La ville et le volcan

Quito, entre Pichincha et Cotopaxi (Équateur)

Pierre PELTRE* et Robert D'ERCOLE**

INTRODUCTION

Bâtie à 2800 m d'altitude à proximité de deux volcans actifs, Quito, capitale de l'Équateur (un million d'habitants) subit régulièrement inondations et éboulements; la ville vit sous la menace de risques naturels très sérieux, comme l'ont rappelé l'éruption du Cotopaxi au siècle dernier, qui avait causé plusieurs dizaines de morts dans une zone alors faiblement occupée mais actuellement urbanisée, ou encore le tremblement de terre en 1987, qui fissura la plupart des nombreuses églises coloniales. L'insécurité de l'environnement urbain à des échelles de temps très diverses, due à un site andin volcanique, pose à la ville des problèmes de gestion de son environnement; nous présenterons ceux qui sont directement ou indirectement liés au volcanisme. La prévention des risques sismiques, encore impossibles à prévoir avec une précision utile, repose principalement sur l'application de normes de construction correctes, aspect encore trop peu étudié jusqu'à présent.

L'un des risques liés à la proximité des volcans, de gravité faible ou moyenne mais très fréquent, est dû à la dynamique érosive naturelle des versants du volcan Pichincha (qui domine la ville), assez particulière dans la mesure où elle affecte des cendres volcaniques; si ce risque ne menace guère la vie des populations, il pose de sérieux problèmes d'aménagement de l'environnement urbain. L'autre risque, plus rare mais beaucoup plus dangereux, menacerait certains secteurs

* *Géographe Orstom, 213, rue La Fayette, 75480, Paris cedex 10.*
** *Géographe Ifea, Les Mas-Perrichaud n° 5, 15 rue de la Contamine, 38120, Saint-Égrève.*

Cah. Sci. Hum. 28 (3) 1992 : 439-459

de la ville ou de l'aire métropolitaine par de vastes coulées de boue et de débris — les lahars — susceptibles de causer des milliers de victimes en cas d'éruption de l'un des deux volcans (fig. 1); sa prévention se pose en termes de protection civile : éducation, alerte, évacuation des populations menacées, mais aussi en termes de gestion de la croissance urbaine par rapport à un environnement menaçant.

Nous résumons ici les conclusions de deux études menées sur ces risques naturels et sur la manière d'en organiser au mieux la prévention, en insistant sur les implications en termes de gestion de l'environnement urbain.

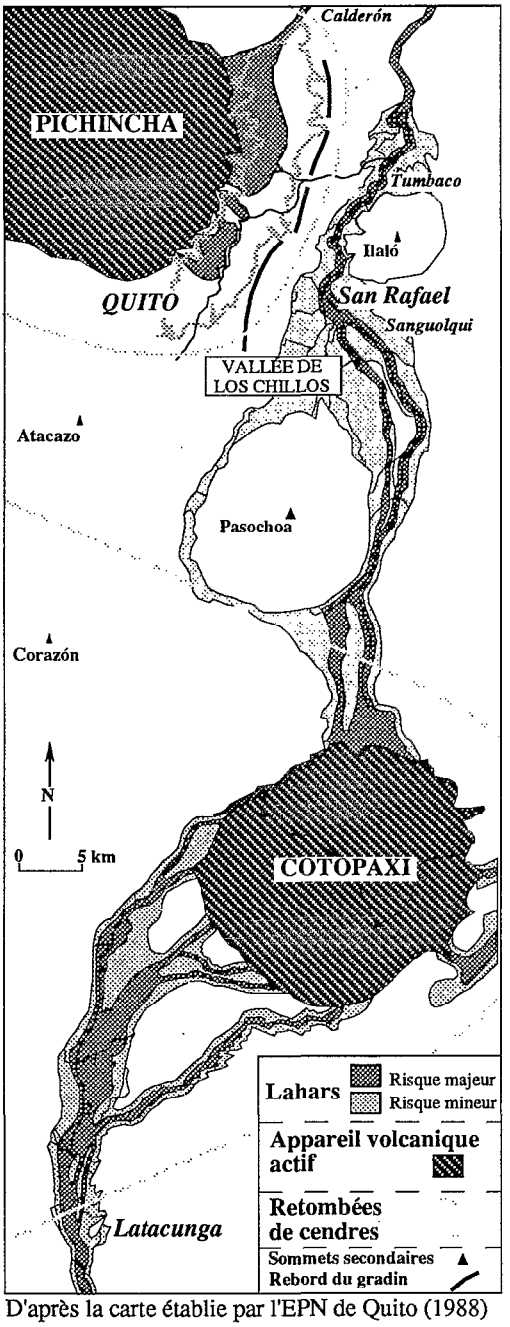
LA DIFFICILE GESTION D'UN ENVIRONNEMENT MONTAGNEUX VOLCANIQUE

Le 4 mai 1978, à deux heures du matin, dans l'avenue America à Quito, une Volkswagen disparaît sous les yeux ébahis du chauffeur du bus qui la croisait; elle vient d'être engloutie par le brusque effondrement de la chaussée sur plusieurs mètres de diamètre et de profondeur. Ce fait divers spectaculaire résume bien les nombreux incidents et accidents liés à la perturbation du drainage naturel par l'urbanisation à Quito : inondations, coulées de boue, effondrements de voirie et éboulements de talus, dont un grand nombre est dû au remblaiement systématique du réseau de drainage naturel des *quebradas* (ravins à écoulement sporadique, entaillés de 2 à 30 mètres dans les cendres volcaniques).

Dans le cadre de l'*Atlas informatisé de Quito*, une étude historique de ces événements répétés a été menée pour établir leur fréquence, largement méconnue et sous-évaluée, et pour identifier les zones sensibles de la ville. La méthode de travail a consisté à dépouiller systématiquement depuis 1900 le principal quotidien de la capitale, *El Comercio*, pour constituer un fichier de 317 résumés d'accidents (1). Ce fichier a permis ensuite la cartographie de l'extension des accidents, qui identifie les zones sensibles de la ville, ainsi que l'étude de leur fréquence et une cartographie dans le temps rapportée aux grandes étapes de la croissance urbaine (PELTRE, 1989-b).

La ville est située à 2800 mètres d'altitude sur un gradin tectonique, marche d'escalier au flanc du volcan actif Pichincha (4700 mètres);

(1) Qui ont ensuite été ventilés en 567 foyers *géographiquement localisés* par noms de rues et de quartiers.



D'après la carte établie par l'EPN de Quito (1988)

FIG. 1. — Menaces potentielles du Pichincha et du Cotopaxi.

l'évacuation des eaux de ruissellement de son versant oriental s'effectue par le réseau des égouts qui ont remplacé la quasi-totalité des *quebradas*, réseau dont l'insuffisance lors des pluies les plus intenses provoque de fréquents problèmes du drainage urbain.

Quatre types d'accidents

Les inondations

Les inondations traduisent directement l'insuffisance chronique du réseau de drainage lors des fortes précipitations. Comme les averses sont d'autant plus localisées qu'elles sont intenses, ces inondations n'ont habituellement qu'une extension limitée dans l'espace et elles ne durent guère plus de deux à quatre heures. Les eaux qui excèdent la capacité des égouts empruntent les rues en pente et s'accumulent quelque temps dans les rues transversales et dans les zones basses; elles atteignent couramment 30 à 60 centimètres de hauteur, rarement plus. L'extension varie de quelques pâtés de maisons au quartier tout entier sur les pentes faibles, mais l'inondation peut affecter des secteurs plus vastes dans les zones planes de la « plaine de Quito ». Ces inondations, très fréquentes avec 226 événements relevés sur l'ensemble de la période, sont en général liées au tracé des anciennes *quebradas*. Elles ne provoquent ordinairement que des dégâts relativement peu importants : rez-de-chaussée mouillés, quelques maisons précaires abîmées ou parfois détruites, usure accélérée des chaussées; dans tous les cas, elles paralysent la circulation dans la ville.

Les crues boueuses

Les crues boueuses sont moins fréquentes (70 accidents relevés) mais nettement plus destructrices que les inondations. Il s'agit de crues à forte charge solide, laquelle est alimentée par l'érosion des berges, parfois par des éboulements ou des coulées de boue en amont; elles sont liées à des averses violentes de fréquence de retour décennale ou plus rares. Leur extension varie de quelques centaines de mètres de longueur à 3 kilomètres, voire 4, sur 100 à 400 mètres de largeur (2); outre la boue déposée sur 30 à 60 centimètres d'épaisseur, des pierres, des blocs et des troncs d'arbres sont également entraînés par le flux dans les cas les plus graves. Ce sont des accidents de la périphérie de la ville, directement liés au tracé des actuelles *quebradas*. Les dégâts peuvent être importants, avec destruction partielle de

(2) Pour une description détaillée d'une crue boueuse et de ses effets, voir DE NONI *et al.* (1988).

maisons, de voitures et d'équipements de voirie, colmatage du réseau d'égouts sur des superficies importantes et, parfois, pertes de vies humaines, comme dans l'accident de la Gasca du 25 février 1975, célèbre à Quito, où il y eut deux morts.

Les effondrements de chaussée

Les effondrements de chaussée, dus à la rupture d'égouts défectueux dans le matériau de remblaiement des anciennes *quebrada*s, sont des accidents plus rares (36 depuis 1900), mais spectaculaires; ils frappent tout particulièrement l'imaginaire collectif. Leur mécanisme est lié à l'érosion souterraine dans des conditions assez particulières; lors d'une forte précipitation, sous l'effet de la pression atteinte par les eaux dans les secteurs pentus, la rupture d'un collecteur d'égout produit un écoulement parallèle au collecteur dans les matériaux de remblaiement peu compacts d'une *quebrada*. Cet écoulement, qui poursuit un lent travail d'évacuation des sables et limons (processus de suffosion), creuse progressivement une cavité sous la chaussée; pendant un certain temps, cette dernière résiste grâce au compactage des couches superficielles et l'érosion souterraine passe complètement inaperçue. La voûte cède brusquement lorsque la cavité, suffisamment agrandie, ouvre dans les avenues des ravins spectaculaires qui peuvent atteindre 20 mètres de profondeur et autant de largeur sur 150 mètres de long.

Les éboulements

Les éboulements sont des accidents assez fréquents (114 répertoriés), beaucoup plus ponctuels, qui affectent les quartiers construits sur des pentes fortes. Ce sont des morceaux de talus hauts de quelques mètres, d'un volume limité, qui s'éboulent, emportant quelques maisons ou enterrant celles qui se trouvent en aval. Ces éboulements sont liés à l'affaiblissement de la cohérence des cendres volcaniques par l'humidité en bordure de talus mal étayés et mal drainés; il ne s'agit pas de boue, mais de masses de terre humide qui ne parcourent que de petites distances. Pour être très localisés, ils n'en sont pas moins graves puisqu'ils provoquent le plus souvent des destructions de maisons; il s'agit en fait des accidents les plus meurtriers avec plus de 80 morts au cours de la période étudiée.

L'analyse historique du risque

Un histogramme des fréquences d'accidents a été tracé à partir du fichier des 567 foyers localisés selon trois auréoles successives de croissance urbaine :

— le noyau historique qui existait en 1900;

— les zones construites au nord et au sud de ce noyau entre 1900 et 1947;
— les zones apparues entre 1947 et 1988.

Cet histogramme indique un déplacement, au fil du temps, des fortes fréquences depuis la zone bâtie la plus ancienne vers les plus récentes, ainsi qu'un glissement des *maxima* dans la fréquence des éboulements et crues boueuses : nombreux dans le centre colonial jusqu'en 1930, ces accidents se raréfient ensuite et disparaissent presque après 1963, alors qu'ils sont fréquents dans la zone construite entre 1900 et 1947, et qu'ils constituent le maximum dans celle la plus récemment urbanisée (PELTRE, 1989-a et -b)

La cartographie dans le temps des accidents confirme cette analyse (3) : les crues boueuses, très présentes dans le centre historique entre 1900 et 1967, y disparaissent ensuite, pour se déplacer vers la périphérie de la ville. Pourtant, dès le début du siècle, on note des crues boueuses au pied des grandes *quebradas* du Pichincha, dans des zones alors non urbanisées où le drainage naturel était encore peu modifié; ces accidents, qui affectaient des ponts, des routes ou des villages, marquent les zones naturellement sensibles où l'urbanisation n'aurait dû être développée qu'avec des précautions de contrôle du drainage, de préférence maintenu à ciel ouvert.

Au total 71 accidents ont causé des dégâts importants ou très importants depuis 1900, ainsi que des morts et des blessés. Le dépouillement du fichier indique 168 morts, dont 82 sont dus aux seuls éboulements, 70 aux crues boueuses, et 14 aux inondations. Mais les articles, souvent imprécis, sous-estiment sans doute parfois le nombre des victimes, qui ne devrait pas dépasser 250 depuis le début du siècle.

Croissance urbaine et gestion du milieu

Les problèmes majeurs du site urbain sont directement liés au remplacement du système naturel de drainage des *quebradas* par un réseau d'égouts, largement sous-dimensionné à l'égard des crues, même de période de retour relativement courante (cinq ans). Au seul point de vue géomorphologique, prétendre évacuer les débits de pointe des *quebradas* du Pichincha — et la charge solide qui leur est nécessairement associée — par le seul réseau des égouts urbains constitue une gageure. Il est clair que la solution la plus sage aurait

(3) Pour les éléments graphiques et les cartes qui fondent cette analyse, voir PELTRE (1989-b, 1991)

été d'aménager à travers la ville des écoulements à ciel ouvert, en assurant la circulation par des ponts; mais l'urbanisation s'est faite — suivant une tradition très ancienne — en remblayant les drains, et la situation est maintenant irréversible, sauf à envisager un utopique remodelage de la ville, politiquement impensable. Cette pratique constante d'une gestion de l'espace par le remblaiement ne semble du reste pas répondre qu'à des impératifs technologiques, mais également à de vieilles peurs populaires qui relèvent de l'approche anthropologique et qui situent nombre de contes effrayants dans ces espaces incontrôlés que sont les *quebradas*.

Des solutions techniques existent pourtant pour maîtriser ces accidents par l'amont, ou tout au moins en diminuer la fréquence : l'*Empresa Municipal de Alcantarillado* (EMA), chargée de la gestion des égouts, a réalisé 2 types d'aménagement : des retenues-tampon qui permettent d'écrêter les crues, ou la dérivation de 3 *quebrada* dans une autre, pourvue d'une meilleure évacuation. La question est alors de choisir pour quelle période de retour des pluies de fréquence rare il convient de dimensionner les ouvrages, en comparant le coût croissant des investissements de protection avec celui des dégâts provoqués par les accidents, ainsi qu'avec leur coût social. Elle est également de savoir contrôler les lieux où s'exerce la croissance urbaine et d'éviter que ne soient bâtis les sites les plus dangereux.

La vieille ville connaît depuis bientôt vingt ans une certaine stabilisation due à des travaux d'amélioration du drainage et à la meilleure protection que lui offrent maintenant les nouveaux quartiers développés à sa périphérie. Ce sont ces quartiers des auréoles récentes de la croissance urbaine — souvent spontanés, ce sont alors les quartiers plus pauvres — qui paient actuellement le plus lourd tribut en accidents du drainage proprement dit, ainsi qu'en éboulements dans les zones pentues. Les accidents qui affectent Quito depuis le début du siècle constituent ainsi plus un problème de croissance urbaine mal maîtrisée, en termes d'aménagement et de gestion du milieu, que d'accidents d'origine morphoclimatique proprement dits au sens d'un risque « naturel ». Ce qui fait problème, c'est moins la dynamique érosive et l'alluvionnement en milieu de montagne — inévitables et qui gênaient peu en environnement rural — que la présence même de la ville sur les lieux où s'exerce cette dynamique.

Il est étonnant de constater à quel point les séries d'accidents sont vite oubliées; si l'hiver 1982-1983 a laissé un souvenir encore très vif cinq ans après, des années noires comme 1950, 1958 ou 1961, qui furent presque aussi graves, semblent avoir disparu de la mémoire collective, et il faut les exhumer des archives de presse pour en mesurer l'ampleur. Sans doute leur extension limitée dans l'espace cantonne-t-elle les accidents au rang de faits divers sans portée

réellement menaçante ; peut-être aussi la disponibilité d'un espace urbain homogène, sans morcellement ni subsistance des espaces incontrôlés qu'étaient les *quebradas*, vaut-elle dans l'esprit des Quiténiens quelques inconvénients.

LE FUTUR : SOUS LA MENACE DU PICHINCHA

Quito est située à une quinzaine de kilomètres du cratère du Pichincha, volcan à faible activité géothermique, dont la dernière éruption importante, en 1660, aurait déposé sur la ville environ 40 centimètres de cendres d'après les chroniques de l'époque. Selon des études volcanologiques récentes (Institut national des mines [Inemin]), les nuées ardentes d'une éventuelle éruption ne menaceraient directement qu'une mince frange de la ville au sud-ouest, et seulement dans le cas — estimé fort peu probable — d'une éruption de magnitude très supérieure à celle des éruptions survenues au cours des 2000 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 dépasserait 25 centimètres d'épaisseur ; mais surtout il couvrirait la totalité des versants du volcan qui dominent directement la ville et il modifierait considérablement la dynamique de ses *quebradas*. Si l'on ajoute 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 comprend qu'il faudrait s'attendre à de nombreux lahars secondaires à l'éruption, flux de boue et de débris qui menaceraient tous les quartiers du piémont (4).

Un risque volcanique indirect

À partir de l'analyse des crues boueuses d'origine purement climatique, nous avons tenté d'évaluer l'ampleur de ces lahars secondaires en

(4) L'éruption à forte dominante de cendres du volcan Pinatubo (Philippines), survenue mi-juin 1991, où les fortes pluies de la saison des typhons ont provoqué de nombreuses coulées de boue et crues boueuses, confirme ce scénario.

fixant des hypothèses relativement basses — donc plausibles — pour l'épaisseur du dépôt de cendres, les caractéristiques de la pluie qui accompagne une éruption et les coefficients de ruissellement dans ces conditions très particulières.

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 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-jacente (POURRUT [hydrologue Orstom], *comm. orale*). Cela signifie que l'infiltration est alors faible, le coefficient de ruissellement élevé, et le temps de concentration de la crue très court. De ce fait, une érosion linéaire s'ajoute à l'ablation pelliculaire dès que les écoulements élémentaires se concentrent.

Globalement, le volume des cendres mobilisées dépend de plusieurs facteurs, délicats à évaluer ; l'épaisseur du dépôt n'intervient que partiellement au-delà d'un certain seuil, alors que les caractéristiques de la pluie sont plus déterminantes. Pour estimer le volume de boue qui affecterait la ville au débouché de chaque *quebrada*, nous avons retenu les hypothèses suivantes :

— *épaisseur du dépôt de cendres* : les chroniques du XVII[e] siècle font état de 40 centimètres de cendres et rapportent que les animaux mourraient dans les champs, faute d'herbe à brouter ; cependant, les volcanologues qui ont étudié le Pichincha récemment pensent que ce chiffre est très exagéré et qu'il faut s'attendre plutôt à un dépôt de 10 à 15 centimètres d'épaisseur, compte tenu de la direction est-ouest des vents dominants. Nous avons donc supposé un dépôt uniforme de 10 centimètres sur l'ensemble des pentes du Pichincha ;

— *caractéristiques de la pluie associée à l'éruption* : les cendres projetées en altitude provoquent de fortes précipitations par multiplication des noyaux de condensation dans l'atmosphère ; sauf éruption en saison sèche, 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 retenu une hypothèse modérée : pluie journalière de fréquence de retour décennale, qui correspond à 52 millimètres, avec une intensité maximale de 35 $mm.h^{-1}$ durant une heure (PELTRE, 1989-b) ;

— *coefficient de ruissellement* : le mécanisme de mobilisation des cendres implique une faible infiltration et une élévation considérable du pourcentage d'eau qui ruisselle ; un coefficient de ruissellement de 70 % a donc été supposé sur les pentes qui dominent la ville (valeur probablement sous-estimée selon POURRUT [*comm. pers.*]) ;

— *volume maximal de cendres mobilisables* : 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 croupes, aux pentes faibles et aux replats des bassins versants ;
— *érosion des berges :* 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 crues boueuses habituelles ; 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 » pour chaque *quebrada* un volume de débris proportionnel (selon la longueur du cours principal) à celui qui avait été estimé lors de l'accident de la Gasca de 1975 (voir ci-dessous).

Dans cette hypothèse, l'estimation des volumes de boue produits par quelques-unes des principales *quebradas,* et susceptibles de pénétrer dans la ville, figure dans le tableau I (pour une étude détaillée, voir PELTRE, 1989-b), où les colonnes 5, 6 et 7 expriment trois hypothèses croissantes (5) :
— colonne 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 centimètres de cendres) ;
— colonne 6 : volume du lahar prévisible dans les mêmes conditions, avec reprise d'érosion qui correspond au dépôt solide estimé lors de l'accident de la Gasca, en proportion de la longueur du cours principal de la *quebrada* considérée ;
— colonne 7 : volume du lahar prévisible avec 20 centimètres de cendres, dans les mêmes conditions.

(5) Les règles de calcul suivantes ont été appliquées au tableau (exemple de la *quebrada* Pambachupa) :
— colonne 1 : superficie du bassin versant = 1,06 km² ;
— colonne 2 : longueur du cours = 3,3 km ;
— colonne 3 : volume du dépôt de cendres = 1060000 m² x 0,1 m = 106000 m³ ;
— colonne 4 : volume d'eau tombée sur le bassin versant = 1060000 m² x 0,052 m = 55120 m³ ;
— colonne 5 : volume probable du lahar (sans effet de nettoyage) = 106000 m³/100 x 30 + 55120/100 x 70 = 70384 m³ ;
— colonne 6 : volume probable du lahar (70 % de la lame d'eau tombée + 30 % des cendres + volume du « nettoyage ») = 38584 m³ + 31800 m³ + 52500 m³ = 122884 m³ ;
— colonne 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 celui de la colonne 3 + volume du « nettoyage ») = 38584 m³ + 63600 m³ + 52500 m³ = 154884 m³ ;
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 ; par exemple, dans le cas de la *quebrada* Vásconez : 52500 m³ x 2,6/3,3 = 41363 m³.

L'extension du risque

Pour avoir une idée concrète de l'extension des lahars secondaires à une éruption du Pichincha dans ces conditions, on peut se référer à l'accident de l'avenue La Gasca de 1975, où le volume des matériaux solides déposés dans la ville par la crue de la *quebrada* Pambachupa a été estimé à 52000 m³ (FEININGER, 1976). S'agissant de l'estimation du dépôt solide, il faut ajouter à cette valeur le volume de l'eau qui constitue la boue pour obtenir des valeurs comparables aux estimations du tableau I; l'expérience montre que un tiers d'eau mélangé aux cendres volcaniques suffit pour obtenir une boue déjà très liquide; le volume global de la crue de La Gasca peut donc être estimé à 70000 m³ environ.

TABLEAU I
Volume estimé des lahars secondaires à une éruption du Pichincha

Quebrada	1 Superf. (km²)	2 Long. Cours (km)	3 Vol. Cendres (m³) Chute 10 cm	4 Vol. Pluie (m³) 1 heure/52 mm	5 Vol. crue (m³) Cendres 10 cm	6 Vol. crue (m³) Cendres 10 cm + nettoyage	7 Vol. crue (m³) Cendres 20 cm + nettoyage
Rumiurcu	11,67	9,10	1 167 000	606 840	774 888	919 661	1 269 761
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
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
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
Caicedo	1,27	3,40	127 000	66 040	84 328	138 419	176 519
Rumipamba	6,97	6,30	697 000	362 440	462 808	563 035	772 135
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
Miraflores	1,96	3,00	196 000	101 920	130 144	177 871	236 671
Jerusalem	4,99	4,40	499 000	259 480	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
Chahuarpata	1,22	2,80	122 000	63 440	81 008	125 553	162 153

En prenant en compte l'hypothèse la plus basse (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 *quebradas*, il est pratiquement sûr que l'on assisterait à un lahar sur chacune des *quebradas* du Pichincha. Dans neuf de ces *quebradas* le lahar dépasserait le double ou le triple du volume de la crue de 1975, et dans les *quebradas* Jerusalem, Rumipamba et Rumiurcu il l'atteindrait cinq, six et dix fois. 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 au moins à une dizaine de lahars réellement destructeurs en pleine ville.

Dans l'hypothèse — plutôt probable — où le déclenchement des crues entraîne la reprise d'érosion de sédiments anciens dans le lit des *quebradas* (colonne 6), le volume de boue mobilisée double presque, avec les mêmes conséquences catastrophiques sur l'accroissement de l'énergie développée. Il faut s'attendre dans ce cas à dix-sept lahars destructeurs qui dépasseraient les 100000 m^3 et la plupart des petites *quebradas* approcheraient le volume de la crue de la Gasca. Enfin, dans le cas d'une chute de cendres de 20 centimètres d'épaisseur, le volume de boue mobilisée dépasse largement le double de celui estimé lors de l'accident de la Gasca, et atteint respectivement huit, dix et dix-huit fois ce volume dans les *quebradas* Jerusalem, Rumipamba et Rumiurcu. La figure 2 tente une cartographie estimée des zones menacées dans les hypothèses basse et moyenne (colonnes 5 et 6), sur la base des superficies atteintes par l'accident de la Gasca de 1975, et en affectant un potentiel destructeur grave aux lahars de volume triple ou supérieur à cette référence.

Dans les trois hypothèses étudiées on aurait affaire à une véritable catastrophe urbaine susceptible de provoquer plusieurs centaines de morts, voire plusieurs milliers, si l'évacuation des zones menacées n'était 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 ; la solution relève de toute évidence de mesures de protection civile efficaces : capacité de surveillance et élaboration de plans d'évacuation, qui relèvent tout autant de la gestion de l'environnement urbain que la lutte contre les inondations ou contre la pollution.

L'AIRE MÉTROPOLITAINE SOUS LA MENACE DU COTOPAXI

Située sur sa marche tectonique étroite, adossée au Pichincha vers l'ouest, la ville ne peut plus croître actuellement qu'en direction du nord, sur des superficies réduites par une topographie accidentée, et vers le sud, sur la prolongation de la marche ; mais cette dernière s'élève progressivement au-dessus de 3000 mètres ce qui refroidit sérieusement le climat et augmente la nébulosité. Aussi la ville s'étend-elle surtout vers l'est et en contrebas, dans le sillon intra-andin, à 2500 mètres d'altitude, dans les vallées de Los Chillos et de Tumbaco, où un climat sensiblement plus clément attire des catégories sociales aisées ou riches (fig. 1 et 3).

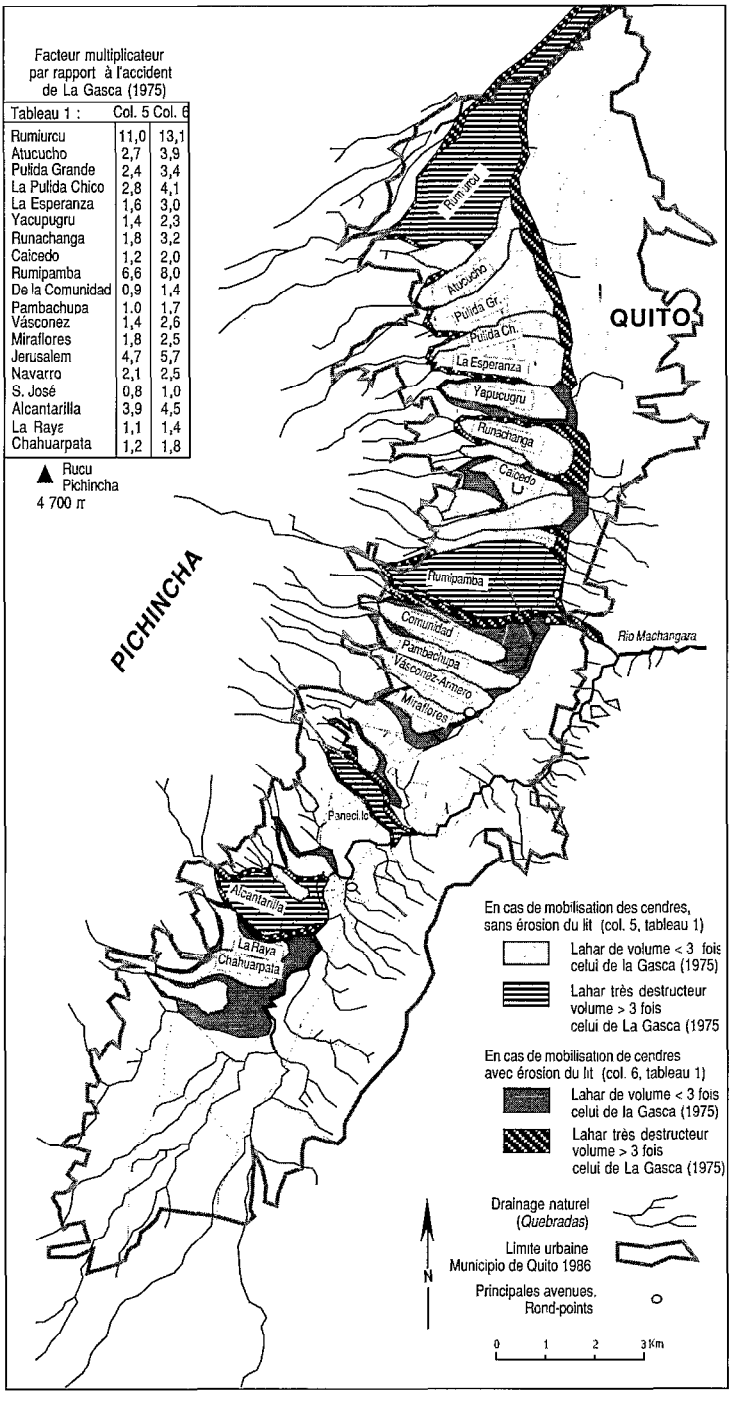


FIG. 2. — Lahars secondaires probables dans Quito en cas d'éruption du Pichincha.

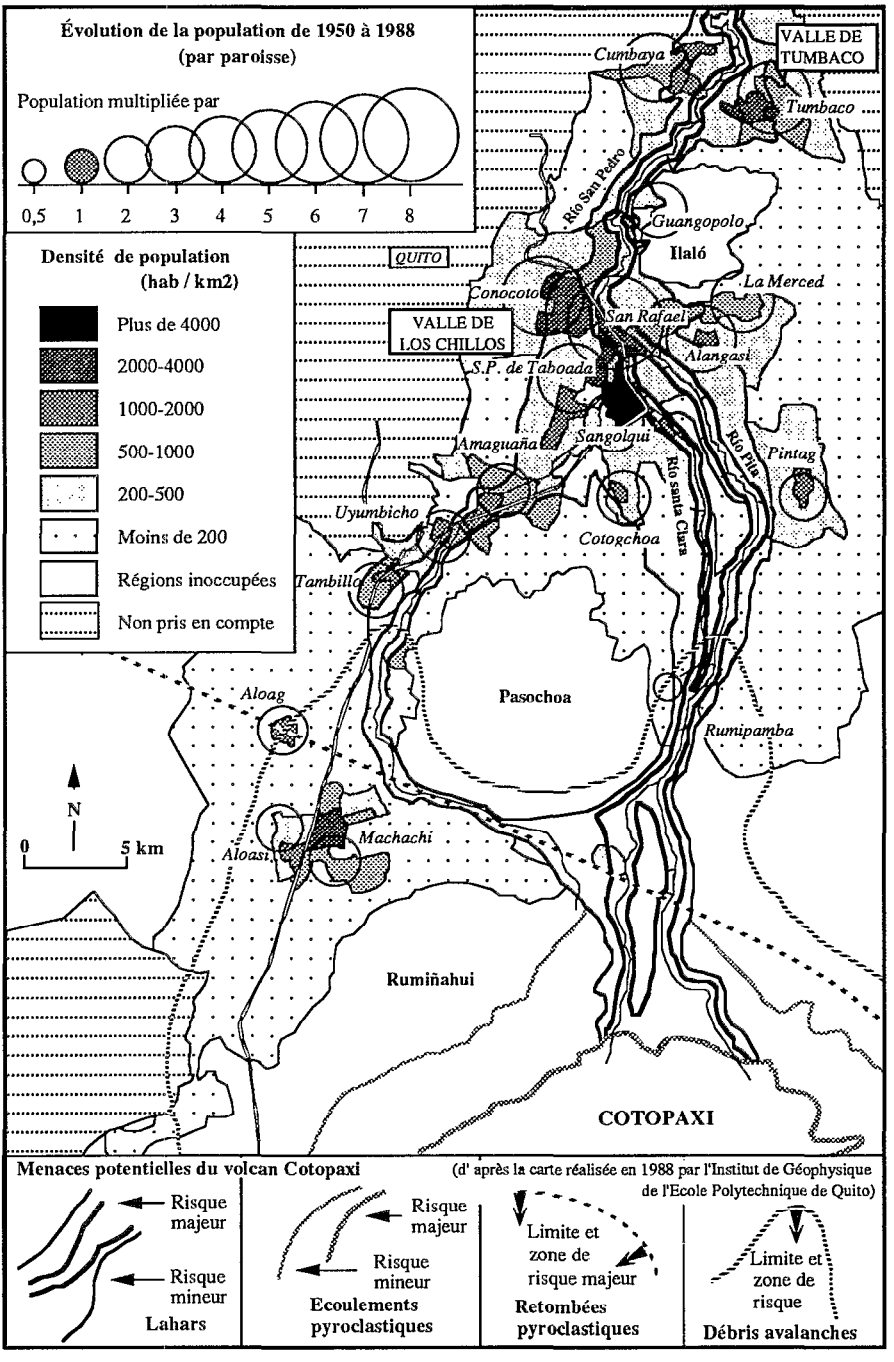


FIG. 3. — Risques liés au Cotopaxi et population exposée.

Encore faiblement peuplée il y a trente ans, la vallée de Los Chillos a subi en 1877 un lahar destructeur à la suite de l'éruption du volcan Cotopaxi (5897 mètres), situé à une cinquantaine de kilomètres en amont, provoqué par la fonte partielle de sa calotte glaciaire. 100000 habitants vivent maintenant dans cette vallée et comme nombre des habitations nouvelles sont construites sur les sédiments du lahar de 1877, de 10000 à 95000 personnes seraient en danger en cas de répétition de l'événement, selon la violence de l'éruption prise en compte. Cette catastrophe du siècle dernier présente de nombreux points communs avec celle du Nevado del Ruiz (Colombie), dont l'éruption du 13 novembre 1985 a provoqué un lahar meurtrier par fusion glaciaire, qui a rayé de la carte la ville d'Armero et qui a fait 23000 victimes (D'Ercole, 1989).

Les lahars du Cotopaxi à l'aune du Nevado del Ruiz

Une nouvelle éruption du Cotopaxi ne peut être écartée dans un assez proche avenir, sans qu'il soit possible cependant d'envisager sérieusement un calcul de probabilité. Le volcan est en effet très actif : une trentaine d'éruptions d'ampleur variée, connues par les archives depuis 1532, ont entraîné au moins trois lahars dévastateurs dans la vallée de Los Chillos (1744, 1768 et 1877), et neuf dans la vallée de Latacunga, au sud, également beaucoup plus peuplée qu'autrefois.

L'étude de la catastrophe d'Armero de 1985 fournit des éléments quant au mécanisme du phénomène (Thouret, 1988). L'éruption du Nevado del Ruiz fut de taille moyenne à modérée (*volcanic explositivity index* (VEI) = 3 pour une échelle qui va de 0 à 8), mais les produits incandescents émis par le volcan déclenchèrent une fusion intense d'une partie de la glace et de la neige de la calotte, fusion qui alimenta très rapidement les crues et les coulées de boue sur les hautes pentes. On estime que 8 à 10 % du volume de glace et de neige seulement ont fondu. Le torrent de boue, mélange hétérogène, s'écoula sous forme de pulsations successives ; canalisé par des gorges profondément incisées, il y atteignit une hauteur de 40 mètres par endroit. À Armero, au débouché du Rio Lagunillas dans la plaine du Río Magdalena, les coulées s'étalèrent en éventail, atteignant encore jusqu'à 5 mètres d'épaisseur, et détruisirent la quasi-totalité de l'agglomération.

En Équateur, selon les récits et les observations de terrain, l'éruption de 1877 aurait correspondu à un VEI de 4 (explosivité assez forte). Le lahar aurait atteint des vitesses de 40 $km.^{h-1}$ dans un rayon de 20 à 40 kilomètres du cratère, et la crue a été nettement ressentie, dix-huit heures plus tard, à Esmeraldas, sur la côte de l'océan Pacifique,

après un parcours de 300 kilomètres. Dans la vallée de Los Chillos, le lahar a atteint une épaisseur de plusieurs mètres (jusqu'à neuf) selon le détail de la topographie et il a étalé, sur 2 kilomètres de long et 1,5 de large, des boues, des sables et des débris dans l'hacienda San Rafael, zone actuellement la plus urbanisée. Au total, ses effets sont restés relativement limités en termes de vies humaines : un millier de morts dans la région de Latacunga, et quelques dizaines dans la vallée de Los Chillos (fig. 3) ; compte tenu d'une croissance urbaine explosive — la population a été multipliée par 12 depuis 1877 — le risque s'est accru en proportion.

Face à l'ampleur et à la variabilité considérable — et peu prévisible — du phénomène, la construction d'ouvrages de protection, qui reste des plus aléatoires, n'est pas envisagée ; la prévention repose donc uniquement sur l'évacuation des populations, opération complexe et délicate qu'il faut réussir dans un temps extrêmement bref.

Des facteurs humains déterminants

Les aspects volcaniques et géomorphologiques du risque ont été étudiés par les géologues de l'École nationale polytechnique de Quito, notamment par des cartes assez détaillées des menaces potentielles du Cotopaxi entreprises dès 1978, ce qui reste cependant très insuffisant pour assurer ne serait-ce qu'un début de prévention ; l'analyse de la catastrophe colombienne de 1985 montre à quel point les facteurs humains sont déterminants.

En Colombie en effet, la carte des risques du Nevado del Ruiz, achevée dans les semaines qui précédaient l'éruption, avait prévu avec une très bonne précision l'ampleur du phénomène, tant en superficie qu'en énergie mise en jeu ; de plus, le volcan donnait des signes évidents de réveil depuis près d'un an déjà — des rapports alarmants avaient été remis — et il faisait l'objet d'une surveillance, assez peu satisfaisante toutefois, faute de moyens. Or, cette connaissance n'a en rien diminué les effets de la catastrophe, au point que la presse titrait ensuite : « Rudimentaires mesures de prévention », « La tragédie d'Armero : une avalanche d'erreurs », ou encore « Chronique d'une mort annoncée » et mettait en cause avec colère les responsabilités politiques et la gestion de la prévention.

Précédée d'une explosion vers 15 heures, l'éruption principale du Nevado del Ruiz s'est produite à 21 heures 30, et la ville d'Armero, à 45 kilomètres de distance, a été atteinte par les lahars deux heures plus tard. L'alerte, donnée dès 16 heures par la Protection civile du département de Tolima, ne fut pas traduite en ordres clairs, faute de décision rapide et d'efficacité dans les transmissions ; des messages — peu précis toutefois —, qui recommandaient l'évacuation d'Armero,

furent diffusés vers 21 heures par les radios nationales, alors que des cendres fines tombaient sur la ville depuis l'après-midi. Mais les prévisions répercutées par les médias étaient restées confuses ou contradictoires et certains responsables locaux se montrèrent rassurants; les autorités comme la population sous-estimèrent manifestement la magnitude du danger et s'attendaient à une crue qui menacerait seulement les berges du Rio Lagunilla (D'Ercole, 1991; D'Ercole et Moncayo, 1991).

Le délai de deux heures qui a séparé l'éruption principale de l'arrivée du flux à Armero aurait permis pourtant d'évacuer l'ensemble de la population vers de petites collines proches et, sans aucun doute, d'épargner la plupart des victimes, sous la seule condition d'une décision d'évacuation prompte et efficace. Impréparations administrative et politique, paralysie bureaucratique, diffusion de prévisions contradictoires par suite de conflits d'écoles entre les scientifiques, incrédulité des autorités quant à l'ampleur probable du phénomène, défaut d'éducation des populations, tous ces facteurs ont totalement annulé le bénéfice des connaissances acquises.

En Équateur, une partie de l'aire métropolitaine de Quito et la vallée de Latacunga sont soumises à un risque très similaire — à certaines différences près dans la topographie des sites, qui ne remettent cependant pas en cause le parallèle que l'on peut établir. Le niveau de préparation des autorités est sans conteste supérieur à celui qui prévalait en Colombie, suite à leur prise de conscience du danger après la catastrophe colombienne : surveillance accrue du volcan, développement par la Défense civile équatorienne de travaux de planification en prévision des catastrophes, réalisation de séminaires avec les responsables et de quelques exercices de simulation d'éruption et d'évacuation. Cependant, pas plus qu'en Colombie, il n'existe encore, à la fin de 1991, de système d'alarme ou de réglementation pour limiter l'occupation des zones menacées; des campagnes d'information auprès de la population ont été réalisées, mais, trop générales ou trop ponctuelles, leurs effets restent incertains.

Perception du risque et vulnérabilité

Ce travail est donc en cours, mais l'étude approfondie sur la vulnérabilité des populations exposées et sur leur perception du risque, menée en 1988-1989 (en collaboration avec la *Defensa Civil del Ecuador*) sur un échantillon de 2200 familles choisies en fonction de quatre zones à risque potentiel croissant, souligne combien il reste à faire, particulièrement en matière de prise de conscience du danger potentiel et de crédibilité des avertissements (D'Ercole, 1991). L'enquête a été centrée sur trois facteurs de vulnérabilité :

— la conscience de courir un risque personnel, globalement assez incertaine avec 45 % seulement de la population des zones à risque le plus élevé qui ont une perception assez claire du danger; cette conscience diminue avec la distance, et plus particulièrement lorsque le volcan est invisible. En outre, elle est nettement plus faible chez les nouveaux arrivants (moins de 20 %), très nombreux dans les zones de croissance urbaine (vallées de Tumbaco et de Los Chillos);
— la connaissance de mesures de protection adéquates, globalement très faible : 23 % seulement de l'échantillon interrogé auraient une connaissance suffisante pour se mettre à l'abri ou adopter un comportement non dangereux;
— l'intention de comportement en cas d'ordre d'évacuation, qui indique que la moitié des habitants des zones à risque le plus élevé éprouveraient de sérieuses réticences à quitter leurs biens pour diverses raisons : incertitude face à un proche avenir de réfugié, peur du pillage s'il s'agissait d'une fausse alerte, crainte de l'expropriation, méfiance quant à la fiabilité des ordres alarmants ou résignation face aux éléments déchaînés.

Globalement, les populations les moins préparées sont celles qui vivent loin du volcan et qui ne peuvent le voir (c'était le cas de la population d'Armero), et ce d'autant plus qu'elles comportent une forte proportion de familles récemment installées. Ce sont aussi les catégories de faible niveau socio-économique, mal informées et de plus méfiantes à l'égard du pouvoir officiel, à l'exception peut-être des paysans qui se distinguent par une mémoire collective du danger encore vivace mais sur lesquels pèsent de dures contraintes économiques et sociales. La plus forte résistance à une évacuation est directement liée à la possession de biens immobiliers; les personnes âgées constituent aussi une catégorie très réticente.

Régionalement, les populations des zones de croissance urbaine récente des vallées de Tumbaco et de Los Chillos sont nettement plus vulnérables que celles, plus stables, des régions rurales de la province du Cotopaxi, qui ont conservé le souvenir des éruptions du siècle dernier et qui affichent une meilleure conscience du risque. En revanche, les citadins de la périphérie de Quito, de meilleur niveau socio-économique et moins méfiants, suivraient plus facilement un ordre d'évacuation que les ruraux.

Géographiquement, le dépouillement détaillé de l'enquête a conduit à une cartographie-diagnostic sur 116 unités territoriales homogènes en termes d'intensité du risque et de structure de la population, dont 47 correspondent au risque le plus élevé. Il a été possible alors de prendre en compte à la fois la nature du risque probable, la localisation des refuges possibles (parfois en se rapprochant du volcan, ce qui n'est pas une démarche qui va de soi), leur accessibilité dans un

temps donné (chemins, ponts), et les facteurs propres à la population : perception du risque personnel et connaissance des mesures à prendre, accessibilité de la population à divers types de messages d'alerte, réticences à évacuer ou à collaborer, problèmes logistiques (parc automobile, goulots d'étranglement probables). Cette analyse a conduit à une typologie des actions à entreprendre, secteur par secteur, pour atteindre la meilleure efficacité des plans d'évacuation.

On voit combien la prévention d'un risque apparemment simple est loin de se limiter à la seule étude de ses causes géologiques et géomorphologiques, et à quel point les facteurs humains se révèlent complexes pour réussir une évacuation d'urgence. S'agissant de préparer des habitants à agir rapidement et en masse dans le seul but d'échapper à un événement subit, c'est bien de gestion de l'environnement urbain dont nous parlons. Cela l'est d'autant plus qu'en bonne logique l'évacuation n'est qu'un pis-aller au regard d'une croissance urbaine qui pourrait être maîtrisée de manière à éviter d'occuper les zones potentiellement dangereuses. On touche là aux mêmes problèmes de crédibilité des mises en garde que nous avons évoqués au niveau individuel, mais aussi à de graves difficultés de maîtrise de la pression foncière qui renvoient à l'ensemble du fonctionnement politique de la cité, où l'importance des enjeux fonciers met bien souvent en échec le jeu démocratique des institutions.

RISQUE NATUREL ET GESTION DE L'ENVIRONNEMENT URBAIN. QUELQUES REMARQUES

En ce qui concerne les risques liés aux seuls effets du climat — faut-il les qualifier de mineurs par rapport à ceux d'une éruption ou d'un séisme ? — remarquons d'abord qu'ils ne sont que l'expression de l'érosion des versants, phénomène normal aux flancs d'un volcan ; en milieu rural peu cultivé, où les pâturages sont dominants, cette érosion reste linéaire selon les *quebradas* et gêne peu. C'est donc la croissance urbaine qui a créé ces problèmes de toutes pièces, par le remblaiement du réseau de drainage et l'occupation du principal replat, siège d'une sédimentation épisodique qui s'effectue maintenant dans la ville. Si la croissance urbaine avait respecté le réseau hydrographique en l'aménageant et en assurant la communication par des ponts plutôt que par le remblaiement, il est très probable que le nombre des accidents relevés depuis le début du siècle aurait été très faible, sans doute limité aux éboulements de talus, à quelques rares inondations et à des problèmes de stabilité des ponts de temps à autre.

Ces problèmes renvoient donc plus à une méconnaissance de la dynamique du site au cours de la croissance urbaine qu'à cette sorte de fatalité qu'implique le concept de risques « naturels ». Mais la ville est maintenant fixée et les solutions relèvent de l'aménagement de l'espace urbain lui-même autant que son environnement :
— amélioration des évacuations et de la capacité des collecteurs qui traversent la ville ;
— contrôle de la stabilité des versants qui dominent la ville par l'entretien d'une végétation couvrante ;
— contrôle de l'érosion linéaire par des travaux dans le lit des *quebradas*.

Certains de ces travaux ont été entrepris pour des coûts toujours élevés, mais leur efficacité reste incertaine en cas d'événements climatiques de fréquence rare. En outre, il serait sage de cesser de remblayer toutes les *quebradas* dans les nouvelles urbanisations comme c'est l'usage constant ; mais la tradition est solidement ancrée, et ce discours est généralement accueilli comme une bizarrerie d'étranger.

En ce qui concerne les menaces liées à une éruption de l'un des deux volcans, le risque est considérablement plus grave, mais de fréquence d'occurrence faible ou très faible. C'est bien sûr le contrôle de la croissance urbaine dans les zones exposées qui, à la racine, aurait permis la seule prévention sûre de ces risques graves ; les zones menacées sont malheureusement déjà très largement occupées et leur densité ne cesse de croître. Dans l'aire métropolitaine comme dans la partie de la ville menacée par le Pichincha, il n'est plus question d'aménagement pour limiter le danger, mais de prévision et d'alerte, et l'on ne peut plus qu'organiser au mieux la capacité d'évacuation des populations dans un délai particulièrement bref.

En effet, si la prévision des éruptions est actuellement très performante au regard de celle des séismes que l'on est encore loin de maîtriser, elle reste cependant beaucoup trop imprécise pour annoncer le moment exact d'une éruption (sur la base d'une déformation du cône et d'un accroissement de la sismicité locale) et organiser une évacuation préventive qui serait politiquement et économiquement intenable pour peu que la catastrophe tarde à se manifester ou ne se produise pas. On est donc contraint d'envisager toute évacuation efficace dans le temps très court laissé entre l'éruption et l'arrivée des lahars.

L'évacuation de 300000 à 400000 habitants en quelques heures sous une pluie de cendres dans le cas du Pichincha, celle de 100000 habitants en moins d'une heure dans le cas du Cotopaxi sont-elles possibles ? Sans revenir sur les difficiles questions de prise de décision et sur les facteurs psychologique de crédibilité des alertes que nous avons évoqués à propos d'Armero, on peut en douter sérieusement si l'on

compare avec les temps d'écoulement des embouteillages de fin de semaine que *Bison futé* tente régulièrement d'exorciser en France. Il est clair qu'une telle évacuation sous la contrainte du temps doit être très soigneusement préparée et décidée sans atermoiement; mais les références d'évacuations réussies avant sinistre sont rares et insuffisamment connues, et les simulations trop partielles encore; cette question essentielle reste donc ouverte.

Paradoxalement, la gestion de l'environnement urbain du point de vue de la prévention des risques passe ainsi plus encore par la gestion des hommes que par des actions sur le milieu et débouche sur une véritable problématique de l'éducation aux périls de l'environnement.

BIBLIOGRAPHIE

DE NONI (B.), DE NONI (G.), FERNANDEZ (M. A.) et PELTRE (P.), 1988. « Drainage urbain et accidents climatiques à Quito (Équateur). Analyse d'un cas récent de crue boueuse », *Cah. Sci. Hum.*, 24 (2) 1988 : 225-249.

D'ERCOLE (R.), 1989. « La catástrofe del Nevado del Ruiz. ¿Una enseñanza para el Ecuador? El caso del Cotopaxi », *Riesgos naturales en Quito, Estudios de Geografía*, n° 2 : 5-32.

D'ERCOLE (R.), 1991. *Vulnérabilité des populations face au risque volcanique. Le cas de la région du volcan Cotopaxi (Équateur)*, thèse doctorat, univ. Grenoble-I, *multigr.*, 459 p.

D'ERCOLE (R.) et MONCAYO (J. F.), 1991. « " Influents locaux " face à une situation d'urgence : une analyse selon l'hypothèse d'une éruption du volcan Cotopaxi (Équateur) », *Bull. de l'Inst. Fr. Ét. Andines*, n° 1-tome 20, Lima : 181-220.

FEININGER (T.), 1976. « El flujo de escombros en La Gasca. Un informe científico », *Boletín de la Sección Nacional del Ecuador*, n^{os} 5-6, enero-junio 1976 : 9-12.

PELTRE (P.), 1989-a. « Les accidents du drainage urbain à travers la presse. Quito (Équateur) 1900-1986 » in *Tropiques, lieux et liens*, Florilège offert à P. Pélissier et G. Sautter, Paris, Orstom, coll. Didactiques, 620 p. : 318-334.

PELTRE (P.), 1989-b. « Quebradas y riesgos naturales en Quito, período 1900-1988 », *Riesgos naturales en Quito, Estudios de Geografía*, n° 2, Quito, Corporación Editora Nacional, 92 p. : 45-91 (vers. fr. à paraître, *L'Espace Géographique*).

PELTRE (P.), 1991. « Accidents morphoclimatiques à travers la presse. Quito (Équateur) 1900-1988 - De l'information qualitative à la cartographie de fréquences : problèmes d'échelles » in *Séminfor IV*. Le transfert d'échelle, Paris, Orstom, coll. Colloques et Séminaires, 518 p. : 291-318.

THOURET (J. C.), 1986. « L'éruption du 13 novembre 1985 au Nevado del Ruiz. L'originalité du dynamisme éruptif phréato-magmatique et plinien sur une calotte glaciaire aux latitudes équatoriales », *Revue de géographie Alpine*, T. LXXIV, 1986-4 : 373-391.

THOURET (J. C.), 1988. *La Cordillère centrale des Andes de Colombie et ses bordures. Morphogénèse plio-quaternaire et dynamique actuelle et récente d'une cordillère volcanique englacée*, Grenoble, Institut de géographie alpine, thèse doct. d'État, 1040 p.