaire des pluies, ainsi qu'aux caractéristiques physiques des cendres fraîches, paramètres qui restent largement hypothétiques. Cependant l'observation géologique montre que les dépôts de cendres des éruptions anciennes moulent toujours des reliefs à pentes fortes et très fortes, et il faut donc supposer que les cendres tombées sur le bassin-versant d'une *quebrada* ne peuvent pas être mobilisées en totalité par les eaux de ruissellement ; nous avons supposé que 30 % seulement du dépôt de cendres pouvait être emmené, le reste demeurant partiellement accroché aux pentes fortes, ou dans une proportion plus élevée aux pentes faibles et aux replats des bassins-versant.

— *effet de « nettoyage » du lit* : enfin le bouleversement de la dynamique des *quebradas* par la forte augmentation du ruissellement doit faire supposer des reprises d'érosion des berges du lit, probablement comparables en volume à ce qui se passe dans les *lahars* habituels ; compte tenu du caractère très exceptionnel des crues que l'on peut attendre en présence d'un tel dépôt de cendres, nous avons compté dans l'estimation de cet effet de « nettoyage » un volume de débris correspondant à celui estimé lors de l'accident de la Gasca de 1975 (pour lequel il existe une bonne estimation du volume des atterrissements), proportionnel à la longueur du cours principal.

L'estimation des volumes de boue susceptibles de pénétrer dans la ville figure dans le tableau 1, où les colonnes (5), (6) et (7) expriment trois hypothèses croissantes :

(5) : Volume du lahar prévisible au cas où aucune reprise d'érosion n'aurait lieu dans le lit de la *quebrada* (pas d'effet de « nettoyage », mobilisation de 30 % des 10 cm de cendres) ;

(6) : Volume du lahar prévisible dans les mêmes conditions, avec reprise d'érosion correspondant au dépôt solide estimé

lors de l'accident de la Gasca, en proportion de la longueur du cours principal de la *quebrada* considérée.

(7) : Volume du lahar prévisible avec 20 cm de cendres, dans les mêmes conditions.

Les règles de calcul suivantes ont été appliquées au tableau (exemple de la *quebrada* Pambachupa) :

Col. (1) : Superficie du bassin-versant = 1,06 km²

Col. (2) : Longueur du cours = 3,3 km

Col. (3) : Volume du dépôt de cendres : 1 060 000 m² x 0,1 m = 106 000 m³

Col. (4) : Volume d'eau tombée sur le bassin-versant : 1 060 000 m² x 0,052 m = 55 120 m³

Col. (5) : Volume probable du lahar (sans effet de nettoyage) :

$106\,000\text{ m}^3/100 \times 30 + 55\,120/100 \times 70 = 70\,384\text{ m}^3$

Col. (6) : Volume probable du lahar (70 % de la lame d'eau tombée + 30 % des cendres + volume du « nettoyage ») : $38\,584 + 31\,800 + 52\,500 = 122\,884\text{ m}^3$

Col. (7) : Volume probable du lahar en cas de chute de cendres de 20 cm (70 % de la lame d'eau tombée + 30 % d'un volume double de la col. (3) + volume du « nettoyage ») : $38.584 + 63\,600 + 52\,500 = 154\,884\text{ m}^3$

Le volume estimé du « nettoyage » du lit a été calculé comme équivalent au dépôt solide de l'accident de la Gasca, et proportionnel à la longueur du cours principal de la *quebrada* considérée : $52\,500\text{ m}^3 \times 2,6/3,3 = 41\,363\text{ m}^3$ dans le cas de la *quebrada* Vásconez

8. Crue boueuse la plus violente survenue dans la période 1900 - 1988, due à une précipitation exceptionnelle, non mesurée et limitée au seul bassin-versant de la *quebrada* Pambachupa. Le flux a traversé la ville d'ouest en est sur trois kilomètres, la charge solide étant attribuée à l'érosion des berges. L'existence d'un phénomène d'embâcle est écartée par l'étude la plus détaillée, mais reste controversée.

Cartographie d'extension

Pour avoir une idée concrète de l'extension des lahars secondaires à une éruption du Pichincha dans ces conditions, on s'est référé à la crue boueuse survenue en 1975 dans l'avenue La Gasca⁸, où le volume des matériaux solides déposés dans la ville par la crue de la *quebrada* Pambachupa a été évalué à 52 000 m³ (Feininger, 1975), et dont on connaît l'extension dans la ville ; cette extension a servi de base pour estimer la zone qui serait touchée par chacun des lahars prévisibles, en fonction de la to-

pographie du site urbain et de la connaissance historique des accidents morphoclimatiques survenus entre 1900 et 1988, dont chaque crue boueuse a été cartographiée au mieux de ce que permettrait l'information disponible⁹. S'agissant de l'estimation du dépôt solide, il faut ajouter à cette valeur le volume de l'eau constituant la boue pour obtenir des valeurs comparables aux estimations du tableau 1 ; l'expérience montre qu'un tiers d'eau mélangé aux cendres est suffisant pour obtenir une boue déjà très liquide, et le volume global du lahar de La Gasca peut donc être estimé à 70 000 m³ environ.

En prenant en compte l'hypothèse la plus basse, soit la seule mobilisation de 30 % des cendres, sans reprise d'érosion dans le lit des *quebradas* (colonne 5), on constate que le lahar prévisible dans le cas de la *quebrada* Pambachupa atteint le même volume que celui de 1975, considéré comme très exceptionnel dans la mesure où il n'a été observé qu'une seule fois en un siècle. Mais dans le cas considéré, au lieu d'être limité à une ou deux *quebrada*, il est pratiquement sûr que l'on assisterait à un lahar sur chacune des *quebrada* du Pichincha. De plus, neuf de ces *quebrada* dépassent le double ou le triple du volume du lahar de 1975, atteignant cinq, six et dix fois ce volume pour les *quebrada* Jerusalem, Rumipamba et Rumiurcu. Si l'on tient compte du fait que l'énergie des flux boueux croît beaucoup plus vite qu'en proportion du volume, on conçoit que l'on assisterait à une dizaine de lahars réellement destructifs en pleine ville.

Dans l'hypothèse où le déclenchement de la crue entraîne la reprise d'érosion de sédiments anciens dans le lit des *quebrada* (colonne 6), le volume de boue mobilisée double presque, avec les mêmes conséquences catastrophiques sur l'accroissement de l'énergie développée. Il faut dans ce cas s'attendre à dix-sept lahars destructifs dépassant les 100 000 m³, la plupart des petites *quebrada* approchant le volume du lahar de la Gasca. Enfin dans le cas d'une chute de cendre atteignant 20 cm d'épaisseur, le volume de boue mobilisée dépasse largement le double de celui estimé lors de l'accident de la Gasca, pour atteindre respectivement huit, dix et dix-huit fois son volume pour les mêmes *quebradas* Jerusalem, Rumipamba et Rumiurcu. La figure 1 tente une cartographie estimée des zones menacées dans les hypothèses basse (colonne 5) et moyenne (colonne 6), sur la base des superficies atteintes par la crue boueuse de la Gasca de 1975 et en affectant un potentiel destructif grave aux lahars de volume supérieur au double de ce dernier.

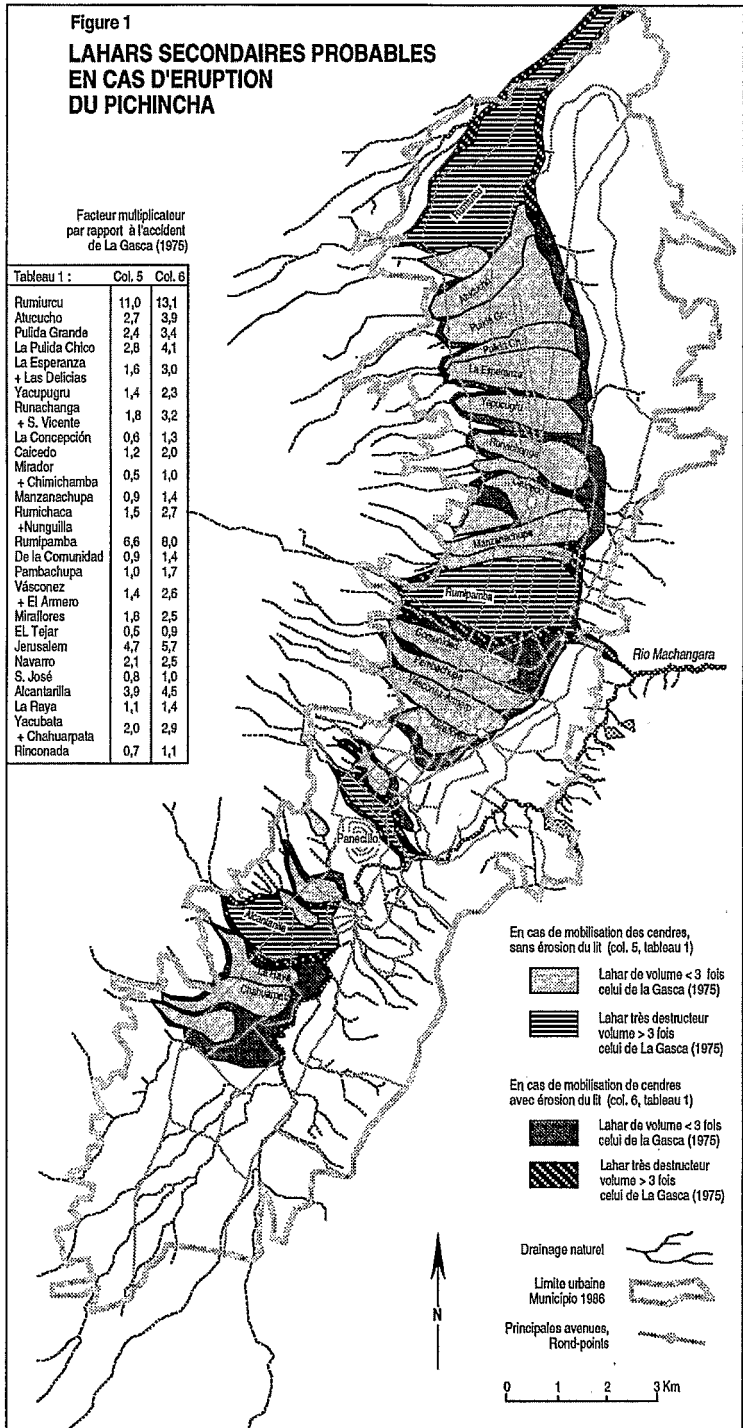
9. Etude menée par dépouillement de la presse quotidienne de 1900 à 1988, pour connaître la fréquence d'occurrence et la distribution spatiale de quatre types d'accidents de nature morphoclimatique : inondations, crues boueuses, éboulements, effondrements de chaussée (cf. Pelire, 1989, 1991)

Figure 1

LAHARS SECONDAIRES PROBABLES EN CAS D'ERUPTION DU PICHINCHA

Facteur multiplicateur
par rapport à l'accident
de La Gasca (1975)

Tableau 1 :	Col. 5	Col. 6
Rumiurcu	11,0	13,1
Atuccho	2,7	3,9
Pulida Granda	2,4	3,4
La Pulida Chico	2,8	4,1
La Esperanza	1,6	3,0
+ Las Delicias		
Yacupugru	1,4	2,3
Ronachanga	1,8	3,2
+ S. Vicente		
La Concepción	0,6	1,3
Caicedo	1,2	2,0
Mirador	0,5	1,0
+ Chimichamba		
Manzanachupa	0,9	1,4
Rumichaca	1,5	2,7
+Nunguilla		
Rumpamba	6,6	8,0
De la Comunidad	0,9	1,4
Pambachupa	1,0	1,7
Vásconez	1,4	2,6
+ El Armero		
Miraflores	1,8	2,5
EL Tejar	0,5	0,9
Jerusalém	4,7	5,7
Navarro	2,1	2,5
S. José	0,8	1,0
Alcantarilla	3,9	4,5
La Raya	1,1	1,4
Yacubeta	2,0	2,9
+ Chahuarpata		
Rinconada	0,7	1,1



Discussion

Bien sûr les valeurs retenues pour les cinq facteurs qui conditionnent l'estimation du volume et de l'ampleur des lahars ne correspondent qu'à des quantités jugées plausibles au regard des rares références disponibles, et sont susceptibles de varier considérablement tant selon l'ampleur et les caractéristiques de l'éruption qu'en fonction de la situation météorologique. Il conviendrait de plus de raisonner en termes de concentration volumique plutôt que de calculer séparément des volumes d'eau ruisselée et de cendres mobilisées¹⁰ ; mais s'agissant d'écoulements lahariques qui prennent origine dans la lame d'eau ruisselée, le calcul ne peut reposer que sur le volume d'eau susceptible de ruisseler, qui seul peut être estimé en fonction du coefficient de ruissellement retenu, et sur la proportion des cendres mobilisables, avec naturellement une forte incertitude quant au détail du mécanisme de mobilisation. Les valeurs qui me semblent les plus incertaines sont sans doute les caractéristiques de la pluie liée à l'éruption qui dépendent d'abord de la quantité de vapeur d'eau présente dans l'atmosphère au moment de l'éruption, et le volume des cendres potentiellement mobilisables, forcément très variable dans l'espace en fonction de l'intensité horaire de la pluie, particulièrement difficile à prédire, de la topographie et de la variabilité de texture des cendres.

Faut-il par ailleurs prendre en compte une érosion des berges ? Au plan théorique on estime généralement qu'un fluide déjà chargé de sédiments est moins érosif que l'eau claire, mais on connaît aussi la puissance destructrice considérable des flux lahariques qui, s'ils sont capables de raser des constructions, me semblent pouvoir également remanier des matériaux des berges. La question demeurant non résolue, la colonne 6 du tableau 1 en donne un ordre de grandeur possible.

Enfin il n'est sans doute pas sûr qu'une plus forte épaisseur de cendres tombées en augmente linéairement les volumes mobilisables ; il est en effet probable qu'à partir d'un certain seuil, cette valeur dépende plus de l'intensité et du volume de la pluie que du volume de cendres disponibles ; aussi la colonne 7 du tableau 1 ne figure à titre indicatif qu'une valeur haute de la fourchette pour les paramètres retenus, qui ne devrait pas être atteinte. On touche là les limites de l'exercice, qui vise plus à évaluer globalement les effets possibles dans certains cas défa-

10. Soit savoir quel volume d'eau il faut ajouter pour obtenir une boue liquide, plutôt que de poser la question de combien de cendres la lame d'eau ruisselée est capable de mobiliser et de transporter.

variables qu'à effectuer une prévision proprement dite, pour laquelle il conviendrait d'appliquer des références plus nombreuses, en raisonnant par bassin-versant et en s'appuyant sur un modèle numérique de terrain. L'ensemble des hypothèses retenues gagnerait à être confrontées aux observations effectuées après l'éruption de 1991 du Pinatubo aux Philippines (ce qui n'a pu être fait), où des conditions similaires à celles envisagées semblent avoir été réunies.

Dans le cas où l'éruption se produirait par chance en saison sèche (entre juillet et septembre), ou au cours d'une période plus sèche de la saison des pluies, la ville éviterait la catastrophe brutale par l'absence de pluies violentes sur les cendres fraîchement déposées. Il resterait cependant une menace dans le futur, moins grave certes, mais encore non négligeable. En effet, l'expérience acquise au Costa Rica après l'éruption du volcan Irazú de 1963 à 1965, près de San José (H. Waldron, 1967), montre qu'un manteau de cendres, même indurées en surface comme dans ce cas précis, continue durant plusieurs années à provoquer de grands glissements de terrain, et à fortement accroître les crues, qui sont alors capables de fortes reprises d'érosion de leurs berges et provoquent des coulées de boue répétées même lors de saisons des pluies peu importantes.

Après une éruption du Pichincha en saison sèche, il faudrait donc s'attendre dans la ville à des lahars répétés et dispersés dans le temps, certainement de moindre importance que ceux, catastrophiques parce que simultanés, qui accompagneraient une éruption en pleine saison des pluies. Mais ces lahars pourraient atteindre ou dépasser dans une dizaine de *quebradas* les proportions de celui de 1975, et certains d'entre eux pourraient avoir un caractère encore gravement destructif. Le phénomène serait à craindre durant plusieurs années, jusqu'à ce que la reprise de la végétation permette une nouvelle stabilisation des versants, et perturberait gravement le fonctionnement de la ville.

Dans les trois hypothèses étudiées on aurait affaire à une véritable catastrophe urbaine susceptible de provoquer plusieurs centaines, voire plusieurs milliers de morts si l'évacuation des zones menacées n'est pas décidée en temps utile. Il est clair que face à cette menace catastrophique, aucune mesure de protection par la construction d'ouvrages civils ne peut être de la moindre utilité, et que la solution relève de toute évidence de

mesures de Défense civile efficaces. Dès le déclenchement de l'éruption, la surveillance des versants du Pichincha devrait permettre de repérer le dépôt significatif de cendres, et de donner l'ordre d'évacuation en tenant compte de la gêne que causerait aux transports les chutes de cendres dans la ville elle-même. La préparation d'un tel plan d'évacuation suppose l'identification des zones menacées, au sein desquelles chaque immeuble devrait afficher un plan d'évacuation indiquant clairement comment se manifesterait l'alerte (signaux par sirènes), et où aller sans délai en cas d'alerte ; elle comprend également l'identification des zones d'accueil jugées sûres, ainsi que la préparation de structures d'urgence permettant de loger et de nourrir les populations déplacées. Le succès de ce type d'évacuation d'urgence est avant tout un problème d'éducation des populations concernées, qui doivent connaître avec précision quel est le risque qui les menace et quoi faire exactement en cas d'alerte.

Références

- D'ERCOLE R., 1991. — Vulnérabilité des populations face au risque volcanique. Le cas de la région du volcan Cotopaxi (Equateur). 459 p. multigr., thèse doctorat Univ. Grenoble I.
- D'ERCOLE R., MONCAYO J.F., 1991. — « Influent locaux » face à une situation d'urgence : une analyse selon l'hypothèse d'une éruption du volcan Cotopaxi (Equateur). in : *Bull. de l'Inst. Fr. Et. Andines*, Lima, sous presse.
- FEININGER T., 1976. — El flujo de escombros en La Gasca. Un informe científico. in : *IPGH, Boletín de la Sección Nacional del Ecuador* n° 5-6, enero-junio 1976, Quito.
- PELTRE P., 1989. — Quebradas y riesgos naturales en Quito, período 1900-1988. pp. 45-91 in : *Riesgos naturales en Quito. Estudios de Geografía* n° 2, 1989, 92 p, Corporación Editora Nacional, Quito.
- PELTRE P., 1991. — Accidents morphoclimatiques à travers la presse. Quito (Equateur) 1900-1988 - De l'information qualitative à la cartographie de fréquences : problèmes d'échelles. pp. 291-318 in : *Séminfor IV. Le transfert d'échelle*. coll. « Colloques et Séminaires », 518 p., Orstom, Paris.
- PELTRE P., 1992. — Risque morphoclimatique urbain à Quito (Equateur). Période 1900-1988. in : *L'Espace Géographique* 2-1992, pp.123-136, Doin-Reclus, Paris.
- PELTRE P., D'ERCOLE R., 1992. — La ville et le volcan. Quito, entre Pichincha et Cotopaxi (Equateur), pp. 439-459, 3 fig., in : *Cahiers des Sciences Humaines* 23 (3) 1992, Orstom, Paris.
- POURRUT P., LEIVA I., 1989. — Las lluvias de Quito : características generales, beneficios y problemática, pp. 33-44, 3 fig., in : *Riesgos na-*

turales en Quito. Estudios de Geografía n° 2, 1989, 92 p, Corporación Editora Nacional, Quito.

WALDRON H.H., 1967. — Debris flow and erosion control problems caused by the ash eruptions of Irazú volcan, Costa Rica. pp. 11-35 en : *Geological survey bulletin* 1241-I, Washington.