le Cedid a perdu 1 ex
f1 (4)

O.R.S.T.O.M. Fonds Documentaire
N° : 31733 ex 1
Cote : B

QUEBRADAS ET RISQUES NATURELS A QUITO (EQUATEUR) - Période 1900 - 1986*

P. Peltre

La ville de Quito subit depuis toujours des accidents d'origine à la fois climatique et géomorphologique liés aux écoulements de surface perturbés par l'urbanisation : inondations, coulées de boue, éboulements et effondrements. Les archives espagnoles font fréquemment état de ces problèmes dès la fondation de la ville, en 1534, et rares sont encore actuellement les années où aucun accident n'a lieu.

Il a donc semblé intéressant d'étudier le passé de ces phénomènes à la manière des études menées par les sismologues sur les tremblements de terre historiques. En domaine urbain où la modification radicale du milieu rural interfère nécessairement avec les causes climatiques et celles liées à la nature des formations superficielles, l'approche purement géomorphologique permet difficilement d'aboutir à des conclusions utilisables en termes de gestion du milieu urbain, et c'est la connaissance fine du passé qui fournit les meilleures informations.

L'approche historique a été conduite à partir des journaux - seul matériau ayant conservé la mémoire de ces phénomènes - pour tenter leur analyse de fréquence et leur cartographie. Le dépouillement du principal quotidien équatorien [1] depuis 1900 fait apparaître 295 événements climatiques ayant causé suffisamment de dégâts pour être pris en compte par les journaux. Une partie de ces événements ont affecté plusieurs lieux dans la ville, et ce sont en réalité 390 accidents morphoclimatiques urbains qui ont été enregistrés en 87 années, soit plus de quatre par an, qui n'ont pas tous la même ampleur ni la même gravité.

Ces accidents ont souvent des effets dévastateurs à l'échelle du quartier, et leur coût, matériel et social est loin d'être négligeable dans un tissu urbain qui s'est considérablement développé au cours des quatre dernières décennies. Il est permis de supposer que les méthodes de construction de la ville, puis celles de la gestion du milieu aménagé, influent puissamment sur la sensibilité du milieu urbain aux excès, mêmes légers, du climat. C'est ce que nous avons essayé de préciser à travers l'étude des accidents du passé, dont nous espérons qu'elle permettra de mieux adapter la gestion d'un milieu urbain aux contrainte de la montagne équatoriale qui sont les siennes.

1 - Urbanisation et problèmes du drainage

1.1. Le site urbain

La ville de Quito se situe à 2800 mètres d'altitude, pratiquement sous l'équateur (0 degrés 10' de latitude sud), au pied du volcan actif Pichincha (alt. 4794 m.); elle occupe au flanc du volcan un gradin tectonique qui domine de 300 mètres environ le sillon interandin, vallée nord-sud séparant les Cordillères Orientales et Occidentales. Ceci donne au site l'aspect d'une gouttière étroite de trente km. sur trois à cinq, d'orientation N-S, dont le fond est constitué par les sédiments fluvio-lacustres d'un ancien lac, encore partiellement marécageux à la fin du siècle dernier.

Les versants du Pichincha et le revers de la "pseudo-cuesta" du gradin tectonique sont principalement constitués de laves, de tufs faiblement indurés et de cendres volcaniques, affectés de plusieurs failles importantes; l'ensemble du site est presque uniformément recouvert de cendres volcaniques limoneuses d'origine éolienne - la *cangahua* - qui moulent la topographie ancienne d'une couche de dix à vingt mètres d'épaisseur. Ces formations présentent la particularité

[1] El Comercio, paru sans interruption depuis 1904, a pris le relai de La Patria, que l'on a analysé à partir de 1900.

* Traduction d'un article publié en Espagnol dans la revue "Estudios de Geografía" n° 2, Quito, 1989.

P37

d'opposer peu de résistance à l'érosion fluviatile, et de s'indurer légèrement lorsqu'elles sont exposées à l'air, ce qui leur a permis de conserver remarquablement fraîches les vigoureuses incisions de la dernière déglaciation, qui constituent un réseau dense de ravins (les *quebradas*) traversant tout le site urbain.

Le climat de la ville est de type équatorial d'altitude, avec une température moyenne annuelle de 13,5 degrés C et des amplitudes thermiques diurnes très supérieures à l'amplitude annuelle [2]. Le régime pluviométrique est distribué en deux saisons des pluies, d'octobre à novembre et de février à mai (cf. fig. 3).

La pluviométrie est affectée d'un fort gradient du nord de la ville (800 mm.) au sud (plus de 1400 mm.) sur une distance d'environ 35 Km., dû pour l'essentiel au volcan Pichincha qui abrite le nord de la ville de l'entrée des masses d'air humides de sud-est dans la vallée interandine, ainsi qu'à des effets de fœnh lors de certains types de temps[3]. L'intensité des précipitations, facteur essentiel pour ce qui nous occupe, est élevée, conformément aux caractères équatoriaux du climat; elle est résumée dans le tableau 1 [4], exprimée en millimètres par heure :

Fréquence	Médiane I(mm/h)	Décennale I(mm/h)	Centennale I(mm/h)
Temps 5 minutes	100,0	126,4	150,1
15 minutes	65,0	83,7	100,6
30 minutes	46,3	58,5	69,2
60 minutes	27,4	35,1	42,3

Tableau 1

1.2. Drainage et croissance urbaine : les *quebradas*

La croissance démographique de Quito s'effectue depuis une trentaine d'années au rythme très soutenu de plus de 4% par an, la population dépassant actuellement le million d'habitants. La ville a accru sa superficie de près de 40 fois entre 1880 et 1980, et l'examen des plans successifs montre que trois étapes peuvent être distinguées dans la progression du domaine urbain [5] (fig. 1) :

- Depuis la fondation du Quito colonial en 1534 jusqu'au début du XXème siècle la croissance est lente et se réalise selon un schéma radial, autour du centre colonial; en 1902 la ville n'occupe encore que 200 hectares.

-Durant la première moitié du XXème siècle la progression est plus rapide, sous forme de fines tentacules le long des voies de communications vers le nord et vers le sud. En 1950 la superficie urbanisée atteint 1 300 hectares, chiffre encore modeste comparé à l'actuel.

- C'est à partir de cette époque que l'urbanisation s'accélère dans des proportions considérables pour atteindre 12 500 hectares; le remblaiement des *quebradas*, pratiqué dès l'époque coloniale, s'accélère également, et les drainages naturels sont pratiquement partout remplacés par des égouts.

Les *quebradas* désignent dans la région de Quito des ravins à bords vifs atteignant fréquemment 15 à 20 mètres de profondeur. Ce sont des torrents de montagne à pente forte, au régime d'oued, qui ne coulent que quelques jours par an en crues brutales et violentes lors des précipitations les plus intenses; seuls les plus importants ont un écoulement permanent.

Sur les pentes du Pichincha (20 à 30 degrés) et sur celles du revers du gradin tectonique (15 degrés) à l'est de la ville, les *quebradas* sont incisées de dix à vingt mètres; dans le fond de la gouttière, les plus importantes conservaient encore une profondeur de deux à trois mètres au siècle dernier, mais les plus actives en termes de sédimentation n'étaient pas marquées topographiquement, noyées dans leurs propres épandages. Elles constituent encore maintenant un réseau de drainage dense des pentes qui dominent la ville, puisque 85 *quebradas* ont été dénombrées lors de l'établissement d'une carte de l'ancien réseau de drainage naturel (fig. 1) [6] et d'un fichier des noms [7]; elles se rassemblent toutes, dans les limites mêmes du périmètre urbain actuel, en trois exutoires seulement. Le cours inférieur de toutes ces *quebradas* a été remblayé lors de l'urbanisation, et remplacé par le réseau d'égouts qui assure maintenant non seulement l'évacuation des eaux usées, mais également celle des eaux pluviales du volcan Pichincha, système montagneux d'un volume

---

[2] La température varie en effet couramment entre 9 et 22 degrés C dans la journée, alors que l'écart entre les moyennes mensuelles extrêmes au cours de l'année ne dépasse pas un demi-degré C.

[3] Par régime de vent d'Est amenant des masses d'air amazoniennes, le flux sec qui redescend dans le sillon interandin après avoir passé la Cordillère Orientale est tout particulièrement canalisé par la vallée du Rio Guayllabamba pour rejoindre les régions côtières, contribuant puissamment aux caractères semi-arides du climat au nord de la capitale.

[4] Station de Quito Observatoire. Cf. Alulema, Ojeda, Nouvelot, Pourrut, 1985.

[5] Cf. Carrera, 1984, et De Noni , Fernandez de Castro, Peltre, 1986

[6] Cf. De Noni , Fernandez de Castro, Peltre, 1986.

[7] Sur l'ensemble du site, les *quebradas* changent en effet très fréquemment de nom le long de leur cours; de plus les noms anciens *quichua* ont souvent été remplacés par un ou plusieurs noms espagnols, ceux des *haciendas* traversées. L'établissement d'un fichier de correspondance des noms entre cinq documents cartographiques différents (cf. Peltre, 1989) devenait donc indispensable pour identifier clairement les *quebradas* mises en cause dans les relations d'accidents par les journaux.

Quebrada :	Rumiurcu	Atucuchu	Pulida Chico	Rumipamba	Manzanachupa	Caicedo
Débit décennal (m^3/s.)	38,8	11,3	11,7	24,9	4,5	5,7
Capacité d'égout (m^3/s.)	13,6	3,4	4,0	8,5	3,2	4,5

Tableau 2

considérable dans la tranche d'altitude de 2 800 à 4 700 mètres au-dessus de la ville.

Les premiers remblaiements datent de l'époque coloniale dans le centre historique, et se poursuivent aujourd'hui avec constance dans les quartiers périphériques, où ils accompagnent l'extension urbaine. Au total la topographie particulière du site a imposé à la ville une croissance en longueur (3 Km. sur 25), l'occupation de versants raides à l'est et à l'ouest, responsable de la multiplication des éboulements, et le remblaiement du réseau naturel de drainage, pour gagner de l'espace et construire une continuité urbaine, principale cause des inondations, des crues boueuses et des effondrements.

Le réseau d'égouts ainsi constitué est localement insuffisant pour évacuer les débits de pointe; l'estimation comparée de la capacité d'évacuation des égouts et des débits maxima de fréquence décennale des *quebradas* du Pichincha qu'ils sont chargés d'évacuer est éloquente, puisque sur 19 *quebradas* étudiées, 12 présentent un déficit d'évacuation parfois considérable dont les plus importants figurent dans le tableau 2 [8].

L'EMAP-Quito cherche à contrôler cette situation en aménageant des retenue-tampon autour de certaines des prise d'égout les plus sensibles, permettant de stocker la crête de crue durant 20 à 30 minutes, délai en principe suffisant pour étaler les averses très intenses [9]. Ces aménagements étant pour la plupart récents, il est encore très difficile de juger de leur efficacité.

Lorsque les débits de fréquence décennale sont approchés ou dépassés, les eaux et la boue passent alors par les rues, provoquant inondations et crues boueuses. De ce fait le réseau d'égouts subit en permanence un alluvionnement important, qui réduit encore sa capacité théorique d'évacuation, et nécessite un nettoyage permanent par une équipe de 140 égoutiers (les *sifoneros*). Enfin les têtes du réseau sont toutes en pente forte, ce qui conduit à de fortes mises en charge des canalisations et aboutit parfois à leur rupture, induisant alors des phénomènes d'érosion souterraine qui provoquent à l'occasion des effondrements de chaussée.

Pour compléter cette brève présentation du risque morphoclimatique, ajoutons que la ville est également menacée par deux risques majeurs, sismique et volcanique, de fréquence faible mais de gravité incomparablement supérieure[10]. Ceci relativise l'ampleur du risque dû au drainage, qui reste limitée à des dégâts localisés par quartier, et de gravité moyenne. Les décès dûs à des coulées de boue ou à des effondrements n'ont pourtant pas été rares, et surtout il s'agit d'un risque très fréquent, dont on sait qu'il affectera nécessairement plusieurs quartiers de la ville à l'échéance d'une, ou à coup sûr de quelques années; enfin c'est un risque beaucoup plus accessible à la prévention par l'aménagement de la ville et par la gestion de sa croissance.

2 - Les accidents morphoclimatiques urbains dans la presse

2.1. Le traitement de l'information

Le dépouillement du principal et plus ancien quotidien, El Comercio, a permis de constituer un fichier de 317 résumés d'articles relatant un ou plusieurs accidents morphoclimatiques survenus dans la ville ou à ses environs immédiats(fichier "Eventos"), au cours d'une seule journée en règle générale [11]. Chacune des fiches correspond donc à un événement, forte précipitation ayant provoqué un ou plusieurs

8 Cf. De Noni , Fernandez de Castro, Peltre, 1986, et CMD, 1977, chap. 14

9 EMAP : Empresa Municipal de Alcantarillas y Agua Potable, agence municipale chargée de la gestion des égouts et de l'approvisionnement en eau. Pour une description de certains de ces aménagements, cf. De Noni . F. de Castro. Peltre. 1986

10 Au plan historique les séismes n'ont jamais fait de dégâts très importants à Quito, mais des villes éloignées d'une centaine de kilomètres seulement ont été complètement détruites comme Riobamba (1797), Ibarra (1868) ou Ambato (1949). Le récent tremblement de terre du 5 mars 1987 (7,5 degrés sur l'échelle de Mercalli), qui ne fit que des dégâts légers dans la ville, mais frôla les destructions plus sévères, rappelle que la capitale est bâtie pratiquement à la verticale de la zone de subduction de la plaque océanique Nazca sous la plaque continentale, et que le risque sismique y est très sérieux. Quant au risque volcanique, le Pichincha a eu plusieurs éruptions depuis la fondation de la ville espagnole, dont la plus connue, en 1660, ne fit d'autres dégâts que des chutes de cendres sur la ville (tout de même jusqu'à 40 cm. d'épaisseur...). Il présente actuellement une faible activité géothermique permanente, mais les géologues estiment qu'il s'agit d'un volcanisme de type péléen, explosif, qui rejette surtout des cendres et des nuées ardentes, et constitue donc un danger très important pour la ville en cas d'éruption violente, peu prévisible encore dans l'état actuel de l'art.

11 Le fichier a été saisi et traité sur Macintosh, sous 4ème Dimension et Excel. Le dépouillement des journaux et la rédaction des résumés ont été réalisés par J. Sarrade.

accidents en différents endroits de la ville. Un second fichier de 517 accidents au sens strict, correspondant chacun à une localisation précise, a été dérivé du premier (fichier "Accidentes", publié dans Peltre, 1989), permettant et l' étude de fréquence précise et la cartographie des zones touchée.

Ce travail d'identification géographique des accidents, réalisé sur les fiches-résumé des articles de journaux, présente des difficultés : les localisations indiquées par le journaliste sont souvent peu précises, constituées de quelques noms de rue, ou de celui d'un ou deux quartiers plus ou moins bien identifiés par ses habitants, à défaut de l'être correctement sur les plans; mais aussi il est parfois difficile de déterminer si une zone assez ample, affectée par l'excès d'eau, constitue un seul ou plusieurs foyers d'accidents, et la part d'appréciation reste grande dans cet exercice.

Il est en outre très probable que les journaux n'aient pas toujours rendu compte de façon homogène de ces accidents au cours du temps : par exemple la couverture de l'information internationale au cours de la dernière guerre mondiale semble assez complète, suffisamment en tous cas pour que l'on puisse s'interroger sur la concurrence qu'aurait pu faire cette actualité brûlante aux compte-rendus des faits divers urbains de l'époque, si du moins ils restaient de dimensions modestes. D'une façon plus générale on peut soupçonner les journaux du début du siècle, plus faiblement intégrés que maintenant aux réseaux mondiaux des agences d'information, d'avoir rendu compte de nouvelles locales plus minces que celles qui retiennent aujourd'hui l'attention des journalistes.

Aussi l'instrument d'observation utilisé est sans doute fort imparfait; c'est cependant le seul disponible, et il n'est guère de moyens d'apprécier sa fiabilité de détail, du moins en termes de localisation précise et de seuil de gravité à partir duquel les accidents ont été relatés . S'il est sûr que tous les accidents importants ont été rapportés, le problème réside plutôt dans une probable irrégularité de traitement des accidents de faible gravité, dont on peut raisonnablement supposer qu'ils ne biaisent l'analyse que dans le détail, et non dans ses grandes lignes. Cette imprécision nous a cependant incité à ne constituer que des groupes géographiques ou chronologiques suffisamment importants pour conserver une signification.

Compte tenu de l'imprécision sémantique souvent insurmontable, et pour éviter de morceler le fichier, nous avons regroupé les accidents relevés en quatre catégories simples :
- ceux liés à un simple excès d'eau (*inundaciones*)
- les crues boueuses ou coulées de boue (*aluviones* et *aludes*);
- les éboulements et glissements de terrain (*derrumbes* et *deslaves*);
- les effondrements de chaussée (*hundimientos*).

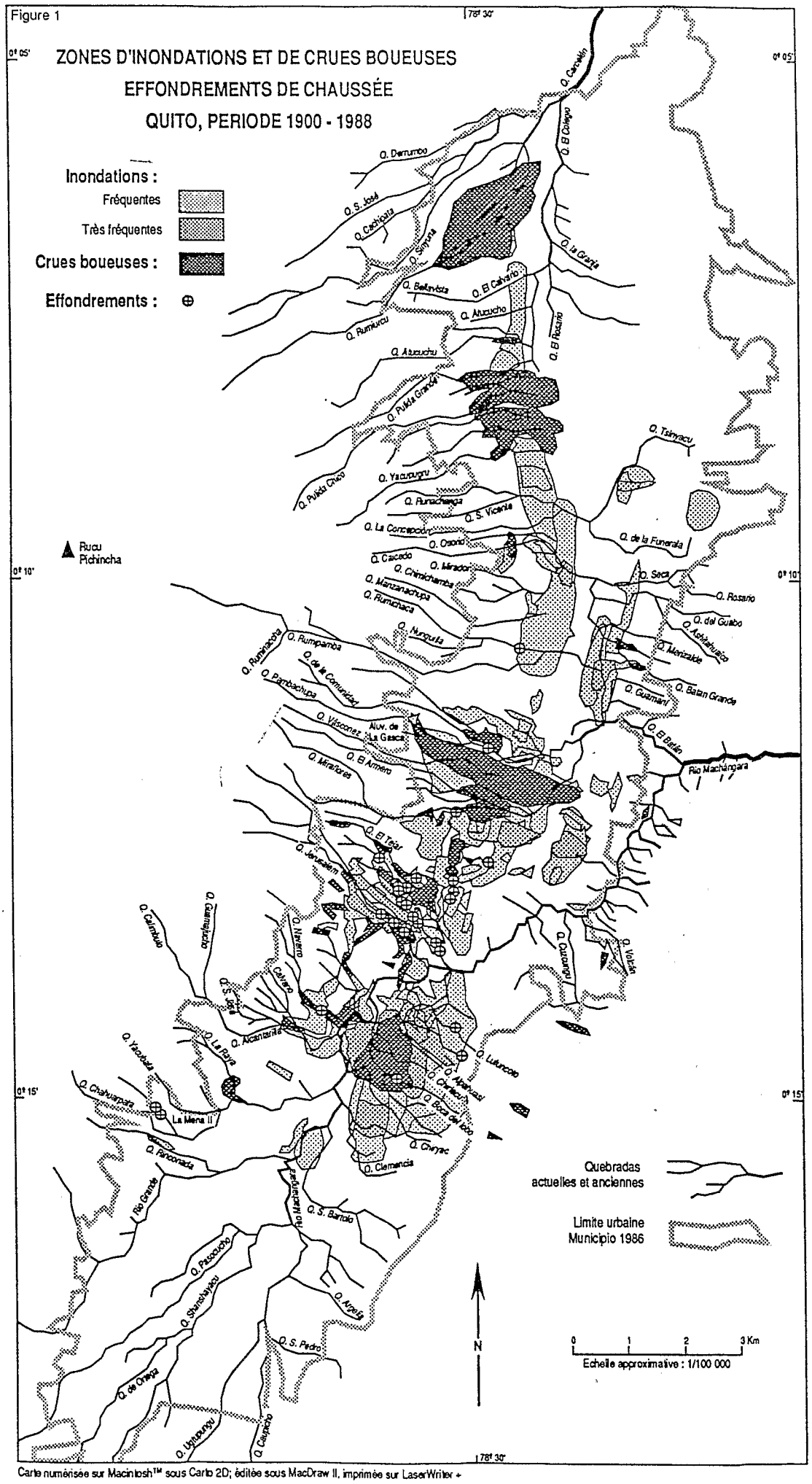
Chaque événement a été cartographié au mieux des indications de localisation que fournissait chaque article, en respectant toujours le principe de ne retenir qu'une hypothèse minimale chaque fois que l'extension précise de l'accident ne pouvait être reconstituée avec précision. L'ensemble des inondations, crues boueuses et effondrements de chaussée survenus de 1900 à 1988 est représenté dans la figure 1, de même que les *quebradas* et un fonds urbain simplifié; les éboulements, qui ne répondent pas à une logique directement liée à l'intensité des pluies sont représentés sur la figure 2.

2.2. Les types d'accidents

Les inondations - Elles traduisent très directement l'insuffisance chronique du réseau de drainage lors des fortes précipitations qui sont de règle en climat équatorial d'altitude. Les averses étant d'autant plus localisées qu'elles sont intenses, ces inondations n'ont en règle générale qu'une extension limitée dans l'espace et ne durent guère plus de deux à quatre heure. Elles sont fréquemment liées au tracé des anciennes *quebradas* , la cartographie montrant qu'environ la moitié des inondations répertoriées correspondent directement à l'insuffisante capacité d'évacuation des débits de pointe des *quebradas* qui dominent la ville. Dans les autres cas c'est la capacité d'évacuation du seul ruissellement urbain qui est en cause.

Qu'elles proviennent des débits de crue ou du seul ruissellement urbain, les eaux excédant 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 cm de hauteur, et ne dépassent guère un mètre ou un mètre cinquante lors des inondations les plus importantes. L'extension varie de quelques *manzanas* (les pâtés de maisons) au quartier tout entier sur les pentes moyennes, mais l'inondation peut affecter des secteurs plus vastes, dans les zones planes de la "plaine de Quito". Ce sont alors les secteurs de la Carolina - ancien marécage au nord du Panecillo - et des quartiers de Chimbacalle, Villa Flora et La Magdalena au sud qui sont les plus affectées, un même épisode pluvieux provoquant fréquemment plusieurs foyers d'inondation dans la ville.

Si ces inondations ne provoquent ordinairement que des dégâts relativement peu importants : inondation des rez-de-chaussées, quelques maisons précaires abîmées ou parfois détruites, et usure accélérée des chaussées, surtout dans les quartiers périphériques où elles ne sont pas revêtues, elles paralysent dans tous les cas la circulation dans la ville, sur des superficies très supérieures à celles identifiées comme inondées par le journaliste. Elles sont surtout très fréquentes et constituent environ la moitié des accidents relevés : le fichier compte 163 événements pluviométriques depuis 1900, qui ont occasionné 233 inondations proprement dites dans toute la ville, soit près de trois par an en moyenne



Carte numérisée sur Macintosh™ sous Carto 2D; éditée sous MacDraw II, imprimée sur LaserWriter +

Les crues boueuses - Répertoriées par les journalistes comme des *aluviones*, *aludes* et parfois *deslaves*, ces accidents sont moins fréquents (73 accidents de ce type ont été recensés en 70 événements) mais nettement plus destructeurs que les inondations : outre la boue déposée sur 30 à 60 cm. d'épaisseur, toujours présente, des pierres, blocs et troncs d'arbres sont également entraînés par le flux dans les cas les plus graves. L'extension varie de quelques centaines de mètres de longueur à 3, voire 4 kilomètres sur 100 à 400 mètres de largeur. Les dégâts peuvent être importants, avec destruction partielle de maisons, de voitures et d'équipement de voierie, colmatage du réseau d'égouts sur des superficies importantes, et même parfois pertes de vies humaines, comme dans l'accident de la Gasca où il y eut deux morts.

Il s'agit soit de coulées de boue, relativement peu liquides, soit plus fréquemment de crues à forte charge solide, allant dans les cas les plus graves jusqu'à charrier des pierres et des blocs. Au plan géomorphologique la coulée de boue correspond au dépassement de la limite de liquidité dans le sol, induisant une loupe d'arrachement et une coulée en aval, généralement assez courte, alors que la crue boueuse résulte de la mobilisation par le torrent de matériaux arrachés à ses berges, ou antérieurement mobilisés par un éboulement ou une coulée de boue dans la partie amont du bassin-versant; elle affecte des distances beaucoup plus importantes, et a tendance à s'étaler lorsque la pente diminue comme c'est le cas à la base de tous les versants qui dominent la ville.

Ce sont des accidents de la périphérie de la ville, bien que les plus graves y pénètrent profondément, exclusivement liés au tracé des actuelles *quebradas*, qu'il est presque toujours possible d'identifier même lorsque le journaliste n'en parle pas. L'analyse des compte-rendus indique qu'à leur entrée dans la ville, les flux correspondent dans presque tous les cas à des crues boueuses, fréquemment attribuées à des embâcles naturels en amont. L'existence de ces embâcles reste cependant douteuse : mentionnée par les journaux dans le cas récent de l'*aluvión* de la *quebrada* La Raya, que nous avons pu étudier "à chaud" [12], ni l'observation de terrain, ni l'enquête auprès des habitants du voisinage n'a pu confirmer un tel mécanisme, et la cause directe de la crue doit être attribuée au caractère exceptionnel de la précipitation, estimée d'une intensité de 60 à 80 millimètres par heure en 30 minutes et d'une fréquence de retour décennale, ou plus rare selon les hypothèses prises en compte pour le calcul [13].

Dans un autre cas ayant fait l'objet d'un compte-rendu scientifique, l'accident de l'Avenida La Gasca du 25 février 1975 - l'un des plus graves répertoriés - les journaux ont également fait état d'un embâcle, non confirmé par l'étude réalisée [14]. Cette dernière attribue l'origine de la très importante charge solide - estimée à 52 000 m^3 - à un seul et brutal épisode d'érosion du lit même de la *quebrada* Pambachupa. Ces deux exemples indiquent qu'en matière d'explication des accidents la fiabilité des journaux est faible, l'information ne reposant en général que sur l'interview rapide des habitants du voisinage; il n'y a malheureusement dans la plupart des cas aucun moyen de préciser le mécanisme d'accidents dont la seule mémoire - descriptive et peu détaillée - reste celle de la presse.

Au total les crues boueuses sont de même nature que les inondations, du moins celles liées au débit des *quebradas*, dont ils constituent le terme le plus grave dans la mesure où la violence de la crue est capable de mobiliser une charge solide importante. Au dépouillement, les deux types d'accidents ne sont pas toujours faciles à distinguer, compte tenu de l'imprécision de vocabulaire que nous avons évoqué plus haut; dans la pratique nous avons classé comme crue boueuse les accidents décrits comme inondation où était mentionné un dépôt de boue important.

Les effondrements - Nous avons déjà évoqué les *hundimientos*, effondrements de chaussée dûs aux égouts défectueux dans le matériau de remblaiement des anciennes *quebradas*, accidents plus rares que les précédents puisque 36 d'entre eux ont été répertoriés depuis 1900. Ils sont cependant spectaculaire et frappent l'imagination lorsqu'un véhicule disparaît dans un trou qui s'ouvre subitement sous ses roues, comme c'est arrivé le 3 mai 1978 dans l'Avenida America.

Leur mécanisme est lié à l'érosion souterraine dans des conditions assez particulières : la rupture d'un collecteur d'égout, lors d'une forte précipitation et sous l'effet de la mise en charge des eaux dans ses secteurs pentus, induit un écoulement parallèle au collecteur dans les matériaux peu compacts de remblaiement d'une *quebrada* . Cet écoulement poursuit un lent travail d'évacuation des sables et limons, et creuse progressivement une cavité sous la chaussée; pendant un certain temps cette dernière résiste grâce au compactage des couches superficielles, et passe complètement inaperçue. La voûte cède brusquement, parfois sous le poids d'un véhicule, lorsque la cavité s'est suffisamment agrandie. Il arrive aussi qu'un édifice soit affecté par de tels affaissements, mais beaucoup plus rarement dans la mesure où l'on a évité de construire sur les superficies remblayées, habituellement réservées aux avenues et à des espaces de loisirs. Certains effondrements de chaussée atteignent des proportions spectaculaires, tel celui du 1er février 1984 dans l'Avenida de Los Libertadores où la *quebrada* Navarro a repris son cours naturel, ouvrant l'avenue sur 200 mètres de long,

[12] Cf. De Noni , Fernandez de Castro, Peltre, 1986

[13] Notons que dans ce cas précis les relevés pluviométriques de deux stations proches, à un et deux kilomètres du lieu de l'accident, n'ont enregistré que des valeurs très faible. La pluie est restée localisée au versant, et c'est l'enregistrement de la crue exceptionnelle du Rio Machangara - intégrant l'ensemble du bassin-versant - qui a permis l'estimation (réalisée par P. Pourrut).

[14] cf. Feininger 1975.

30 de large et 20 de profondeur.

Ces accidents sont également directement liés aux déficiences du drainage urbain. On ignore tout cependant du temps de latence entre la cause de l'accident - la précipitation qui induit la rupture de canalisation - et l'événement lui-même. Les deux derniers affaissements de grandes dimensions datent du début 1984, au cours d'une saison des pluies jugée assez forte, mais les deux précédentes avaient été exceptionnelles; on peut donc subodorer un délai de préparation des accidents entre quelques mois et deux ans, sans pouvoir préciser plus. L'incidence du phénomène géomorphologique sur la voierie est du reste beaucoup plus élevée que ne le laisse apparaître le compte des accidents : en effet un très grand nombre de petits affaissements progressifs, non catastrophiques, affecte les rues et avenues, qui ne sont pas rapportés par les journaux mais constituent des problèmes d'entretien répétés pour les services de voierie.

Les éboulements - Décrits sous les termes de *derrumbe* et parfois de *deslave* ou de *deslizamiento*, ce sont des accidents très ponctuels qui affectent les quartiers construits sur des pentes raides. Assez fréquents avec 114 fiches, 21 d'entre eux sont simplement décrits comme des effondrements de maisons pour lesquels il est difficile de distinguer quelle est la part de l'instabilité du terrain et celle de la simple vétusté des bâtisses; la plupart des articles mentionne cependant des orages violents comme cause première, et parfois un terrain instable par suite du remblayement d'une *quebrada* proche. Aussi nous avons compté ces effondrements de maisons comme des éboulements, la surestimation de leur nombre due aux effondrements par simple vétusté des édifices ne devant pas excéder 10%.

Il s'agit de 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 accidents arrivent surtout en saison des pluies, et sont liés à l'affaiblissement de la cohérence des cendres volcaniques par l'humidité en bordure des talus mal ou pas étayés, et mal drainés; il ne s'agit pas de boue, mais de masses de terre humide qui ne parcourent que de petites distances. Bien que très localisés, ce sont des accidents graves puisqu'ils affectent des talus de 5 à 10 mètres de haut qui détruisent des maisons entières et entraînent des pertes de vies humaines. Ce sont notamment les accidents les plus meurtrieres, puisqu'ils sont responsables de 115 morts sur 171 répertoriés dans le fichiers.

La cartographie (fig. 2) fait apparaître quatre noyaux principaux, et une auréole assez diffuse : Le Panecillo, urbanisé dès les premières décennies du siècle, est surtout touché sur son versant nord-est; un second noyau dense jalonne le débouché de la quebrada Jerusalem, sur les pentes raides d'El Placer et de la Libertad, et un troisième marque le versant et le pied de la colline de l'Itchimbia; le quatrième noyau correspond au centre colonial, mêlant les effondrements de maisons anciennes et les éboulements de talus. Le reste des éboulements (une trentaine) se disperse à la périphérie, dans des quartiers à pentes raides : La Colmena, San Juan, Luluncoto-La Ferroviaria, et les pentes dominant le Machangara. Ce sont des accidents directement liés à une urbanisation pauvre de pentes fortes, où la construction est restée très artisanale, les talus mal ou pas étayés, et très insuffisamment drainés; il semble que des quartiers plus riches, parfois construits sur des pentes également fortes, ne souffrent pas de ce genre de problèmes.

Les quatre types d'accidents que nous venons de décrire dépendent tous des conditions d'évacuation des eaux de ruissellement dans la ville : inondations et crues boueuses sont très directement liées aux précipitations les plus intenses; les effondrements le sont également, mais avec le retard dû à l'évolution géomorphologique souterraine. Enfin les éboulement dépendent de l'infiltration et de la dynamique de l'eau dans les sols des versants raides, et de leurs propriétés structurales sous certaines conditions de saturation. Au total ce sont tous des accidents du drainage urbain.

3 - Fréquence et localisation des accidents

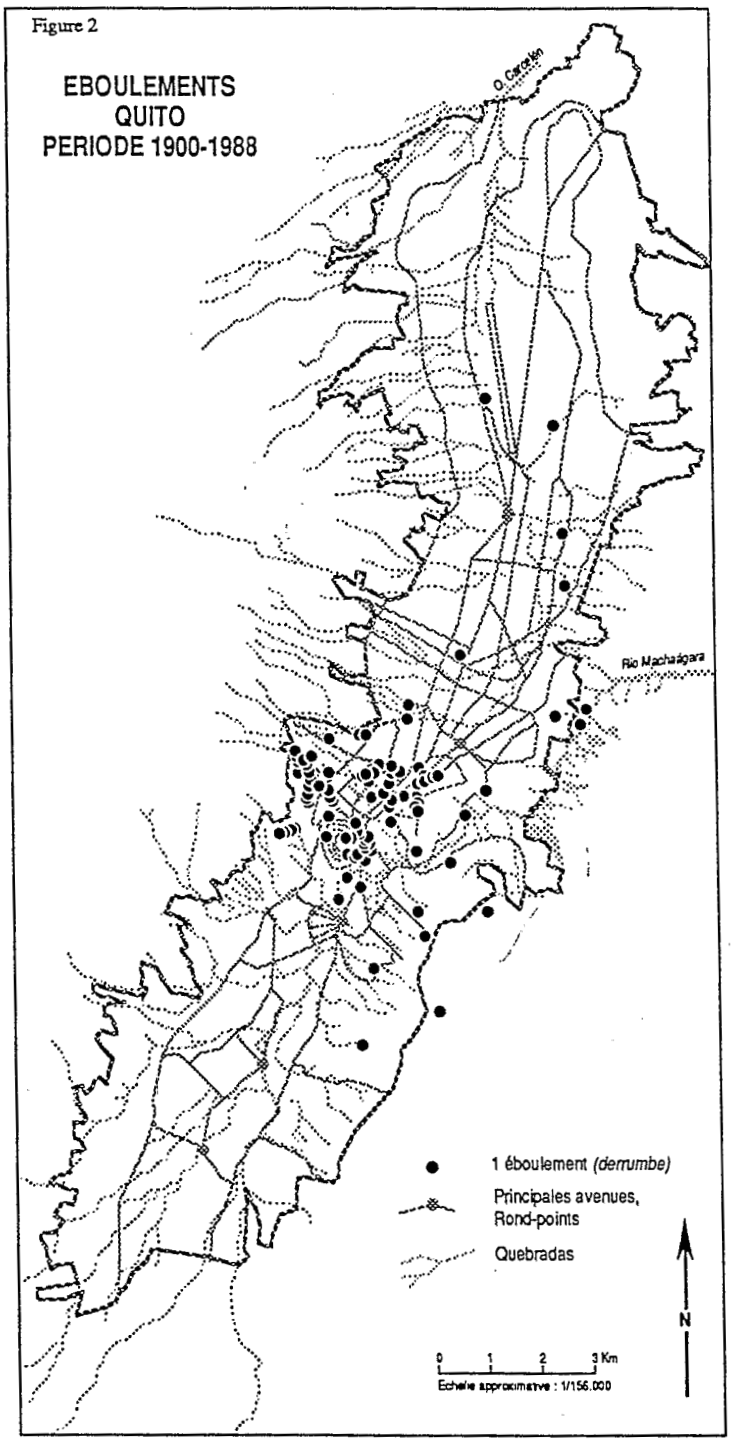
3.1 - Rythmes d'occurence

A partir du fichier des accidents on a dressé l'histogramme des fréquences annuelles pour les quatre types de phénomènes (cf. fig. 3), où n'apparait guère de régularité d'occurrence. On note seulement 13 années d'accidents fréquents entre 1915 et 1928, suivies d'un épisode calme de 20 ans, puis de quatre périodes de fréquences élevées de 1950 à 1987.

Pour ce traitement par fréquences, les inondations ont été comptées par *événement pluviométrique* ayant causé des problèmes, et non par foyer géographique. Les inondations constituent en effet les accidents les plus étendus, qui ont en général dû être cartographiés en plusieurs foyers géographiques pour identifier les zones les plus sensibles; en termes de fréquences d'occurence, une pluie ayant causé par exemple quatre foyers d'inondation dans la ville doit être comptée comme un seul accident pour éviter de donner aux inondations un poids excessif du fait de leur grande extension spatiale, alors que chacun des trois autres types d'accident, plus graves et beaucoup mieux localisés, seront comptés pour chacun de leurs foyers, même si plusieurs foyers sont dûs à un même orage. Le tableau 3 indique le nombre des accidents survenus depuis 1900 selon ce principe : nombre des épisodes *journaliers* d'inondations, et nombre des accidents *géographiquement localisés* pour les autres types[15].

[15] Le total du tableau 3 est supérieur au nombre de fiches du fichier "événements" (317) du fait que certains accidents ont eu plusieurs foyers localisés dans la ville le même jour, et inférieur au nombre de fiches du fichier "accidents" (567) où chaque fiche correspond à un foyer géographique d'accident.

Figure 2



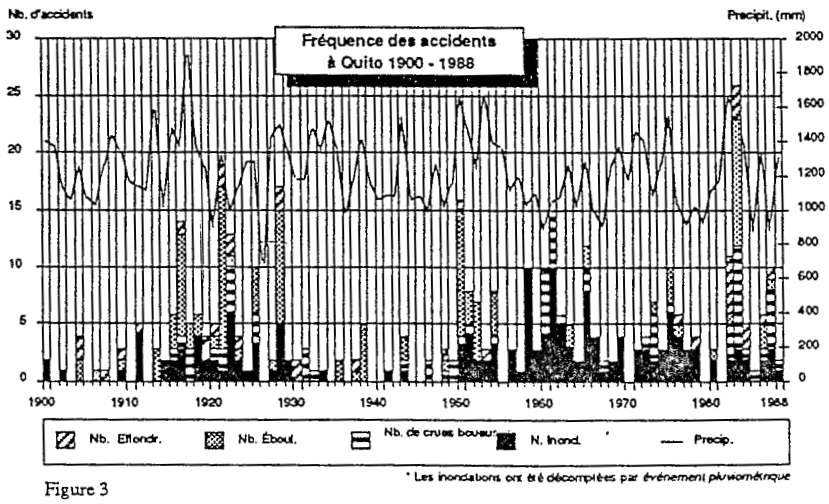


Figure 3

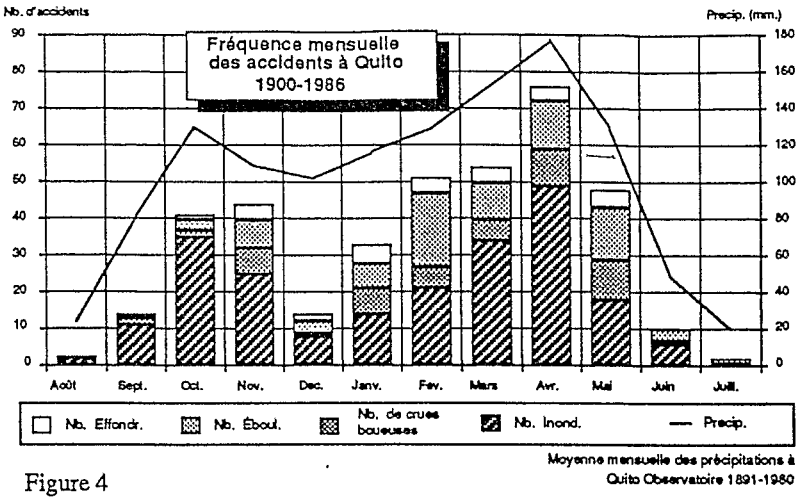


Figure 4

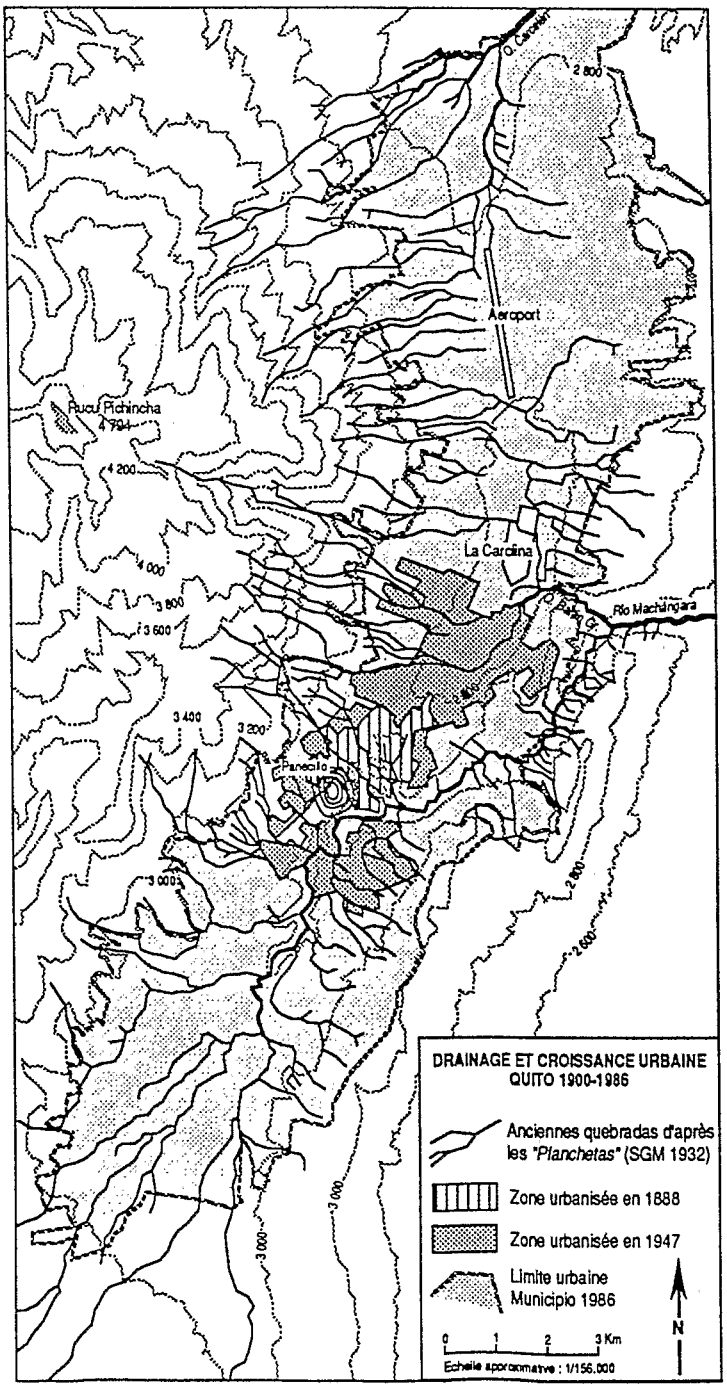


Figure 5

	Nombre d'accidents
Inondations	163
Crues boueuses	70
Eboulements	114
Efffondrements	36
Total	383

Tableau 3

Ces fréquences ont été rapportées aux précipitations annuelles, dont la courbe n'indique qu'une corrélation très faible avec le nombre des accidents. Ceci est dû au fait qu'une très forte majorité des accidents - 233 inondations et crues boueuses - est directement liée aux fortes intensités beaucoup plus qu'aux totaux annuels, et il faudrait pouvoir comparer avec les relevés horaires ou au moins journaliers pour obtenir une relation graphique claire. En outre les stations pluviométriques sont toutes localisées dans la "plaine de Quito", alors que l'on sait par expérience que les pluies les plus intenses sont très localisées, et tombent sur les versants qui dominent la ville; nous avons pu constater lors de l'étude de l'*aluvión* de la *quebrada* La Raya[16], qu'une précipitation très intense, attestée par le limnigramme de crue du Rio Machangara, n'avait pratiquement pas été enregistrée par deux pluviographes proches, qui n'avaient vu passer que la frange de l'orage.

Si la corrélation avec les totaux annuels est mauvaise, celle de la fréquence mensuelle des accidents sur l'ensemble de la période, rapportée à la moyenne mensuelle des précipitation sur 89 années[17] est en revanche très bonne (fig. 4), confirmant que ce sont bien à des accidents du drainage du site urbain que l'on a affaire, dont les maxima suivent étroitement ceux des précipitations mensuelles moyennes.

La courbe des inondations se calque très précisément sur la courbe des précipitations. Les crues boueuses semblent par contre apparaître avec un mois de retard sur le maximum d'octobre, pour se développer complètement de février à mai; or ce développement semble lié à celui des éboulements, et l'on peut supposer que, statistiquement parlant, les crues boueuses sont directement alimentés en charge solide par des éboulements dans l'amont du bassin-versant des *quebradas*, ou tout au moins par des conditions d'affaiblissement de la structure de leur berges dues à l'humectation des sols en profondeur, conditions voisines de celles qui provoquent les éboulements. Le temps nécessaire pour réaliser cette humectation expliquerait le décalage que l'on observe par rapport aux maxima pluviométriques, ce décalage étant plus net pour octobre, début brutal de la saison des pluies, que pour avril, où cette dernière est déjà installée depuis plusieurs mois.

Les effondrements de voierie semblent suivre une distribution voisine de celle des crues boueuses et des éboulements, sans différences très marquées au cours de la seconde saison des pluies, de février à mai. Le fait qu'ils soient liés aux précipitations en termes de fréquences mensuelles permet cependant d'en conclure que l'effondrement est directement lié à un ruissellement souterrain en phase d'activité. Par contre l'hypothèse que le délai d'évolution entre la rupture de canalisation et l'affaissement de la cavité puisse ne pas excéder un à six mois est plus hasardeuse, dans la mesure où une rupture amorcée au cours d'une saison des pluies peut très bien ne provoquer le *hundimiento* qu'à la saison suivante, voire deux ans plus tard, au moment de l'année où l'écoulement souterrain est actif.

Mais en un siècle la ville a multiplié sa superficie par 40, et les fréquences d'accidents doivent être rapportées à la croissance urbaine. Nous avons ainsi construit les histogrammes de fréquences (fig. 6) selon trois zones successives de croissance urbaine : le noyau historique qui existait en 1900; les zones construites au nord et au sud du centre entre 1900 et 1947; et enfin celles qui sont apparues entre 1947 et 1983[18] (cf. fig. 5). Le nombre des accidents enregistrés par type et pour chacune des trois zones successives de croissance urbaine est exprimé dans le tableau 4 [19], construit sur la même base que le tableau 3, mais dont les totaux sont supérieurs du fait que certains accidents, à cheval sur deux zones, sont comptés à la fois dans l'une et dans l'autre.

La figure 6 indique un déplacement dans le temps des fréquences élevées d'accidents, de la zone bâtie la plus ancienne à la plus récente, conforme à ce que l'on peut attendre : peu d'accidents dans la première moitié du siècle pour les deux auréoles de croissance, et mode principal en 1983, dans la zone la plus récemment urbanisée.

16 Cf. De Noni, Fernandez de Castro, Peltre, 1988

17 1891 à 1980 à Quito Observatoire. Cf. Alulema, Ojeda, Nouvelot, Pourrut, 1985.

18 Les limites de plans utilisées ont été rassemblées par O. Lemaire. Elles correspondent à :
Plano de Quito con plano de todas las casas, 1/3 000 ème, 1888
Plano de Quito, Servicio Geográfico Militar, 1/10 000 ème, 1947
Limite urbaine Municipio 1986 (Document de travail du projet Atlas Informatisé de Quito)

19 Les accidents ont été classés par zone géographique quelle que soit leur date, pour pouvoir comparer des fréquences d'occurence par zone de croissance urbaine. Lorsque des accidents figurent dans une zone avant la période où celle-ci s'est en principe urbanisée, il s'agit alors d'accidents des faubourgs ruraux de la ville : villages, routes et ponts le plus souvent; si des accidents se sont produits dans les champs et les prés, ils n'ont en général pas été relatés : ne gênant pas suffisamment ils ne constituaient pas matière à fait divers dans les journaux de la ville.

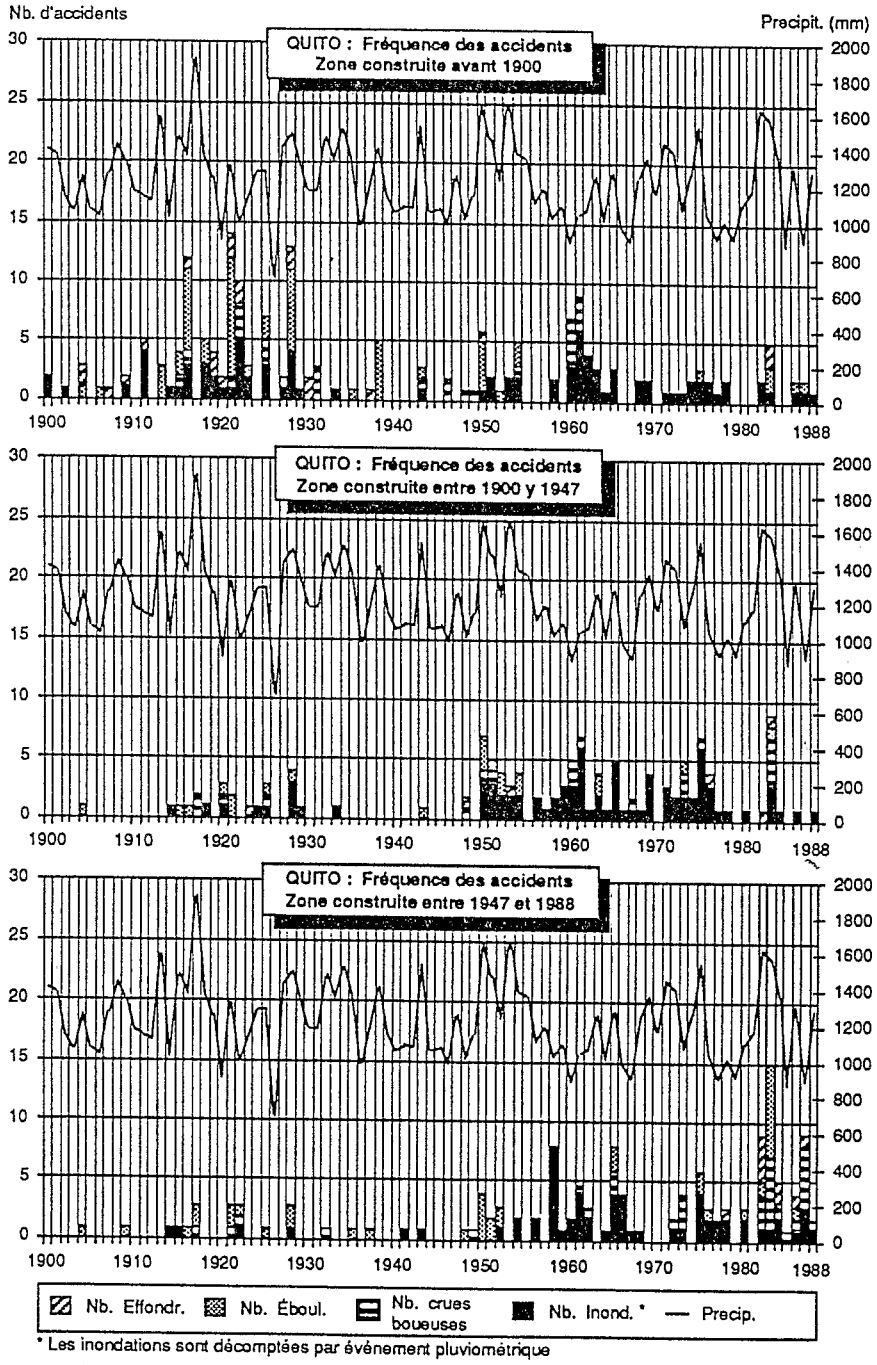

Nb. d'accidents
Precipit. (mm)
QUITO : Fréquence des accidents
Zone construite avant 1900
QUITO : Fréquence des accidents
Zone construite entre 1900 y 1947
QUITO : Fréquence des accidents
Zone construite entre 1947 et 1988
0 5 10 15 20 25 30
0 200 400 600 800 1000 1200 1400 1600 1800 2000
1900 1910 1920 1930 1940 1950 1960 1970 1980 1988
Nb. Effondr.
Nb. Éboul.
Nb. crues boueuses
Nb. Inond. *
Precip.
* Les inondations sont décomptées par événement pluviométrique

Figure 6

Figure 7

ANALYSE HISTORIQUE

Periode 1900 - 1947

Q. Carcelén
Q. Rumiurcu
Q. Pulida Chico
Q. Yaciplugu
Aeroport
Rucu Pichincha ▲ 4780 m
Q. Rumipamba
Q. Pambachupa
La Carolina
B. Quevedo
Q. Batán Gr.
Rio Machángara
S. Juan
M. Sucre
Q. Jerusalem
La Colmena
Panecillo
La Magdalena
Chimbacalle
Inondations (nombre)
1 - 2
3 - 4
5 - 6
> 7
Crue boueuse
Eboulement
Centre historique
Limite urbaine 1947

Periode 1948 - 1967

Q. Carcelén
Q. Rumiurcu
Aeropuerto
Q. Pulida Chico
Q. Yaciplugu
Rucu Pichincha ▲ 4780 m
Q. Rumipamba
Q. Pambachupa
La Carolina
Q. Batán Gr.
Rio Machángara
Q. Jerusalem
Centre historique
Limite urbaine 1947

Periode 1968 - 1988

Q. Carcelén
Q. Rumiurcu
Aeroport
Q. Pulida Chico
Q. Yaciplugu
Rucu Pichincha ▲ 4780 m
Q. Rumipamba
Q. Pambachupa
La Carolina
Q. Batán Gr.
Rio Machángara
Q. Jerusalem
Panecillo
Q. La Ladera
N
Centre historique
Limite urbaine 1947
Limite urbaine 1986
0 1 2 3 Km.
Echelle approximative : 1/150.000

Zone construite :	Avant 1900	De 1900 à 1947	De 1947 à 1986	Total
		Nombre d'accidents		
Inondations	89	82	62	233
Crues boueuses	24	18	31	73
Eboulements	56	21	38	115
Effondrements	21	6	9	36
Total	190	127	140	457

Tableau 4

Ce glissement dans les fortes fréquences annuelles globales s'accompagne d'un déplacement des modes dans la fréquence des éboulements et crues boueuses, dont nous avons vu qu'ils étaient liés : nombreux dans le centre colonial jusqu'en 1930, ils se raréfient ensuite et disparaissent presque après 1963, alors qu'ils sont fréquents dans la zone 1900-1947, et qu'ils constituent le maximum dans celle la plus récemment urbanisée.

La raréfaction des accidents liés à d'importantes mobilisations de terre dans le centre historique doit être mise en relation avec la complète urbanisation de son environnement : les talus, d'autant mieux étayés que l'urbanisation est ancienne, sont plus stables et s'éboulent moins, et les crues boueuses se produisent plus haut en amont sur le cours des *quebradas*, là où commence le remblaiement. C'est maintenant la périphérie qui subit ces accidents, caractéristiques de la frange où les bassins-versant voient leur dynamique perturbée par l'urbanisation; certaines parties de la vieille ville ont fait partie de cette frange jusqu'en 1963, mais semblent maintenant à l'abri de ces problèmes.

De plus, même la fréquence des inondations semble régresser dans le centre depuis 1961, dernière pointe enregistrée; dans la mesure où les deux autres zones ont subi en 1982-1984 un nombre important d'inondations et de crues boueuses, il faut sans doute en conclure que l'appareil de drainage du vieux centre a été progressivement amélioré.

La partie de la ville urbanisée entre 1900 et 1947 bénéficie, comme la vieille ville, du calme relatif entre 1930 et 1949, mais connaît ensuite trois décades difficiles. Durant cette période, ce sont surtout des zones plates qui ont été colonisées : ancienne zone marécageuse de la Mariscal Sucre et replat des anciens quartiers du Sud (Chimbacalle, Villa Flora et La Magdalena). Ceci explique la nette prédominance des inondations et des crues boueuses, le faible nombre d'effondrements, les *quebradas* remblayées dans cette partie de la ville étant peu profondes, ainsi que celui des éboulements, absents des terrains plats.

La zone la plus récemment urbanisée attire l'attention par la forte proportion des *aluviones* et *derrumbes* par rapport à un nombre d'inondations qui reste comparable à celui subi dans les deux autres parties de la ville durant la même période. A cet égard les années 1982 à 84 battent tous les records sur l'ensemble de la période; s'il est vrai que l'année 1983 correspond à un phénomène de *Niño* très accusé et à des inondations catastrophiques dans la région côtière[20], la zone 1900-1947 n'a subi qu'un nombre très moyen d'accidents pour cette période, et le centre colonial en est sorti presque indemne.

Cette forte proportion d'accidents dans les zones récemment urbanisées traduit la colonisation de nombreux versants en pente forte, et l'accélération considérable des travaux de remblaiement des *quebradas* : le début des années 80 voit la construction de *l'Avenida Occidental*, boulevard périphérique qui contourne la ville par le pied des pentes du Pichincha en coupant 68 de ses *quebradas*, et subit depuis cinq ans une crue boueuse chaque année. Dans le sud de la ville se développent actuellement de nombreux lotissements neufs qui remontent sur les bords de la cuvette, et fournissent également une part appréciable des accidents des dernières années. C'est donc dans la partie la plus récemment urbanisée que le déplacement de la zone sensible du centre vers la périphérie de la ville est le plus net.

3.2 - Distribution spatiale

La cartographie de l'évolution des accidents dans le temps[21] (fig. 7) confirme l'analyse par fréquences : les crues boueuses, très présentes dans le centre historique entre 1900 et 1967, y disparaissent ensuite. Au cours de la période 1968-88 elles sont localisées à la périphérie de la ville, ce qui apparaît nettement au sud du Panecillo, alors qu'au nord le phénomène est moins net, masqué par la grande extension des *aluviones*. Pourtant dès le début du siècle on note des crues boueuses au pied des grandes *quebradas* du Pichincha, dans des zones non urbanisées où le

20 *El Niño* correspond à un phénomène océanique sur les côtes du Pérou et de l'Equateur, qui entraîne les années où il se produit des précipitations fortes sur le continent. Sensible dans la Sierra équatorienne de janvier à juin 1983, il a entraîné une hausse du total annuel et une plus forte irrégularité des précipitations, sans toutefois affecter de façon significative l'intensité des averses ni augmenter les totaux journaliers (cf. Nouvelot et Pourrut, 1986).

21 Pour cette cartographie, les accidents ont cette fois été classés par date selon trois périodes (48, 20 et 21 années), et non plus par zone comme pour l'étude de fréquence. Maintenir ce dernier type de classement reviendrait en effet à cartographier simplement la croissance urbaine par la localisation des accidents, information de peu d'intérêt.

Figure 8

ACCIDENTS GRAVES ET TRES GRAVES QUITO, 1900-1988

Crues boueuses et effondrements

25 9 1987
6 1 1983
21 4 1949
1 5 1983
24 3 1932
1 5 1983
11 11 1948
24 5 1987
18 4 1917
4 5 1917
11 12 1983
12 2 1985
16 4 1946
10 1 1950
23 11 1950
26 2 1975
30 12 1931
29 8 1960
13 3 1984
26 4 1973
24 5 1983
26 11 1982
1 2 1984
2 5 1983
6 10 1922
30 12 1931
18 2 1984
17 12 1982
18 4 1967

Crue boueuse grave

Crue boueuse très grave

Effondrement grave

Hundimiento muy grave

Date de l'accident 18 4 1967

Inondations et éboulements

26 3 1983
26 3 1983
19 3 1963
18 2 1951
28 1 1927
14 3 1961
26 4 1950
10 2 1952
19 5 1948
18 2 1913
25 9 1943
27 3 1951
5 3 1928
28 9 1928
24 4 1962
17 3 83
30 7 86
30 1 1911
18 12 1982
22 1 1963
7 6 1950
5 6 1977
26 11 1987
10 11 1965
17 5 1923
24 3 1950
26 4 11
27 4 71
8 5 72
19 3 1983
4 5 1911
28 4 1954
1 5 1976
26 4 83
4 5 1950
27 4 1983
28 4 1954
22 5 1965
15 4 1973

Eboulement grave

Eboulement très grave

Inondation grave

N

0 1 2 3 Km.

Echelle approximative : 1/170.000

drainage naturel a été encore peu touché[22]; ces accidents, affectant des ponts, des routes ou des villages de la périphérie rurale de la ville, marquent les zones naturellement sensibles où l'urbanisation n'aurait dû être développée qu'avec des précautions de contrôle morphodynamique du drainage, de préférence maintenu à ciel ouvert.

D'une façon générale les crues boueuses et les effondrements de chaussée apparaissent sur les cartes comme directement liées au réseau de drainage ancien, et il est toujours possible d'identifier clairement pour chacun de ces accidents une *quebrada* responsable. De même les quartiers fréquemment inondés correspondent à des zones de plus faible pente, au pied des versants à forte densité de drainage, comme les secteurs de Chimbacalle, de la Mariscal Sucre, de la Carolina ou de l'aéroport. La superficie de ces zones inondées augmente avec la croissance urbaine, suivant logiquement la détérioration des conditions de drainage du site dans les secteurs peu pentus de la ville.

Enfin les vingt dernières année comportent deux crues boueuses de gravité et d'extension exceptionnelles : *l'aluvión* de La Gasca de 1975 (*Q. Pambachupa*), qui est arrivé jusqu'au quartier de la Mariscal Sucre, et au nord celui de la Q. Rumiurcu de 1983, qui a affecté la nouvelle avenue Occidentale et le quartier de Cotocollao, ancien village de la périphérie, et s'est répété trois fois au cours de la période étudiée sans qu'il soit cependant possible de comparer clairement la gravité de ces récidives. A en juger par leur extension, et en l'abscence de données pluviométriques horaires anciennes, ces deux accidents semblent correspondre à des événements pluviométriques d'intensité exceptionnelle.

3.3 - Gravité des accidents

La cartographie des accidents arrivés depuis 1900 permet d'identifier des zones sensibles aux problèmes du drainage dans la ville. Cependant tous ces événements ne sont pas également destructeurs : nombre d'entre eux ne constituent qu'une gêne passagère alors que d'autres causent des dégâts graves et des pertes en vies humaines, et l'identification des zones réellement menacées par les phénomènes morphodynamiques doit être menée à partir de la distinction du degré de gravité de leurs effets. Les accidents ont donc été affectés d'un degré de gravité en quatre catégories selon des critères simples, facilement identifiables dans les descriptions qu'en faisait le quotidien :

- 3 : gêne du trafic, dégâts légers;
- 2 : dégâts matériels rapportés par le journaliste, gêne sévère du trafic;
- 1 : existence de morts et blessés, dégâts matériels importants;
- 0 : gravité et extension exceptionnels.

Au total 71 accidents ont causé des dégâts importants ou très importants et/ou des morts et des blessés depuis 1900, selon la distribution résumée dans le tableau 5.

	Gravité 0	Gravité 1	Total
inondations	0	15	15
crues boueuses	4	20	24
effondrements	2	3	5
éboulements	1	26	27
Total	7	64	71

Tableau 5

L'analyse de la sélection réalisée appelle quelques remarques :

- sur 163 inondations qui affectent la ville, seul un petit nombre d'entre elles sont graves;

- les accidents graves commencent en 1911 par une crue du Rio Machangara qui fait 6 victimes, et par deux derrumbes en 1913 au débouché de la Q. Jerusalem; ils se poursuivent en 1917 par deux aluviones de la Q. Pambachupa (déjà!), et un aluvión en 1922 de la Q. Jerusalem, qui semblent marquer le début des grands travaux de remblaiement et de modification du réseau de drainage;

- tous les accidents très graves se sont produits entre 1973 et 1984, soulignant une réelle aggravation probablement liée à l'ampleur croissante des grands travaux de l'urbanisation récente.

Une autre sélection réalisée sur le fichier concerne le nombre de morts rapportés par les journaux (accidents de gravité 1), qui fournit le chiffre de 168 morts sur l'ensemble de la période. Il s'agit là d'une estimation approchée, le journaliste n'ayant pas toujours donné le nombre exact des victimes; lorsqu'il n'est mentionné que *"varios muertos"* nous avons supposé 5 victimes correspondant à la moyenne des articles qui fournissent cette précision; enfin le nombre de blessés n'étant que rarement mentionné, il n'est pas posssible de traiter cet indicateur. Sur 168 morts, 82 sont dûs aux seuls derrumbes, type d'accident le plus meurtrier, et 70 aux aluviones; les inondations sont responsables de 14 victimes, et un seul hundimiento a fait 2 morts.

Même en supposant que les journaux aient assez souvent sousestimé le nombre des morts lors d'un accident, voire omis leur existence, on ne dépasse probablement pas le chiffre de 250 victimes des accidents morphodynamiques en 89 années, soit un peu moins de trois par an en moyenne. Il s'agit là d'un chiffre relativement faible, comparé par exemple à l'importance du nombre annuel des victimes d'accidents de la circulation en ville, qui relativise bien la gravité somme toute faible ou moyenne de ce type d'accidents

22 Encore que la "plaine de Quito" soit occupée depuis longtemps, et que les documents cartographiques de 1930 y montrent certains tracés de *quebradas* en baïonnette, de toute évidence retouchés pour les besoins de mise en culture des *haciendas*.

par rapport au danger des risques sismiques ou volcaniques, où le nombre des victimes pourrait se compter par milliers. En ce qui concerne les dégâts matériels les descriptions fournies par les journaux sont trop imprécises pour permettre une estimation, même approchée; notons simplement que les véritables destructions de maisons sont rares hormis les derrumbes, et que c'est peut-être dans le domaine des réparations de voierie que l'on enregistrerait les coûts les plus élevés.

4 - Le futur : Les risques morphodynamiques exceptionnels

L'étude historique des accidents urbains d'origine climatique donne une bonne idée des zones de risque "habituel", lequel reste de faible amplitude par rapport aux risques majeurs, sismique et volcanique, qui menacent la ville. Ces derniers comportent pourtant des effets morphodynamiques secondaires, glissements de terrain et crues boueuses très exceptionnelles qui peuvent être beaucoup plus graves, dont nous tenterons une brève estimation.

4.1 - Les glissements de terrain liés aux séismes

Il ne semble pas qu'une période très exceptionnellement humide puisse à elle seule déclencher des mouvements de masse beaucoup plus importants que les *derrumbes* enregistrés depuis 1900, mais 89 années ne constituent pas encore une série climatologique suffisamment longue pour pouvoir être complètement affirmatif. En revanche, dans l'hypothèse d'un séisme survenant au cours d'une période exceptionnellement humide, affectant des sols saturés d'eau en profondeur, on pourrait très probablement assister à des glissements de terrain de grande ampleur pouvant causer plusieurs centaines de morts. La probabilité d'un tel accident est sans doute assez faible, exigeant la conjonction de deux phénomènes de fréquence d'occurence rare, mais elle existe et doit être prise en compte dans l'estimation du risque urbain.

Les quartiers les plus menacés dans cette hypothèse seraient la Colmena Alta et la zone de San José de las Monjas, qui domine l'autopista a los Chillos[23]; de même devraient être affectées plusieurs zones du secteur El Tejar, dont notamment la partie d'El Placer qui domine la quebrada Jerusalem et les pentes fortes de Toctiuco Alto et San Juan, ainsi que les parties hautes de Chiryacu et de la Ferroviaria. Sont en outre menacées par ce type de phénomène les pentes dominant Guápulo, en contrebas de l'Avenue Gonzalo Suarez, ainsi que les pentes du Panecillo .

4.2 - Les lahares secondaires d'une éruption du Pichincha

La ville de Quito est située à moins de 15 Km du cratère du Guagua Pichincha, volcan actif dont la dernière éruption importante, en 1660, aurait déposé sur la ville environ 40 cm de cendres d'après les chroniques de l'époque.

Selon les études vulcanologiques en cours (INEMIN) 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 épaisseur[24]; 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 traversent. 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 *aluviones*, ou lahares secondaires à l'éruption, au pied des pentes du Pichincha.

A partir de ce que nous savons maintenant des crues boueuses d'origine purement climatique, nous avons tenté d'estimer l'ampleur de ces lahares secondaires en fixant des hypothèses relativement basses - et donc très plausibles - pour l'épaisseur du dépôt de cendres, les caractéristiques de la pluie accompagnant 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 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-jacente[25]. 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. Celà signifie

23 La partie urbanisée en contrebas du Monument de la Liberté, de même que le versant raide qui domine le départ de l'autopista a los Chillos, semblent notamment installés sur les "coups de cuiller" d'importants glissements anciens, qui pourraient sans doute se réactiver.

24 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.

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

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 XVIIème 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 dominants[26]. 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'occurence 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 heure[27]. Ici encore il s'agit sans doute d'une hypothèse assez basse, 10 ans ne constituant pas une fréquence d'occurence très rare en regard du caractère exceptionnel que constitue une éruption de cendres en termes de mécanismes atmosphériques.

- *coefficient de ruissellement :* nous avons vu que le mécanisme de mobilisation des cendres implique une très faible infiltration, et une élévation considérable du pourcentage d'eau qui ruisselle; un coefficient de ruissellement de 70% a donc été supposé, constituant probablement une valeur sous-estimée selon P. Pourrut.

- *volume maximum de cendres mobilisables :* 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 *aluviones* 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 "netoyage" 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 6, où les colonnes (5), (6) et (7) expriment trois hypothèses croissantes :

(5) : Volume de l'aluvión 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 de l'aluvión 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 de l'aluvión 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 m3/100 x 30 + 55.120/100 x 70= 70.384 m3

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 m3

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 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:
52.500 m3 x 2,6/3,3 = 41.363 m3 dans le cas de la quebrada Vásconez

---

26 Déclarations du prof. BARBERI a la télévision; conférence de l'Ing. AGUILERA (INEMIN) aux IIèmes journées de Géographie, Quito, Casa de la Cultura

27 cf. DE NONI B. Y G., FERNANDEZ M. A., PELTRE P. 1986

Tableau 6 : Lahares secondaires dûs à la chute de cendres
après une éruption du Pichincha

	1	2	3	4	5	6	7
Quebrada	Superf. Km2	Long. Cours Km	Vol. Cendres (m3) Chute 10 cm (1)	Vol. Pluie (m3) 1 heure/52 mm	Vol. Aluvión 10 cm	Vol. Aluvión 10 cm + "nettoyage" (2)	Vol. Aluvión 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	259.480	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
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

Hypothèse : (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, avec une intensité de 35 mm/h durant une heure (I30)
Coefficient de ruissellement de 70 %
(2) Une fois démarré "l'aluvión", on a supposé un effet de "nettoyage" du lit (fonction de la longueur du cours), proportionnel au volume des matériaux mobilisés lors de "l'aluvión" de la Gasca (=52.500 m3).

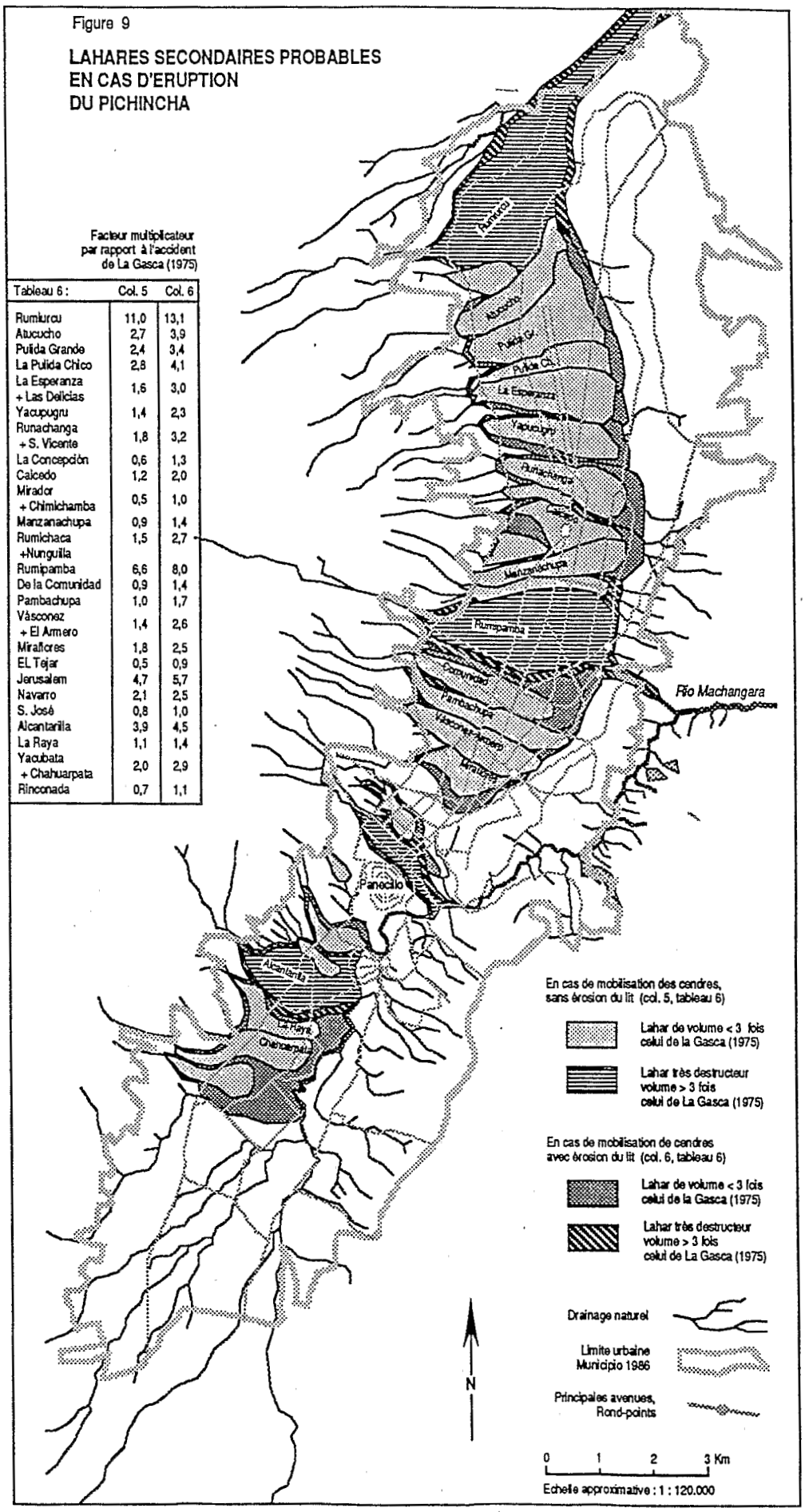
Aluvión de la Gasca : Volume des materiaux solides estimé à 52.500 m3; si l'on ajoute 1/3 d'eau, on aboutit à un volume estimé dede la crue boueuse de 70.000 m3.

Figure 9

LAHARES SECONDAIRES PROBABLES EN CAS D'ERUPTION DU PICHINCHA

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

Tableau 6 :	Col. 5	Col. 6
Rumiurcu	11,0	13,1
Atucucho	2,7	3,9
Pulida Grande	2,4	3,4
La Pulida Chico	2,8	4,1
La Esperanza + Las Delicias	1,6	3,0
Yacupugru	1,4	2,3
Runachanga + S. Vicente	1,8	3,2
La Concepción	0,6	1,3
Calcedo	1,2	2,0
Mirador + Chimichamba	0,5	1,0
Manzanachupa	0,9	1,4
Rumichaca +Nunguila	1,5	2,7
Rumipamba	6,6	8,0
De la Comunidad	0,9	1,4
Pambachupa	1,0	1,7
Vàsconez + El Armero	1,4	2,6
Miraflores	1,8	2,5
EL Tejar	0,5	0,9
Jerusalem	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
Yacubata + Chahuarpata	2,0	2,9
Rinconada	0,7	1,1



Pour avoir une idée concrète de l'extension des lahares 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 52.000 m3 (Feininger, 1975). 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 6; l'expérience montre qu'un tiers d'eau mélangé à la cangahua est suffisant pour obtenir une boue déjà très liquide, et le volume global de l'aluvión 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 lahare 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 lahare sur chacune des quebradas du Pichincha. De plus, neuf de ces quebradas dépassent le double ou le triple du volume de l'aluvión de 1975, atteignant cinq, six et dix fois ce volume pour les quebradas 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 lahares réellement destructifs en pleine ville.

Dans l'hypothèse - assez probable - où le déclenchement de la crue entraîne la reprise d'érosion de sédiments anciens dans le lit des quebradas (colonne 6), le volume de boue mobilisée double presque, avec les même conséquences catastrophiques sur l'accroissement de l'énergie développée. Il faut dans ce cas s'attendre à dix-sept lahares destructifs dépassant les 100.000 m3, la plupart des petites quebradas approchant le volume de l'aluvión 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 9 tente une cartographie estimée des zones menacées dans l'hypothèse moyenne (colonne 6), sur la base des superficies atteintes par l'aluvión de la Gasca de 1975 et en affectant un potentiel destructif grave aux lahares de volume supérieur au double de ce dernier.

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.

Enfin 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'abscence 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 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 pluies peu importantes.

Après une éruption du Pichincha en saison sèche, il faut s'attendre dans la ville à des lahares 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 lahares 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. De plus, même après une éruption en saison des pluies, il est probable que la déstabilisation des versants se poursuivrait quelque temps, mettant les travaux de reconstruction sous la menace de nouveaux aluviones.

Nous n'avons fait ici qu'une estimation sommaire de ce risque, de faible probabilité d'occurence puisque directement lié au réveil d'un volcan aux éruptions rares, mais de gravité élevée ou très élevée dans tous les cas où l'éruption se produirait. Il est clair que des études plus détaillées de ce risque s'imposent, pour fournir les bases d'un plan de Défence Civile

cohérent, tout à fait indispensable à la sécurité de la population.

Conclusion : Croissance urbaine et gestion du milieu

Sous des dehors tranquilles, la ville de Quito compte ainsi un nombre considérable d'accidents qui, après dénombrement, étonne même les vieux Quiténiens. Certains de ces événements ont marqué la mémoire collective, tel l'*aluvión* de l'avenue La Gasca en février 1975, qui fut l'un des plus graves enregistrés, ou cet effondrement de la chaussée en mai 1978 dans l'avenue América, qui engloutit une Volkswagen à deux heures du matin sous les yeux ébahis du chauffeur du bus qui la croisait. L'hiver 1982-83 a également laissé un vif souvenir, mais des années noires comme 1950, 58 ou 61 qui furent presqu'aussi graves semblent avoir disparu de la mémoire collective, et il faut les exhumer des archives de presse pour en mesurer l'ampleur.

Les problèmes majeurs du site urbain sont directement liés au remplacement du système naturel de drainage des *quebradas* par un réseau d'égouts, lequel ne peut être techniquement dimensionné pour évacuer les crues brutales et violentes de ces torrents lors des précipitations les plus intenses d'un climat équatorial de montagne. 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 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.

Que faire ?

Il existe des solutions techniques par l'amont pour maîtriser ces accidents, ou pour le moins diminuer leur fréquence et leur gravité : l'EMA a réalisé des retenues-tampon qui permettent d'écréter les crues, ou la dérivation d'une quebrada dans une autre, pourvue d'une meilleure évacuation; associés à des mesures de protection et de stabilisation des versants, ces travaux doivent permettre de réduire la gravité des crues s'ils sont bien conçus. Dans le domaine de la stabilisation des versants, il faut noter que l'herbe est tout aussi protectrice vis à vis de l'érosion, sinon plus protectrice même, que les forêts d'eucaliptus qui peuplent en partie les versants du Pichincha; le débat sur le *"bosque protector del Pichincha"* doit donc être pris au sens large d'une indispensable limitation de l'urbanisation des versants, plus que d'une reforestation proprement dite, qui ne s'impose pas nécessairement.

Cependant le réseau d'égouts est construit selon l'EMA (28) pour n'absorber que les crues de fréquence d'occurence de 5 ans. Des travaux progressifs d'amélioration des collecteurs se trouvant le plus souvent en surcharge, qui porteraient leur capacité à l'évacuation de la crue décennale, ou même de fréquence d'occurence de 20 ans, supprimeraient sans doute la quasi-totalité des petits aluviones et des inondations dans les secteurs concernés. Dans tous les cas il faut absolument cesser de remblayer les quebradas dans les zones de nouvelle urbanisation, ce qui ne fait qu'amplifier les problèmes d'insuffisance du drainage dans le futur. Une visite à la quebrada La Raya en novembre 1988 montre en effet que le remblaiement se poursuit activement : entre janvier 1986 et fin 1988, près de trois cent mètres de son cours ont été totalement remblayés sur 12 à 15 mètres de profondeur, avec semble-t-il des possibilités très réduites d'accès pour l'entretien du nouveau tronçon de collecteur; en cas de répétition de l'aluvión du 23 janvier 86, le problème serait sans aucun doute plus grave par bouchage du collecteur à une profondeur très supérieure, et par le risque de remobilisation de l'ensemble des matériaux de remblai. Le remblaiement en cours, fin 1988, du bas de la Q. Alpahuasi, à l'est du Panecillo, est un autre exemple de la poursuite de ces pratiques dangereuses : dans ce cas on remblaye un tronçon de quebrada en pente forte, où les matériaux de remblai risquent de produire un important glissement de terrain en cas de période de pluies fortes et prolongées.

En ce qui concerne les accidents graves, les solutions sont plus difficiles à élaborer : si l'on peut imaginer de détourner à ciel ouvert la Q. Rumiurcu dans la Q. Singuna[29], il est par contre difficile de proposer des mesures qui auraient évité l'accident de la Gasca de 1975; tout ce que l'on peut proposer dans ce cas sont des mesures de stabilisation des versants et du lit de la quebrada, dans l'espoir de diminuer la puissance et la gravité du lahare. Ce type d'accident grave d'origine purement climatique constitue un risque de fréquence d'occurence rare, contre lequel il n'y a guère de protection possible, et avec lequel il faut vivre.

Les effondrements de chaussée peuvent être évités à long terme en soignant la qualité de construction des collecteurs chaque fois que des réparations sont nécessaires, de façon à leur donner une résistance suffisante à la pression atteinte lors des crues, valeur aisément calculée en fonction de la dénivelée du collecteur. Quant aux derrumbes, ils relèvent de règlements d'urbanisme adéquats : limitation de l'urbanisation des pentes très fortes, et application de normes de construction adaptées au risque sismique et aux éboulements dans ces secteurs, en portant une attention toute particulière aux travaux de drainage des talus qu'impose l'urbanisation des versants.

28 Note interne de l'EMA

29 Idée de l'Ingénieur Julio Carcélen (Quito), communication orale.

Risque catastrophique

Enfin les risques morphodynamiques catastrophiques, liés aux séismes et à une éventuelle éruption du Pichincha, ne peuvent ietre traités qu'en termes de Défense Civile, par l'évacuation en temps utile des populations menacées. Encore faut-il avoir pris conscience de la gravité du risque, ce à quoi nous espérons avoir contribué ici, et traduire concrètement cette connaissance par l'élaboration d'un plan d'évacuation cohérent, appuyé sur l'éducation de la population.

Références

ALULEMA R., OJEDA F., NOUVELOT J.F., POURRUT P. 1985 - Proyecto acuífero de Quito. Informe final 1981 - 1985. EMAP-Q, PRONAREG, INERHI, ORSTOM; Quito, multigr.

CARRERA B. 1984 - Mapa de distribución de la población de la ciudad de Quito, pp. 7-15 in: Quito, Aspectos de su dinamismo geográfico" Documentos de Investigación Nº 5, 1984, 87 p.; CEDIG, Quito.

CDM, 1977 - (Camp Dresser & Mac Kee Inc. y Consult. Ass. Ecuatorianos). - Planes maestros y Estudios de Factibilidad de los sistemas de agua potable y de alcantarillado. USAID, Quito, 500 p. env., 17 chap.

DE NONI B. Y G., FERNANDEZ M. A., PELTRE P. 1986 - Accidentes climáticos y gestión de las quebradas de Quito. Análsis del "aluvión" de la Raya del 23 de enero de 1986. p. 25-44 in: Paisajes geográficos (Revista del CEPEIGE) Nº 17, Quito, julio 1986. (por publicarse en: Cah. Sci. Hum. ORSTOM, 1987, con el título "Drainage urbain et accidents climatiques a Quito (Equateur). Analyse d'un cas recent de crue boueuse".

FEININGER T., 1976- El flujo de escombros en La Gasca. Un informe científico. in: Boletín de la Sección Nacional del Ecuador; IPGH, Nº 5-6, Quito, enero-junio 1976.

GOMEZ N. 1984- La Mena II, un barrio de Quito con una lesión congenital p. 75-81 en: "Quito, Aspectos de su dinamismo geográfico" Documentos de Investigación Nº 5, 1984, 87 p.; CEDIG, Quito.

NOUVELOT J.F., POURRUT P. 1985 - El Niño. Phénoméne océanique et atmosphérique. Importance en 1982-83 et impact sur le littoral équatorien. p. 39-65 in: Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XXI, Nº 1, 1984-85.

NOVOA J.E., MEZA M., MORENO I., SANCHEZ F., SERRANO C. 1987 - Análisis morfodinámico aplicado al diagnóstico de riesgos naturales en los sistemas La Gasca y San Carlos. p. 5–27 en: Paisajes Geográficos Nº 18, Quito, CEPEIGE, marzo 1987.

RYDER R. 1984 - Segundo informe técnico "La Mena II". Enero 1984 p. 84-87 en: "Quito. Aspectos de su dinamismo geográfico" Documentos de Investigación Nº 5, 1984, 87 p.; CEDIG, 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.

WINCKELL A. 1984 - Primer informe técnico "La Mena II". Enero 1983, p. 82-83 en: "Quito. Aspectos de su dinamismo geográfico" Documentos de Investigación Nº 5, 1984, 87 p.; CEDIG, Quito.