

1996

Tome 25
N° 3

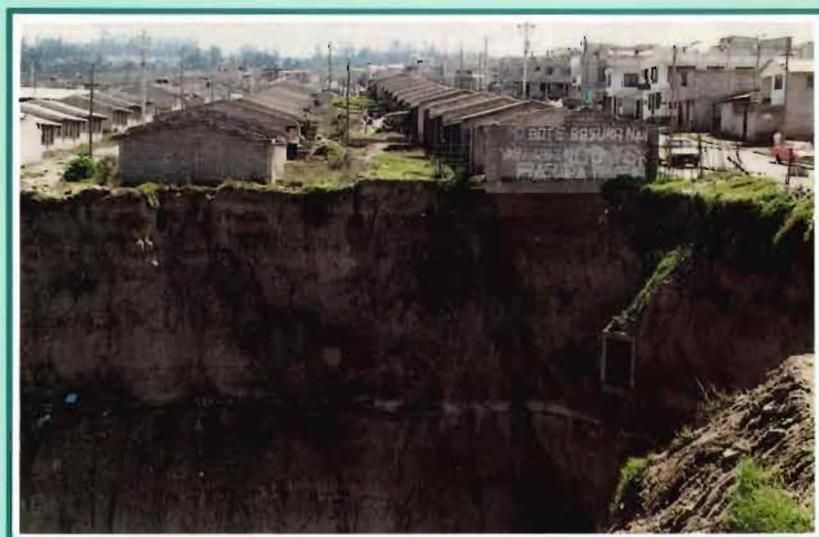
LIMA - PÉROU

BULLETIN

de l'INSTITUT FRANÇAIS
d'ÉTUDES ANDINES

LES RISQUES NATURELS ET LEUR GESTION EN ÉQUATEUR

DIVERSITÉ DES EXEMPLES
COMPLÉMENTARITÉ DES
APPROCHES



Sous la direction de
Robert d'Ercole



IFEA

CRSTOM



ISSN 0303 - 7495

**BULLETIN
DE L'INSTITUT FRANÇAIS
D'ÉTUDES ANDINES**

1996, Tome 25, N° 3

Directeur : Georges Pratlong
Responsable de l'édition : Anne-Marie Brougère

Toute correspondance concernant la revue doit être adressée à :

Institut Français d'Études Andines - Éditions
Casilla 18-1217 - Lima 18 - Pérou
Tél: 51-1 447 60 70
Fax: 51-1 445 76 50
Courrier Électronique : abrouger@ifea.org.pe

Composition:
Anne-Marie Brougère
Juan Carlos Tello

Maquette de la couverture:
Alain Dagand

Impression:
Editorial Gráfica Pacific Press S.A.
Los Negocios, 219
Surquillo
Lima - Pérou

Photo de la couverture :

Urbanización Carapungo, dans le nord de Quito, menacée par l'érosion début 1994. Exemple d'un aménagement mal conçu par rapport au site : le lotissement, coordonné par le *Banco de Vivienda* au début des années 90, a été construit en bordure d'une grande *quebrada*, profonde de 60 à 80 mètres environ. Le collecteur d'eaux pluviales de l'ensemble de l'urbanisation, visible sur la droite du cliché et déversant en cascade dans des cendres volcaniques (la *cangahua*), a concentré le ruissellement, causant ainsi l'érosion régressive du talus sur une dizaine de mètres environ. Malgré la déviation du collecteur vers une autre sortie, le recul du talus s'est poursuivi depuis.

(Cliché Bernard Lortic, ORSTOM)

**BULLETIN
DE
L'INSTITUT FRANÇAIS
D'ÉTUDES ANDINES**

1996, Tome 25, N° 3

Numéro thématique

**LES RISQUES NATURELS ET LEUR
GESTION EN ÉQUATEUR
DIVERSITÉ DES EXEMPLES
COMPLÉMENTARITÉ DES APPROCHES**

**Institut Français d'Études Andines
Institut Français de Recherche Scientifique pour le
Développement en Coopération
Centre International pour la Formation et les Échanges
Géologiques**

Sous la direction de Robert D'Ercole

SOMMAIRE

Préface	319
Les phénomènes naturels générateurs de dommages	323
F. EGO, M. SÉBRIER, E. CAREY-GAILHARDIS, D. INSERGUEIX Estimation de l'aléa sismique dans les Andes nord équatoriennes ..	325
C. HIBSCH, A. P. ALVARADO, H. A. YEPES, M. SÉBRIER, V.H. PEREZ Falla activa de Quito y fuentes sismogenéticas regionales: un estudio del riesgo sísmico de Quito (Ecuador) con el análisis de los sedimentos cuaternarios	359
M. MONZIER, P. SAMANIEGO, C. ROBIN Le volcan Cayambe (Équateur) : son activité au cours des 5 000 dernières années et les menaces qui en résultent	389
F. ROSSEL, É. CADIER, G. GÓMEZ Las inundaciones en la zona costera ecuatoriana: causas, obras de protección existentes y previstas	399
É. CADIER, O. ZEVALLOS, P. BASABE Le glissement de terrain et les inondations catastrophiques de la Josefina en Équateur	421
P. BASABE, E. ALMEIDA, P. RAMÓN, R. ZEAS, L. ÁLVAREZ Avance en la prevención de desastres naturales en la cuenca del río Paute, Ecuador	443
Quelques aspects de la vulnérabilité	459
F. LÉONE, E. VELÁSQUEZ Analyse en retour de la catastrophe de la Josefina (Équateur, 1993) : contribution à la connaissance du concept de vulnérabilité appliqué aux mouvements de terrain	461
R. D'ERCOLE Représentations cartographiques des facteurs de vulnérabilité des populations exposées à une menace volcanique. Application à la région du volcan Cotopaxi (Équateur)	479

A. COLLIN DELAUAUD	
Guayaquil, au temps du choléra	509
La gestion des risques, ses outils, ses problèmes	529
P. METZGER, P. PELTRE	
Gestion de l'environnement urbain et risques "naturels". La problématique des <i>quebradas</i> à Quito (Équateur)	531
J.-L. CHATELAIN, B. GUILLIER, H. YEPES, J. FERNÁNDEZ, J. VALVERDE, B. TUCKER, G. HOEFER, F. KANEKO, M. SOURIS, E. DUPÉRIER, T. YAMADA, G. BUSTAMANTE, A. EGUEZ, A. ALVARADO, G. PLAZA, C. VILLACIS	
Projet pilote de scénario sismique à Quito (Équateur) : méthode et résultats	553
P. METZGER, J.-L. CHATELAIN, B. GUILLIER	
Les dimensions politiques d'un projet scientifique : le scénario sismique de Quito	589
C. DE MIRAS	
Risques naturels : de la géophysique à l'approche institutionnelle ..	603

ÍNDICE

Prefacio	319
Los fenómenos naturales generadores de daños	323
F. EGO, M. SÉBRIER, E. CAREY-GAILHARDIS, D. INSERGUEIX	
La amenaza sísmica en los Andes ecuatorianos	325
C. HIBSCH, A. P. ALVARADO, H. A. YEPES, M. SÉBRIER, V.H. PEREZ	
Falla activa de Quito y fuentes sismogénicas regionales: un estudio del riesgo sísmico de Quito (Ecuador) con el análisis de los sedimentos cuaternarios	359
M. MONZIER, P. SAMANIEGO, C. ROBIN	
El volcán Cayambe (Ecuador): su actividad desde los últimos 5 000 años y las amenazas correspondientes	389
F. ROSSEL, É. CADIER, G. GÓMEZ	
Las inundaciones en la zona costera ecuatoriana: causas, obras de protección existentes y previstas	399
É. CADIER, O. ZEVALLOS, P. BASABE	
El deslizamiento y las inundaciones catastróficas de la Josefina en Ecuador	421
P. BASABE, E. ALMEIDA, P. RAMÓN, R. ZEAS, L. ÁLVAREZ	
Avance en la prevención de desastres naturales en la cuenca del río Paute, Ecuador	443
Algunos aspectos de la vulnerabilidad	459
F. LÉONE, E. VELÁSQUEZ	
Análisis de la catástrofe de la Josefina (Ecuador, 1993): contribución a la definición del concepto de vulnerabilidad aplicado a los movimientos de terreno	461
R. D'ERCOLE	
Cartografía de los factores de vulnerabilidad de las poblaciones expuestas a una amenaza volcánica. Aplicación a la región del volcán Cotopaxi (Ecuador)	479
A. COLLIN DELAUAUD	
Guayaquil, en el tiempo del cólera	509

La gestión de los riesgos, sus herramientas, sus problemas	529
P. METZGER, P. PELTRE	
Manejo del medio ambiente y riesgos "naturales". La problemática de las quebradas en Quito	531
J.-L. CHATELAIN, B. GUILLIER, H. YEPES, J. FERNÁNDEZ, J. VALVERDE, B. TUCKER, G. HOEFER, F. KANEKO, M. SOURIS, E. DUPÉRIER, T. YAMADA, G. BUSTAMANTE, A. EGUEZ, A. ALVARADO, G. PLAZA, C. VILLACIS	
Proyecto piloto de riesgo sísmico en Quito (Ecuador): métodos y resultados	553
P. METZGER, J.-L. CHATELAIN, B. GUILLIER	
Las dimensiones políticas de un proyecto científico: el manejo sísmico de Quito	589
C. DE MIRAS	
Riesgos naturales: entre la geofísica y la aproximación institucional	603

PRÉFACE

À l'heure où ces lignes introductives sont écrites, un séisme vient de nouveau frapper l'Équateur. Le 28 mars 1996, c'est la province du Cotopaxi, au sud de la capitale, qui a été affectée par un séisme de magnitude 5,7 sur l'échelle de Richter. D'après les premières informations fournies par le DHA (Département des Affaires Humanitaires des Nations Unies), les communautés rurales situées à l'ouest de Latacunga, comptent environ 20 morts, 60 blessés et 15 000 sinistrés, parmi lesquels 3 000 ont vu leurs maisons en *adobe* entièrement détruites, notamment à Pujilí et à San Juan. Quelques mois plus tôt, le 2 octobre 1995, un autre séisme faisait quelques victimes et détruisait plusieurs habitations dans la Cordillère de Cutucú située à 120 km à l'est de Cuenca. Ces événements, aussi dramatiques soient-ils, ne constituent cependant que des événements mineurs dans l'histoire des catastrophes équatoriennes.

L'Équateur est sans conteste une terre à hauts risques et les nombreuses catastrophes qui jalonnent l'histoire du pays en sont la malheureuse concrétisation. Celles qui se sont produites avant l'arrivée des *conquistadores* sont encore mal connues mais les légendes indiennes, comme celles qui relatent les violentes colères du volcan Cotopaxi réagissant aux amours illicites de *Mama Tungurahua*, son épouse infidèle, et de *Cupac-Urcu* (l'Altar), laissent supposer qu'elles furent fréquentes. Les travaux scientifiques réalisés ces dernières années tendent à le confirmer.

L'arrivée des Espagnols est marquée par une éruption du Cotopaxi en 1534, laquelle, selon la tradition, aurait destabilisé la farouche résistance de Rumiñahui, lieutenant de l'Inca Atahualpa exécuté l'année précédente sous les ordres de Pizarro. Depuis lors, l'histoire des catastrophes naturelles en Équateur est assez bien connue dans ses grandes lignes, notamment grâce aux hommes d'église, hommes d'armes, voyageurs et scientifiques qui, comme Cieza de Leon, Zárate, Juan de Ulloa, La Condamine ou Theodor Wolf, ont parcouru le pays entre le XVI^e et le XIX^e siècle. Depuis, les scientifiques contemporains avec leurs données instrumentales et les moyens d'information modernes ont progressivement pris le relais.

Durant ces derniers siècles, les catastrophes naturelles en Équateur sont étroitement associées aux séismes ou aux éruptions volcaniques.

Les événements sismiques connus sont extrêmement nombreux, mais une vingtaine d'entre eux se sont révélés particulièrement dévastateurs comme en 1587, 1645, 1674, 1698, 1757, 1797, 1868 ou 1949. Ce sont à chaque fois des villes et des villages rasés, des milliers de victimes, en particulier dans la Sierra, dans les régions de Quito-Otavallo, de Latacunga-

Ambato et Riobamba. Ainsi, le 4 février 1797 la ville de Riobamba est dévastée entraînant la mort de plusieurs milliers de personnes (6 000 à 20 000 selon les estimations). Le 16 août 1868, c'est le nord de l'Équateur qui est concerné par un violent séisme qui tue près de 20 000 personnes entre Quito et Ibarra. Le 5 août 1949, c'est à nouveau la région centrale qui est frappée (destruction de Pelileo, plus de 6 000 morts).

Par ailleurs, près de 25 volcans sont potentiellement actifs en Équateur et une dizaine d'entre eux sont entrés en éruption durant les 460 dernières années, parmi lesquels le Guagua Pichincha qui surplombe la capitale, le Tungurahua qui domine celle de Baños, et surtout le Cotopaxi avec quelques 35 éruptions durant cette période. Les lahars (coulées de boue et de débris) qui ont accompagné ces éruptions ont régulièrement dévasté la province du Cotopaxi et sa capitale Latacunga, notamment en 1742, 1768 et 1877.

Dans les domaines volcanique et sismique, l'Équateur semble connaître une relative accalmie durant la deuxième moitié du XX^e siècle. Les dernières éruptions notables datent du début du siècle (1904 pour le Cotopaxi, 1918 pour le Tungurahua). Depuis 1949, les séismes ont été relativement nombreux mais n'ont pas eu l'ampleur des gros séismes des siècles antérieurs. Une exception, cependant, avec celui de 1987 qui a principalement concerné les provinces orientales, en particulier entre Baeza et Lago Agrio. Ici les victimes (de 1 000 à 5 000 morts selon les estimations) ne sont pas directement liées au séisme, mais aux glissements de terrains et aux coulées de boues que celui-ci a engendré. Les dégâts occasionnés à l'oléoduc transéquatorien ont par ailleurs sérieusement affecté l'économie du pays en grande partie tributaire des exportations de pétrole (un milliard de dollars de dégâts pour l'essentiel lié aux pertes directes et surtout indirectes enregistrées dans le secteur pétrolier).

L'histoire semble avoir essentiellement retenu les catastrophes sismiques et volcaniques. Cela peut paraître normal dans un sens, en raison d'un contexte géotectonique favorable (subduction de la plaque océanique Nazca sous le continent sud-américain) à l'origine d'événements destructeurs qui ont particulièrement marqué la mémoire des hommes. On peut en revanche être surpris par la faible part des catastrophes liées à des phénomènes hydro-météorologiques ou à des mouvements de terrain, généralement associés à ces derniers. Pourtant les conditions sont favorables à leur développement, sur le plan climatique (hivers souvent très pluvieux, phénomène du Niño) comme sur celui de la topographie (relief montagneux de la Sierra, plaines inondables de la Côte). Les catastrophes liées à ces phénomènes semblent surtout marquer les dernières décennies.

Les inondations côtières de l'hiver 1982-1983 liées au phénomène du Niño (600 morts et 650 millions de dollars de dommages) constituent un bon exemple. Plus récemment, l'hiver 1993-1994, particulièrement pluvieux, a eu des conséquences graves pour tout le pays : inondations, glissements de terrain, laves torrentielles... Outre les facteurs lithologiques, tectoniques et anthropiques, les fortes précipitations ont vraisemblablement contribué au gigantesque glissement de la Josefina survenu dans la province de l'Azuay. Au total plus d'une centaine de morts (les 2/3 à la Josefina), 60 000 sinistrés (14 000 à la Josefina), 1 200 maisons détruites, une trentaine de ponts emportés, des milliers d'hectares de cultures perdues, des dégâts s'élevant à plusieurs centaines de millions de dollars (147 pour les seules pertes directes enregistrées à la Josefina).

Diminution relative des catastrophes d'origine sismique et volcanique d'une part, accroissement des catastrophes d'origine hydro-météorologique et liées à l'instabilité des

terrains d'autre part : on assisterait donc à deux évolutions apparemment contraires durant les dernières décennies.

Dans le premier cas la situation n'est pas le résultat d'une meilleure capacité préventive du pays, même si des progrès sont actuellement notables dans ce domaine. Elle est due à l'absence d'éruptions volcaniques dans des régions habitées (seul le Sangay présente une activité soutenue, mais dans une région vide d'hommes). De même, les régions densément peuplées n'ont plus été affectées par un très gros séisme depuis près d'un demi-siècle. L'Équateur connaît actuellement une période d'accalmie, très nette sur le plan de l'activité volcanique, plus relative, mais néanmoins sensible sur celui de l'activité sismique.

Dans le deuxième cas, la situation ne s'explique vraisemblablement pas par une aggravation des conditions climatiques, mais par deux phénomènes complémentaires : la perte de la mémoire collective et l'explosion démographique et urbaine.

Les événements hydro-climatiques et induits du passé ont dans l'ensemble peu imprégné la mémoire collective dans la mesure où les phénomènes et leurs conséquences étaient généralement limités dans le temps et dans l'espace, du moins dans un espace beaucoup moins humanisé que de nos jours. Même si leur impact a été relativement mineur à l'échelle du pays, ces événements que des études récentes commencent à faire sortir de l'oubli (à Quito, à Cuenca...), ont été en fait beaucoup plus nombreux qu'il n'y paraît au premier abord. Le problème est donc avant tout celui d'une d'information inexistante ou difficilement accessible.

Cependant, cela n'explique pas tout. Ces phénomènes ont aujourd'hui une plus grande portée que dans le passé en raison d'une population beaucoup plus nombreuse occupant des zones de plus en plus dangereuses (terrains instables comme sur les flancs du Pichincha à Quito, terrains inondables de la Côte, etc...). Vers 1800, l'Équateur comptait environ 500 000 habitants ; 3,3 millions en 1950 ; près de 12 aujourd'hui. Cette rapide évolution a surtout profité à la Côte qui concentrait 10 % de la population du pays en 1800, près de la moitié aujourd'hui. Or, les risques d'inondation y sont très importants en raison du faible relief et du mauvais drainage des plaines.

En conclusion, les conditions naturelles et humaines sont très favorables au déclenchement de catastrophes en Équateur. Cela se manifeste clairement de nos jours en matière de catastrophes d'origine hydro-météorologique. Cela peut se manifester de nouveau fortement dans les domaines sismique et volcanique.

Le présent ouvrage s'insère dans ce contexte. Il ne vise pas à l'exhaustivité en matière de risques en Équateur, mais il en présente certaines facettes à travers quelques travaux récents menés dans un pays où la recherche sur les risques naturels s'est fortement développée depuis quelques années. Le caractère pluridisciplinaire de la revue concorde parfaitement avec les différentes approches impliquées par la notion de risque. Aussi, des contributions provenant de champs variés sont-elles présentées. Celles-ci peuvent être regroupées en trois ensembles complémentaires.

Le premier ensemble (6 articles) concerne les phénomènes naturels générateurs de dommages abordés selon des angles différents suivant la contribution (depuis la présentation générale de premiers résultats obtenus sur le terrain, jusqu'aux aspects préventifs, en passant par la présentation de méthodes d'évaluation des aléas). Les principaux phénomènes concernant l'Équateur sont représentés :

- phénomènes sismiques à l'échelle du pays et à celle de Quito ;
- phénomènes volcaniques avec le cas du Cayambe longtemps considéré comme non actif ;
- phénomènes hydro-météorologiques à propos de la côte équatorienne et du bassin du rio Paute ;
- mouvements de terrain avec notamment le cas du glissement de la Josefina à l'origine d'une longue crise qui a débuté le 29 mars 1993.

Le deuxième ensemble (3 articles) aborde la question de la vulnérabilité, en d'autres termes la propension d'un élément exposé donné à subir des dommages et la mesure de l'endommagement potentiel en cas de survenue d'un phénomène naturel ou anthropique destructeur. La vulnérabilité constitue donc un volet complémentaire, indissociable de la menace naturelle pour toute évaluation de risque.

À partir du cas de la Josefina, un premier article propose une méthode d'évaluation des endommagements liés aux mouvements de terrain. Le deuxième porte plus spécifiquement sur la cartographie des facteurs de vulnérabilité de populations exposées à une menace volcanique (Cotopaxi).

Un troisième article est consacré à l'épidémie de choléra survenue en 1991. Il ne se place pas sur le même registre que les précédents compte tenu du type de phénomène retenu, mais il s'en rapproche étroitement dans l'analyse de pratiques sociales contribuant à accroître la vulnérabilité.

Le troisième ensemble (4 articles) porte sur la gestion des risques, ses outils, ses problèmes. Les thèmes abordés se situent à l'aval des précédents et revêtent une grande importance dans la mesure où c'est principalement l'usage des travaux scientifiques, en terme de gestion des risques, qui est en question.

La gestion des *quebradas* de Quito est ainsi davantage liée à un consensus social plutôt qu'à des considérations sur les risques en milieu urbain. Le scénario sismique de Quito réalisé entre 1992 et 1994 fournit un bel exemple d'outil à l'usage des décideurs en terme de prévention. Mais son utilisation est encore en deçà des espérances, compte tenu des difficultés et contradictions qui ont accompagné sa réalisation.

Le dernier article pose en des termes plus généraux le problème du faible retour des travaux scientifiques et propose une approche institutionnelle du risque à côté de l'approche physique classique. Cette approche devrait permettre de fixer des objectifs de prévention en phase avec la capacité institutionnelle et par là, de mieux orienter les programmes de recherche situés en amont.

Ce numéro ne constitue qu'une page de l'histoire de la recherche en Équateur en matière de risques naturels. Il se veut fédérateur de contributions provenant d'horizons scientifiques différents, en conformité avec la diversité et la complexité de la notion de risque. Puisse-t-il contribuer à une meilleure connaissance des risques en Équateur et encourager le rapprochement des différents segments de recherche qui contribuent à en réduire les effets.

**LES PHÉNOMÈMES NATURELS
GÉNÉRATEURS DE DOMMAGES**

**LOS FENÓMENOS NATURALES
GENERADORES DE DAÑOS**

ESTIMATION DE L'ALÉA SISMIQUE DANS LES ANDES NORD ÉQUATORIENNES

*Frédéric Ego **, *Michel Sébrier **, *Evelyne Carey-Gailhardis **, *Delphine Insergueix **

Résumé

Les Andes Nord équatoriennes ont connu de nombreux séismes historiques destructeurs. Pour caractériser l'aléa sismique de la région andine, nous avons fait une révision critique de la sismicité historique et de l'ensemble des failles actives de l'Équateur. Les deux sources majeures de l'aléa sismique sont respectivement la subduction superficielle pour la région côtière et le système transpressif des hautes Andes pour la région andine. Ce système est composé de failles décrochantes dextres d'orientation N30-35°E (failles du Rio Chingual-La Sofia et Pallatanga) qui limitent respectivement au Nord et au Sud des failles inverses N-S du relais compressif de la vallée interandine (failles de Quito et de Latacunga).

L'étude des mécanismes au foyer superficiels des Andes équatoriennes nous a permis de calculer une vitesse de raccourcissement crustal de 4.6 mm/a selon une direction N92°E et d'estimer des temps de récurrence et des périodes de retour. Un séisme de Mw = 5 pourrait se produire tous les 0.5 an, de Mw = 6 tous les 4.5 ans, de Mw = 7 tous les 45.4 ans. De même, sur une période de temps de 33 ans, 66 séismes de Mw=5 peuvent être attendus, 7 séismes de Mw=6 et 1 séisme de Mw=7. Enfin, nous avons estimé pour l'ensemble des sources sismogènes de la région andine des magnitudes maximales probables et des temps de récurrence. Un séisme de magnitude 7 à 7.5 peut se produire sur la faille du Rio Chingual tous les 400±440 ans et de magnitude 6.7 à 7.2 tous les 380±320 ans sur la faille de Pallatanga. Dans la vallée interandine, la faille de Quito est susceptible d'engendrer un séisme de magnitude 6.6 à 7.6 tous les 930±300 ans.

Mots-clés : *Aléa sismique, failles actives, tectonique active, sismicité historique, mécanismes au foyer, magnitude, temps de récurrence.*

LA AMENAZA SÍSMICA EN LOS ANDES ECUATORIANOS

Resumen

Los Andes del Norte del Ecuador son una región sismogénica mayor, donde se puede contabilizar muchos terremotos históricos destructores. A fin de determinar la amenaza sísmica sobre la región andina, se hizo la asociación sismotectónica potencial entre las fallas activas y los eventos sísmicos históricos e instrumentales. Además, para cada fuente sismogénica, se proporcionan sus

(*) URA 1369 CNRS, Géophysique et Géodynamique interne, bât 509, Université Paris Sud, 91405 ORSAY Cédex. (e-mail: ego@geol.u-psud.fr, Fax: (33-1) 60 19 14 46)

parámetros geométricos y dinámicos. Los dos sistemas constituyendo la amenaza sísmica mayor son la zona de subducción superficial para la costa y el sistema mayor transpresivo dextral para la cordillera (fallas dextrales del Río Chingual-La Sofía y de Pallatanga). El estudio de los mecanismos focales superficiales de esta región nos permitió calcular una velocidad de acortamiento cortical de 4.6 mm/a según un rumbo N92°E y apreciar tiempos de recurrencia y frecuencias de retorno. Un evento de $M_w = 5$ pudiera producirse cada 0.5 año, de $M_w = 6$ cada 4.5 años, de $M_w = 7$ cada 45.4 años o 66, 7.3 y 0.73 eventos de magnitud superior o igual a 5, 6 y 7, por un período de tiempo de 33 años. Por fin, para cada fuente sismogénica, hemos calculado su magnitud máxima probable y el tiempo de recurrencia asociado. La falla transcurrente dextrale del Río Chingual-La Sofía en el norte de la cordillera oriental puede producir un sismo máximo probable de magnitud 7 a 7.5 con un retorno de 400 ± 440 años y la falla dextrale de Pallatanga en el Sur de la cordillera occidental, un sismo máximo probable de 6.7 a 7.2 con un retorno de 380 ± 320 años. En el callejón interandino la falla de Quito puede producir un sismo máximo probable de magnitud 6.6 a 7.6 con un retorno de 930 ± 300 años.

Palabras claves: *Amenaza sísmica, sismicidad histórica, mecanismos focales, magnitud máxima probable, tiempo de recurrencia, falla activa.*

SEISMIC HAZARD IN THE ECUADORIAN ANDES

Abstract

Northern Ecuadorian Andes are an important seismogenic zone with several destructive events. In order to address the seismic hazard in the Ecuadorian Andes, we have performed a critical reappraisal of both the historical seismicity and active faults of Ecuador. This study shows that the two most important hazard sources are the shallow subduction zone and the major transpressive Ecuadorian fault system, for the coastal lowlands and the Andean region respectively. A study of shallow focal mechanisms from the Andean zone allows us to calculate a N92°E crustal shortening rate of 4.6 mm/yr over the high Andes, and estimate recurrence intervals and average return periods. The calculations predict recurrence intervals of 0.5 yr (for $M_w = 5$), of 4.5 yr (for $M_w = 6$), and of 45.4 yr (for $M_w = 7$) or 66, 7.3, and 0.73 events (with M_w greater than 5, 6, and 7) per 33-yr period. Using the scaling-laws, we have estimated the maximum expected magnitude and earthquake recurrence interval for each sismogenic source. It appears that an earthquake with a maximum magnitude of 7 to 7.5 can be expected on the Chingual-La Sofía Fault every 400 ± 440 years, and with a maximum magnitude of 6.7 to 7.2 every 380 ± 320 years on the Pallatanga Fault. Within the Inter-Andean Valley, the Quito Fault may produce a $M_{w\max}$ 6.6-7.6 earthquake every 930 ± 300 years.

Key words: *Seismic Hazard, Active Faults, Historical Seismicity, shallow Focal Mechanisms, Maximum expected Magnitude, Earthquake Recurrence Interval.*

INTRODUCTION

Les Andes Nord équatoriennes font partie intégrante du Bloc Andin (Fig. 1) et sont connues pour leur importante sismicité historique, aux séismes destructeurs, répertoriée depuis le XVI^{ème} siècle. La recherche des structures actives potentiellement responsables de l'occurrence de ces séismes et l'étude des déformations récentes associées, ont suscité un intérêt particulier depuis ces dix dernières années. Quelques travaux (Soulas, 1988 ; Winter, 1990 ; Tibaldi & Ferrari, 1992 ; Ego, 1993) ont permis de mettre en évidence les grandes structures actives des Andes Nord équatoriennes consistant en un système majeur transpressif dextre, où la vallée interandine représente le relais compressif N-S (Ego *et al.*, 1995b) (Fig. 1). L'étude de ce système, compris entre 0.5°N et 2.5°S de latitude, sera l'objet essentiel de l'article. Nous n'aborderons pas en revanche l'étude de la zone subandine au Sud de 1°S de latitude ainsi que celle du Golfe de Guayaquil.

La dynamique des familles de failles du système transpressif dextre est principalement contrôlée par leur orientation dans le champ de contrainte compressif E-W induit par la

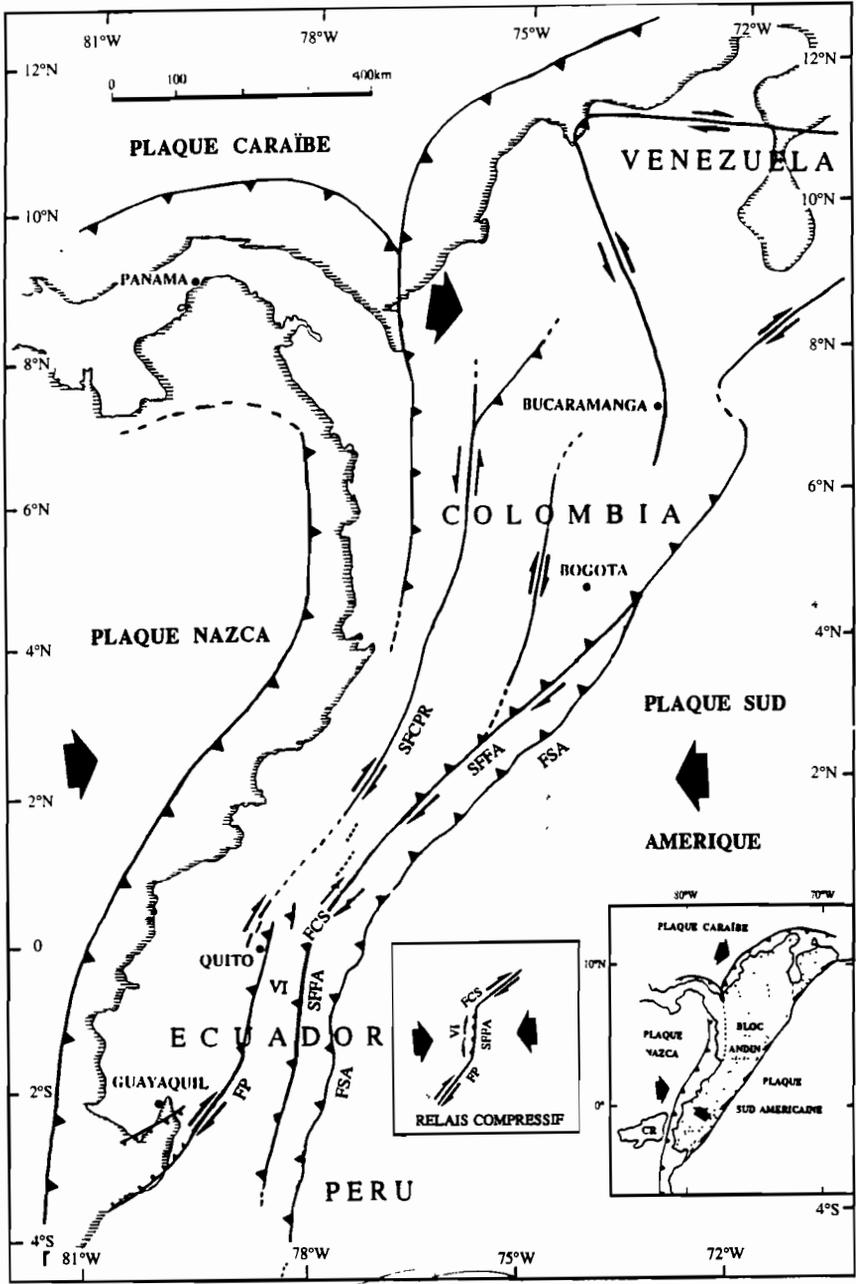


Fig. 1 - Schéma géodynamique des Andes du Nord (Équateur, Colombie et Venezuela). En Équateur, la vallée interandine (VI) et la zone transpressive de la cordillère orientale (SFFA) représentent un relais compressif N-S entre deux failles majeures décrochantes dextres : la faille du Rio Chingual-la Sofia (FCS) au Nord et la faille de Pallatanga (FP) au Sud. FSA, Front Sub-Andin ; SFFA, Système de failles du Front Andin ; SFCPR, Système de failles de Cauca-Patia et Romeral.

subduction de la plaque Nazca sous la plaque Sud américaine (Ego *et al.*, 1993 ; 1995a ; 1995b). La première famille comprend les structures N-S purement compressives de la vallée interandine et de la zone transpressive de Baeza-Reventador dans la cordillère orientale. La deuxième famille comprend les structures obliques (N30-N35°E) décrochantes dextres localisées au Nord dans la cordillère orientale (faille du Rio Chingual-La Sofia, N35°E, $7\pm 3\text{mm/a}$) et au Sud dans la cordillère occidentale (faille de Pallatanga, N30°E, $3,8\pm 0,9\text{mm/a}$) (Fig. 1, 2). La différence de vitesse observée sur ces deux failles majeures est la conséquence de la variation de l'obliquité de la convergence entre les plaques Nazca et Sud Américaine le long de la fosse équatorienne (Ego *et al.*, 1995b).

Dans le but de mieux apprécier l'aléa sismique sur les Andes Nord équatoriennes, c'est-à-dire estimer le séisme de magnitude maximale probable et son temps de récurrence

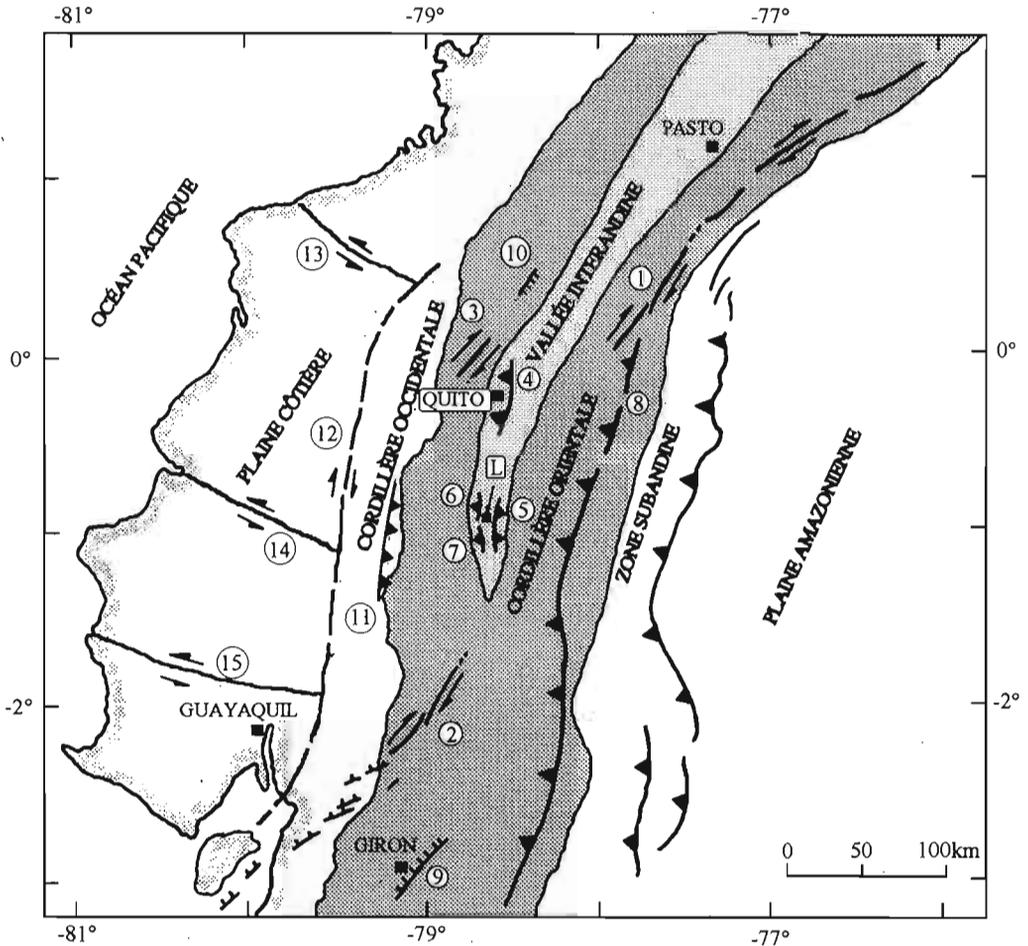


Fig. 2 - Carte des principales structures actives ou potentiellement actives de l'Équateur. 1, Faille du Rio Chingual-la Sofia ; 2, Faille de Pallatanga ; 3, Faille de Mindo-Nanegalito ; 4, Faille de Quito ; 5, Faille du Rio Yanayacu ; 6, Faille de Saquisilí ; 7, Faille du Rio Nagsiche ; 8, Failles de Borja-El Chaco (au Sud) et Faille du Reventador (au Nord) ; 9, Faille de Giron-Santa Isabel ; 10, Faille de Billecocha ; 11, Failles du versant Ouest de la cordillère occidentale ; 12, Faille de Babaoyos ; 13, Faille d'Esmeraldas ; 14, Faille de Bahia de Caraquez ; 15, Faille de Chongon-Colonche. L, Latacunga.

pour chaque faille active identifiée, plusieurs approches ont été utilisées. Nous avons calculé tout d'abord la vitesse de raccourcissement sur les Andes équatoriennes en utilisant la sommation des tenseurs des moments sismiques. À partir de cette méthode, des fréquences et des périodes de retour pour des séismes de magnitude M_w donnée (5, 6 et 7) ont pu être estimées. Dans un deuxième temps, nous avons défini pour chacune des structures actives ses paramètres géométriques (longueur de rupture en surface, rejet, pendage, ...) et donné et/ou estimé sa vitesse "long-terme". Comme ces paramètres (géométriques et dynamiques) témoignent du comportement sismogénique "long-terme", l'aléa sismique estimé à partir de ces derniers sera donc un aléa sismique "long-terme". Nous avons par ailleurs essayé de corrélérer la sismicité historique (voir annexe) aux failles actives identifiées. Enfin, nous avons utilisé les corrélations empirico-statistiques ou lois d'échelle afin de faire correspondre aux paramètres géométriques d'une faille sa magnitude maximale probable. L'estimation de cette magnitude a été faite sur l'hypothèse d'une réactivation totale de la faille ou du segment de faille considéré. À partir des vitesses calculées et/ou estimées, des temps de récurrence pour chacune des failles des Andes Nord équatoriennes ont pu être appréciés.

1. TAUX ET VITESSE DE DÉFORMATION (RACCOURCISSEMENT) SUR LES ANDES ÉQUATORIENNES

1. 1. Principes et méthodes

La mesure de la distorsion (déformation de cisaillement) engendrée par un séisme sur une faille est donnée par le moment sismique M_0 tel que $M_0 = \mu A u$ (Aki, 1972) avec μ , la rigidité du milieu ($3 \cdot 10^{11}$ Dyn/cm²), A , l'aire de la rupture et u , le déplacement moyen lors de la rupture. Ainsi, le glissement cumulé sur une faille peut être déterminé en sommant les moments associés aux séismes qui se sont produits sur la faille (Brune, 1968 ; Davies & Brune, 1971). Cependant, dans les Andes équatoriennes, l'énergie libérée lors de séismes ne se fait pas sur une seule faille majeure. Les séismes se produisent en fait sur des systèmes différents et d'orientation différentes au travers d'un large volume crustal. À partir de cette constatation, il est plus facile d'appliquer la relation de Kostov (1974) en utilisant les tenseurs des moments sismiques pour calculer la déformation résultant de l'ensemble du mouvement de toutes les failles dans le volume donné (Wesnousky *et al.*, 1982 ; Chen & Molnar, 1977). Le tenseur du moment peut être défini par $M_{ij} = \mu A (u_i v_j + u_j v_i)$, où u est le vecteur glissement sur le plan de faille et v , le vecteur normal au plan de faille (Aki & Ricards, 1980 ; Ben-Menahem & Singh, 1981). Les valeurs propres du tenseur sont $+M_0$, 0 et $-M_0$ et correspondent aux trois vecteurs propres orthogonaux T, B et P (Hermann, 1975 ; Backus, 1977 ; Dziewonsky & Woodhouse, 1983). Afin de calculer le taux moyen de la déformation irrotationnelle, due au glissement sur N failles, dans un volume V et pendant un temps t , nous appliquons la formule de Kostov (1974) définie comme suit:

$$\dot{\mathcal{E}}_{ij} = \frac{1}{2\mu V t} \sum_{n=1}^N M_{ij}^n \tag{1}$$

En diagonalisant $\dot{\mathcal{E}}_{ij}$, nous obtenons les trois directions principales du taux moyen de raccourcissement (Table 2). En suivant la méthode de Suarez *et al.* (1983), la vitesse de raccourcissement crustal peut être obtenue en multipliant la composante horizontale maximale

du taux de déformation ($\dot{\mathcal{E}}_{ij}$ H max) par la largeur de la zone déformée, mesurée selon la direction de $\dot{\mathcal{E}}_{ij}$ H max.

1. 2. Problèmes et limites de la méthode

La méthode précédemment décrite pose cependant quelques problèmes pour la détermination de $\dot{\mathcal{E}}_{ij}$. En effet, on suppose que chaque séisme affecte l'ensemble du volume considéré, c'est-à-dire que l'on rapporte le volume V à une sphère de même volume où tous les mécanismes sont placés au centre de la sphère. La somme des tenseurs des moments peut donc augmenter ou diminuer la déformation réelle du volume V. Il faut donc toujours considérer des volumes tels que effectivement, chaque mécanisme puisse affecter l'ensemble du volume. Nous supposons par ailleurs que l'ensemble de la déformation se fait de manière cassante dans un milieu irrotationnel. Comme le tenseur du moment sismique est symétrique, la déformation rotationnelle pure est donc ignorée dans la relation de Kostov (1974). D'autre part, nous ne prenons en compte ni la déformation viscoélastique ni le *fault creep* dont la part active dans la déformation est fonction soit de la profondeur, du flux thermique ou du comportement inhérent à la faille. Nous observons donc le glissement minimum dans le volume considéré pendant un temps t.

1. 3. Les données

Douze séismes superficiels majeurs de magnitude Mw comprise entre 5.3 et 7.1 ont été enregistrés de 1963 à 1992 dans les Andes équatoriennes (Table 1, Fig. 3, 4). L'ensemble de leurs hypocentres est compris entre 5 et 25.0 km. Les données de la sismicité instrumentale produites par les réseaux locaux sur les Andes équatoriennes donnent des profondeurs pouvant aller jusqu'à 25 km dans la cordillère et 30 km dans le subandin. Nous ferons l'hypothèse d'une profondeur de 25 km pour la zone sismogénique car la majorité de la zone considérée se trouve dans la zone andine. À partir de la représentation géographique des

Table 1 - Mécanismes au foyer superficiels utilisés dans la sommation des tenseurs des moments. NP1 et NP2, plans nodaux ; T axis, axe extensif ; Mo, moment sismique. Sources : a, Suarez *et al.* (1983) ; b, Dziewonski *et al.* (1985, 1991a ; 1991b) ; c, Kawakatsu et Proaño-Cadena (1991) ; d, Sipkin & Needham (1994).

n°	Date	Time (UT)	Lat deg	Long deg	Depth (km)	NP1		NP2		T axis		Mo (Nm) 10e17	ref
						strike	dip	strike	dip	pl	az		
1	10/05/63	22h 22m 42s	-2.2	-77.60	16.0	231	89	140	86	01	005	88.5	a
2	23/02/73	04h 26m 21s	-2.16	-78.33	10.0	026	71	156	26	60	322	9.47	a
3	06/10/76	09h 12m 39s	-0.80	-78.80	16.0	202	75	323	28	54	145	5.24	a
4	28/04/84	20h 12m 05s	-1.77	-78.10	15.5	199	26	358	65	68	250	3.49	b
5	06/03/87	1h 54m 57s	0.048	-77.65	10.0	007	74	173	16	61	282	41.5	c
6	06/03/87	4h 10m 55s	0.15	-77.82	10.0	358	70	196	21	64	259	397	c
7	06/03/87	8h 14m 58s	0.022	-77.92	10.0	227	86	317	90	02	002	6.0	c
8	22/09/87	13h 43m 45s	-0.97	-78.05	15.0	218	42	334	68	52	201	41.0	b
9	22/09/87	16h 21m 41s	-1.08	-78.12	19.4	197	42	330	59	63	190	11.0	b
10	11/08/90	3h 00m 06s	0.059	-78.44	15.0	323	45	190	55	64	157	0.94	b
11	25/11/90	12h 32m 53s	-2.70	-77.79	25.0	020	35	190	55	79	080	1.3	b
12	26/12/92	14h 37m 38s	-1.01	-78.06	11.6	023	68	291	83	10	339	8.3	d

épïcêtres, nous pouvons déterminer la surface moyenne de la zone affectée par les séismes. Cette zone a 370 km de long et 180 km de large, ce qui nous donne un volume pour le calcul de la déformation égal à 370*180*25 km³, soit 1.665*10⁶ km³ (Fig. 4). Le tenseur des contraintes obtenu par la sommation des tenseurs des moments sismiques est donné dans la Table 2.

Table 2 - Tenseur des contraintes obtenu par la sommation des tenseurs des moments sismiques.
R = (B-P) / (T-P).

Axis	Moment (10 ¹⁹ Nm)	Az / Pl	R
T	4.72	248.6 / 66.3	
B	1.13	359.1 / 8.7	0.66
P	-5.85	92.7 / 21.8	

1. 4. Résultats

À partir des différents paramètres définis précédemment, la valeur du taux de la déformation compressive dans les Andes équatoriennes est de 1.83 10⁻⁸/an selon une direction N93°E (Table 2). La valeur de la vitesse de déformation crustale au travers du volume considéré est de 3.3 mm/an. Cette vitesse est minimale car elle est obtenue en ne prenant pas en compte la déformation engendrée par les séismes de magnitude Mw<5.3. Afin d’estimer la part de la déformation associée à ces séismes, nous utilisons la méthode établie par Molnar (1979) en combinant les relations de la magnitude de la fréquence (Log N (Ms)=a-b*Ms) et de la magnitude du moment (Log Mo=c*Ms+d) (Hanks & Kanamori, 1979), avec c=1.5 et d=16 et en appliquant la formule de la puissance maximale des moments sismiques sommés défini comme suit :

$$\dot{M}_0^\Sigma = \frac{\alpha M_0^{\max 1-\beta}}{1-\beta} - \frac{\alpha\beta \overline{M}_0^{1-\beta}}{1-\beta} + \alpha \overline{M}_0^{1-\beta} \ln\left[\overline{M}_0 / M_0^{\min}\right] \tag{2}$$

où α et β sont des coefficients tels que α = [a + bd/c] et β = [b/c]. En prenant une valeur moyenne b=1 (0.8 ≤ b ≤ 1.2) dans la relation de la magnitude de la fréquence et en posant dans l’équation (2) M₀^{max}=3.97*10¹⁹ Nm, M₀=10¹⁶ Nm et M₀^{min}=10⁹ Nm, nous pouvons obtenir le pourcentage de la contribution des séismes de faible magnitude dans la sommation des moments en additionnant le deuxième et le troisième terme et en divisant le tout par le premier terme. Le pourcentage obtenu est de 39%. La vitesse totale de la déformation dans les Andes équatoriennes est donc de 4.6 mm/a. Il nous semble difficile à ce stade du calcul de définir une incertitude sur cette vitesse de raccourcissement. En effet, pour la définir, il faudrait prendre en compte celles sur la détermination des mécanismes au foyer, du volume précédemment défini et de la valeur β, qui sont toutes les trois difficilement contraignables.

Des périodes moyennes de retour T(Mo) et des fréquences de séismes N(Mo) peuvent être calculées sur les Andes équatoriennes en appliquant les formules définies par Molnar (1979) :

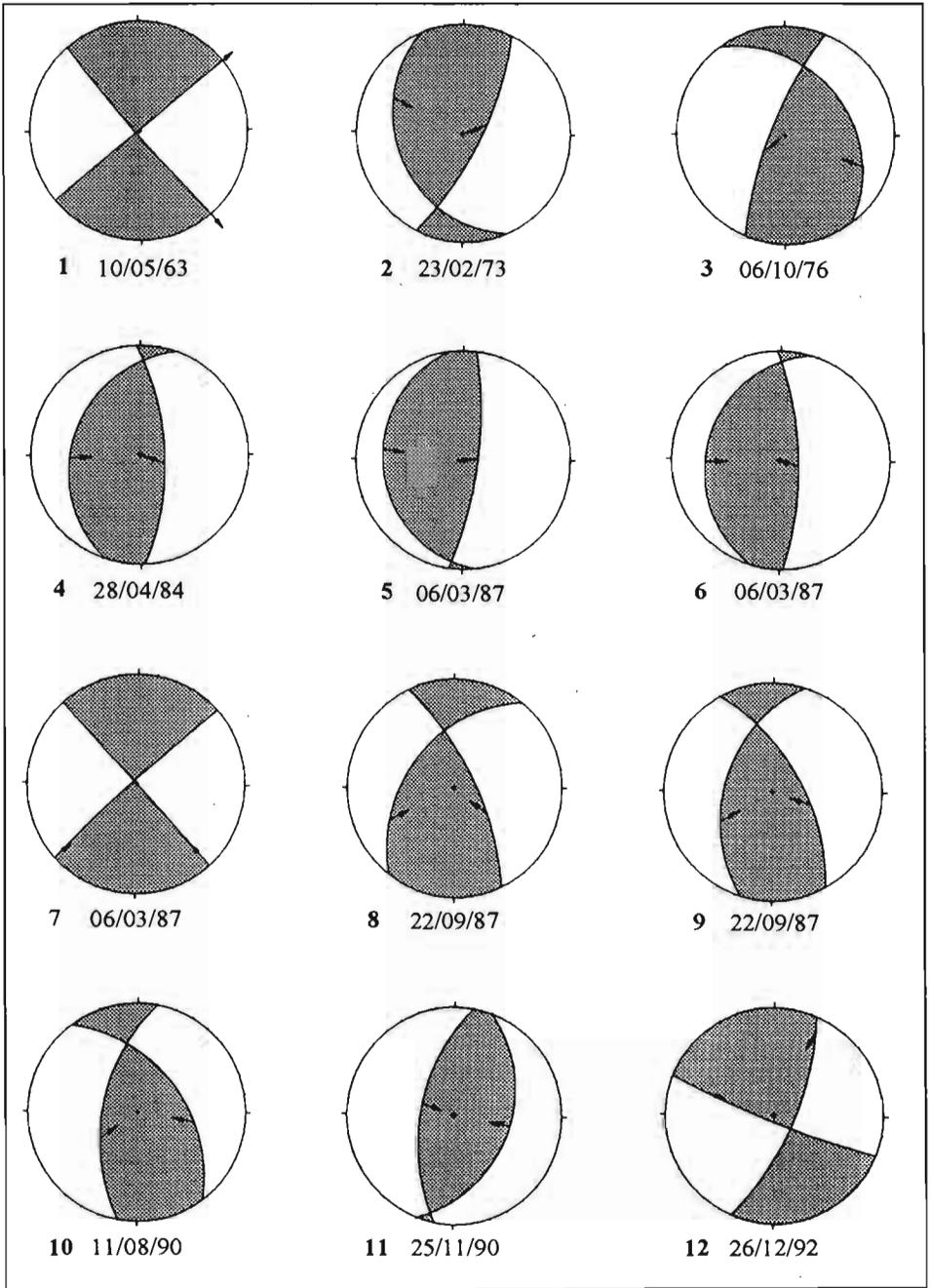


Fig. 3 - Ensemble des mécanismes au foyer superficiels des Andes équatoriennes (Table 1) ayant servi pour la sommation des tenseurs des moments sismiques (pour la localisation, voir Fig. 4).

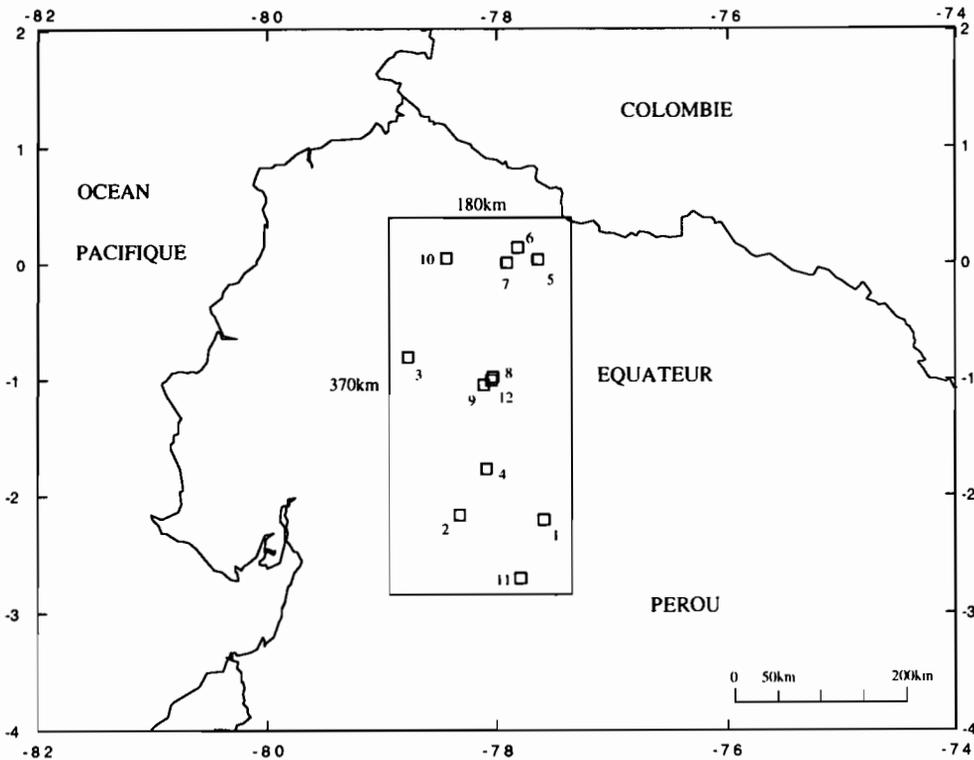


Fig. 4 - Carte de localisation des épacentres des séismes superficiels récents (Table 1, Fig. 3) ayant affecté les Andes équatoriennes. La surface ayant servi dans le calcul du taux de raccourcissement est aussi donnée dans cette figure.

$$T(M_0) = \frac{M_0^{\max 1-\beta}}{(1-\beta) \dot{M}_0^\Sigma} M_0^\beta \tag{3}$$

et

$$N(M_0) = (1-\beta) \frac{\dot{M}_0^\Sigma}{M_0^{\max 1-\beta}} M_0^{-\beta} \tag{4}$$

Pour cela, trois paramètres doivent être préalablement définis : β , M_0^{\max} et \dot{M}_0^Σ , le taux des moments sismiques. Le paramètre β (b/c) est entaché d'une grande incertitude. En effet, suivant les régions sismogéniques, b peut varier de 0.8 à 1.2 et c de 1.5 à 1.8 (Molnar, 1979), β pouvant donc varier de 0.5 à 0.75. Une valeur moyenne théorique de 0.67 (b=1, c=1.5) sera attribuée à β . La détermination de M_0^{\max} est aussi problématique. Sur la période de temps considérée (1963-1996), le M_0^{\max} enregistré dans les Andes équatoriennes est de $3.97 \cdot 10^{19}$ Nm. Cependant, nous ne pouvons pas exclure que d'autres séismes avec un M_0 supérieur aient pu se produire antérieurement dans les Andes équatoriennes. En première approximation, le M_0^{\max} sera de $3.97 \cdot 10^{19}$ Nm ($M_w = 7.1$). La détermination de \dot{M}_0^Σ s'est faite selon le modèle de Molnar (1979). Nous avons divisé la valeur sommée des moment sismiques selon l'axe P ($5.85 \cdot 10^{19}$ Nm), majorée de 39% (énergie des séismes de $M_w < 5$) par

une base de temps de 33 ans. Une valeur de $2.46 \cdot 10^{18}$ Nm/an a été calculée pour \dot{M}_0 . Sur le volume considéré des Andes équatoriennes, les équations (3) et (4) prédisent respectivement un temps de récurrence de 0.5 an ($M_w = 5.0$), de 4.5 ans ($M_w = 6$), de 45.4 ans ($M_w = 7$) et une fréquence de 66 ($M_w \geq 5.0$), de 7.3 ($M_w \geq 6$) et de 0.73 ($M_w = 7$) pour une base de temps de 33 ans. Par comparaison avec la sismicité enregistrée depuis ces 33 dernières années sur les Andes équatoriennes, une similitude est observée avec les fréquences des séismes de $M_w \geq 6$ (5) et de $M_w \geq 7$ (1). En revanche, une différence notable d'un facteur 2 est observée avec la fréquence des séismes de $M_w \geq 5$ (30, dont 24 séismes avec $6 > M_w \geq 5$), enregistrés sur les Andes équatoriennes depuis ces 33 dernières années. Cette différence d'un facteur 2 pourrait provenir du fait que le \dot{M}_0^{\max} est très mal contraint pour les Andes équatoriennes. Nous pouvons par ailleurs estimer la quantité de raccourcissement des Andes équatoriennes en faisant l'hypothèse que la déformation se fait à volume constant. En prenant une altitude moyenne de 2000 m pour les Andes équatoriennes et une profondeur de 50 km pour la racine crustale (Robalino, 1976) et en faisant l'hypothèse d'une épaisseur initiale théorique de 35 km pour la croûte de la paléo-marge équatorienne, nous obtenons un raccourcissement de 90 km. Selon la vitesse calculée précédemment, ce raccourcissement se serait fait en majeure partie depuis les 19-20 derniers millions d'années. Cette hypothèse de calcul semble être corroborée par une augmentation de la vitesse de convergence (125 ± 33 mm/a) entre les plaques Nazca et Amérique du Sud depuis 20 Ma jusqu'à l'actuel (Daly, 1989).

2. LES STRUCTURES SISMOGÉNIQUES DE LA "RÉGION" NORD ÉQUATORIENNE

2. 1. La subduction

L'azimut de la fosse équatorienne-Sud colombienne varie notablement du Sud au Nord (Fig. 1). De N15°E (4°S-3°S), il passe à N04°E (3°S-1°S), puis à N22°E (1°S-1.5°N) pour s'infléchir selon une direction N42°E (1.5°N-4°N) au niveau de la marge Sud-colombienne. Au niveau de la marge équatorienne (2.5°S-1°N), la plaque Nazca plonge d'un angle de 25° vers l'Est (Winter, 1990). Plus au Nord, sous la marge Sud-colombienne (1.5°N-4°N), la plaque Nazca plonge d'un angle de 35° vers l'Est (Pennington, 1981). La variation du pendage de la subduction ainsi mise en évidence reste cependant sujette à discussion. En effet, au vu de la faible quantité de données disponibles au niveau de la marge équatorienne, il semble difficile de pouvoir déterminer avec précision la géométrie de la plaque plongeante.

Depuis le début du siècle (1906), quatre séismes superficiels majeurs de magnitude comprise entre 7.7 et 8.8 se sont produits le long de la fosse équatorienne (Fig. 5) et une vingtaine de séismes superficiels ($M_w \geq 5$) y ont été enregistrés durant ces trente dernières années. La subduction apparaît être la structure sismogénique majeure capable d'engendrer des séismes de magnitude supérieure à 8.0 dans la région équatorienne. Le séisme de 1906 ($M_w = 8.8$, I = IX) a provoqué d'importants dégâts sur la côte et jusqu'à 100 km à l'intérieur des terres (Kelleher, 1972) (Fig. 5). Cependant aucune destruction n'a été répertoriée dans la zone andine, ce qui tendrait à montrer, si l'on se réfère au séisme de 1906, que les séismes superficiels de la subduction ne représentent pas l'aléa majeur pour cette zone.

Les séismes intermédiaires de la subduction peuvent être aussi la source d'importants dégâts en surface, localisés dans la zone andine. En effet, quelques séismes historiques dévastateurs, principalement ressentis dans la vallée interandine, pourraient en être le témoignage (voir annexe).

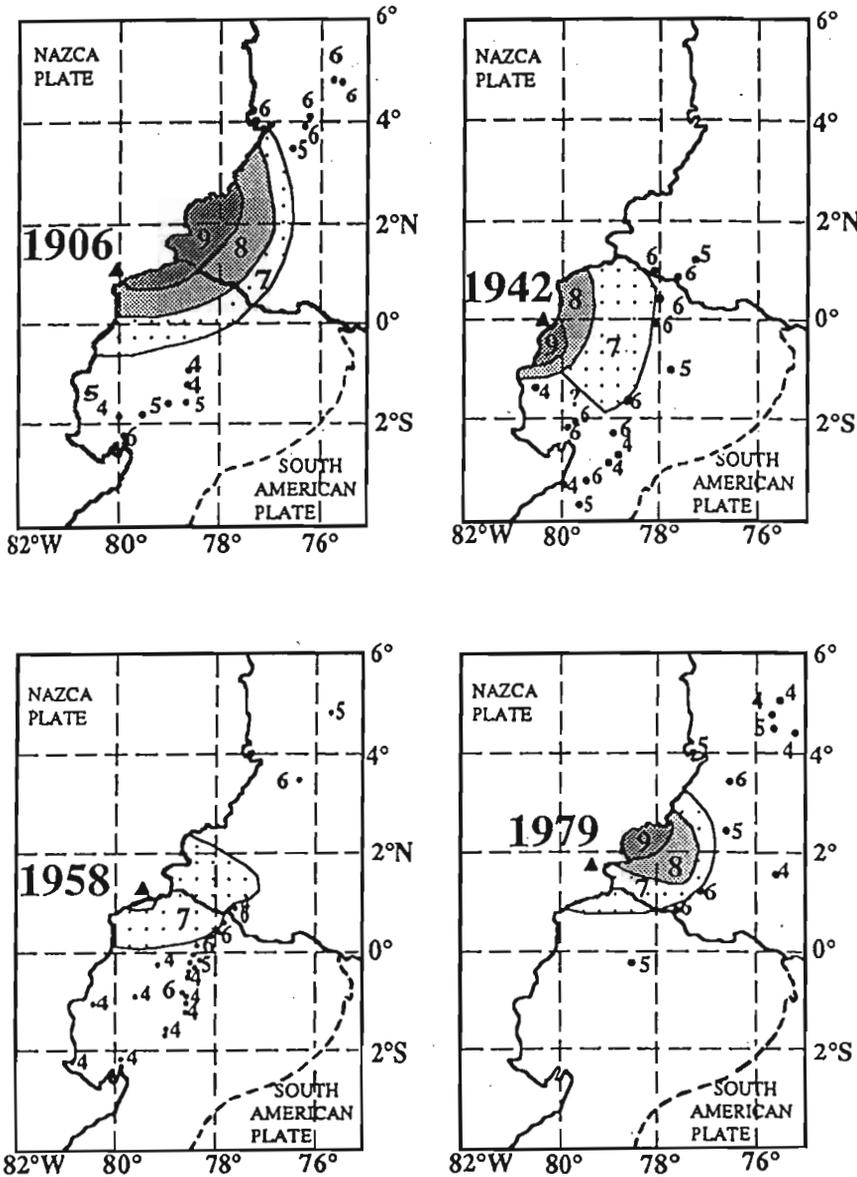


Fig. 5 - Localisation des épicentres des quatre séismes superficiels majeurs de la subduction et distribution des intensités dans la plaque supérieure (d'après Swenson & Beck, 1995).

2. 2. La côte

La côte est structurée par un ensemble de failles majeures d'orientation NW-SE au Nord (faille d'Esmeraldas) évoluant à WNW-ESE au Sud (faille de Colonche-Chogon). Ces failles sont limitées plus à l'Est par le faisceau de failles décrochantes NNE-SSW de Babahoyos (Fig. 2). Il s'amortit en queue de cheval dans le Golfe de Guayaquil (au Sud) pour

former l'actuel bassin de Jambeli (Benitez, 1986). Ces failles ont été actives durant le Néogène et le début du Pléistocène et sont à l'origine de la formation de l'ensemble des bassins côtiers (Daly, 1989). Cependant, depuis le XVI^{ème} siècle, aucun séisme historique n'a été recensé dans cette région. De plus, aucun événement sismique superficiel ($M_w \geq 5$) n'a été enregistré durant ces trente dernières années sur la côte et dans le Golfe de Guayaquil. Cette région semblerait être une zone à faible aléa sismique, si l'on se réfère à son activité sismique très superficielle, le seul danger identifié à ce jour provenant de la subduction.

2. 3. Les hautes Andes Nord équatoriennes

La haute chaîne des Andes Nord équatoriennes a été le siège d'important séismes historiques destructeurs, principalement ressentis dans la vallée interandine (voir annexe). De plus, des travaux récents (Soulas, 1988 ; Winter, 1990 ; Ego, 1993) ont mis en évidence l'existence de structures actives. À ce titre, la haute chaîne des Andes Nord équatoriennes peut être considérée comme une zone majeure de l'aléa sismique. Plusieurs systèmes de failles actives y ont été identifiées.

2. 3. 1. Le système majeur transpressif dextre des hautes Andes Nord équatoriennes

Ce système comprend deux failles majeures dextres, la faille du Rio Chingual-la Sofia au Nord dans la cordillère orientale et la faille de Pallatanga au Sud dans la cordillère occidentale (Fig. 1, 2). Ces deux failles définissent d'une part la bordure orientale du Bloc Andin en Équateur, et constituent d'autre part respectivement la terminaison Nord et Sud du relais compressif N-S défini par la vallée interandine et la zone transpressive de Baeza. Ce système de failles est caractérisé par de nombreux indices morphologiques de déformations quaternaires. Il est à ce titre, au regard des structures des Andes Sud équatoriennes, le système majeur de la plaque chevauchante.

2. 3. 1. 1. La faille du Rio Chingual-la Sofia

Cette faille est la plus importante par sa dimension et ses nombreux indices morphologiques de déformations quaternaires des Andes équatoriennes (Fig. 1, 2). Elle fait partie du grand système de failles bordières dextres affectant la cordillère orientale de Colombie et les Andes du N-E vénézuélien et définit la bordure orientale du Bloc Andin (Fig. 1) (Aggarwal *et al.*, 1983 ; Soulas, 1986 ; Soulas *et al.*, 1991). Cette faille est rectiligne et a une longueur totale de 75 km selon une direction N35°E. Elle s'incurve au Nord le long de la frontière colombienne selon une direction N-S et s'amortit progressivement dans la topographie. Il ne semble pas qu'elle se raccorde plus au Nord directement avec la faille Afiladores. Dans le détail, elle se compose d'un segment Nord de 46 km et d'un segment Sud de 31 km de long. Ces deux segments se recouvrent pour former le petit relais extensif de la Sofia de 2 km de large qui pourrait fonctionner comme une barrière sismique. Cette faille est bien marquée dans la topographie par un tracé rectiligne et un alignement de *spurs* et de *shutter ridges*. Elle affecte l'ensemble du réseau hydrographique qui la traverse, soit par contrôle, soit par décalage en majorité dextre. À partir du décalage dextre de la coulée volcanique du Soche (37 220 ans BP) et de ses coulées lahariques (8 600 ans BP), une vitesse "long terme" de 7 ± 3 mm/an a été calculée pour cette faille (Ego *et al.*, 1995b). Cette vitesse

semble être en accord avec les 6 mm/an obtenus par Mora & Kellogg (1995) à partir des mesures G.P.S sur une période 6 ans (1988-1994). Une activité exclusivement Holocène a été suggérée pour cette faille, basée sur le fait que seule la morphologie héritée de la dernière glaciation (12 000 ans BP) était affectée par cette faille (Tibaldi & Ferrari, 1991 ; Ferrari & Tibaldi, 1992). Cependant, à partir de la vitesse calculée, et au vu du décalage dextre (7-10 km) du Rio Chingual (drain majeur de la cordillère orientale), cette faille est active depuis au moins 700 ka et au maximum depuis 2.5 Ma.

2. 3. 1. 2. La faille de Pallatanga

La faille dextre de Pallatanga est localisée dans la cordillère occidentale (Fig. 1, 2) et est liée à l'ouverture du golfe de Guayaquil. Elle fait le relais entre les failles normales (N50-N70°E) du golfe au Sud et le système compressif N-S défini par la vallée interandine au Nord. Cette faille a une longueur approximative de 60 km et est composée de deux segments qui se recouvrent pour former le petit relais extensif de Pallatanga large de 3 km (Marchant, 1961 ; Campbell, 1974 ; Soulas, 1988 ; Winter, 1990). Cependant, selon la cartographie proposée par Winter (1990), seule une partie du segment Nord d'une longueur totale de 42 km montrerait des ruptures en surface récentes. La rupture en surface a une longueur de 26 km, associée à une faille de direction N30°E pendant de 75° vers l'Ouest. À partir de l'étude des marqueurs morphologiques hérités des différentes glaciations, Winter *et al.* (1993) ont pu déterminer des décalages de 27 m et 40 m de long attribués au dernier maximum glaciaire Holocène moyen et des décalages de 590 m et 960 m attribués aux trois dernières grandes glaciations du Pléistocène (250 ka). À partir de ces observations une vitesse "long terme" de 3.8 ± 0.9 mm/an a été calculée pour cette faille et un décalage total de 9 km a été estimé pour cette même faille (Winter & Lavenu, 1989 ; Winter *et al.*, 1993).

Le fonctionnement de cette faille serait à l'origine des séismes historiques de 1674 (Alausi, I = X) et de 1961 (Riobamba, I = VIII). Winter *et al.* (1993) attribuent le séisme historique de 1797 (Riobamba antigua, I = XI) à cette même faille (Fig. 6 + annexe)

2. 3. 1. 3. Le relais compressif N-S de la vallée interandine

Cette famille correspond à l'ensemble des failles inverses N-S qui définissent le relais compressif (Fig. 1, 2) entre les failles majeures décrochantes N30 et N35°E (Ego *et al.*, 1993). La majeure partie de la déformation se concentre en fait dans la vallée interandine sous forme de plis Quaternaires associés à des failles en profondeur (Winter, 1990 ; Ego *et al.*, 1993).

1.- La faille de Quito est la plus grande faille de la vallée interandine. Longue de 50 km selon une direction moyenne N10°E, elle aurait, si l'on se réfère à la morphostructure des plis en surface, une géométrie en rampe et plat. La rampe finale se divise en trois failles inverses aveugles en échelon dextre et de pendage moyen 50°W (Ego & Sébrier, 1995). En surface, l'expression morphologique de cette faille se caractérise par trois plis en échelon. Le pli Nord de Pomasqui, long de 18 km, est une flexure dissymétrique à vergence Est et le pli central de Quito, long de 17.5 km, est un pli en genoux de même vergence. Le troisième pli, au Sud et long de 20 km, n'a malheureusement pas fourni suffisamment d'affleurements pour en déterminer la structure. Néanmoins, le fait que son expression morphologique de surface soit identique à celle des deux autres plis suggérerait un même type de structure en

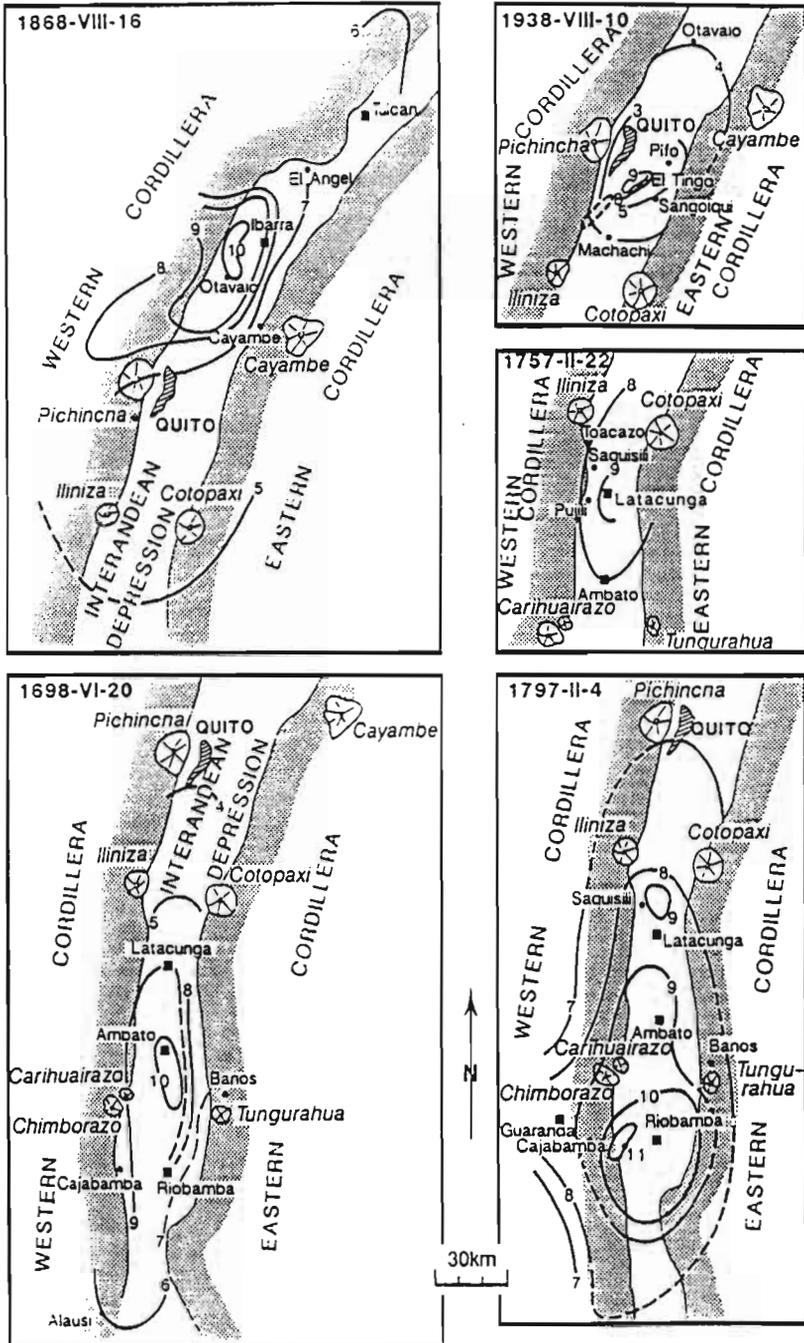


Fig. 6 - Cartes des isoséistes des cinq séismes historiques majeurs ayant affecté la vallée interandine (d'après Winter, 1990).

profondeur. Soulas *et al.* (1991) ont proposé une vitesse de 0.5 à 1mm/an pour cette faille. Cette fourchette de vitesses est en accord avec la vitesse de raccourcissement minimum de 1 mm/a calculée sur ces structures par Ego & Sébrier (1995). Le fonctionnement de la faille de Quito serait à l'origine des séismes historiques de 1755 (Quito, I= IX), de 1929 (Quito, I = VIII) et de 1938 (El Tingo, I = IX) (Fig. 6). Plus récemment, le 11/08/90, un séisme de magnitude $M_w = 5.3$ s'est produit à 5 km de profondeur sous le pli Nord de Quito (Pomasqui, I = VII). (voir annexe)

2.- La faille du Rio Yanayacu-Cutuchi. Cette faille est localisée au Sud de Latacunga, quelques kilomètres à l'Est de Salcedo sur la bordure orientale de la vallée interandine. Longue de 25 km, elle est associée en surface avec une grande flexure Quaternaire dissymétrique avec un flanc raide pendant de 70° vers l'Ouest (Dávila, 1990). Le sens de vergence de la flexure suggérerait que la faille associée ait un pendage vers l'Est (Winter, 1990). Cette faille pourrait ainsi se connecter en profondeur avec la suture de Peltevec de même pendage (Ego & Sébrier, 1995). Selon Soulas *et al.* (1991), cette faille serait à l'origine du séisme de 1698 qui détruisit les villes de Latacunga et Ambato (Fig. 6 + annexe).

3.- La faille de Saquisili. Cette faille est localisée quelques kilomètres au Nord de Latacunga, à l'Ouest de Saquisili. Elle a une longueur totale de 21 km selon une direction moyenne N-S et est associée en surface avec une flexure quaternaire symétrique (Dávila, 1990 ; Winter, 1990).

4.- La faille du Rio Nagsiche. Cette faille est située sur la bordure occidentale de la vallée interandine à environ 5 km à l'Est de Salcedo. Elle est longue de 16 km selon une direction N-S. Elle se caractérise en surface par une flexure quaternaire asymétrique avec un flanc long pendant de 20° vers l'Ouest et un flanc court pendant de 40° vers l'Est (Dávila, 1990 ; Winter, 1990). Selon Winter (1990), cette flexure asymétrique serait associée en profondeur avec une faille inverse à pendage Ouest.

Pour la région de Latacunga, Lavenu *et al.* (1995) ont calculé une vitesse de raccourcissement E-W, pour la période du Pliocène à l'actuel, de 1.4 ± 0.3 mm/an en attribuant un pendage théorique de 28° à l'ensemble des failles de cette région. Cette vitesse semble être sous-estimée. En effet, en considérant que la vitesse de la faille de Pallatanga (3.8 ± 0.9 mm/an, Winter *et al.*, 1993) est intégralement transmise vers le Nord sur le relais compressif N-S, la vitesse de raccourcissement E-W dans la région de Latacunga devrait être de 2.1 ± 0.5 mm/an, en tenant compte de la légère composante inverse (pitch : 11.5° S) sur la faille de Pallatanga. L'ensemble des structures de la vallée interandine et de la bordure orientale de la cordillère occidentale accommoderaient 2.1 ± 0.5 mm/a des 4.6 mm/a calculés à partir de la sommation des tenseurs des moments (voir chapitre 2). Les 2.5 ± 0.5 mm/a restants seraient accommodés dans la zone transpressive de la cordillère orientale et le subandin. Le fonctionnement des failles inverses de la région de Latacunga serait à l'origine des séismes historiques de 1736 (Pujili, I = VIII) et de 1757 (Latacunga, I = IX) (Fig. 6 + annexe).

2. 3. 2. *Les failles de la cordillère occidentale*

L'analyse des photos aériennes et de la topographie de la cordillère occidentale a permis de mettre en évidence des structures actives à potentiellement actives.

1.- La faille de Mindo-Nanegalito. Cette faille est localisée dans la cordillère occidentale (Fig. 2), à la latitude de Quito et a une longueur totale de 20 km selon une direction N55°E. Elle est composée dans le détail de trois segments. Le segment Sud est bien marqué dans le paysage par un alignement de *spurs* et de petites collines de pression et décale de manière dextre le rio Cinto sur 1 km de long. Plus au Nord, un *shutter ridge* bloque le drainage du rio Mindo, entraînant la formation du petit bassin de Mindo. Le segment central est bien moins marqué dans la topographie et se caractérise simplement par un alignement d'escarpements à regard Est. Le segment Nord est quant à lui bien marqué dans le paysage et se caractérise par un alignement de *spurs* et de collines de pression. Le rio Alambi, quelques centaines de mètres à l'Est de Nanegalito est décalé de manière dextre sur 2.5 km de long. L'ensemble des décalages observés sur les drains majeurs et mineurs ainsi que l'analyse morphologique de cette faille lui confèrent un caractère décrochant dextre. Cependant, aucune trace d'activité récente sur cette faille n'a pu être clairement démontrée.

2.- La zone de failles hypothétique du versant Ouest de la cordillère occidentale (Fig. 2). L'étude de la topographie de ce versant a montré d'importantes variations de pente et de morphologie du Nord au Sud (Ego & Sébrier, 1995). À la latitude de 0.5°N (Ibarra), le versant, d'orientation moyenne N30°E, est sinueux et a une pente moyenne de 5°. À la latitude de 0.2°S (Quito), le versant d'orientation moyenne N20°E est toujours sinueux mais sa pente augmente très légèrement à 7°. Enfin, plus au Sud, entre 1.5°S et 2°S (Latacunga-Riobamba) le versant a une orientation N-S, devient linéaire et a une pente de 19°. Il se raccorde brutalement à la plaine côtière. Les caractéristiques morphologiques et topographiques de ce versant, entre 1.5°S et 2°S, pourraient être l'expression morphologique d'une faille inverse à la base du versant. Il n'existe pas de sismicité historique et instrumentale dans cette région. Ces failles, si elles existent, représentent dans tous les cas un risque sismique non négligeable. Aucun calcul de magnitude et de temps de récurrence n'a été effectué sur cette zone de faille.

2. 3. 3. *Les failles en extension*

L'extension dans les Andes Centrales péruviennes et boliviennes a été communément interprétée comme la conséquence d'une haute topographie compensée à l'échelle lithosphérique (Sébrier *et al.*, 1985 ; 1988 ; Mercier *et al.*, 1992). Les failles normales mises en évidence dans les Andes équatoriennes ne semblent pas être dues quant à elles aux forces de volume lithosphériques. Deux systèmes failles ont été identifiées.

1.- La faille normale de Girón-Santa Isabel. Cette faille a été largement décrite et étudiée par Winter (1990). Elle se situe au Sud de l'Équateur, à environ 30 km au Sud-Ouest de la ville de Cuenca (Fig. 2). Elle se localise à la base d'un front montagneux d'une hauteur de 1000 m associé à la cordillère occidentale. Ce front montagneux représenterait l'escarpement de cette faille normale. Elle se compose de quatre segments qui sont respectivement du Sud

au Nord de 4.7, 16, 18 et 7.5 km de long selon un azimut variant de N35 à N55°E. Au vu de la cartographie proposée par Winter (1990), les trois derniers segments pourraient être en continuité et ne former qu'un seul segment majeur de 41.5 km de long selon une direction moyenne N42°E. Cette faille est bien marquée dans le paysage et se caractérise par un alignement de facettes triangulaires et de vallées en verre à vin ; elle perturbe la topographie et contrôle le réseau hydrographique. Une analyse de terrain (Winter, 1990) a permis de déterminer la géométrie et la cinématique de cette faille normale et de mettre en évidence des ruptures de surfaces récentes. Ces ruptures de surfaces ne seraient pas d'origine tectoniques (Winter, comm perso). Dans la zone étudiée (Sulupali Chico), cette faille a un pendage de 80° vers l'Ouest et un vecteur glissement proche de la verticale. Une vitesse de déplacement de 0.2 mm/an à 0.5 mm/a a été estimée pour cette faille (Winter, 1990 ; Winter *et al.*, 1990). Au vu de la faible altitude moyenne des Andes d'Équateur, en particulier pour cette région où elle est de 2 300 m (Winter, 1990), et de la faible longueur d'onde des hautes topographies, l'extension observée sur la faille de Girón-Santa Isabel ne semble pas être la conséquence d'une haute topographie compensée (Winter, 1990 ; Ego *et al.*, 1995c). Winter (1990) suggère que les ruptures de surface observées localement soient plutôt liées à des phénomènes locaux de tassement et de compaction du bassin sédimentaire intramontagneux. En revanche, la longueur de cette faille (40 km) et son déplacement cumulé ($\pm 1\ 000$ m) correspondent davantage à des déformations à l'échelle crustale (± 50 km). Comme cette structure est à la fois à proximité et parallèle au Golfe de Guayaquil, son jeu pourrait être lié à l'ouverture de ce dernier. Deux hypothèses peuvent être alors considérées. La première serait d'assimiler la faille normale de Girón à une faille bordière de la zone de subsidence du Golfe de Guayaquil. Dans ce cas, elle représenterait la terminaison septentrionale du système de failles en queue de cheval contrôlant l'ouverture du golfe. La deuxième hypothèse serait de considérer la faille Girón comme une structure ancienne, héritée de la formation d'un "paléogolfe" de Guayaquil. Dans un contexte de convergence oblique instable dans l'espace et le temps, il se pourrait que la déformation ait migré plus au Nord au cours du temps pour se localiser dans l'actuel Golfe de Guayaquil.

2.- Les failles normales de Billecocha. Cinq failles normales ont été identifiées sur un haut plateau de la cordillère occidentale (Fig. 2), à la latitude de la ville d'Ibarra (0.3°N) (Ego *et al.*, 1995c). Ces cinq failles sont parallèles entre elles et suivent les plans de stratification du plateau de Billecocha. Le segment majeur a une longueur totale de 10 km et un azimut variant de N30 à N50°E vers le Nord. Les quatre autres segments ont chacun une longueur n'excédant pas 4 km. Une étude détaillée (Ego *et al.*, 1995c) a montré que le jeu de ces failles est postérieur à la dernière glaciation (10 000 ans BP) et antérieur à 6 000 ans BP et pourrait être associé à un rejet unique. Elles sont rectilignes et décalent verticalement l'ensemble de la topographie et les marqueurs morphologiques issus de la dernière glaciation (moraines, lanières d'érosion, ...) du plateau avec un affaissement du bloc oriental. Plusieurs *sag-ponds* se sont formés et sont actuellement bloqués contre le *scarp* du segment majeur. Ce segment majeur a un pendage identique à celui de la stratification (75°E) et montre un rejet unique de 2.5 ± 0.3 m. Ce rejet n'est pas en accord avec les relations statistiques des lois d'échelle. En effet, si une faille normale de 10 km de long est tectoniquement active, elle devrait être associée lors de la rupture à un rejet maximum de 0.5 m. Le mécanisme de rupture invoqué pour ces failles n'est pas tectonique mais est à rechercher dans des phénomènes gravitaires

locaux (Ego *et al.*, 1995c). Bien que ces failles ne soient pas actives à proprement parler, elles constituent cependant des plans de faiblesse facilement réactivables. Dans l'hypothèse où la cordillère occidentale continuerait actuellement de chevaucher la vallée interandine, et où il y aurait une diminution du pendage du plan de chevauchement en surface, un déséquilibre topographique pourrait se créer dans la cordillère. Les failles de Billecocha pourraient être alors réactivées par réajustement topographique. Il faut cependant noter qu'aucun indice de déformation récente n'a été trouvé dans ce sens tout au long de la cordillère occidentale.

2. 4. Le subandin (s. 1.)

Le subandin comprend la cordillère orientale et la zone subandine plus à l'Est. L'analyse de la sismicité historique et instrumentale (voir annexe) montre que cette région est une importante source sismogène (e. g., séisme historique de 1541, la crise sismique de Baeza-Reventador en 1987 et 7 séismes superficiels [$M_w \geq 5$] enregistrés durant ces trente dernières années). Le subandin (s. 1.) est structuré par une famille de failles compressive N-S qui définissent la partie orientale du relais compressif de la vallée interandine. Ces failles s'incurvent au Nord du volcan Reventador selon une direction N20-30°E. Tibaldi & Ferrari (1991) ont signalé la présence de petites failles décrochantes dextres N20°E à environ 10 km à l'Ouest du volcan.

1.- La faille de Borja-El Chaco. Après l'analyse des photos aériennes de la cordillère orientale, le seul linéament susceptible d'avoir une activité significative est la faille de Borja-El Chaco (Fig. 2). Elle est localisée au Sud du volcan El Reventador, entre les villages de Cosanga au Sud et El Chaco au Nord. Elle a une longueur maximale de 20 km selon une direction N25-N30°E. Elle est bien exprimée dans le paysage, surtout aux alentours du village de Borja. Elle se caractérise par des alignements de petites collines formant des escarpements à regard Est en rive gauche du Rio Quijos. D'autre part, elle contrôle localement le cours du Rio Cosanga plus au Sud sur environ 6 km. Barberi *et al.* (1988) signalent qu'une ancienne terrasse du Rio Quijos, dont l'âge a été estimé à environ 16 500 ans, a été soulevée par cette faille d'environ 40 m. L'ensemble des données morphologiques et géologiques laissent penser que la faille de Borja-El Chaco est inverse. Sa vitesse pourrait être d'environ 2.4 mm/a, si l'on considère un pendage moyen théorique de 45°W. Cependant, comme nous l'avons dit précédemment, le versant Est de la cordillère orientale et le subandin au sens strict doivent accommoder 2.6 mm/a. Dans ce cas, cette faille accommoderait la majeure partie du raccourcissement, ce qui semble peu vraisemblable.

2.- Le système de faille à l'origine du séisme du 06/03/1987 (Table 1, Fig. 3, 7). Les trois séismes majeurs se sont produits dans le Nord de la cordillère orientale et ont été principalement ressentis entre le volcan El Reventador et le Rio Salado. Leurs épïcêtres sont localisés à l'aplomb des unités paléozoïques et mésozoïques de la Cordillère. Ces unités sont imbriquées dans des écaïlles N-S recoupées par de petits segments de failles décrochantes dextres N35°E. Dans la mesure où aucune rupture de surface n'a été observée, il est difficile de définir avec précision les failles réactivées. Ils peuvent s'être produits soit sur les chevauchements N-S de la cordillère orientale, soit sur le front de chevauchement oriental faisant la limite entre la Cordillère et le bouclier guyanais. Les mécanismes au foyer obtenus

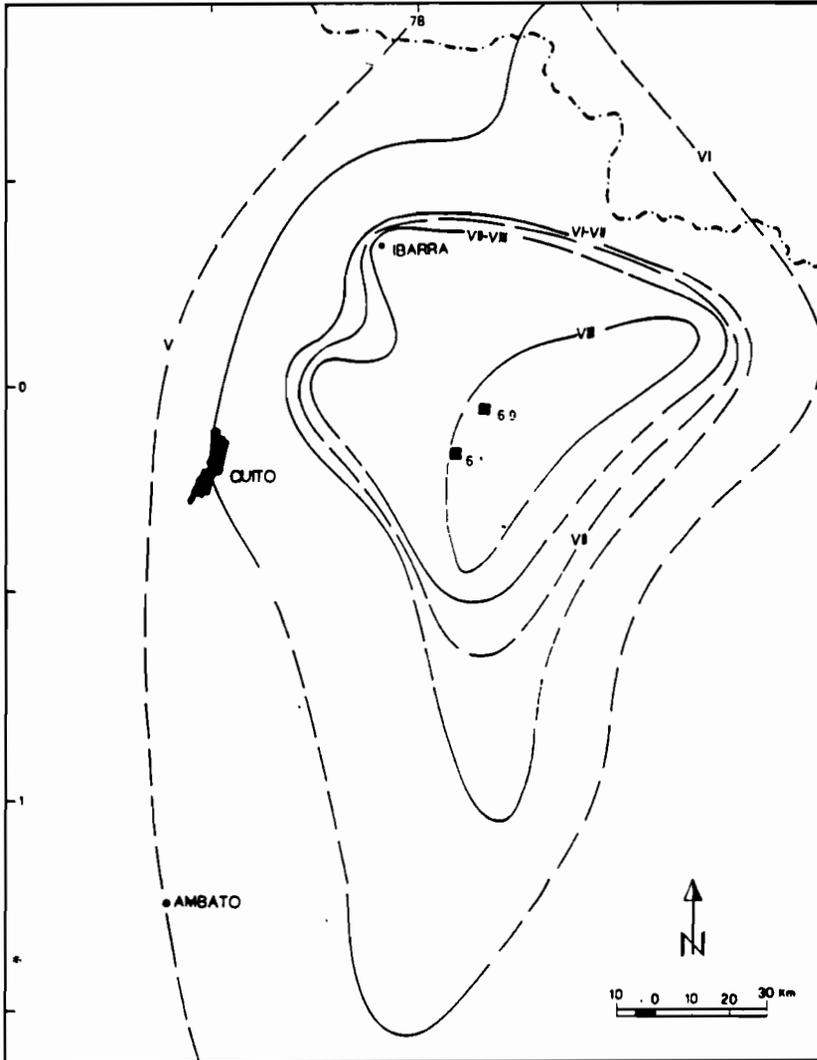


Fig. 7 - Carte des isoséistes du séisme du 6 mars 1987 (d'après Barberi *et al.*, 1988). Sont donnés les épicentres des deux chocs principaux.

à partir des deux premiers séismes (Kawakatsu & Proaño-Cadena, 1991) sont essentiellement compressifs avec un plan nodal, parallèle à la cordillère, pendant de 16 et 21° vers l'Ouest (Table 1, Fig. 3). Le troisième mécanisme au foyer a une solution focale purement décrochante avec un plan nodal (N47°E) légèrement oblique à la cordillère (N20°E). Au vu des différentes solutions focales, il semblerait que les deux premiers séismes se soient produits sur les structures de *Ramp and Flat* associées au système de chevauchement frontal subandin, responsable de la formation de l'anticlinal du Napo. Le troisième séisme pourrait s'être produit sur l'une des petites structures obliques localisées au Nord-Ouest du volcan Reventador.

3. ESTIMATION DES MAGNITUDES MAXIMALES ET DES TEMPS DE RETOUR POUR LES SOURCES DE L'ALÉA SISMIQUE

3. 1. Méthodologie

Après avoir décrit les différentes sources sismiques potentielles et estimé les différents paramètres géométriques et dynamiques, l'aléa sismique a été quantifié pour chacune de ces sources.

Compte tenu du manque de données sismologiques et d'une période de temps relativement courte (33 ans) pour la détermination des mécanismes au foyer, de la faible période d'archivage de la sismicité historique (400 ans) et de l'absence de donnée paléosismique, l'estimation de l'aléa sismique "court-terme" et "moyen-terme" ne peut être envisagée. Les paramètres géométriques et cinématiques de chaque faille renseignent sur son comportement sismogénique "long-terme". Par l'utilisation de ces paramètres, l'aléa sismique "long-terme" sera donc estimé pour chaque faille étudiée.

Pour estimer l'aléa sismique, les corrélations empirico-statistiques établies par Wells & Coppersmith (1994) (Table 3) ont été utilisées. Ces corrélations empiriques sont basées sur les lois d'échelle (Scholz, 1990) et permettent de déterminer, pour un événement sismique donné, ses paramètres géométriques (longueur de rupture en surface, rejet, ...) en fonction de sa magnitude correspondante et vice versa. Les lois d'échelle utilisées sont linéaires dans la majeure partie des cas et proportionnelles au logarithme décimal du paramètre considéré.

Ainsi, pour chaque faille active précédemment décrite, nous avons calculé sa magnitude maximale probable, basée sur la réactivation totale de la faille. Cette magnitude a été obtenue à partir de l'équation (1) (Table 3). Elle est entachée d'une incertitude obtenue à partir de

Table 3 - Équations (Wells & Coppersmith, 1994) ayant servi pour l'estimation de l'aléa sismique. L'équation (1) a été utilisée pour calculer la magnitude correspondant à une rupture de surface donnée. L'équation (2) a été utilisée pour déterminer la longueur de rupture lors du séisme du 06/03/1987. L'équation (3) a été utilisée pour déterminer le déplacement maximum moyen (DM) correspondant à la magnitude définie par l'équation (1). L'équation (4) a été utilisée uniquement pour les failles de Billecocha. Nous avons ainsi pu déterminer la magnitude correspondant au rejet mesuré sur le terrain (2.5 m). R : coefficient de corrélation, a (e) et b (e) : coefficients et incertitudes associées (Wells & Coppersmith, 1994).

Équation	Type a (e)	Coefficients et Erreurs b (e)		R
(1) $M=a+b*\text{Log (LRS)}$	D	5.16 (0.13)	1.12 (0.08)	0.91
	I	5.00 (0.22)	1.22 (0.16)	0.88
	N	4.86 (0.34)	1.32 (0.26)	0.81
(2) $\text{Log (LRS)}=a +b*M$	I	-2.86 (0.55)	0.63 (0.08)	0.88
(3) $\text{Log (DM)}=a+b*M$	D	-7.03 (0.55)	1.03 (0.08)	0.90
	I	-1.84 (1.14)	0.29 (0.17)	0.36
	N	-5.90 (1.18)	0.89 (0.18)	0.80
(4) $M_o=m*d^l*h$	N	-	-	-
(5) $M= 2/3 (\log M_o)-10.73$				
M : Magnitude (M_w), LRS : Longueur de Rupture de Surface, DM : Déplacement maximum sur la faille, D : faille Décrochante, I : faille Inverse, N : faille Normale				

celles des coefficients a et b de cette équation. Par ailleurs, la magnitude maximale probable sur certaines failles a été réévaluée quand elles étaient segmentées. Dans ce cas, le segment présentant la plus grande rupture de surface a été utilisé. En effet, des études ont montré que des discontinuités géométriques de l'ordre du kilomètre (courbure, relais, lacune de rupture) le long d'une faille active peuvent arrêter la propagation de la rupture et constituer une barrière sismique (Crone & Haller, 1991 ; de Polo *et al.*, 1991 ; Beaudouin *et al.*, 1995).

Un déplacement maximum (DM) a ensuite été calculé pour chaque faille en utilisant la relation (3) (Table 3). En première approximation, un DM moyen a été considéré, son incertitude correspondante ne dépendant que de celle de la magnitude. Un temps de récurrence a été déduit pour les failles dont la vitesse était connue ou estimée. Ce temps de récurrence est calculé à partir du DM moyen, rapporté à l'horizontale par prise en compte du pendage β de la faille et de la vitesse horizontale. Ce calcul est entaché d'une incertitude, fonction de celle sur la vitesse d'une part, et de celle sur le DM moyen horizontal, d'autre part.

L'estimation du séisme de magnitude maximale probable et son temps de récurrence pour chaque structure a été faite sur l'hypothèse d'une réactivation totale de la faille ou du segment de faille considéré. Ceci n'implique pas que nous appliquions dans cet article le concept du "gap sismique" et le modèle de comportement sismogénique non-aléatoire d'une faille, défini par le "séisme caractéristique" (Schwartz & Coppersmith, 1984). Notre but, à partir d'approximations simples (rupture totale de la faille, pas de glissement asismique) est de donner le séisme maximum probable mécaniquement possible le long d'une structure active reconnue. Le temps de récurrence associé doit donc être considéré comme minimum.

3. 2. Discussion des résultats

Nous discutons ici l'ensemble des résultats présenté dans la Table 4, en insistant particulièrement sur l'obtention de certaines données et sur les approximations faites sur la vitesse de certaines failles.

3. 2. 1. Les failles décrochantes dextres

Nous avons attribué à l'ensemble de ces failles un pendage vertical (Table 4). Pour la faille de Mindo-Nanegalito (N55°E), nous avons considéré en première approximation qu'elle accommode l'intégralité de la vitesse de raccourcissement E-W (2.1 ± 0.5 mm/a) sur la vallée interandine. Son temps de récurrence doit donc être considéré comme minimum. Celui de la faille du Rio Chingual-La Sofia (400 ± 440 ans) est entaché d'une incertitude relative supérieure à 1. Cela provient du fait que la vitesse elle-même (7 ± 3 mm/a) est entachée d'une grande incertitude (43% de la vitesse moyenne).

3. 2. 2. Les failles inverses de la vallée interandine et de la zone subandine (s.l.)

Compte tenu du manque de données, la première difficulté à laquelle nous avons été confrontés consiste en la détermination de la vitesse horizontale pour chacune de ces failles. Nous avons donc considéré en première approximation que l'intégralité de la vitesse de la faille de Pallatanga (3.8 ± 0.9 mm/a) était transmise plus au Nord dans la vallée interandine sur les structures N-S de Latacunga. Compte tenu de l'orientation de la faille dextre de Pallatanga (N30°E), une décomposition vectorielle de sa vitesse sur les structures N-S

Table 4 - Magnitude et temps de récurrence associé pour chacune des failles actives des Andes équatoriennes. Az, Azimut de la faille ; β , pendage de la faille en degré ; DM, déplacement maximum sur la faille.

Famille	Faille	Longueur (km) totale	segm.	Az N°E	β (°)	Vitesse (hz) (mm/a)	DM sur faille (m)	Magnit. (Mw)	Récurrence (ans)
Décrochante	Chingual	75	-	35	90	7±3	2.8±1.9	7-7.5	400±440
	"	-	46	"	"	"	1.6±1.0	6.8-7.3	230±240
	Pallatanga	42	-	30	90	3.8±0.9	1.40±0.9	6.7-7.2	380±320
	"	-	26	"	"	"	0.8±0.5	6.5-7	220±180
	Mindo	20	-	55	90	1.2±0.3	0.6±0.3	6.4-6.9	510±410
Inverse	Quito	50	-	10	55	1	1.6±0.5	6.6-7.6	930±300
	"	-	20	"	"	"	1.2±0.3	6.2-7	670±190
	"	50	-	"	30	"	1.6±0.5	6.6-7.6	1400±460
	"	-	20	"	"	"	1.2±0.5	6.2-7	1010±290
	Yanayacu	25	-	NS	28	1.0±0.5	1.3±0.4	6.3-7.2	1120±890
	Saquisili	21	-	"	"	"	1.2±0.3	6.2-7	1050±830
	Nagsiche	16	-	"	"	"	1.1±0.3	6.1-6.9	960±480
	Borja	20	-	25	45	2.4±0.5	1.2±0.3	6.2-7	350±170
Reventador	36	-	NS	20	2.5±0.5	1.55	7.1	580±120	
Normale	Giron	41.5	-	42	80	0.07±0.04	2.1±3.3	6.2-7.8	5260±11200
	"	-	18	"	"	"	0.8±1.0	5.9-7.2	1970±3820
	Billecocha	10	-	30	75	-	2.5±0.3	6.3	-

donnerait une vitesse de raccourcissement E-W de 2.1 ± 0.5 mm/an. Cependant, il ne semble pas raisonnable, dans l'estimation de l'aléa sismique, d'attribuer cette vitesse à une faille, et a fortiori à chacune des structures de cette région. Elles sont localisées respectivement dans la partie ouest (failles à vergence Est de Saquisili et de Nagsiche) et dans la partie est (faille à vergence Ouest de Yanayacu) de la vallée interandine (Dávila, 1990). Lavenu *et al.* (1995) ont calculé sur ces structures un raccourcissement E-W de 1720 ± 350 m et ont montré qu'il était distribué, aux incertitudes près, de moitié sur les structures occidentales (950 ± 170 m) et orientales (870 ± 175 m). D'autre part, Ego & Sébrier (1995) ont proposé que ces structures se connectent en profondeur respectivement avec les deux limites structurales de la vallée interandine, les systèmes de failles de Calacali-Palenque à l'Ouest et de Peltelec à l'Est. Au vu de ces résultats, on peut estimer que la vitesse totale de raccourcissement (2.1 ± 0.5 mm/a) est répartie équitablement respectivement sur les structures à vergence Ouest et Est. Ainsi, une vitesse de 1 ± 0.5 mm/a a été attribuée aux failles à vergence Est (Saquisili et Nagsiche) et à vergence Ouest (Yanayacu).

À partir de la vitesse de raccourcissement E-W (4.6 mm/a) calculée pour l'ensemble de la zone andine, nous avons émis l'hypothèse que la cordillère orientale et la zone subandine devaient accommoder une vitesse E-W de $(4.6-2.1) \pm 0.5$ mm/a, soit 2.5 ± 0.5 m/a. Il convient de signaler que ces vitesses sont très mal contraintes. Toutes les vitesses données dans la Table 4 sont des vitesses de raccourcissement normales à la faille.

La deuxième difficulté relève de l'attribution du pendage de ces failles. Le pendage influe directement sur la composante horizontale du déplacement le long de la faille, et donc sur le temps de récurrence. Pour la région de Latacunga, nous avons considéré un pendage moyen de 28° proposé par Lavenu *et al.* (1995). Pour la faille de Quito, deux pendages sont pris en compte successivement. Le premier correspond au pendage du plan nodal (55° W) du

séisme du 11/08/90 sous Quito (Table 1, Fig. 3) et le deuxième, de 30°W , constitue la valeur inférieure proposée par Soulas *et al.* (1991). Enfin, pour la faille du Reventador, nous avons considéré le pendage du plan nodal de ce séisme (20°W) (Table 1, Fig. 3) et avons attribué arbitrairement pour la faille de Borja-El Chaco ($\text{N}25^{\circ}\text{E}$), un pendage moyen de 45°W . La longueur de rupture pour la faille du Reventador (36 km) a été déterminée à partir de l'équation (2) (Table 3).

Pour le calcul du temps de récurrence, nous avons émis l'hypothèse que chaque faille, prise indépendamment, accommode l'intégralité de la vitesse de raccourcissement sur la zone considérée. Le temps de récurrence doit donc être considéré comme minimum. Pour la faille du Reventador, le temps de retour est entaché d'une incertitude ne dépendant que de celle de la vitesse, l'incertitude sur la magnitude étant inconnue.

3. 2. 3. Les failles normales

Un temps de récurrence de 5260 ± 11200 est associé à la faille de Girón (41.5 km). L'incertitude relative est de l'ordre de 2. On peut incriminer la grande incertitude sur la magnitude (7.0 ± 0.76), du fait que l'équation (1) (Table 3) ayant servi pour son calcul a un coefficient de corrélation de 0.81. D'autre part, la vitesse moyenne est entachée d'une incertitude représentant 57% de sa valeur. Deux vitesses de déplacement sur la faille ont été proposées. La première est de 0.5 mm/a (Winter *et al.*, 1990) et la deuxième de 0.2 mm/a (Winter, 1990). Nous avons moyenné ces deux vitesses soit 0.35 ± 0.15 mm/a. La vitesse d'extension horizontale est donc de 0.07 ± 0.04 mm/a, en tenant compte du pendage de cette faille (80°).

Pour la faille de Billecocha, nous avons seulement calculé à partir de l'équation (4) (Table 3) la magnitude associée à un rejet de 2.5 ± 0.3 m. Comme ces failles ne sont pas tectoniques, aucune vitesse et par conséquent aucun calcul de récurrence ne peut être estimé.

Au vu des résultats et selon les hypothèses et approximations posées, un séisme de magnitude maximale probable 7.5 tous les 800 ans au plus peut être attendu sur les failles décrochantes et de 7.6 tous les 1 800 ans au plus sur les failles inverses. La faille de Girón, quant à elle, peut engendrer un séisme de magnitude maximale probable 7.8 tous les 16 000 ans au plus.

Par ailleurs, l'ensemble des résultats est cohérent. Si l'on ne considère que la variation sur la longueur de faille, une diminution de cette dernière entraîne la diminution aussi bien des magnitudes que des temps de récurrences (e.g., failles du Rio Chingual-la Sofia, Pallatanga, Quito, Latacunga, Girón). Pour une longueur de faille donnée, la variation du pendage influe sur le temps de récurrence (e.g., faille de Quito).

De cette étude, il apparaît que le système transpressif dextre des hautes Andes est la source majeure d'aléa pour la région andine. Dans le Nord de la cordillère orientale, la faille du Rio Chingual peut engendrer un séisme de magnitude maximale probable de 7.5 tous les 400 ± 440 ans. Pour la région de Quito, un séisme maximum de 7.6 peut être attendu tous les 930 ± 300 à 1400 ± 460 ans suivant l'hypothèse formulée sur le pendage de la faille. Cette magnitude est la plus grande que nous ayons calculé sur les hautes Andes équatoriennes. Enfin, au Sud de la cordillère occidentale, la faille de Pallatanga peut produire un séisme maximum de 7.2 tous les 380 ± 320 ans.

4. CONCLUSION

L'étude de l'aléa sismique de l'Équateur a montré que d'importants séismes destructeurs de magnitude comprise entre 6 et 8.8 peuvent être attendus en Équateur. Les deux sources majeures d'aléa sismique sont la partie superficielle de la subduction pour la côte et le système transpressif dextre des hautes Andes nord équatoriennes pour la région andine.

La subduction peut engendrer un séisme de magnitude 8.8 aux effets dévastateurs (e.g., le séisme de 1906). La région côtière est donc directement menacée tant sur le plan humain qu'économique. En effet, sur la côte, Guayaquil est la ville qui compte le plus grand nombre d'habitants en Équateur. De plus, l'industrie pétrolière s'y trouve concentrée. Comme il existe un "aléa social et économique" sur cette région, un niveau sismique équivalent au séisme de 1906 ($M_w = 8.8$) pourrait être pris en compte pour la détermination du séisme maximum de dimensionnement. Cependant, il faut noter que la ville de Guayaquil n'a pas été détruite depuis le XVI^{ème} siècle.

Le système transpressif dextre représente la source sismogène majeure d'aléa pour la région andine. La faille décrochante dextre du Rio Chingual-La Sofia, dans la cordillère orientale, peut produire un séisme de magnitude maximale probable de 7-7.5 environ tous les 400 ± 440 ans. Dans cette région, bien qu'elle soit faiblement peuplée, passera la future route destinée aux transports pétroliers. En se référant au séisme du 06/03/87, une intensité de VIII a été répertoriée à Ibarra et de VI à Quito.

La vallée interandine qui représente structurellement le relais compressif est une région à forte concentration humaine. Pour la seule ville de Quito, une réactivation totale de la faille pourrait engendrer un séisme maximum probable de 7.6 tous les 930 ± 300 à 1400 ± 460 ans, suivant les hypothèses faites sur le pendage de la faille. Dans la région de Latacunga, un séisme de magnitude 6.3 à 7.2 peut se produire tous les 1120 ± 890 ans. L'existence d'un "aléa social" dans la vallée interandine implique que l'on doive prendre en compte sur cette région un niveau sismique égal au séisme maximum probable ($M_w = 7.6$) pour la détermination du séisme maximum de dimensionnement. Plus à l'Est, la zone transpressive de Baeza-Reventador constitue aussi un aléa sismique, si l'on se réfère au séisme de 1987. C'est par cette région que passe l'oléoduc alimentant les raffineries de la côte.

Enfin, au Sud dans la cordillère occidentale, la faille décrochante dextre de Pallatanga peut produire un séisme de magnitude maximale probable 6.7-7.2 tous les 380 ± 320 ans. C'est au travers de cette cordillère (Duran-Alausi) que se trouve l'une des voies d'accès majeures entre la côte et la vallée interandine et où se localisent quelques implantations hydroélectriques (e.g., la Josefina).

À l'exception des failles de Quito, Latacunga et Girón, les temps de récurrence sur les failles actives étudiées (Chingual, Pallatanga, Borja, Mindo et Baeza) varient entre 200 et 500 ans. Cependant, compte tenu des hypothèses réductrices qui ont été faites sur le comportement sismogénique des failles, il faut donc considérer que les temps de récurrence proposés sont minimum et/ou que le comportement sismogénique des failles décrites est plus compliqué et que l'on ne peut pas se contenter des simples paramètres géométriques et cinématiques dans l'estimation de l'aléa sismique.

À partir de la sommation des tenseurs des moments et en utilisant les équations de Molnar (1979), des temps de récurrence sur les Andes équatoriennes de 0.5, 4.5 et 45.4 ans ont

été calculés pour des séismes de magnitude $M_w = 5, 6$ et 7 . Cependant, au regard de la sismicité historique, il ne semble pas que les Andes équatoriennes aient été le siège, depuis ces 500 dernières années d'une dizaine de séismes de $M_w = 7$ et d'une centaine de séismes de $M_w = 6$. Cette sous-estimation des temps de récurrence peut provenir de la surestimation de l'énergie des séismes de $M_w > 5$ (39 %) dans le calcul de \bar{M}_0^2 et de la mauvaise connaissance des paramètres β et M_0^{\max} sur les Andes équatoriennes.

Les incertitudes sur les paramètres β et M_0^{\max} ayant servi au calcul des temps de récurrence sont grandes. Il est donc indispensable, si l'on veut mieux contraindre l'aléa sismique sur les Andes équatoriennes, de développer un réseau sismologique local et d'approfondir l'étude néotectonique en cours. Les données de sismicité permettront de contraindre avec précision β . L'étude néotectonique et l'acquisition de données paléosismiques permettront de déterminer avec précision le M_0^{\max} sur les Andes équatoriennes, de mieux contraindre les vitesses de glissement sur les failles et les fréquences de séismes et de déterminer sur chaque faille la part de glissement asismique et sismique. Le but ultime de cette étude sera de déterminer un modèle de comportement sismogénique pour les failles des Andes Nord équatoriennes.

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre d'un programme de recherche entre l'Institut Français d'Études Andines (IFEA), l'Institut Français de Recherche pour le Développement en Coopération (ORSTOM) et l'Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica de Quito (EPN). Nous tenons à remercier Messieurs R. Marocco, C. de Muizon et H. Yopez pour avoir soutenu l'ensemble de ces travaux et Messieurs D. Hatzfeld et T. Winter pour leurs remarques constructives et pertinentes contribuant à l'amélioration de cet article.

Références citées

- ABE, K., 1979 - Size of great earthquakes of 1837-1979 inferred from tsunami data. *Journal of Geophysical Research*, **84** : 1561-1568.
- AGGARWAL, Y.P., SOULAS, J.-P. & GARCÍA, D., 1983 - Contemporary tectonics of the Venezuelan Andes and Northern Colombia. 10th Caribbean Geological Conference : 16-17, Cartagena, Colombia.
- AKI, K., 1972 - Scaling law of earthquakes source time fonction. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, **31** : 3-25.
- AKI, K., 1984 - Asperities, barriers, characteristic earthquakes and strong motion prediction. *Journal of geophysical Research*, **Vol 89, B7** : 5867-5872.
- AKI, K. & RICHARDS, P.G., 1980 - *Quantitative seismology: Theory and Method*, 932p, New York, San Francisco : W.H. Freeman and Co.
- BACKUS, G.E., 1977 - Interpreting the seismic glut moment of total degree two or less. *Geophysical Journal of the Royal Astronomy Society*, **51** : 1-25.
- BARBERI, F., BELLONI, L., FERRARI, L., PASQUARE, G., PREVITALI, F., TIBALDI, A. & ZONNO, G., 1988 - *Riesgo sísmico, Proyecto hidroeléctrico Coca Codo-Sinclair. 0209-A-158, Anexo H: Sismología y Tectónica*, 162p. + annexes.
- BEAUDOUIN, T., BELLIER, O. & SÉBRIER, M., 1995 - Segmentation et aléa sismique sur la Grande Faille de Sumatra (Indonésie). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, tome **321, II a**, sous presse.

- BECK, S.L. & RUFF, L.J., 1984 - The rupture process of the great 1979 Colombia earthquake: Evidence from the asperity model. *Journal of Geophysical Research*, **89** : 9281-9291.
- BEN-MENAHEN, A. & SINGH, S.J., 1981 - *Seismic waves and sources*. Springer Verlag, 1108p., New York.
- BRUNE, J.N., 1968 - Seismic moment, seismicity, and rate of slip along major fault zones. *Journal of Geophysical Research*, **Vol 73** : 777-784.
- CAMPBELL, C.J., 1974 - Ecuadorian Andes. In : *Mesozoic-cenozoic Orogenic Belts, data for orogenic studies*, geological society of London: 725-732, special Publication 4.
- CERESIS (Centro Regional de Sismología para América del Sur), 1985 - *Catálogo de terremotos para América del Sur*, Vol 6.
- CHEN, W. & MOLNAR, P., 1977 - Seismic moments of major earthquakes and the average rate of slip in Central Asia. *Journal of Geophysical Research*, **Vol 82**, **20** : 2945-2969.
- COYNE & BELLIER, 1988 - *Projet Mica Tambo, Annexe Sismologie*, 144p.
- CRONE, A.J. & HALLER, K.M., 1991 - Segmentation and the coseismic behavior of the Basin and Range normal faults: examples for east-central Idaho and southwestern Montana, USA. *Journal of Structural Geology*, **13**, **2** : 151-164.
- DAVIES, G.F. & BRUNE, J.N., 1971 - Regional and global fault rates from seismicity. *Nature Physics Science*, **229** : 101-107.
- DÁVILA, F., 1990 - Geodinámica Plio-Cuaternaria de la cuenca de Latacunga-Ambato, Callejón Interandino. Sector entre Salcedo y Pillaro. Tesis de grado, EPN, Quito, 192p.
- DE POLO, C.M., CLARK, D.G., SLEMMONS, D.F. & RAMELLI, A.R., 1991 - Historical surface faulting in the Basin and Range province, Western North America: implication for segmentation. *Journal of Structural Geology*, **13**, **2** : 123-136.
- DALY, M.C., 1989 - Correlations between Nazca / farallon Plate kinematics and forearc basin evolution in Ecuador. *Tectonics*, **Vol 8**, **4** : 769-790.
- DZIEWONSKI, A.M. & WOODHOUSE, J.H., 1983 - *Studies of the seismic source using normal-mode theory, Earthquakes: Theory and interpretation*, 608p., H. North-Holland, Amsterdam, New York, Oxford : Kanamori & E. Boschi, Editors.
- DZIEWONSKI, A.M., FRANZEN, J.E. & WOODHOUSE, J.H., 1985 - Centroid-moment tensor solutions for April-June 1984. *Physics of the Earth and Planetary Interior*, **37** : 87-96.
- DZIEWONSKI, A.M., EKSTRÖM, G. & WOODHOUSE, J.H., 1988 - Centroid-moment tensor solutions for July-September 1987. *Physics of the Earth and Planetary Interior*, **53** : 1-11.
- DZIEWONSKI, A.M., EKSTRÖM, G., WOODHOUSE, J.H. & ZWART, G., 1991a - Centroid-moment tensor solutions for July-September 1990. *Physics of the Earth and Planetary Interior*, **67** : 211-220.
- DZIEWONSKI, A.M., EKSTRÖM, G., WOODHOUSE, J.H. & ZWART, G., 1991b - Centroid-moment tensor solutions for October-December 1990. *Physics of the Earth and Planetary Interior*, **68** : 201-214.
- EGO, F., 1993 - Risques sismiques et néotectonique en Équateur. *Pangea*, **19** : 16-21.
- EGO, F., SÉBRIER, M., LAVENU, A., EGUEZ, A. & YEPEZ, H., 1993 - A new geodynamical model for the northern Ecuadorian Andes. *Terra abstract* **5** (1) : 203, EUG VII, 4-8 April 1993.
- EGO, F., SÉBRIER, M. & YEPEZ, H., 1995a - Is Cauca-Patia and Romeral fault system left or right-lateral? *Geophysical Research Letter*, **22**, **1** : 33-36.
- EGO, F., SÉBRIER, M., LAVENU, A., YEPEZ, H. & EGUEZ, A., 1995b - Quaternary state of stress in northern Andes and the restraining bend model for the Ecuadorian Andes. *Tectonophysics*, sous presse.
- EGO, F., SÉBRIER, M. & BEATE, B., 1995c - Are the normal faults of Billecocha significant for lithospheric body forces in northern Andes? *Accepté à Tectonophysics*.
- EGO, F. & SÉBRIER, M., 1995 - Regional structural analysis of the Ecuadorian Inter-Andean Valley (Quito). Geodynamic implications. Soumis à *Annales Tectonicae*.
- EGRED, J., 1986 - Estudio histórico de los deslizamientos de terreno, de las grietas y de la licuefacción, asociados a sismos. Note interne dans COYNE & BELLIER, 1988.
- FERRARI, L. & TIBALDI, A., 1992 - Recent and active tectonics of the northeastern Ecuadorian Andes. *Journal of Geodynamics*, **Vol 15**, **1/2** : 39-58.
- GRANJA, J., 1974 - Estudio sísmico geológico del terremoto de Alausi. Informe de la Universidad Central, Quito, Ecuador.
- HANKS, T.C. & KANAMORI, H., 1979 - A moment magnitude scale. *Journal of Geophysical Research*, **89** : 5771-5790.
- HERD, D.G., YOUND, T.T., MEYER, H., ARANGO, J.L., PERSON, W.J. & MENDOZA, C., 1981 - The great Tumaco, Colombia earthquake of 12 December 1979. *Science*, **211** : 441-445.

- HERRMANN, R.B., 1975 - A student's guide to the use of P and S wave data for focal mechanism determination. *Earthquake Notes*, **46** : 29-39.
- HOANG-TRONG, P. & ROULAND, D., 1993 - Strike-slip or reverse faulting earthquake: consequences on the aftershock activity and prediction of the occurrence of large aftershocks. *Tectonophysics*, **217** : 195-203.
- KANAMORI, H., 1977 - The energy release in great earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, **82** : 2981-2987.
- KANAMORI, H. & MC NALLY, K.C., 1982 - Variable rupture mode of the subduction zone along the Ecuador-Colombia coast. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **72** : 1241-1253.
- KAWAKATSU, H. & PROAÑO-CADENA, G., 1991 - Focal mechanisms of the March 6, 1987 Ecuador earthquakes, CMT inversion with a first motion constraint. *Journal of Physics of the Earth*, **39** : 589-597.
- KELLEHER, J.A., 1972 - Rupture zones of large South America earthquakes and some predictions. *Journal of Geophysical Research*, **77** : 2087-2103.
- KOSTOV, V.V., 1974 - Seismic moment and energy of earthquakes, and seismic flow of rock. *Izv. Acad. Sci. URSS Phys. Solid Earth*, **1** : 23-44.
- LAVENU, A., WINTER, T. & DÁVILA, F., 1995 - A Pliocene-quaternary compressional basin in the Inter-Andean Depression, Central Ecuador. *Geophysical Journal International*, **121** : 279-300.
- MARCHANT, S., 1961 - A photogeological analysis of the structures of the western Guayas Province, Ecuador. *Geological Society of London, Quaternary Journal*, **117** : 215-231.
- MENDOZA, C. & DEWEY, J.W., 1984 - Seismicity associated with the great Colombia-Ecuador earthquake of 1942, 1958, 1979: implication for barrier models of earthquake rupture. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **74** : 577-593.
- MERCIER, J.-L., SÉBRIER, M., LAVENU, A., CABRERA, J., BELLIER, O., DUMONT, J.-F. & MACHARÉ, J., 1992 - Changes in the tectonic regime above a subduction zone of Andean type: The Andes of Peru and Bolivia during the Pliocene- Pleistocene. *Journal of Geophysical Research*, **97**, **B8** : 11 945-11 982.
- MOLNAR, P., 1979 - Earthquake recurrence intervals and plate tectonics. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **Vol 69**, **1** : 115-133.
- MORA, H. & KELLOGG, J.N., 1995 - Tectonics of northwestern South America, CASA GPS measurements. *EOS*, **April 25** : T21A-3.
- NOBOA, F.J., 1984 - Desarrollo histórico y evolución social de las primeras casas quiteñas y de la Plaza Mayor entre 1534 y 1912. *Cultura, Revista del Banco Central del Ecuador*, **7**, **20** : 311-369.
- OAE (Observatorio Astronómico de Quito), 1959 - *Breve historia de los principales terremotos en la república del Ecuador*, 27p., Quito : Publicación del comité del año Geofísico Internacional del Ecuador.
- PENNINGTON, W.D., 1981 - Subduction of the eastern Panama Basin and seismotectonics of northwestern South America. *Journal of Geophysical Research*, **86**, **B11** : 10753-10770.
- ROBALINO, F., 1976 - Espesor de la corteza en Quito mediante el análisis del espectro de las ondas longitudinales P de período largo. *Revista del Colegio de Ingenieros Geológicos de Minas y Petroleos* : 25-69.
- SCHOLZ, C.H., 1990 - *The mechanics of earthquakes and faulting*, 439p., Cambridge University Press.
- SCHWARTZ, D.P. & COPPERSMITH, K.J., 1984 - Fault behavior and characteristic earthquakes: Examples from the Wasatch and San Andreas Fault zones. *Journal of Geophysical Research*, **89**, **B7** : 5681-5698.
- SÉBRIER, M., MERCIER, J.L., MACHARÉ, J., BONNOT, D., CABRERA, J. & BLANC, J.-L., 1988 - The state of stress in an overrinding plate situated above a flat slab: the Andes of Central Peru. *Tectonics*, **7** (4) : 895-928.
- SÉBRIER, M., MERCIER, J.-L., MÉGARD, F., LAUBACHER, G. & CAREY-GAILHARDIS, E., 1985 - Quaternary normal and reverse faulting and the state of stress in Central Andes of South Andes. *Tectonics*, **4** (7) : 739-780.
- SIPKIN, S.A. & NEEDHAM, R.E., 1994 - Moment-tensor solutions estimated using optimal filter theory: global seismicity, 1992. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **82** : 1-7.
- SOULAS, J.-P., 1986 - Neotectónica y tectónica activa en Venezuela y regiones vecinas. in : *VI Congreso de la geología del Venezuela*, t. 10 : 6639-6656, Venezuela, Caracas.
- SOULAS, J.-P., 1988 - Informe de misión en el Ecuador, 21p., Proyecto UNDRO-EPN. Programa de prevención y planificación para desastres en el Ecuador y países vecinos. Genève, Suisse : UNDRO.
- SOULAS, J.-P., EGUEZ, A., YEPES, H. & PÉREZ, H., 1991 - Tectónica activa y riesgo sísmico en los Andes ecuatorianos y el extremo sur de Colombia. *Boletín de Geología Ecuatoriano*, **Vol 1**, n°1 : 3-9.

- SUAREZ, G., MOLNAR, P. & BURCHFIEL, B.C., 1983 - Seismicity, fault plane solution, depth of faulting, and active tectonics of the Andes of Peru, Ecuador and southern Colombia. *Journal of Geophysical Research*, Vol 88, B12 : 10, 403-10, 428.
- SWENSON, J.L. & BECK, S.L., 1995 - Historical 1942 Ecuador and 1942 Peru subduction earthquakes, and earthquakes cycles along Colombia-Ecuador and Peru subduction segments. *Soumis à Pageoph.*
- TIBALDI, A. & FERRARI, L., 1991 - Multisource remotely sensed data, field checks and seismicity for the definition of active tectonics in Ecuadorian Andes. *International Journal of Remote Sensing*, Vol 12, 11 : 2343-2358.
- TIBALDI, A. & FERRARI, L., 1992 - Latest pleistocene-holocene tectonics of the ecuadorian Andes. *Tectonophysics*, 205 : 109-125.
- U.S.G.S., N.E.I.C., 1995 - World Data Center. A for Seismology. Listing, 1977 to 1995. U.S. Dept. of the Interior.
- WELLS, D. & COPPERSMITH, K.J., 1994 - Updated empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the Seismological society of America*, 8, 4 : 974-1002.
- WESNOUSKY, S.G., SCHOLZ, C.H. & SHIMAZAKI, K., 1982 - Deformation of an island arc: rates of moment release and crustal shortening in intraplate Japan determined from seismicity and Quaternary fault data. *Journal of Geophysical Research*, Vol 87 : 6829-6852.
- WINTER, T. & LAVENU, A., 1989 - Morphological and microtectonic evidence for a major active right lateral strike-slip fault across Central Ecuador (South America). *Annales Tectonicae*, III, 2 : 123-139.
- WINTER, T., 1990 - Mécanismes de déformation récentes dans les Andes équatoriennes. Thèse de l'Université d'Orsay, Paris-Sud, 205p.
- WINTER, T., IGLESIAS, R. & LAVENU, A., 1990 - Presencia de un sistema de fallas activas en el sur del Ecuador. *Boletín Geológico Ecuatoriano*, 1, 1 : 53-67.
- WINTER, T., AVOUAC, J.-P. & LAVENU, A., 1993 - Late Quaternary kinematics of the Pallatanga strike-slip fault (Central Ecuador) from topographic measurements of displaced morphological features. *Geophysical Journal International*, 115 : 905-920.
- WOLF, T., 1892 - *Geografía y geología del Ecuador*. Edición 1975, Quito: Casa de la cultura Equatoriana.
- WOLF, T., 1904 - *Crónica de los fenómenos volcánicos y terremotos en el Ecuador*, Quito: Imprenta de la Universidad Centralo.

ANNEXE

LA SISMICITÉ HISTORIQUE ET INSTRUMENTALE DE L'ÉQUATEUR

Depuis le début de la colonisation espagnole, l'archivage historique nous permet de retracer la sismicité historique de l'Équateur de 1541 à 1955. En 1901, les premières données instrumentales apparaissent et les premiers mécanismes au foyer sont réalisés dans les années 50. Nous avons reproduit ici les 21 séismes historiques et instrumentaux les plus dévastateurs et présenté quatre séismes récents ayant affecté les Andes équatoriennes. Ils sont énumérés ci-dessous par ordre chronologique et par région géographique. Les données sont principalement tirées du catalogue CERESIS (1985), sauf pour les séismes de subduction.

1. Les séismes instrumentaux de la subduction

1-. Séisme du 31/01/1906 ($M_w = 8.8$; $81^\circ W$, $1^\circ N$). Ce séisme a généré un tsunami de 36 cm sur les côtes japonaises ainsi qu'un important tsunami local (Swenson & Beck, 1995). Kelleher (1972) exclut l'hypothèse d'un séisme en faille normale, à partir du fait que d'importantes destructions ont été répertoriées jusqu'à plus de 100 km à l'intérieur des terres (Fig. 5). Les premières arrivées des ondes P confirment cette hypothèse (Swenson & Beck, 1995). Une longueur de rupture de 500 km a été estimée par Kelleher (1972) à partir des déformations enregistrées le long de la côte et de la distribution des intensités. À partir de cette longueur de rupture, Kanamori (1977) a déterminé un moment sismique de $2 \cdot 10^{22}$ Nm, soit une magnitude $M_w = 8.8$. Cette magnitude est en accord avec la magnitude du tsunami ($M_t = 8.7$) calculée par Abe (1979). La zone de rupture est confinée entre l'extrémité Nord de la ride Carnegie (0°) et la zone de changement d'azimut de la fosse colombienne au Nord ($4^\circ N$).

2-. Séisme du 14/05/1942 ($M_w = 7.8 - 7.9$; $0.01^\circ N$, $80.39^\circ W$). Ce séisme a été produit par la réactivation de la partie Sud de la rupture de 1906 (Fig. 5). Swenson & Beck (1995) ont calculé pour ce séisme un moment sismique de $6-8 \cdot 10^{20}$ Nm ($M_w = 7.8 - 7.9$) et une longueur de rupture de 200 km.

3-. Séisme du 19/01/1958 ($M_w = 7.7$; $1.14^\circ N$, $79.59^\circ W$). Ce séisme a été produit par la réactivation partielle de la partie centrale de la rupture de 1906 (Kanamori & McNally, 1982 ; Beck & Ruff, 1984). Un moment sismique de $2.8 \cdot 10^{20}$ Nm a été déterminé ainsi qu'une longueur de rupture de 50 km (Beck & Ruff, 1984). La rupture s'est propagée du Sud au Nord et s'est arrêtée sur la zone épiscopale du séisme du 12/12/1979 (Fig. 5) décrit ci-après (Mendoza & Dewey, 1984). Un tsunami a endommagé en partie la petite ville côtière d'Esmeraldas.

4-. Séisme du 12/12/1979 ($M_w = 8.15$; $2.32^\circ N$, $78.81^\circ W$). Il a été produit par la réactivation de la partie Nord de la rupture de 1906 (Fig. 5) et a engendré un tsunami destructeur tout le long de la côte Nord équatorienne-Sud colombienne (Herd *et al.*, 1981). Par l'analyse des ondes P, Beck & Ruff (1984) ont déterminé une longueur de rupture de 120 km. Cependant, l'analyse des ondes de surface donnerait une longueur de rupture de 180 à 240 km. À partir des retards des ondes de Rayleigh, Kanamori & McNally (1982) ont déterminé une longueur de rupture de 230 km.

2. Les séismes historiques et instrumentaux des Andes(s. I.)

1.- Séisme d'avril 1541 (Quijos, I=IX) (Egred, 1986). Ce séisme représente le premier événement sismique historique connu dans les Andes équatoriennes, mais est malheureusement très peu documenté. Il semble qu'il n'ait été ressenti que très localement et principalement à Quijos, à une quinzaine de kilomètres au Sud du Reventador sur le versant Est de la cordillère orientale, où une soixantaine de maisons ont été détruites (Wolf, 1904). Aucune destruction n'a été répertoriée à Quito et plus généralement tout au long de la vallée interandine. En l'absence d'information sur la zone subandine, il nous est difficile de nous prononcer sur la localisation précise de l'épicentre. Le fait que les dégâts soient très locaux, et qu'il n'ait été que très faiblement ressenti dans la vallée interandine, exclut une origine profonde pour ce séisme. La faille source pourrait être l'une des failles inverses N-S de la zone compressive de Reventador-Baeza, comme celle de Borja.

2.- Séisme du 4/09/1587 (Quito, I=X ; Otavalo, I=VII). Ce séisme fait partie d'une séquence sismique allant du 28/08/1587 au 4/09/1587. Quito est détruite en grande partie ainsi que la ville d'Otavalo, mais de manière moindre, quelques dizaines de morts (Wolf, 1904). Wolf (1892) signale que des destructions ont été répertoriées dans un rayon de 100 km autour de Quito. La durée de la crise sismique (1 semaine) et l'étendue des dégâts seraient en faveur d'une origine profonde pour ce séisme, probablement la subduction intermédiaire.

3.- Séisme du 26/06/1627 (Quito, I = ?). Plusieurs maisons sont détruites ainsi que le palais de l'administration coloniale (Noboa, 1984).

4.- Séisme du 15/03/1645 (Riobamba Antigua, I=IX ; Baños, I=VIII ; Quito, I=V). La ville de Riobamba Antigua fut partiellement détruite. Comme aucune information n'est disponible sur la côte et dans la zone subandine, il est difficile de déterminer son origine.

5.- Séisme de Janvier 1661 (Quito, I=VI). Grands glissements de terrain et formation de coulées de boue sur les pourtours du volcan Sincholagua (CERESIS, 1985). Très peu d'informations sont disponibles sur ce séisme.

6.- Séisme du 29/08/1674 (Alausi, I=X). La ville d'Alausi fut totalement détruite et la ville de San Miguel de Chimbo (I=VIII) fut recouverte par un glissement de terrain (CERESIS, 1985). D'importantes secousses ont été ressenties à Riobamba Antigua (I=VIII) et dans la région de Chimbo, des fentes se sont ouvertes sur 25 km de long. En 1961, un autre séisme se produisit dans la région (I=VIII). Ce séisme a été attribué à la faille de Pallatanga qui suit la vallée du rio Chimbo (Granja, 1974).

7.- Séisme du 22/11/1687. Une forte secousse est ressentie dans la vallée interandine entre les villes d'Ambato et Latacunga (I=VIII) (Wolf, 1904 ; *Observatorio Astronómico de Quito*, 1959 ; CERESIS, 1985). Très peu d'informations sont disponibles sur ce séisme.

8.- Séisme du 20/06/1698 (Ambato, I=X ; Riobamba, I=IX) (Fig. 6). Destruction totale de la ville d'Ambato avec ouverture de fissures N-S de 5 km de long (3 000 morts). La ville de Latacunga (I=IX) fut en partie détruite faisant 2 000 morts et 1 500 dans les villages avoisinants. L'origine de ce séisme et sa localisation sont très difficiles à estimer car il n'existe pas d'information concernant les dégâts enregistrés sur la côte et dans la zone subandine.

9.- Séisme du 06/12/1736. Les villages de Pastocalle, Saquisili et Pujili (I=VIII) ainsi que la ville de Latacunga (I=VII), furent partiellement détruits (Wolf, 1904 ; *Observatorio Astronómico de Quito*, 1959 ; CERESIS, 1985). Ce séisme n'a été que partiellement ressenti à Quito (I=IV). Winter (1990) a signalé que les effets de ce séisme dans la région de Latacunga étaient comparables au séisme du 06/10/1976 (Table 1, Fig. 3) (0.76°S, 78.75°W, Mw=5.8, P=16 km) localisé sur la bordure occidentale de la vallée interandine. La faille source pourrait être l'une des failles inverses N-S associées aux plis Quaternaires de Latacunga.

10.- Séisme du 26/04/1755 (Quito, I=IX). La ville de Quito est partiellement détruite, mais aucune autre destruction n'a été répertoriée en Équateur (Wolf, 1904 ; *Observatorio Astronómico de Quito*, 1959). Ce séisme semble très local et pourrait être associé au fonctionnement de la faille de Quito.

11.- Séisme du 22/02/1757 (Latacunga, I=IX). La ville fut presque totalement détruite ainsi que les villages de Toascaso, Saquisili et Pujili et la ville d'Ambato (I=VIII) (Wolf, 1892 ; 1904 ; CERESIS, 1985). Des répliques se sont fait sentir pendant environ 6 mois. D'importants glissements de terrain ont affecté la région du Cerro Culachapan. Ce tremblement de terre n'a pas été ressenti à Quito (Wolf, 1892). La zone épicertrale semble très réduite (Fig. 6) (Winter, 1990). On peut supposer que ce séisme est d'origine superficielle et associé au fonctionnement de l'une des failles inverses N-S responsables de la formation des plis de la région de Latacunga.

12.- Séisme du 04/02/1797 (Riobamba Antigua, I=XI). Destruction totale de la ville de Riobamba antigua recouverte par de nombreux glissements de terrain. Le nombre de victimes serait d'environ 20 000 morts (Wolf, 1904). Ce tremblement de terre semble être limité à la vallée interandine. Il a cependant provoqué un bouleversement géographique important dans toute la région de Riobamba. Une magnitude de 8.3 (*Observatorio Astronómico de Quito*, 1959) lui a été attribué en utilisant la relation de Gutenberg-Richter ($M = 1 + 2/3 I_0$), ce qui est sans doute surestimé par rapport au séisme de Pelileo en 1949 (I=IX, Ms=6.8). Une intensité de VII a été reportée à Quito (Fig. 6), 160 km plus au Nord, ce qui tendrait à montrer la grande énergie de ce séisme qui pourrait être lié à la subduction.

13.- Séisme du 22/03/1859 (Quito, I=VIII). De nombreuses églises et maisons ainsi que le palais présidentiel subirent de nombreuses et graves avaries. Ce tremblement de terre a fait une cinquantaine de morts (Wolf, 1892 ; CERESIS, 1985).

14.- Séisme du 16/08/1868 (Otavalo, I=X ; Ibarra, I=IX). Destruction totale des villages entre Otavalo et Urcuqui sur la bordure occidentale de la vallée interandine. Ibarra est sévèrement touchée et Quito (I=VII) subit de légères destructions. Le nombre de victimes se situe entre 15 000 et 20 000 morts (Wolf, 1904). Il faut noter que la veille, la petite ville de El Angel (30 km au Nord d'Ibarra) fut détruite par un séisme d'intensité VII (*Observatorio Astronómico de Quito*, 1959). Sur la côte, il a été ressenti avec une intensité de IV, où aucun tsunami n'a été répertorié (Swenson & Beck, 1995). Ceci tendrait à montrer qu'il ne s'agit pas d'un séisme superficiel de subduction. Comme les destructions majeures sont assez concentrées dans un rayon de 30 km autour de la zone épiscopale (I=X) (Fig. 6), une origine superficielle pourrait lui être attribuée. Cependant, les effets de ce séisme ont été ressentis dans toute la vallée interandine, jusqu'à 250 km au Sud et au moins 120 km vers le Nord en Colombie (CERESIS, 1985 ; Coyne & Bellier, 1988).

15.- Séisme du 5/02/1923 (Machachi, I=VIII). D'importants dégâts dans la ville à 20 km au Sud de Quito. Quelques dommages ont été répertoriés à Saquisilí (*Observatorio Astronómico de Quito*, 1959).

16.- Séisme du 25/07/1929 (Quito, I=VIII). Forte secousse sismique qui provoque la destruction de quelques maisons à l'est de Quito (*Observatorio Astronómico de Quito*, 1959 ; CERESIS, 1985). Les effets de ce séisme sont apparemment très locaux et son origine pourrait être liée au fonctionnement de la faille de Quito.

17.- Séisme du 10/08/1938 (Tingo et Alangasi, I=IX). Destructions des villages se situant à 15 km au Sud-Est de Quito (I=V), comme El Tingo, Alangasi et Sangolquí (I=VIII) (*Observatorio Astronómico de Quito*, 1959 ; CERESIS, 1985). On note une diminution des intensités vers le Nord et le Sud (Cayambe et Otavalo, I=IV ; Machachi, I=III), mais aussi vers l'Est (Pifo et Pintag, I=V) (Fig. 6). Ce séisme serait un événement local assez superficiel, probablement en relation avec la faille de Quito.

18.- Séisme du 05/08/1949 (Pelileo (I=XI, Ms=6.8, P=60 km, CERESIS, 1985). La ville fut complètement détruite et disparition de plus de 10% de la population. D'importants glissements de terrain ont bloqué le Rio Patate. Les villes de Baños (I=IX), Latacunga et Ambato (I=VIII) furent sévèrement touchées. Aux alentours de Pelileo, de nombreuses fentes se sont ouvertes selon une direction N35°E. Ce séisme a été ressenti à 100 km à l'Est, dans la ville de Tena avec une intensité de V, et à 60 km à l'Ouest, dans la ville de Guaranda avec une intensité de V. Ce séisme pourrait s'être produit dans la zone de subduction intermédiaire à l'aplomb de la cordillère.

19.- Séisme du 23/02/1973 (zone subandine, lat : 2.16°S, long : 78.33°W, prof : 10 km, Mw= 6). Ce séisme superficiel a un mécanisme focal en compression selon une direction E-W. Le plan nodal (N26°E), sub-parallèle aux structures de la zone Sub-Andine, montre un jeu inverse dextre, compatible avec une compression E-W (Table 1, Fig. 3).

20.- Séisme du 06/10/1976 (Pilango, Pastocalle, I=IX, lat : 0.8°S, long : 78.88°W, prof : 16 km, Mw= 5.81). Ce séisme superficiel, localisé dans la chaîne équatorienne a un mécanisme focal en compression et le plan nodal (N12°E), parallèle aux structures de la cordillère occidentale, a un mouvement dextre inverse. Le plan fortement oblique (N143°E) aux structures de la chaîne, a quant à lui un jeu sénestre inverse (Table 1, Fig. 3).

21.- Crise sismique du 06/03/1987 (Reventador, I=IX) (Table 1, Fig. 3). Dommages enregistrés à Quito (I=VI) et à Cayambe (Fig. 7). Isolement total de la province du Napo et interruption de la production de pétrole et de gaz pendant 6 mois. 1 000 morts et 4 000 disparus (perte de 1 milliard de dollars soit 1/3 du budget de l'état équatorien). Cette crise sismique précédemment décrite est caractérisée par trois séismes majeurs sans rupture de surface. Le premier s'est produit à 1h54 mm TU (lat : 0.09°N, long : 77.37°W, prof : 10 km, Mw=6.3), le deuxième à 4h10 mm TU (lat : 0.19°N, long : 77.19°W, prof : 10 km, Mw=7.0) et le troisième à 8h14 mm TU (lat : 0.01°N, long : 77.96°W, prof : 10 km, Mw=5.8). Cette crise sismique a été interprétée comme comportant un séisme précurseur, un séisme principal et une série de répliques dont une majeure (Kawakastu & Proaño-Cadena, 1991 ; Hoang-Trong & Rouland, 1993). Les répliques dans la majeure partie des cas, ont une magnitude inférieure à celle du choc principal et ne sont pas toujours compatibles avec l'état de contrainte régional. Cependant, bien que la magnitude du troisième séisme soit nettement inférieure à celle du choc principal, sa solution focale est tout à fait compatible avec l'état de contrainte régional. De plus, le fait que ces trois séismes soient localisés sur des segments différents laisserait penser qu'il s'agit d'une séquence de trois chocs successifs. Cette crise sismique est assez analogue à celle du séisme d'El Asnam du 10/10/1980. Nous pourrions donc évoquer ici un phénomène de barrière (Aki, 1984) pour expliquer l'occurrence de ces trois séismes.

22.- Les séismes du 22/09/1987 (cordillère orientale, S1 : lat : 0.89°S, long : 78.24°W, prof : 15 km, Mw= 6.4 ; S2 : lat : 0.98°S, long : 78.24°W, prof : 19.4 km, Mw= 6.02) (Table 1, Fig. 3). Ces deux séismes se sont produits à trois heures d'intervalle, vraisemblablement sur le même segment de faille, ce qui laisserait supposer des ruptures selon le modèle d'aspérité.

23.- Séisme du 11/08/1990 (Pomasqui, 8km au Nord de Quito, I=VII, lat : 0.01°N, long : 78.15°W, prof : 6km, Mw=5.3) (Table 1, Fig. 3). Ce séisme s'est produit sous le pli Nord de Quito. Son mécanisme focal est en compression selon une direction E-W. Le plan nodal (N10°E), parallèle à l'axe du pli, montre un jeu inverse avec une légère composante décrochante dextre en accord avec la présence d'une faille inverse sous le pli.

L'ensemble de l'activité sismique historique dans les Andes équatoriennes semble donc se concentrer principalement dans la vallée interandine et se distribue entre les villes d'Ibarra (0°20'N) et d'Alausi (2°10'S). Il n'est pas à exclure que d'importants séismes historiques se soient produits dans les deux cordillères et dans la zone subandine. Cependant, par manque d'implantation humaine importante, ces tremblements de terre n'ont soit pas été ressentis, soit leur épïcêtre n'a pas pu être localisé avec précision. Néanmoins, trois séismes destructeurs majeurs ont été répertoriés, le premier dans le sud la cordillère orientale d'Équateur (Quijos, 1541), le deuxième dans la cordillère orientale de Colombie (La Providencia, 16/10/1827) et le troisième dans le nord de la cordillère orientale d'Équateur (Reventador, 06/03/1987).

FALLA ACTIVA DE QUITO Y FUENTES SISMOGENÉTICAS REGIONALES: UN ESTUDIO DEL RIESGO SÍSMICO DE QUITO (ECUADOR) CON EL ANÁLISIS DE LOS SEDIMENTOS CUATERNARIOS

*Christian Hibscht**, *Alexandra P. Alvarado****,
*Hugo A. Yepes***, *M. Sébrier****, *V. Hugo Pérez*** (†)

Resumen

A lo largo de los 460 años de historia escrita que tiene la ciudad de Quito, se han registrado varios eventos sísmicos que alcanzaron intensidades de hasta IX grados en la escala MSK. Dentro de las numerosas fuentes sismogénicas que pueden generar daños en la ciudad, se identifica la falla de Quito, cuya actividad es susceptible de producir intensidades superiores a VIII grados, haciendo de ella una fuente de alto peligro para la ciudad. En el registro histórico, se atribuye al sismo de 1755 como producido por la actividad de esta falla, el mismo que reportó intensidades de VIII-IX (MSK) en Quito. A fin de conocer la velocidad de esta falla y la recurrencia de los eventos mayores, que seguramente sobrepasan los 500 años de sismicidad histórica, se tuvo que recurrir al análisis del registro geológico. La paleosismicidad se ha definido mediante el análisis de las evidencias de paleolicuefacción producida por los terremotos que afectaron a los sedimentos holocénicos de la parte baja de la ciudad. Durante el análisis de estos sedimentos, se encontraron manifestaciones de la paleosismicidad debida tanto a la actividad de las fuentes regionales, como también a la actividad de la falla de Quito, que se manifestaron bajo la forma de estructuras de licuefacción, algunas fallas sinsedimentarias y deformaciones sismotectónicas. Un registro paleosísmico relativamente completo se encontró en la cuenca norte, en el afloramiento en la Calle Pinzón, donde se reconocieron unos veinte niveles de paleolicuefacción mostrándose principalmente como capas contorneadas o invaginaciones, que se producen en el fondo de los lagos en la interfase agua-sedimento. Comparando estos niveles deformados con los ejemplos de la literatura, con las relaciones entre aceleración horizontal obtenidas en función de la intensidad ($\log a_H = 0.014 + 0.30I_{MM}$) y con la distribución de la sismicidad histórica, se propone una escala de intensidades sísmicas deducidas de la intensidad de la deformación provocada por la licuefacción. La distribución de las intensidades definidas con esta escala muestra una buena coherencia con la distribución de intensidades del registro histórico para valores de intensidad > VI (MM/MSK). El uso de la sismicidad histórica y de la paleosismicidad geológica define una recurrencia media de 115 años para los eventos que superan una intensidad de VII. Hay que notar que el último evento sísmico relacionado con este rango de intensidad ocurrió en 1868, hace más de 125 años; pero hay que considerar que en los 460 años de historia, el tiempo transcurrido entre eventos puede variar entre 9 y 168 años para

* Instituto Francés de Estudios Andinos. Casilla 171106596, Quito, Ecuador. Fax: 593-2 449-919 (Ecuador) o Francia: Laboratoire de Géologie des Ensembles Sédimentaires, Université Henri Poincaré, Fac. des Sciences, BP 239, 54506 Vandoeuvre-les-Nancy Cedex. Fax: 33-03 83-91-25-89.

** Instituto Geofísico y Departamento de Geología. Escuela Politécnica nacional. Casilla 2759, Quito, Ecuador. Fax: 593-5 567-847.

*** LGDI Bât. 509, Université Paris XI, 91405 Orsay Cedex, Francia. Fax: 33-1 60191446.

(†) Mientras realizábamos la presente investigación, nuestro compañero Víctor Hugo Pérez falleció en una explosión del volcán Guagua Pichincha. Este artículo está dedicado a su memoria.

tales eventos. El uso de la escala anteriormente descrita permitió proponer también la ocurrencia de un terremoto de intensidad IX-X (MM/MSK) entre el siglo X y el siglo XVI. Este nivel pudo ser correlacionado en algunos lugares de la cuenca gracias a la presencia de una capa guía de origen volcánico afectada por esta deformación. Por otra parte, se puede correlacionar este evento con deformaciones sismotectónicas en la cuenca, haciendo de la falla de Quito el candidato más probable para explicar esta intensidad que supera al máximo histórico en casi un grado de intensidad.

Palabras claves: Ecuador, Cuaternario, paleosismicidad, licuefacción, neotectónica.

FAILLE ACTIVE DE QUITO ET SOURCES SISMOGÉNÉTIQUES RÉGIONALES: UNE ÉTUDE DE L'ALÉA SISMIQUE DE QUITO (ÉQUATEUR) PAR L'ANALYSE DES SÉDIMENTS QUATERNAIRES

Resumé

De nombreux événements sismiques ont été décrits au cours des 460 ans d'histoire écrite de la ville, ils atteignent une valeur IX sur l'échelle d'intensité (MSK). Parmi les diverses sources sismogènes susceptibles d'affecter sensiblement la capitale, on considère la faille de Quito capable de produire des intensités supérieures à VIII. Elle se caractérise comme la source potentiellement la plus dangereuse pour la ville. Dans le registre historique, son activité fut possiblement identifiée en 1755, produisant alors une intensité de VIII-IX (MSK) dans Quito. Afin de connaître la vitesse de cette faille et la récurrence des événements majeurs (laquelle est supérieure à la durée de l'enregistrement historique), il a été nécessaire d'étudier la séquence géologique quaternaire. La paléosismicité a été mise en évidence grâce à l'observation de niveaux de paléoliquéfaction enregistrés dans les sédiments. Durant l'analyse des sédiments holocènes de la partie basse de la ville, des témoins de l'activité sismique régionale ont été observés, de même que des indices d'activité de la faille de Quito sous la forme de failles synsédimentaires et de déformations sismotectoniques. Un enregistrement paléosismique relativement complet a été rencontré dans le bassin nord de la ville, notamment dans l'affleurement de la "Calle Pinzón" où une vingtaine de niveaux paléosismiques ont été mis en évidence sous la forme de couches contournées de type invaginations. Ces figures sont produites en fond de lac, à l'interface entre eau et sédiments. En comparant ces niveaux avec des exemples de la littérature, les relations définies entre accélération horizontale et intensité sismique ($\log a_H = 0.014 + 0.30I_{MM}$) et la distribution des intensités dans la sismicité historique, il a été proposé une échelle de détermination de paléointensités sismiques d'après l'intensité de la déformation par liquéfaction. La répartition des intensités >VI (MM/MSK) définies par cette échelle montre une bonne cohérence avec la distribution des intensités définies par la sismicité historique. L'utilisation de la sismicité historique et de la paléosismicité géologique définit une récurrence moyenne de 115 ans pour les événements majeurs d'intensité >VII. Il faut noter ici que le dernier événement correspondant à cet intervalle d'intensités est survenu en 1868, il y a plus de 125 ans, mais également que, au cours des 460 ans d'histoire, il a été observé des intervalles de récurrence allant de 168 ans à seulement 9 ans. L'utilisation de l'échelle citée ci-dessus a également permis de mettre en évidence la probable occurrence d'un séisme d'intensité IX-X (MM/MSK) entre le X^{ème} et le XVI^{ème} siècle. Dans la ville, plusieurs niveaux paléosismiques ont pu être corrélés avec cet événement grâce à la présence d'un banc repère d'origine volcanique déformé par ce séisme. Ces niveaux ont pu également être corrélés dans le bassin avec des déformations sismotectoniques, faisant ainsi de la faille de Quito le candidat le plus probable pour expliquer une telle intensité dépassant le maximum historique de près d'un degré d'intensité.

Mots-clés : Équateur, Quaternaire, paleosismicité, liquéfaction, néotectonique.

QUITO ACTIVE FAULT AND REGIONAL SEISMOGENIC SOURCES: A SEISMIC HAZARD STUDY FOR QUITO (ECUADOR) INFERRED FROM QUATERNARY SEDIMENTS ANALYSIS

Abstract

Over the 460 years of Ecuadorian written history, several seismic events were registered, some of them reaching intensity IX (MSK) in Quito. From the various seismogenic sources able to produce damage in the city, the Quito Fault is thought to be able to produce higher intensities in case of a rupture of the fault along its entire length (45 Km), making this structure the potentially more dangerous seismogenic source for the city. In the historical record, activity of this fault was only registered once in 1755, when part of this fault ruptured producing an intensity VIII-IX (MSK) in Quito. In order to know the slip rate and the recurrence of the major events, which surely extend beyond the five hundred years of seismic history, it was necessary to make use of the geologic record. The paleoseismicity was defined by means of the analysis of earthquake-induced paleoliquefaction horizons produced in a lacustrine

environment. Evidences of the regional seismic activity were observed during the analysis of the Holocene sediments from the lower part of Quito, as well as evidences of the Quito fault activity such as synsedimentary faults and seismotectonic deformation. A relatively complete paleoseismic record was observed in the northern basin, where a particular exposure in the "Calle Pinzón" shows the succession of at least 20 earthquake-induced contorted bedding horizons. These paleoseismic features occur at the bottom of lakes, at the water - sediments interface. From the comparizon between published examples, relations between horizontal ground acceleration and intensity ($\log a_{\text{H}} = 0.014 + 0.30I_{\text{MM}}$) and intensity distribution inferred from the historical seismicity, we propose to define a scale of paleointensity according to the intensity of the earthquake-induced deformation. The obtained intensity distribution for intensities >VI (MM/MSK) shows a good coherence with the intensity distribution inferred from the historical seismicity. Both the historical seismicity and geological paleoseismicity indicate an average recurrence of 115 yr. for major events with intensities >VII. We must notice that the last seismic event corresponding to this intensity range occurred in 1868, more than 125 years ago, but also that, within the 460 years of historical seismicity, this recurrence varied from 168 to just 9 years. The use of the above mentioned scale also permit to evidence the probable occurrence of a major event of intensity IX-X (MM/MSK) between the 10th and the 16th century. Several paleoseismic horizons were succesfully correlated with this event thanks to the presence of a volcanic key bed deformed by this paleoseismic shaking. These horizons were also correlated with seismotectonic deformation in the basin, making the Quito fault the most probable seismic source able to explain this major intensity overpassing the historical maximum intensity by almost one degree.

Key words: Ecuador, Quaternary, paleoseismicity, liquefaction, neotectonics.

1. INTRODUCCIÓN

El Ecuador está situado dentro de un contexto de tectónica activa debido a la subducción de la placa Nazca bajo la placa Suramericana (Pennington, 1981; Kanamori & Mc Nally, 1982) (Fig. 1). En el país se nota una recurrencia de terremotos con magnitudes superiores a 7 grados en la escala de Richter, por lo que ha sido clasificado como una de las zonas de alto peligro sísmico en el mundo. Además del conocimiento de los rasgos tectónicos activos del país, se ha visto la necesidad de estudiar no solamente la dinámica, la cinemática y el potencial sísmogenético de las diferentes fallas, sino también la recurrencia de los terremotos. Pero el problema encontrado en todo el continente americano, para tener un registro de la sismicidad suficientemente extenso, es que las descripciones históricas se remontan a la llegada de los españoles, es decir a un máximo de 500 años, además que la repartición geográfica de la población fue siempre muy irregular.

La ciudad de Quito, capital del Ecuador, con más de un millón de habitantes, con una importante tasa de crecimiento e inversiones y con una larga historia sísmica, constituye una zona prioritaria para el estudio de los peligros sísmicos. Recientemente se desarrolló un programa para establecer un simulacro de daños por terremotos en Quito (Grupo Local de Trabajo, 1993), el cual entre otros objetivos consideró las diferentes fuentes sísmicas, las intensidades y la recurrencia de los eventos que pueden ocurrir en la ciudad. En este sentido el estudio de los paleoeventos sísmicos registrados en la ciudad, ayudaron a estimar la recurrencia de eventos mayores que ocurrieron antes de la llegada de los españoles.

2. CONTEXTO GEOTECTÓNICO Y GEOLÓGICO

2. 1. Contexto neotectónico y sísmico regional

Los estudios neotectónicos consideran diferentes fuentes sísmogenéticas (Fig. 1), que pueden ocasionar destrucción en Quito, y que se hallan dentro de un contexto general de compresión N80°E (Bonilla & Ruíz, 1992; Ego *et al.*, 1995). Por otra parte, se identifican diferentes zonas sísmicas que se describen a continuación.

Sismos de subducción que han afectado la zona costera, como el de 1906 de la provincia de Esmeraldas que alcanzó una Magnitud $M_w=8.9$ y que ocasionó intensidades de grado VI (MSK) en la zona de Quito (Del Pino & Yepes, 1990). Sin embargo, ahora se pueden temer daños que representen intensidades superiores en la capital, en especial a los edificios altos, que son particularmente vulnerables a la duración y frecuencia de las ondas generadas por tales sismos. En 1859, un terremoto produjo intensidades de grado IX (MSK) en Quito y Otavalo, siendo su área macrosista muy extendida en la parte central del Valle Interandino. Este comportamiento peculiar de las intensidades del sismo de 1859 sugiere una magnitud grande y una localización profunda, tal vez en la placa subducida, bajo la parte centro-norte del Valle Interandino.

En el continente, se identifica un sistema mayor transcurrente dextral caracterizado por las fallas Chingual al norte y Pallatanga al sur (Winter, 1990; Soulas *et al.*, 1991; Ego *et al.*, 1995). Con un trazo de por lo menos 130 kilómetros, que es la prolongación hacia el sur del sistema de fallamiento Algeciras-Servita-Sibundoy de Colombia, se considera que la Falla Chingual podría generar sismos de magnitud superior a $M_s=7.3$ (Soulas *et al.*, 1991) capaces de

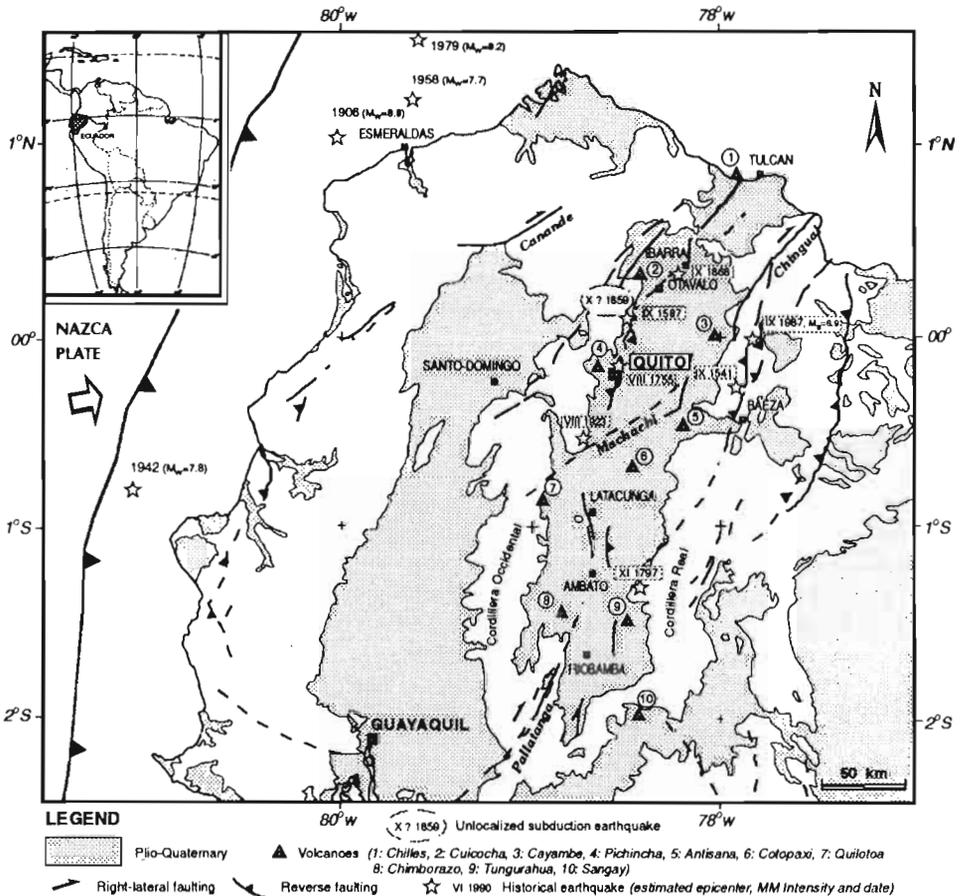


Fig. 1 - Mapa neotectónico del centro-norte del Ecuador con la ubicación de los sismos históricos.

producir intensidades de VI-VII en Quito (Bonilla *et al.*, 1984; Grupo Local de Trabajo, 1993). La sismicidad de la región atravesada por esta falla está mal conocida, debido a la falta de población y a las dificultades de acceso que presenta la zona. A la actividad de la Falla Pallatanga al sur del Valle Interandino, se relaciona la destrucción de la ciudad de Riobamba el 4 de febrero de 1797, por un sismo de intensidad XI (MM) (CERESIS, 1985) que produjo daños equivalentes a una intensidad VI-VII en Quito (Del Pino & Yepes, 1990).

Entre estas dos fallas, se define un ancho sistema de fallamiento transpresivo e inverso (*restraining bend model*, Ego *et al.*, 1995) (Fig. 1). En la Cordillera Real, el sistema transpresivo de la zona de Baeza se identifica como la desviación hacia el sur de la falla Chingual donde se encuentra un sistema de fallas de N-S a NNE-SSW con una cinemática inversa-dextral (Soulas *et al.*, 1991). A este rasgo, fue atribuido el sismo del 5 de marzo de 1987 que produjo una intensidad de VII en ciertos lugares de Quito (Del Pino & Yepes, 1990). El sistema transpresivo del Callejón Interandino se manifiesta con una serie de rasgos tectónicos que se pueden encontrar hacia el sur en la zona de Latacunga y Ambato (fallas de Poaló-Saquisilí y del río Cutuchi definidas por Soulas *et al.*, 1991), o bajo la ciudad de Quito misma (Fig. 1 y 2). Esta falla se presenta a continuación, pero se puede mencionar aquí que se considera que pudiera generar sismos con una magnitud máxima de 6.9 a 7.1 grados y con intensidades por lo menos de VIII en Quito, como la del sismo de 1755 (Del Pino & Yepes, 1990), o intensidades menores como la del sismo de Pomasqui en 1990, cuyo epicentro estuvo ubicado al norte de la ciudad (intensidad V grados MSK en Quito según

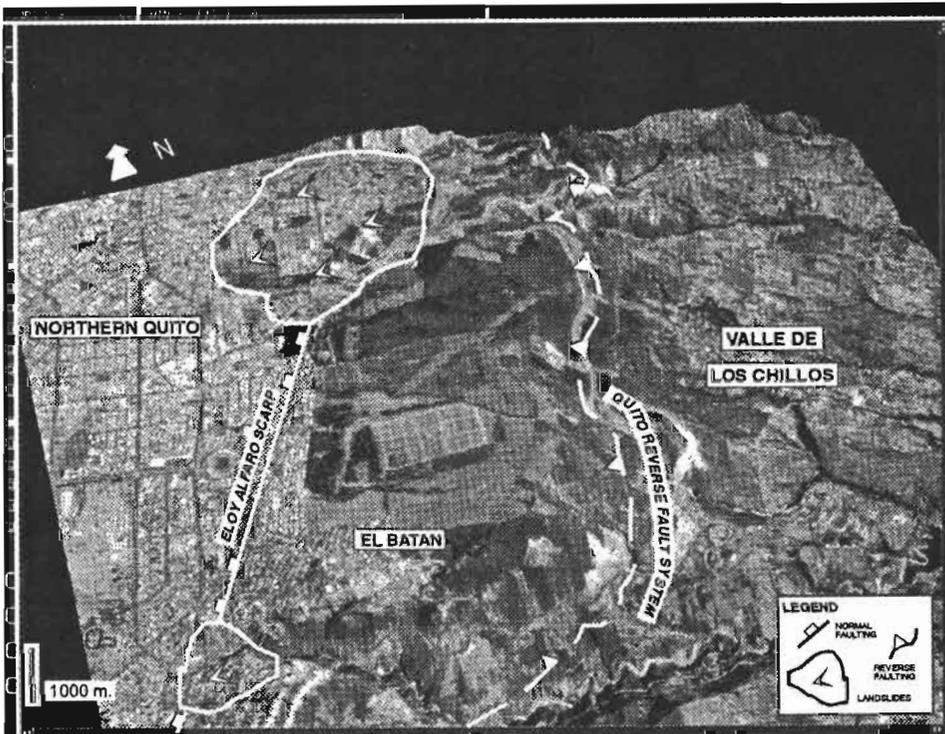


Fig. 2 - Vista geomorfológica del rasgo de la tectónica activa del noreste de Quito. (Figura base: I. Municipio de Quito, Dirección de Planificación y ORSTOM).

Del Pino & Yepes, 1990). Dentro de este sistema transpresivo, se identifica también la zona de Machachi que produjo un sismo en el año de 1923 que afectó fuertemente la población de Machachi. Este evento produjo intensidades de VI a VII (MSK) en Quito (Del Pino & Yepes, 1990) y pudo haberse originado en un ramal del sistema de fallamiento dextral que cruza la zona (Yepes *et al.*, 1990).

Aparte de este sistema transcurrente-transpresivo mayor que atraviesa el país desde el golfo de Guayaquil hasta la frontera colombiana, se encuentran otras fuentes sismogénicas superficiales aún mal conocidas. En la Cordillera Occidental se identificó el trazo morfológico de Apuela-Nanegalito-Mindo, de rumbo NNE-SSW y de cinemática aparentemente dextral (Ego, 1992). No se sabe todavía la importancia de la actividad de este rasgo, que en su parte conocida alcanza más de treinta kilómetros de largo. Más al oeste en la provincia de Esmeraldas, recientemente hemos identificado un rasgo de rumbo ENE-WSW, que lo hemos denominado falla del Río Canande, que se la puede seguir sobre una distancia de casi setenta kilómetros. Una primera estimación en base del trabajo de Bonilla *et al.* (1984) en relación a los segmentos de esta última falla y leyes de atenuación (Grupo Local de Trabajo, 1993) permite obtener una intensidad de VI+ grados (MM) en Quito. Un último sistema tectónico muy activo se encuentra en la zona norte del Callejón Interandino. La ciudad de Ibarra fue destruida el 16 de agosto de 1868 por un sismo cuya intensidad estimada fue de X grados MM (CERESIS, 1985), y que en Quito se sintió con una intensidad de IX (MSK) (Del Pino & Yepes, 1990). Otro evento muy fuerte se produjo en esta zona en 1587 con una intensidad estimada en Quito de VIII (Del Pino & Yepes, 1990). Las fallas de esa región que han podido producir esos sismos son todavía poco conocidas. Los rasgos antes definidos como los de San-Isidro (Soulas *et al.*, 1991) no son comprobables según Ego (1992).

Para terminar, hay que mencionar que la actividad volcánica del Guagua Pichincha produjo en Quito vibraciones que causaron efectos de intensidad VI en 1660 (Del Pino & Yepes, 1990). Ese fenómeno es raro, local, y no se esperarían intensidades mayores.

2. 2. Contexto geológico y neotectónico de la zona de Quito

Durante el Cenozoico tardío, principalmente a partir del Plioceno, se identificó el Callejón Interandino norte como una cuenca sedimentaria limitada por las cordilleras Real y Occidental (Fig. 1). Dentro de esta cuenca, se identificaron varias estructuras tectónicas en compresión. Algunas de ellas están activas desde el Pleistoceno (Dávila, 1990; Winter, 1990; Soulas *et al.*, 1991; Ego *et al.*, 1995). Entre éstas, es de interés especialmente la de Quito por ser una peligrosa fuente sismogénica para la ciudad, que se halla construida sobre una estructura tipo *piggy back basin* generada por la falla inversa (Fig. 2, 3 y 4). En este contexto activo, se determinaron una serie de rasgos morfológicos, principalmente lomas de rumbo N-S que se ubican al este de Quito y que están levantadas unos 400-600 m sobre el Valle de Los Chillos. Este levantamiento se debe al flexuramiento ocasionado en el frente de la falla, la misma que buza hacia el oeste por debajo de la ciudad (Soulas *et al.*, 1991; Bonilla *et al.*, 1992). El borde oeste de la cuenca está limitado por el volcán Rucú Pichincha. Al no tener afloramiento de la falla de Quito (*blind thrust* o falla escondida por numerosos deslizamientos), se tuvo que estudiar la evolución sedimentológica y volcánica cuaternaria para proponer algunas estimaciones de la tasa de actividad de este rasgo tectónico. Algunos autores (Lavenue *et al.*, 1993) consideran una permanencia de la compresión E-W desde el Mioceno superior, explicando el Valle Interandino

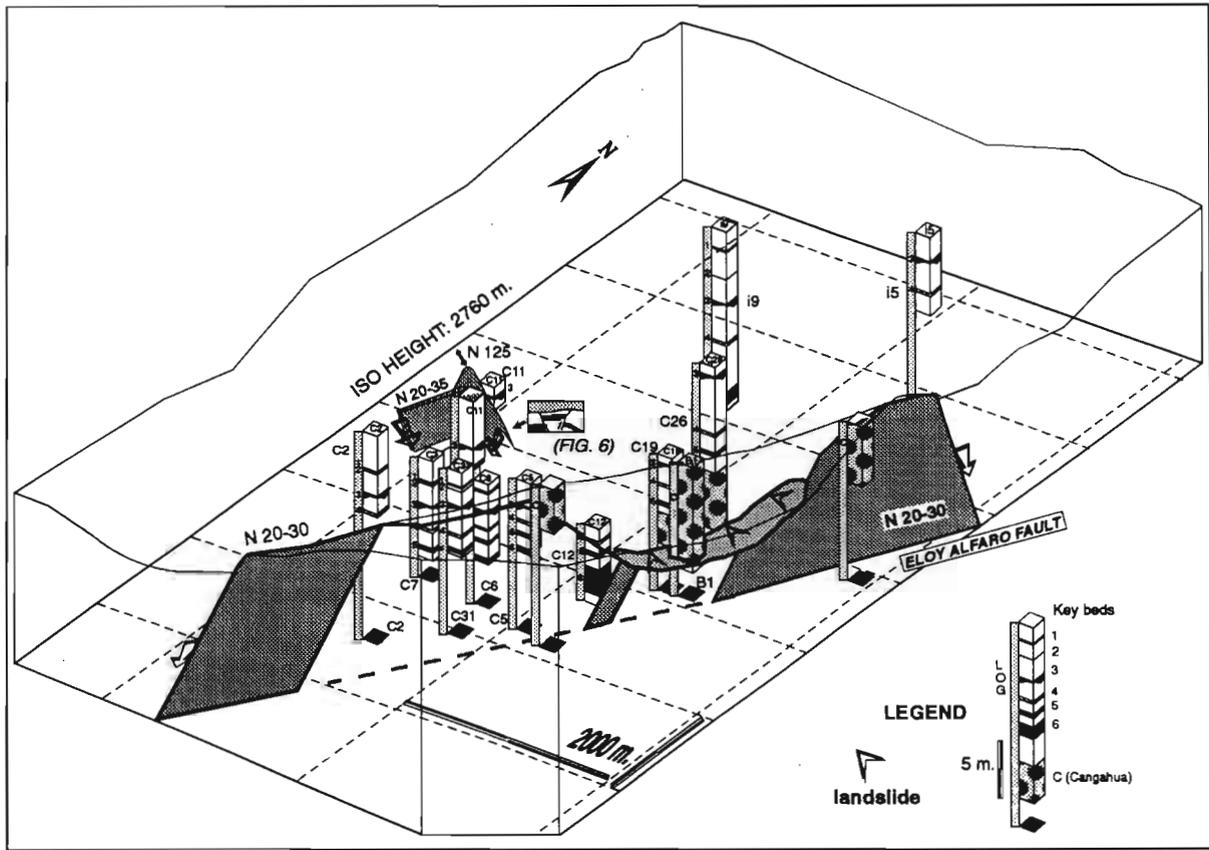


Fig. 3 - Imagen tridimensional de la cuenca holocénica del norte de Quito. Las columnas estratigráficas se presentan en la posición de sus alturas actuales. El nivel de referencia horizontal corresponde a una altura de 2760 m. La rejilla es la misma que para la Fig. 8. La geometría sedimentaria muestra una actividad tectónica que controló la sedimentación y la subsidencia. Nótese la presencia de la deformación sismotectónica en la cuenca (#C11) y los deslizamientos que afectan el escarpe de la Avenida Eloy Alfaro (#B1).

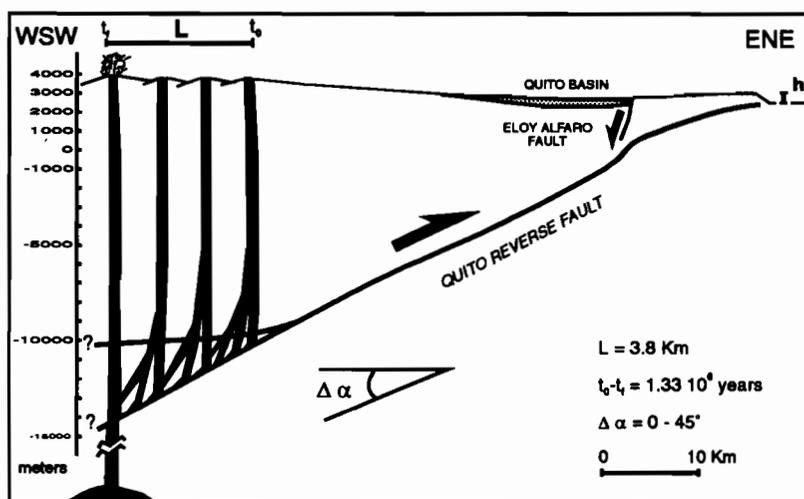


Fig. 4 - Perfil esquemático ENE-WSW de la falla de Quito (al norte de la ciudad), que muestra el posible desplazamiento de las chimeneas volcánicas debido al movimiento inverso, así como un fallamiento normal inducido en el borde este de la cuenca en *piggy back* de Quito. Las letras están referidas en el texto.

con un modelo de *push down basin* debido a la actividad de dos sistemas de fallas inversas convergentes en los bordes del Valle, al pie de las dos cordilleras. Otros autores consideran el Valle Interandino como un graben extensivo (Tibaldi & Ferrari, 1992). El análisis geomorfológico del Valle, conjuntamente con observaciones de flexuramientos y fallamientos que afectan el Cuaternario (Ego, 1992), así como el análisis de la sismicidad superficial (Bonilla & Ruiz, 1992; Bonilla *et al.*, 1992) demuestran claramente que la deformación actual del Valle Interandino se realiza bajo un contexto compresivo N80°E. Otros trabajos (Samaniego *et al.*, 1994) muestran la existencia durante el Plio-Pleistoceno de una tectónica extensiva (¿transtensiva?) previamente al estado compresivo actual.

2. 2. 1. Evidencias de la actividad holocénica de la falla de Quito

Después de la depositación de la "cangahua" en la cuenca (decenas a centenas de metros de depósitos de tipo loess de origen volcánico y de edad cuaternaria) se instaló un régimen fluvio-lacustre en la cuenca de Quito. Este ambiente se mantuvo alrededor del siglo XVI, perturbado en algunas ocasiones por la actividad humana, siendo el mejor ejemplo un nivel enterrado de campos elevados (paleocamellones) utilizados para la agricultura, que han sido encontrados en casi toda la zona. Estos camellones están cubiertos por algunos decímetros de ceniza volcánica. Según las primeras dataciones radiométricas con Carbono 14 (Anexo A), este nivel tendría una edad incluida entre **60 y 640 años** después de Cristo (Fig. 5). Estos camellones indican que hubo períodos durante los cuales las paleolagunas fueron casi totalmente desecadas y se las cultivaron. Posteriormente se instalaron nuevas condiciones sedimentológicas fluviales, lacustres y palustres. En la literatura se encuentra también que hubo períodos durante los cuales el drenaje fue cambiado con el objeto de aumentar el volumen de agua en la laguna. Esto ocurrió durante el período de dominación incaica (Rodríguez de Aguayo, 1897). A la llegada de los españoles se sugirió la preservación de la laguna como fuente de agua, pero no se tienen datos acerca de que si este hecho se llegara a concretar (Libro Primero de Cabildos de Quito, 1934).

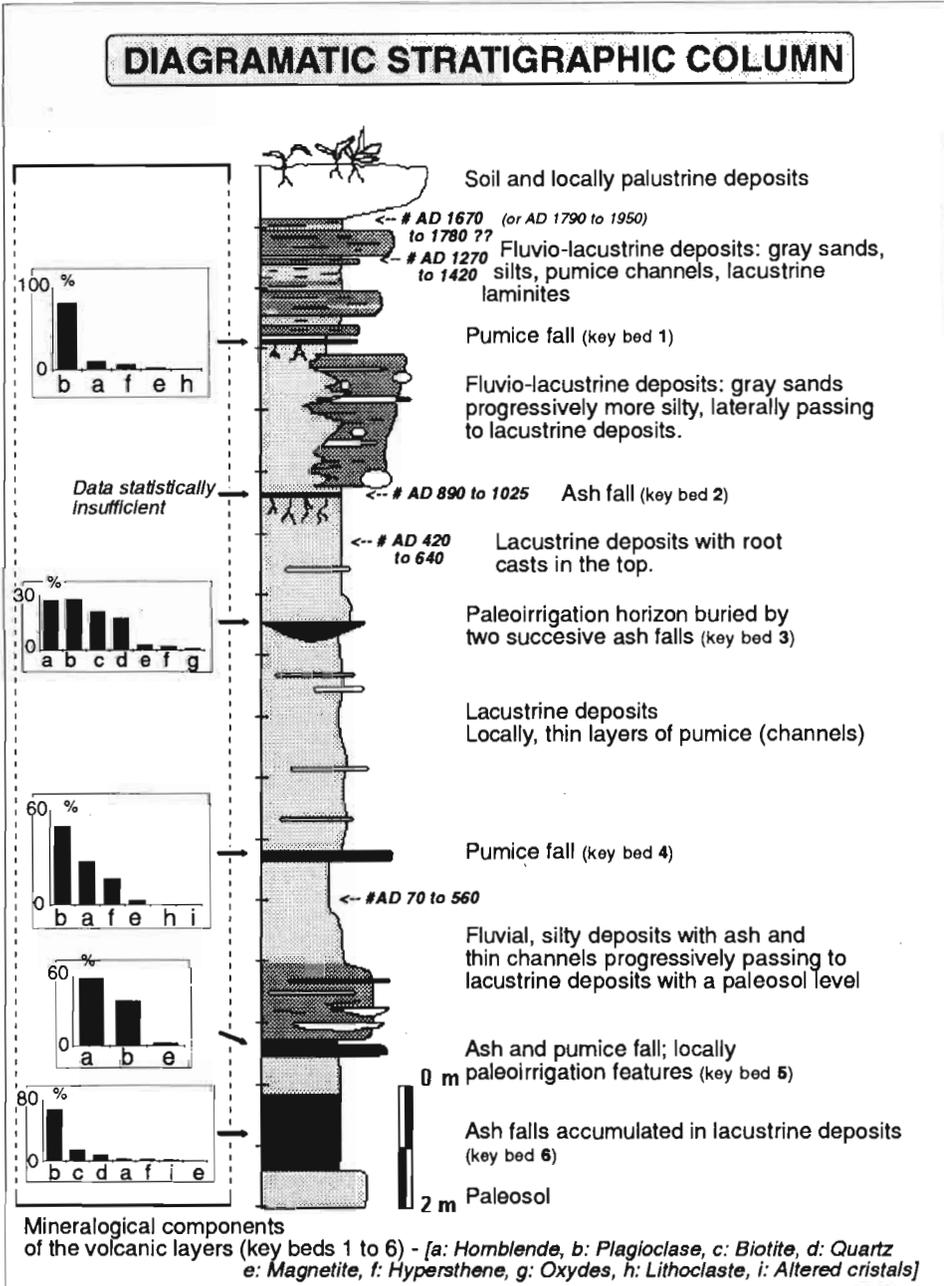


Fig. 5 - Columna estratigráfica sintética de los depósitos holocénicos del norte de Quito.

Además de la actividad humana, muchos fenómenos dinámicos intervinieron sobre el relleno de la cuenca como son el volcanismo, los sismos y las lluvias, e incluso fenómenos de remoción en masa particularmente comunes en la zona andina. Como consecuencia directa de todos estos fenómenos, hubo grandes variaciones en las tasas de sedimentación. Estas variaciones sedimentológicas han creado muchos cambios laterales de facies. Se encuentran depósitos fluviales de arenas y arenas volcánicas, conglomerados y arcillas, depósitos lacustres y palustres con laminitas arcillosas y limosas, niveles arenosos finos y turbas, depósitos volcánicos como caídas de pómez y cenizas, sedimentos dinámicos como flujos de lodo y niveles de paleosuelos (Fig. 5).

En el registro sedimentario de edad holocena, en la parte baja de la ciudad, se han encontrado algunas evidencias de un fallamiento normal sinsedimentario (Fig. 3) y deformaciones sismotectónicas (Fig. 6), que podrían estar asociadas a la actividad de la falla de Quito. Este fallamiento normal se identifica como el escarpe "Eloy Alfaro" (Fig. 2 y 3) y se podría interpretar como un efecto generado sobre una rampa localizada atrás de la deformación frontal, la cual es debida a la falla inversa (Fig. 4). El fallamiento normal es posible identificarlo mejor en el estudio de perfiles de pozos de agua, en donde se observa que esta falla reactiva una falla más vieja que controló la sedimentación después de la depositación de la unidad "Volcánicos" (Alvarado, 1996; tesis en preparación). Sin embargo, tales fallamientos han podido favorecer la subsidencia de la cuenca (Fig. 3) y muestran claramente la actividad de la falla de Quito.

2. 2. 2. Estimaciones de la velocidad de la falla de Quito

Según Soulas *et al.* (1991), la velocidad de esta falla sería de 0.5 hasta 1 mm por año, con una recurrencia de 1500 hasta 4000 años para los eventos mayores, considerando un modelo de falla inversa buzando de 30 hasta 45 grados hacia el oeste y tomando en cuenta un desplazamiento de la terraza del río Parcayacu (sin más precisiones). Sin embargo, mientras este valor parece lógico a comparación de la velocidad de otras fallas activas de dimensión similar, este desplazamiento no es cierto y además, el desplazamiento por falla y la edad de dicha terraza son mal conocidas. A fin de verificar este valor, hemos buscado otras maneras para estimar esta velocidad. Hacia el oeste, el complejo volcánico del Pichincha muestra una alineación N 80°E, paralela a la orientación de acortamiento (σ_H Max) definida con la sismicidad (Bonilla & Ruiz, 1992; Ego *et al.*, 1995). Esta orientación sugiere una relación directa con la neotectónica. La evolución de los centros de emisión desde el este (volcán inactivo del Rúcu Pichincha) hacia el oeste (volcán activo del Guagua Pichincha), sugiere un modelo de desplazamiento superficial del bloque superior, por una falla inversa, sobre una cámara magmática profunda considerada como fija (Fig. 4). Se puede hacer dos estimaciones de velocidad de la falla de Quito, considerando un tiempo $t_0=1.33$ Ma para una lava del Rúcu Pichincha (Geotérmica Italiana, 1989), un tiempo $t_1=0$ para el Guagua Pichincha que es todavía activo, una distancia $L=3.8$ km entre estos dos volcanes y un ángulo α para el buzamiento de la falla de Quito. La microsismicidad sugiere un valor de $\alpha=45^\circ$ bajo la ciudad (Bonilla *et al.*, 1992) pero no se tiene idea de este buzamiento bajo el complejo volcánico. La velocidad en milímetros por año se estima con la fórmula $V = L / [\cos\alpha \cdot (t_0 - t_1)]$. Una primera estimación con $\alpha=45^\circ$ nos da una velocidad alta de 4 mm/año. Si consideramos que la falla

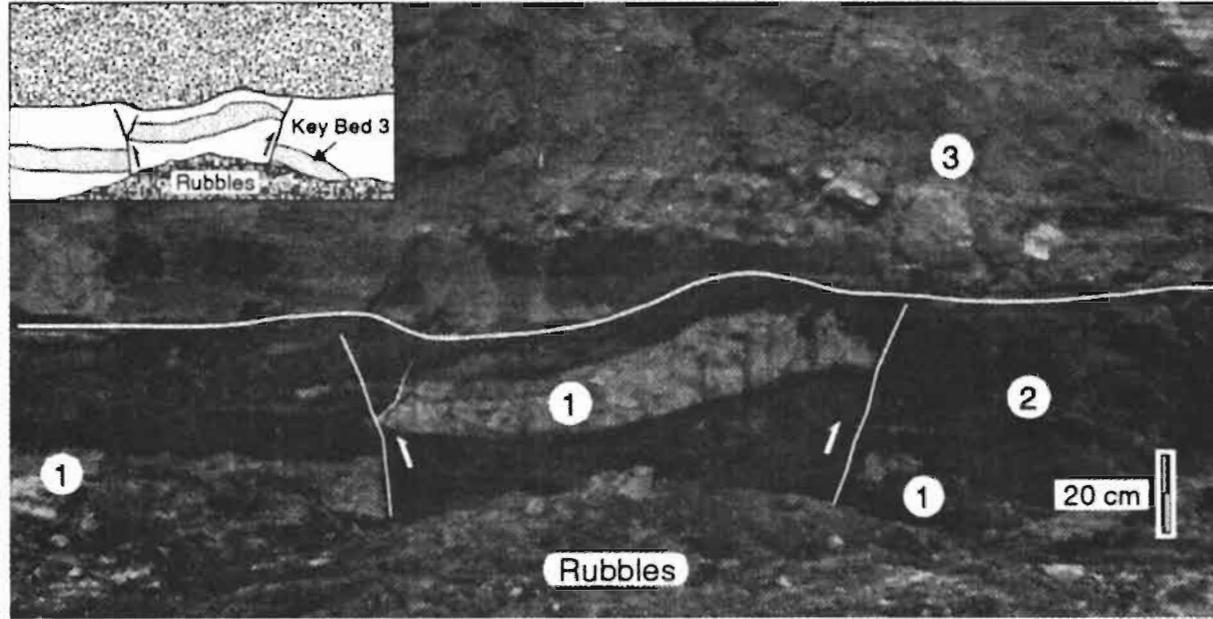


Fig. 6 - Deformación sismotectónica en la excavación del centro comercial "El Jardín", (#C11). 1: Capa guía 3 (caída de ceniza); 2: depósitos lacustres (limos y arenas finas); 3: sedimentos fluviales gruesos fosilizando la deformación. Nótese el plegamiento superficial y fallamiento inverso que afecta a la capa guía 3.

se horizontaliza ($\alpha=0^\circ$) en niveles más dúctiles bajo los complejos volcánicos (*flat and ramp?*), tendremos una velocidad de 2.9 mm/año con la misma fórmula. Sin embargo, estas velocidades se deben estimar como un máximo, considerando la cámara magmática como fija. De otra manera, si consideramos el tiempo t_0 como el marcador del comienzo del movimiento de la falla de Quito, una altura $h=400-600$ m del escarpe oriental de las lomas de Quito y el ángulo $\alpha=45^\circ$, obtenemos una velocidad de 0.4-0.6 mm/año con la fórmula $V = h / [\sin\alpha \cdot (t_0 - t_i)]$ que es más cercana a las estimaciones de Soulas *et al.* (1991). Todos estos cálculos nos indican un rango de velocidad entre 0.4 y 3-4 mm/año que nos permitiría estimar con confianza la recurrencia de los eventos mayores relacionados con la falla de Quito. Hay que considerar también las incertidumbres existentes sobre la constancia del ángulo, la edad del comienzo de la deformación y el valor real de h , considerando el efecto de la erosión. Frente a este problema analítico, se trató de buscar evidencias de la actividad de la falla en el registro geológico holocénico lacustre de la cuenca de Quito, para tratar de definir una recurrencia directa con su propia paleosismicidad.

3. EL USO DE LOS SEDIMENTOS COMO PALEOSISMÓGRAFOS NATURALES

Los sedimentos pueden deformarse durante un sacudimiento sísmico cuando existen condiciones reológicas favorables. La licuefacción es un fenómeno que ocurre por una desestabilización de materiales no consolidados, que se traduce en una reducción del esfuerzo efectivo (pérdida de contacto entre los granos que componen el suelo), debido al aumento en la presión de poros, haciendo que el suelo se comporte como fluido (Darve & Flavigny, 1978; Geotécnia y Cimientos III, 1980; Pecker, 1985; Ishihara, 1985; Ishihara & Hsu, 1986; Holzer *et al.*, 1989; Obermeier, 1989). Este aumento en la presión de poros se debe a un incremento de la compactación del sedimento, debido a una reorganización entre los granos. Esta rápida compactación frecuentemente resulta de la acción de una fuerza cíclica sobre el sedimento, como sucede durante un terremoto. Como resultado de la licuefacción se incrementa la presión hidráulica, que produce una fluidización de los sedimentos cuando se sobrepasa la presión de confinamiento. En el caso que nos interesa, los sismos afectaron sedimentos lacustres bajo el agua; además de los clásicos fenómenos de licuefacción, se produjeron también deformaciones plásticas de los mismos. Este último tipo de deformación resulta de la influencia conjunta de varios factores, entre los cuales identificamos los efectos de heterogeneidades de densidad, de la gravedad y de una posible respuesta elástico-plástica de los sedimentos afectados por un esfuerzo cíclico de origen sísmico (Hibsch *et al.*, 1996). A los niveles que presentan evidencias de deformaciones producidas por un terremoto, se les denominarán niveles paleosísmicos o sismitas. Tales deformaciones se pueden producir bajo el agua, pero también muy frecuentemente ocurren a la altura del nivel freático cuando la reología del sedimento es favorable (Holzer *et al.*, 1989; Obermeier *et al.*, 1990; Audemard & de Santis, 1991). En este tipo de análisis, hay que diferenciar los fenómenos no sísmicos más comunes que pueden producir deformaciones parecidas, a fin de reducir el porcentaje de error de diagnóstico a un mínimo aceptable para la determinación del riesgo sísmico. Veremos cuáles son estos fenómenos y también que, mientras existe un rango de error, los resultados en Quito son todavía demasiado optimistas con respecto al análisis del riesgo sísmico obtenido con la sismicidad histórica.

3. 1. Las figuras de paleosismicidad

3. 1. 1. Las inyecciones de sedimentos

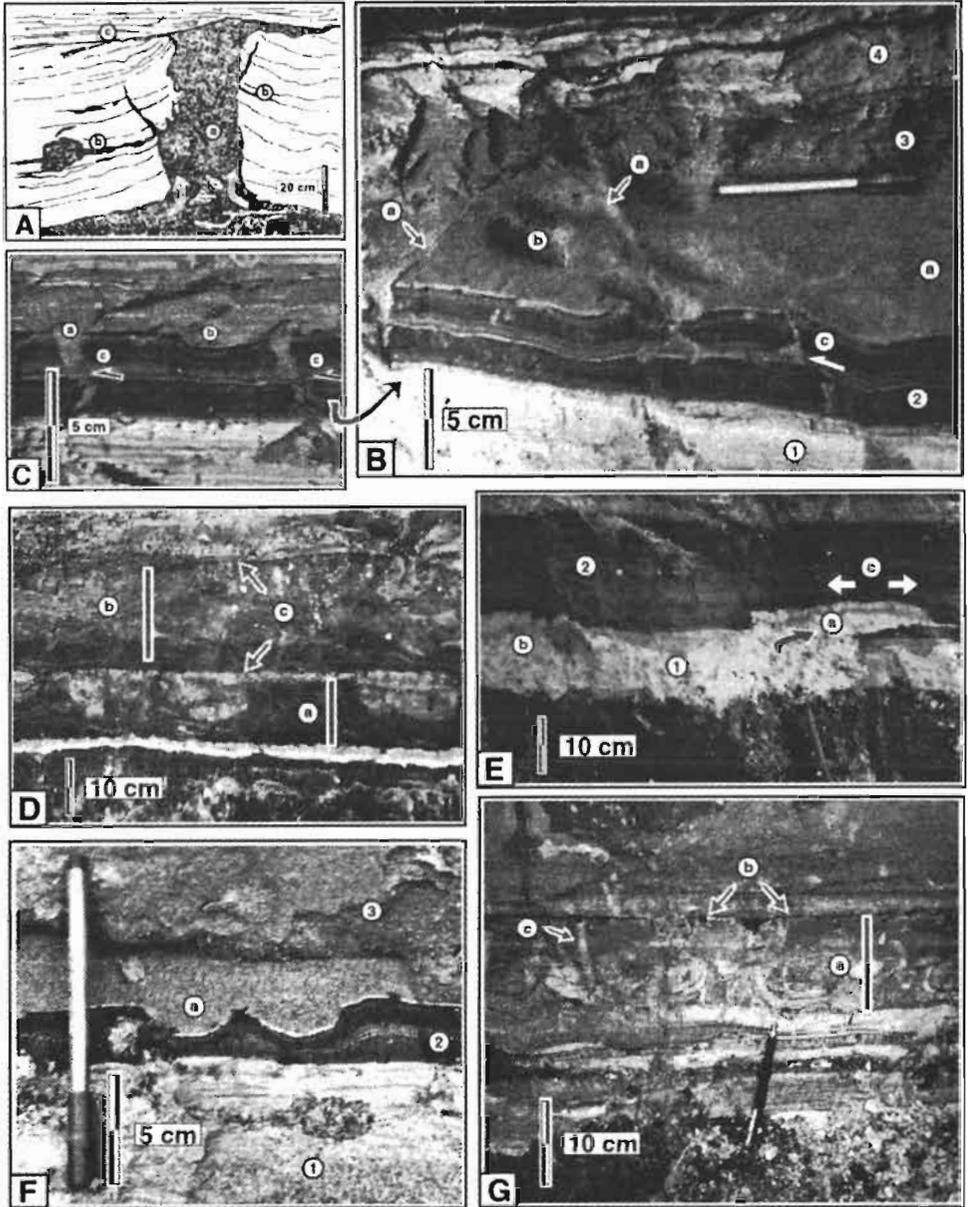
Se encuentran intrusioniones de sedimentos debidas a un fenómeno de licuefacción en varios depósitos como arenas, limos, arcillas, pero también en areniscas y rocas calcáreas. Para que rocas sedimentarias como las dos últimas se deformen, la deformación debe ocurrir únicamente durante los primeros tiempos de la diagénesis, antes de la litificación. Los depósitos con una buena porosidad como las arenas (especialmente arenas bien sorteadas), son los más susceptibles de ser afectados por la licuefacción. Este fenómeno es el que más comúnmente ocurre en zonas continentales. Es especialmente peligroso cuando ocurre a poca profundidad, en especial con la presencia de un nivel freático alto, que ha producido daños importantes en algunas ciudades como Niigata en Japón. Las intrusioniones de sedimentos se emparentan con los volcanes de arena y lodo, que han sido muy bien descritos en el caso de terremotos actuales como en el sismo de Imperial Valley en 1979 (Youd, 1984) y sobre todo en Niigata, donde aparecieron cráteres de sifonamiento hasta media hora después del sismo principal (efecto artesiano asociado), lo que produjo inundaciones, hundimientos, desenterramientos de depósitos enterrados, rotura de vías de comunicación, volcamiento de edificios, etcétera (Geotécnia y cimientos III, 1980; Ishihara & Koga, 1981). Con la compactación y la expulsión de agua puede ocurrir una reducción de la porosidad y así una evolución más rápida de la diagénesis, por lo que después de la licuefacción, los sedimentos pueden cambiar de reología y ser mucho menos licuables al momento de un segundo evento (Ishihara, 1985; Obermeier, 1989). Durante el enterramiento de las capas, se puede notar un incremento natural de la presión de poros si existe un confinamiento impermeable que impide la compactación y la liberación del agua contenida en el sedimento (alternancias de niveles arenosos y arcillosos por ejemplo) y/o cuando las tasas de sedimentación son demasiado altas. Este fenómeno se parece mucho al fenómeno artesiano. En este caso, las aguas represadas pueden expulsarse violentamente cuando se producen por ejemplo fracturas o fallas que reducen la presión de confinamiento y ponen en contacto capas de diferente compactación y porosidad, provocando una fluidización del sedimento. Esta expulsión puede ocurrir a varias profundidades (decenas a centenas de metros) y tiene la tendencia a manifestarse en las zonas de debilidad, es decir en sitios localizados, ya que la presión litostática impide la deformación de toda la capa. Tal característica puede permitir diferenciar está deformación de la causada por la licuefacción superficial debida a un terremoto (distribución más generalizada).

Durante el estudio en Quito, se identificaron intrusioniones de arena, de limos, de limos arcillosos y de ceniza volcánica (Fig. 7, B, C y E). Estas deformaciones se produjeron en un ambiente lacustre, lo que indica un alto nivel de saturación en agua de los sedimentos al tiempo del sismo. Este ambiente acuático desecha la posibilidad de la influencia de fenómenos artesianos. La profundidad máxima donde se produjo la licuefacción es de 1.5 metros, lo que desecha la hipótesis de una influencia diagenética importante.

3. 1. 2. Las deformaciones plásticas

Consideramos dos figuras principales, las figuras de carga (*load casts*) que resultan de heterogeneidades de densidad, y las capas contorneadas (o invaginaciones).

Las figuras de carga (Fig. 7, B, C y F) ocurren por un reordenamiento de los granos debido a la diferencia de densidad existente, que se manifiesta por la introducción del material más denso de la capa superior hacia la inferior (figuras en bolso). La perturbación



se puede originar con la llegada rápida de un cuerpo denso no consolidado a una zona de depósitos finos o, puede suceder por la ocurrencia de un evento como un sismo que causa un desequilibrio en sedimentos con heterogeneidades de densidad. Para diferenciar estos dos mecanismos en el afloramiento, hay que identificar la presencia de una sedimentación tipo catastrófica que puede haber causado tales deformaciones, sin que se necesite una estimulación sísmica en particular. Por eso, hay que tener una cierta experiencia de los procesos sedimentarios de las cuencas (Pettijohn *et al.*, 1973). Estas figuras de paleosismicidad son muy comunes y han sido ya descritas en la literatura (Sims, 1973; 1975; Ringröse, 1989). Figuras muy similares se obtuvieron en laboratorio (Kuenen, 1958). En un caso específico, el de las figuras del afloramiento de las calles Amazonas y República (excavación #C11, Fig. 8), se puede notar que las figuras de carga tienen una orientación preferida (N 30-40°E) (Fig. 7B), lo que sugiere una relación con las ondas sísmicas, notándose además, la presencia de grietas de tensión rellenadas por la misma arena, las cuales fueron afectadas por desplazamientos cortantes longitudinales (movimiento capa a capa) del norte hacia el sur (Fig. 7C), sin que se tenga una explicación para este fenómeno, sino la sugerencia de una respuesta elástico-plástica de los sedimentos a la sollicitación cíclica de las ondas sísmicas (Hibsch *et al.*, 1996).

Las capas contorneadas o invaginaciones (Fig. 7D y G) se caracterizan porque la deformación sólo afecta a una parte de la secuencia litológica y en la interfase agua-sedimento, es decir que no existe una fuerte influencia de los contrastes de densidad (caso de las figuras de carga) ni de la presión de confinamiento. Estas deformaciones se notan muy bien en depósitos bien laminados, como varves fluvio-glaciares (Morner, 1985; Ringröse, 1989) o sedimentos lacustres (Sims, 1975; Davenport *et al.*, 1989). Son estructuras similares a pliegues y estiramientos que se emparentan a las figuras de *ball and pillow* (Hempton & Dewey, 1983). En algunos casos estas invaginaciones llegan a cortarse formando seudonódulos, los cuales se encuentran también en el caso de fenómenos de carga. Es necesario saber que pueden ser confundidas con un *slump*, en donde se producen figuras muy similares, pero se diferencian porque la deformación debida a este último está asociada a un desplazamiento direccional del material, mostrando una vergencia de los pliegues e invaginaciones, mientras que en el caso de

Fig. 7 - Ejemplos de figuras paleosísmicas encontradas en los depósitos holocénicos de Quito. A: Dique sedimentario (limo y arcillas de origen volcánico) que atraviesa laminitas lacustres en la excavación #C6. (a): inyección de limo arcilloso con fragmentos de pómez; (b) inyección horizontal (sill sedimentario); (c): laminitas lacustres fosilizando las deformaciones; B: Figuras de carga y diques sedimentarios *per descensum* en la excavación #C11. (a): dique sedimentario; (b): figuras de carga orientadas; (c): diques afectados por un desplazamiento inverso capa a capa; 1: capa guía 3 (caída de ceniza); 2: laminitas lacustres (arcilla y limo); 3: arenas fluviales; 4: cenizas volcánicas resedimentadas; C: Detalle de los diques sedimentarios *per descensum* (a) y figuras de carga (b); notar el desplazamiento inverso de los diques (c); D: Capas contorneadas en laminitas lacustres de la excavación #i4. (a) & (b): niveles de capas contorneadas; (c): discontinuidades erosionales; observar, la presencia del depósito de caída de ceniza (capa guía 2) a la base de (a), el cual parece que actuó como una barrera reológica para el desarrollo del horizonte paleosísmico (a); la intensidad del sacudimiento es considerada más alta para (a) que para (b) de acuerdo a la intensidad de desmembración de la capa [aquí, el solo criterio de espesor no puede ser aplicado para (a)]; E: Figura de inyección en la excavación #C11. (a): Intrusión (dique sedimentario) el cual generó fallas (b) y una grieta de abertura (c); 1: capa guía 3 (caída de ceniza); 2: laminitas lacustres; F: Figuras de carga en la excavación #C11. (a): figuras de carga; 1: capa guía 3 (caída de ceniza); 2: laminitas lacustres; 3: arenas fluviales; G: Capas contorneadas en depósitos de arena fina y ceniza de la excavación #i9. (a): capas contorneadas fosilizadas por arenas no deformadas; (b): discontinuidad erosional; (c): madriguera post deformación.

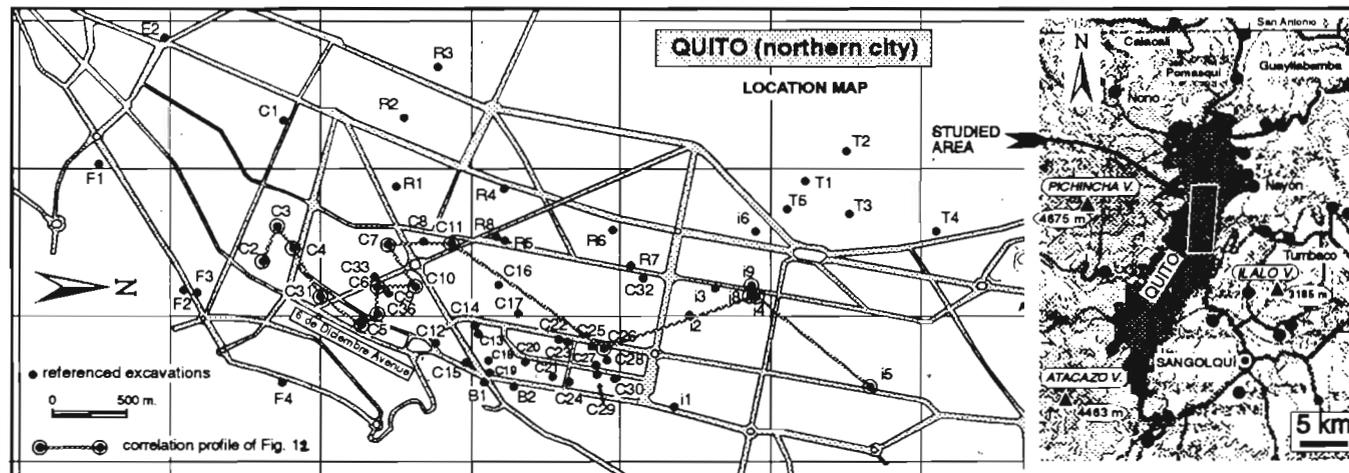


Fig. 8 - Mapa urbano del norte de Quito con la localización de las excavaciones analizadas.

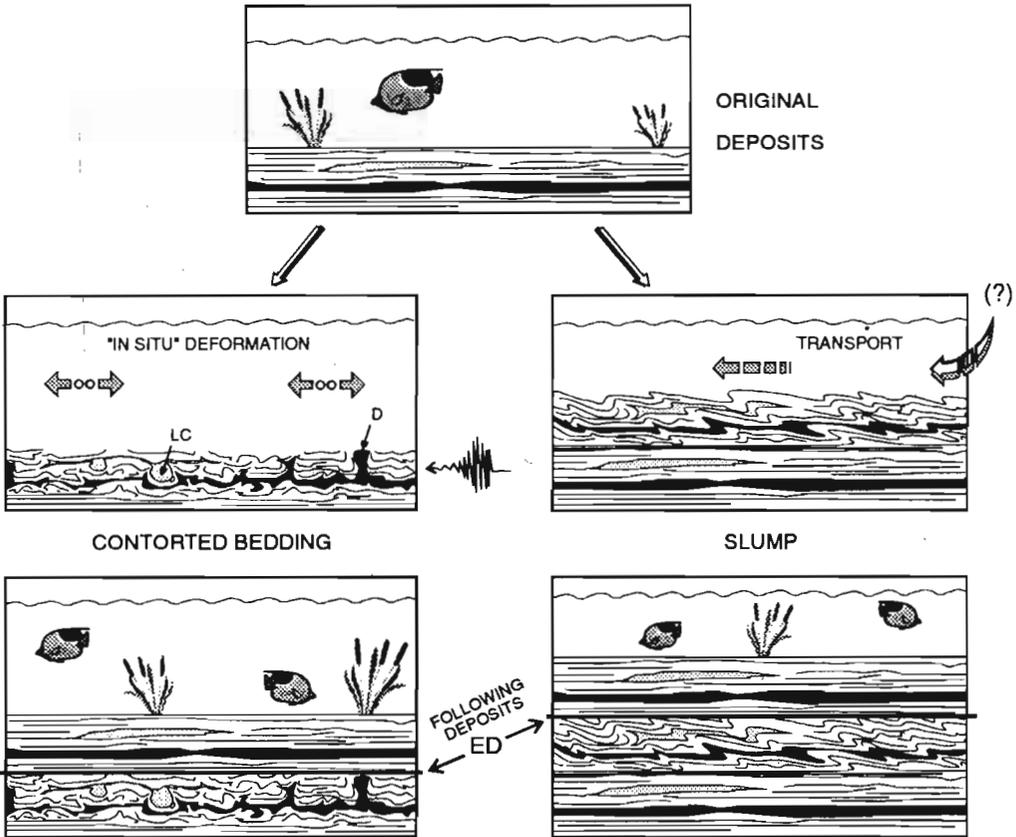


Fig. 9 - Comparación esquemática entre capas contorneadas inducidas por sismos y *slumps* de origen desconocido, que afectan a sedimentos acuáticos. Observar la orientación preferencial y la continuidad de las capas en el caso de los *slumps* en comparación a lo que se observa en el caso de las capas contorneadas donde las figuras de carga (LC) y los diques sedimentarios (D) pueden estar asociados a convolutas. Ambos horizontes deformados están enterrados por depósitos no deformados con una clara discontinuidad erosional (DE).

las sismitas no se observa un desplazamiento del sedimento y las figuras son mucho más aleatorias (Fig. 9). Además, el análisis sedimentológico de la cuenca debería permitir definir la presencia de paleopendientes y deslizamientos asociados que excluyan esta posibilidad.

Estas deformaciones se encuentran en la interfase agua/sedimentos con una presión de confinamiento mínima que no impide la formación de tales estructuras. Esa posición permite la fosilización del nivel por los depósitos siguientes. Sospechamos que esta deformación superficial tiene una relación íntima con las trayectorias superficiales de las ondas sísmicas. No se sabe si los sedimentos responden a las ondas de volumen o de superficie (o a la mezcla de las dos). Estas ondas podrían favorecer la ocurrencia de una ola de menor amplitud en sedimentos saturados no consolidados encima de la columna litológica, un poco como olas producidas por los sismos en líquidos (*i. e.* tsunamis).

Durante el análisis de todas estas figuras, es muy importante tomar en cuenta sus distribuciones espaciales, ya que una distribución más o menos amplia nos indica que la deformación de un nivel por licuefacción no es debida a un fenómeno local sino más bien a

un efecto general en la zona como el que podría producir un sismo. Todo el presente estudio fue realizado por medio de investigaciones en excavaciones de edificios, habiéndose encontrado varias figuras de paleosismicidad en Quito. La mayoría son de tipo invaginaciones o capas contorneadas; también se encuentran algunas figuras de carga. Se identificaron pocas evidencias de inyecciones de sedimentos, las cuales son generalmente de poca amplitud (inyecciones tipo cuñas). Localmente se encontraron diques y sills sedimentarios similares a los descritos en varias publicaciones, excepto que aquí se trata de la inyección de material limo-arcilloso con pómez o ceniza volcánica (Fig. 7A y E). En términos generales, la escasez de estructuras tipo volcanes de arena o de lodo sugiere que casi nunca el material fue favorable a tales deformaciones, o que no hubo sismos suficientemente fuertes para ocasionar una licuefacción tan fuerte. Este resultado da cierta confianza en cuanto a la seguridad de la ciudad, a propósito del riesgo de licuefacción de gran volumen, además que las condiciones ambientales actuales de la parte baja al norte de la ciudad son mucho menos favorables para la ocurrencia de este fenómeno (desaparición de las lagunas y un bajo nivel freático).

3. 2. Problemática del análisis de los niveles paleosísmicos

Se encuentran sobre todo dos tipos de problemas durante el análisis: el principal consiste en reconocer el origen sísmico de las deformaciones y correlacionarlas de un afloramiento a otro; el segundo es poder atribuir un parámetro sísmico a cada nivel paleosísmico para utilizar esta información con una finalidad paleosismológica.

Se han visto algunas características de las figuras de paleosismicidad y cómo se puede tratar de diferenciarlas de deformaciones de origen no sísmico. Después de haber reconocido tales deformaciones, hay que definir la superposición de los eventos. Para ello nos interesan las capas contorneadas donde se identifica la zona de la interfase agua/sedimento, es decir el nivel que corresponde a erosión o a discordancias sobre el nivel perturbado. Si la deformación se produjo en un nivel enterrado, se puede notar un amortiguamiento de la deformación sin que se identifique una isocrona que nos permita fechar el evento. Esto es importante ya que se debe diferenciar una superposición de sismos y varios niveles afectados por un mismo sismo. Otro problema surge en la correlación de los eventos. En Quito, la presencia de capas guías de origen volcánico nos ayudó bastante.

El análisis de la sismicidad histórica depende mucho de la objetividad con que se realizaron las descripciones por parte de los antiguos cronistas; sin embargo, se puede considerar que los eventos sísmicos de importancia mediana o mayor difícilmente pasaron desapercibidos. En cambio, el análisis de las sismitas parece más objetivo, pero el registro paleosísmico puede estar incompleto por varias razones. Se puede hacer en parte una comparación con el funcionamiento de un sismógrafo (indicando la equivalencia geológica entre paréntesis).

Paso de solicitud: bajo una cierta frecuencia (intensidad o aceleración) el estilete no se mueve (no hay deformación; hablaremos de un valor de paso de intensidad I_0 para que se produzca deformación en los sedimentos). *Velocidad de rotación de la banda registradora* (tasa de sedimentación). *Frecuencia de las estimulaciones* (recurrencia de los sismos). Si la velocidad esta muy lenta (velocidad nula = lagunas de depositación) y/o si hay muchos señales (sismos), resulta difícil diferenciarlos. *La amplitud de movimiento del estilete del sismógrafo* puede hacer que grave encima de otros registros (los sismos mayores pueden

borrar las evidencias de sismos pequeños anteriores; en el caso de las capas contorneadas, sólo se afectaron unos centímetros o decímetros de sedimentos, lo que significa que la amplitud de movimiento del "estilete" está bien calibrada respecto a las tasas de sedimentación y recurrencias de los eventos superiores al paso de intensidad). Por fin, hay que considerar también que la banda se puede destrozarse (erosión) y que se perdieran los datos correspondientes.

4. ANÁLISIS DE LA PALEOSISMICIDAD DE QUITO

4. 1. Caso particular del registro de la Calle Pinzón

A fin de obtener resultados para el análisis del riesgo sísmico de Quito, se trató de definir parámetros sísmicos en base al estudio de los niveles paleosísmicos. La observación de veinte niveles deformados por sismos en un solo sitio nos permitió desarrollar un método de determinación de intensidades sísmicas en base a una comparación estadística con la sismicidad histórica, el mismo que lo aplicamos en la ciudad para obtener el calendario paleosísmico.

En el afloramiento de la Calle Pinzón (#C2, Fig. 8) se encuentran los camellones a una profundidad de 5.8 metros. Encima aparecen 1.3 metros de depósitos limo-arcillosos con pómez (flujos de lodo, donde se desarrolló un suelo) seguidos por 30 centímetros de un paleosuelo fechado con C^{14} dando una edad calibrada de 420-640 años después de Cristo (Anexo A). Después de este suelo, se encuentran los depósitos lacustres, fluviales y paleosuelos que se observan en la Fig. 10 (A y B). Se encuentran secuencias laminadas alternadas con pequeños contrastes de litología (alternancias de láminas de sedimentos limosos y limo-arcillosos y de niveles más arenosos) que favorecieron el registro de unos veinte niveles de paleolicuefacción. Estos niveles son de importancia variable, con deformaciones que los han afectado desde menos de un centímetro hasta más de treinta (Fig. 10) (Tabla 1). Se tuvo una datación del último depósito deformado que nos da una edad calibrada de 1670-1780 ó 1790-1950 (Anexo A) incompatible con los datos históricos que nos indican que esta zona se secó definitivamente a partir del siglo XVII (Libro Primero de Cabildos de Quito, 1934). Lo que hay que mencionar es que las capas están recortadas por más de 4 metros por una paleoquebrada ahora rellenada, lo que también demuestra que los depósitos no son tan recientes. Además, no se observan evidencias de la erupción mayor del Guagua Pichincha en 1660. En un estudio previo (Pérez *et al.*, 1994) se estimó una edad de 1400 años después de Cristo en base a estimaciones de tasas de sedimentación. Sin embargo, los márgenes de error son tan grandes que no se puede tratar de comparar ningún nivel con eventos históricos. Consideramos un lapso mediano de 1000 años para este registro paleosísmico. Mientras tanto, se trató de hacer una comparación estadística con la distribución de intensidades de la sismicidad histórica.

Los estudios de Sims (1973) en el caso preciso de sedimentos lacustres limosos y limo-arcillosos de California indicaron un valor de intensidad $I_0 = VI$ (MM) para que capas contorneadas aparezcan. En el caso de la Calle Pinzón, se trata de ambientes lacustres, siendo limos, limo-arcillosos, arenas finas y medianas de origen volcánico. No estamos en presencia de niveles arenosos o arcillosos potentes que fueron capaces de producir volcanes sedimentarios. Se podría también esperar un valor de paso de intensidad de VI (MM/MSK) para que se produzca una deformación, pero hay que mencionar que existen niveles con una deformación del orden del milímetro como los niveles 3, 7 y 14 (Fig. 10) los cuales podrían corresponder a

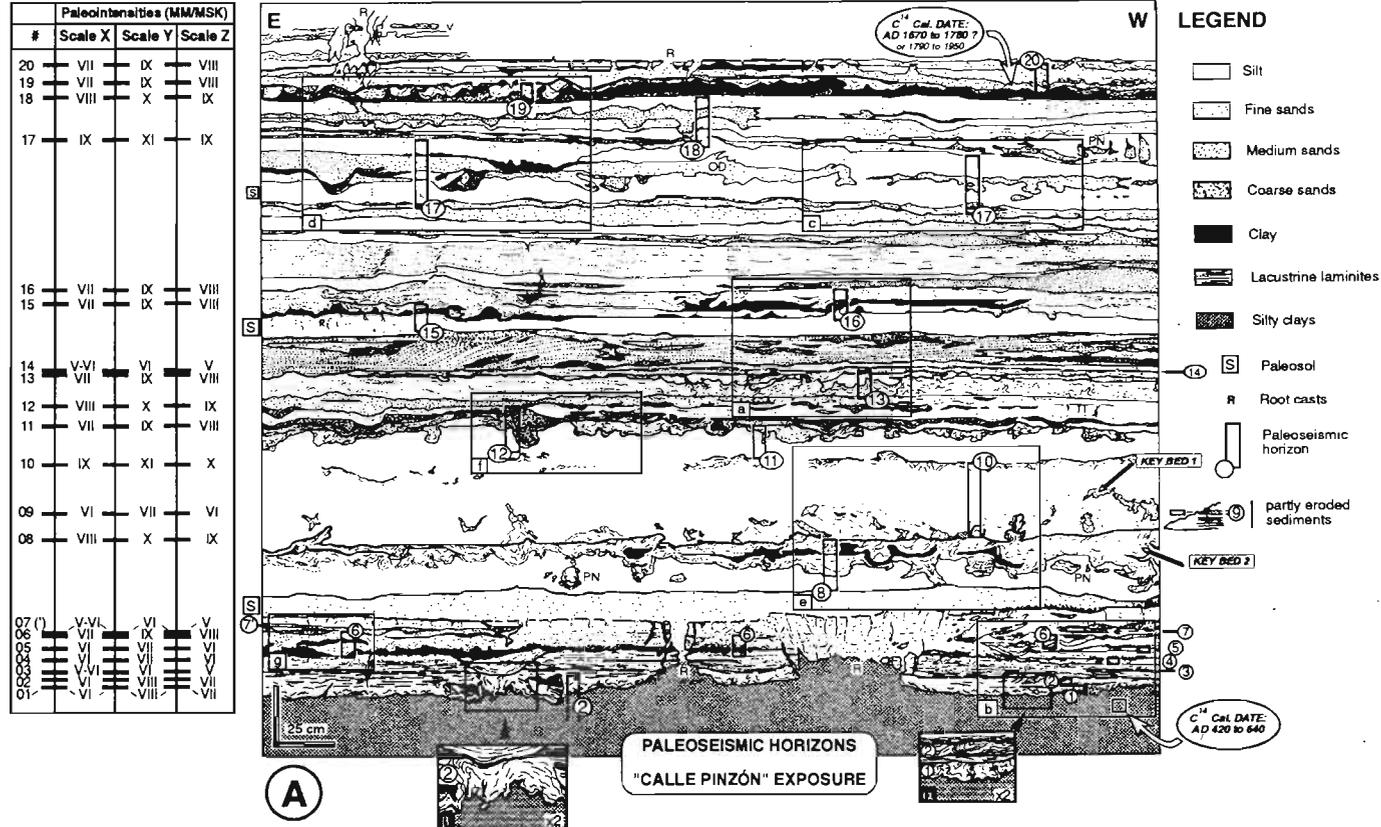


Fig. 10A - Dibujo de los horizontes paleosísmicos de la calle "Pinzón" (#C2) (ver también la Tabla 1). Vista general; posición de las muestras datadas; las ampliaciones a y b muestran diferentes respuestas del suelo al mismo paleosismo, debido a la presencia por debajo de una capa de depósitos limo-arcillosos finos; las letras a hasta f se refieren a las ampliaciones en B; las intensidades atribuidas a los horizontes paleosísmicos se refieren a las escalas X, Y y Z de la Fig. 11; PN: Pseudo Nódulos, OD: Diques Orientados.

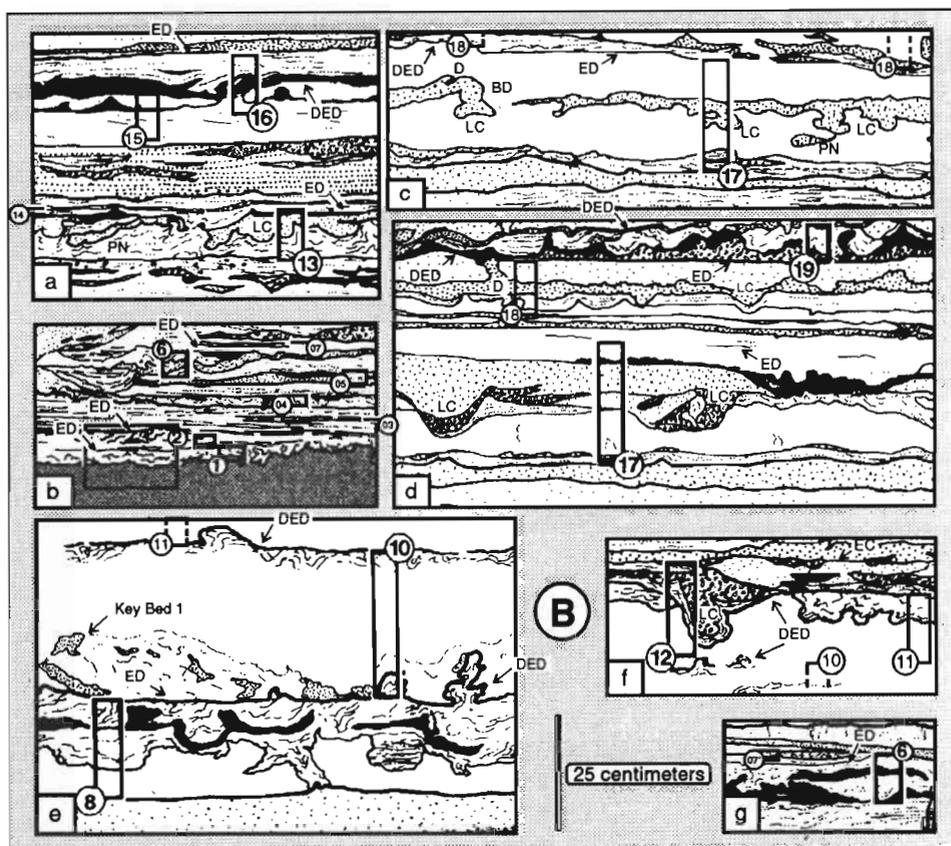


Fig. 10B - Vista en detalle de las áreas a hasta f de A; LC: Figura de carga, PN: Seudo Nódulos, D: Diques, BD: Capas cortadas, ED: Discontinuidad erosional, DED: Discontinuidad erosional deformada (debido al efecto de los sucesivos eventos paleosísmicos).

sacudimientos más pequeños, pero capaces de producir deformaciones milimétricas. Como esto no se puede verificar, se consideraron como debidos a sismos de intensidad VI, según lo descrito en la literatura. La sismicidad histórica nos indica la ocurrencia de dos eventos de intensidad máxima de IX (MSK) durante los 460 años de historia escrita. Una primera escala comparativa se puede proponer, considerando estos datos, donde a los más pequeños niveles deformados se atribuyó una intensidad de VI y a los más grandes una intensidad de IX por lo menos. Esta escala comparativa se puede definir de la manera siguiente:

$$I_n = I_{n_0} + (n - n_0) \cdot h_0 \left[\frac{h_0}{2} \right] \text{ (cm)}$$

en donde h_0 es el espesor de sedimentos deformados por la ocurrencia de un sismo de intensidad I_{n_0} y n un valor entero de intensidad. Viendo la distribución de los espesores de deformación en #C2, se atribuyó un valor de 8 cm para h_0 .

Esta relación permitió definir la escala X (Fig. 11) en donde hay una cierta coherencia en la distribución de intensidades (Fig. 11), excepto que muestra claramente una falta de eventos considerando una duración mediana de 1000 años para el registro paleosísmico, en

Tabla 1: Descripción general de los niveles paleosísmicos de la "Calle Pinzón", (ver Fig. 10).
Notas: (1): Los espesores de la deformación pueden cambiar debido al efecto del espesor de la capa de limo subyacente (ver a y b en la Fig. 10A) y se consideró un espesor de 5 cm para la interpretación paleosísmica; (2): las variaciones de espesores son debidas a la cantidad de arcilla en la secuencia lacustre; (3): las capas #7 y #7' pueden corresponder al mismo evento sísmico; (4): este nivel fue erosionado antes de la depositación de la capa 10; (5): figuras de carga e intrusiones sedimentarias del mismo nivel de arena; es notorio cómo las intrusiones tienen una dirección hacia el oeste (OD en la Fig. 10A).

Horizonte	capas contorneadas	figuras de carga	intrusiones	espesores	notas
1	si	no	no	5 cm	
2	si	no	no	5- >13 cm	(1)
3	si	no	no	0.2 cm	
4	si	no	no	3 cm	
5	si	no	no	3 cm	
6	si	no	no	6-11 cm	(2)
7 & /or 7'	si	no	no	0.4 cm	(3)
8	si	no	no	22 cm	
9	si	no	no	2 cm	(4)
10	si	no	no	31 cm	
11	si	no	no	13 cm	
12	si	si	no	20 cm	
13	si	si	no	12 cm	
14	si	no	no	0.8 cm	
15	si	no	no	12 cm	
16	si	no	no	13 cm	
17	si	si	si	26 cm	(5)
18	si	si	no	21 cm	
19	si	no	no	8 cm	
20	si	no	si	12 cm	

comparación con la distribución de intensidades en la sismicidad histórica. Por esta razón, proponemos otras escalas en base a las observaciones de Sims (1973) y relaciones matemáticas entre aceleración horizontal e intensidades.

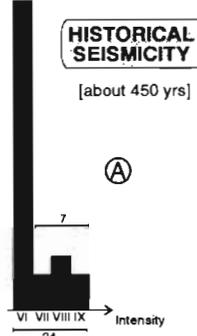
Se define la relación:

$$I_n = x^{(n-n_0)} h_0 \quad [1/3 I_n] \text{ (cm)}$$

donde x corresponde a un coeficiente multiplicador que se puede definir en base a la fórmula de Trifunac & Brady (1975) $\log a_H = 0.014 + 0.30 I_{MM}$, donde $a_{H_{n+1}} = x \cdot a_{H_n}$. Consideramos $x=2$. Se determina una primera escala en base a los datos de Sims (1973), considerando un valor $n_0 = VI$ y un valor $h_0 = 1.25$ cm. La escala Y resultante (Fig. 11) es incompatible con la distribución de la sismicidad histórica, apareciendo muchas intensidades que sobrepasan los IX grados (MM/MSK), aunque no se debe descartar la posibilidad de intensidades de este rango si consideramos que el sismo máximo probable para la falla inversa de Quito ha sido estimado en una magnitud de alrededor de 7 grados Ms y que su período de retorno estaría entre los 1500 a 4000 años (Soulas *et al.*, 1991), que se acerca al tiempo de registro que estamos analizando con estos métodos paleosísmicos; sin embargo, doce sismos de intensidad

DATE	INTENSITY (MM/MSK)		DATE	INTENSITY (MM/MSK)	
	Epicenter (1)	in Quito (2)		Epicenter (1)	in Quito (2)
1541	IX	VII-VIII ?	1787		VI
1587	IX	VIII	1797	XI	VII-VIII
1627	V	VI-VII	1859	VIII	IX
1645	IX	VI-VII	1868	X	IX
1660	V-VII	VI-VII	1870		VI
1662	VII & IV	VI-VII	1906	IX	VI
1698	X	VI-VII	1914	VIII	VI
1736	VIII	VI	1923	VIII	VII
1751		VI-VII	1938	IX	V-VI
1755	VIII	VIII-IX	1942	IX	VI
1757	IX	VI-VII	1987	IX	VI-VII
1759		VI	1990	VII	V
1764	V	VI			

Only underlined intensities were considered according to Yepes.

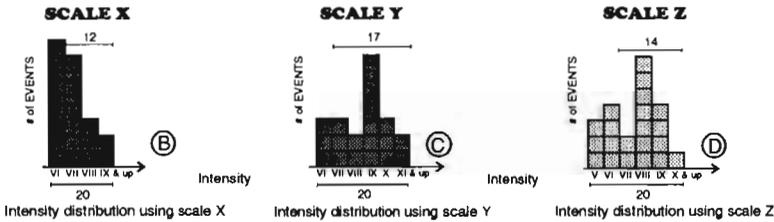


(1) CERESIS 1985.- Catálogo de Terremotos para América del Sur, Vol. 6, Ecuador, Lima (MM)
 (2) DEL PINO I., YEPES H. 1990.- Apuntes para una historia sísmica de Quito, I. Municipio de Quito (MSK)

PALEOSEISMICITY DEDUCED FROM GEOLOGIC OBSERVATIONS ("Calle Pinzón")

[Duration : about 1000 yrs]

DISTRIBUTION OF INTENSITIES



Intensity distribution using scale X Intensity distribution using scale Y Intensity distribution using scale Z

Scale X definition is inspired from historical seismicity data. It is defined by the relation:
 $ln = ln_0 + (n-n_0) \cdot h_0 [+/- h_0 / 2]$ cm
 where n is the intensity value, n_0 is the value of the intensity threshold and h_0 the thickness value for n_0 .
 We considered $n_0 = VI$, and $h_0 = 8$ cm

Both Y and Z scales consider a multiplier factor x inspired from observations of paleoseismic horizons in lacustrine deposits from California (Sims, 1973) and from mathematical relations between horizontal ground acceleration and seismic intensity (Tritunac and Brady, 1975). We define the following relation:
 $ln = x^{(n-n_0)} \cdot h_0 [+/- 1/3 ln]$ where n , n_0 , and h_0 have the same meaning as for scale X relation; we considered $x = 2$ and $h_0 = 1.25$ cm.
 Scale Y consider $n_0 = VI$ and Scale Z consider $n_0 = V$ (MM/MSK)

SCALES OF RELATIONS SEISMIC INTENSITY/THICKNESS OF CONTORTED BEDDING HORIZON

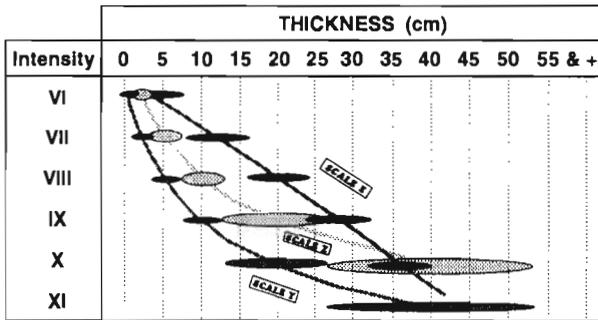


Fig. 11 - Sismicidad histórica de Quito e intensidades para los eventos paleosísmicos de la excavación #C2. Comparar las tres escalas propuestas y la relativa coherencia entre la distribución de intensidades históricas y las intensidades paleosísmicas determinadas con la escala Z para el número de eventos con $I > VI$ (considerar el doble de la duración del registro geológico con respecto al registro histórico).

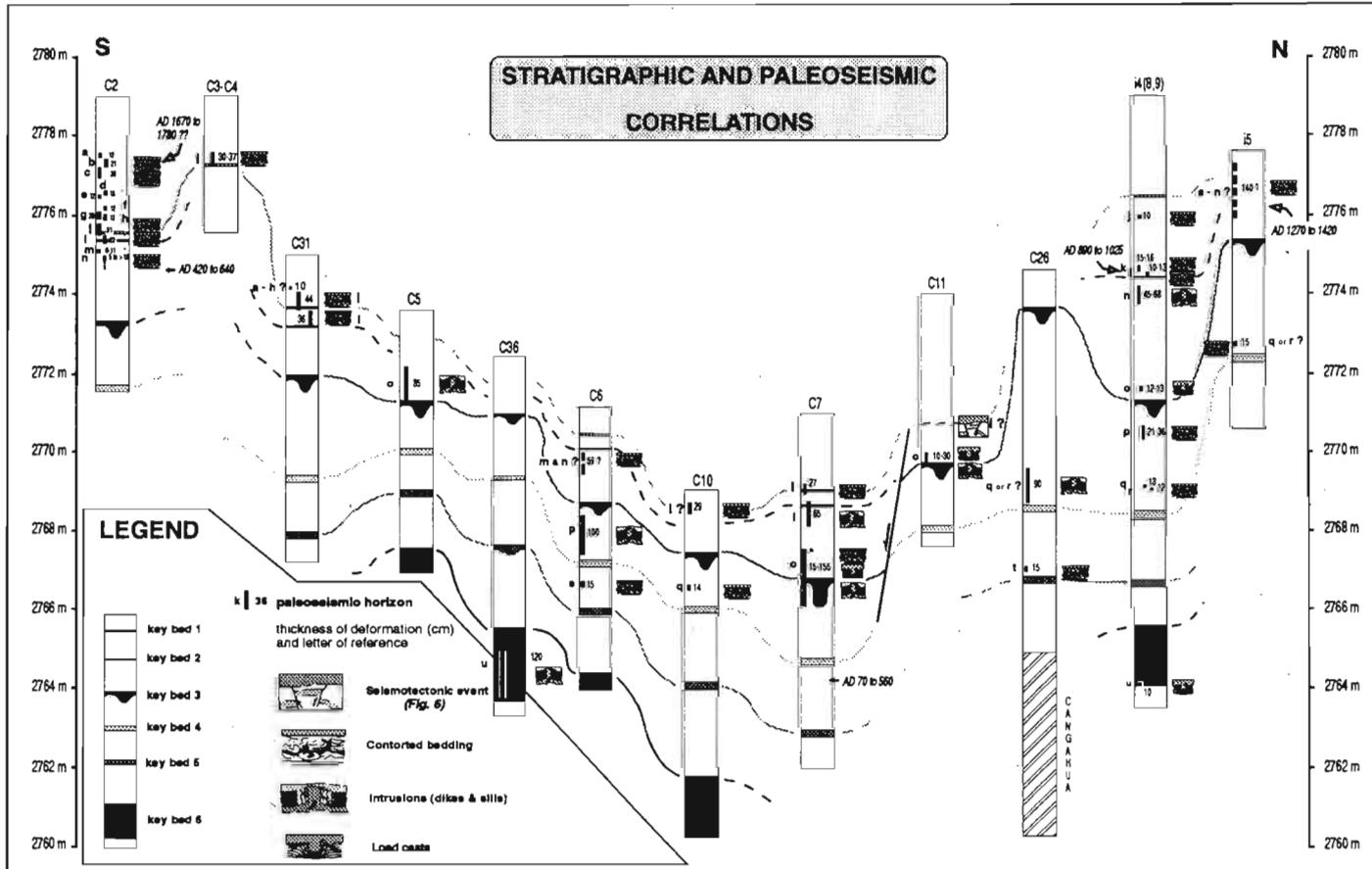


Fig. 12 - Correlación estratigráfica y paleosísmica. Las columnas estratigráficas están presentadas en sus alturas actuales. Ver Fig. 3 y 5 para la ubicación de las columnas. Los principales eventos paleosísmicos están citados desde a hasta u.

superior o igual a IX parecen demasiados para un lapso del orden de 1000 años. Por lo tanto, proponemos la escala Z (Fig. 11) que considera un valor $n_0 = V$. La distribución de las intensidades obtenida con esta escala, resulta ser muy coherente al compararla con la sismicidad histórica para sismos de intensidad $I_n \geq VII$ (MM/MSK). Pero existen menos eventos de intensidad menor que probablemente han estado más influenciados por las limitaciones de la banda registradora geológica. Con el uso de esta escala, se evidencia la posible ocurrencia de un sismo de intensidad X (MM/MSK) entre el siglo X y el siglo XVI (considerando correlaciones con las capas guías que precisan las edades).

4. 2. Correlaciones en la ciudad

La Fig. 12 muestra las correlaciones realizadas entre diferentes afloramientos, en base a la presencia de seis capas guías de origen volcánico. Debido a estas correlaciones, la numeración de la Fig. 10 tuvo que cambiar (Tabla 2). Los datos de estos afloramientos son más detallados por Hibschi *et al.* (1996) y Alvarado (1996). Entre otras observaciones, se destaca principalmente la distribución espacial al nivel de la ciudad del nivel i al que fue atribuido una intensidad X en #C2. Los espesores de este nivel varían de 27 hasta 44 cm, estando de acuerdo con los valores definidos por la escala Z. Gracias a las correlaciones con las excavaciones #i4, 8, 9 se puede mejorar la datación de este evento entre el siglo IX-XI y el siglo XVI. Este evento se pudo correlacionar entre las excavaciones cercanas #C11 y #C7. En esta última, el nivel i está cubierto por un nivel fluvial grueso. En #C11, este nivel fluvial fosiliza fallas normales sinsedimentarias y deformaciones sismotectónicas compresivas (fallas inversas; Fig. 3 y 6). Esta observación sugiere una fuente proximal para este sismo, lo que está de acuerdo con el conocimiento de las fuentes sismogenéticas regionales, donde sólo se considera la falla de Quito como capaz de producir tales intensidades en la ciudad.

4. 3. Paleosismicidad geológica y sismicidad histórica

En las figuras 11 ó 13 están resumidos los principales sismos que han afectado Quito desde el siglo XVI, según la publicación de Del Pino & Yepes (1990). Se puede decir que algunas intensidades fueron sobrestimadas, o subestimadas por lo que luego de un análisis crítico hecho

Tabla 2 - Tabla de conversión para los niveles paleosísmicos de las Fig. 10 y 13.

Fig. 10	Fig. 13	Fig. 10	Fig. 13
1	η	11	h
2	n	12	g
3	γ	13	f
4	ϕ	14	β
5	ϵ	15	e
6	m	16	d
7 &/or 7'	δ	17	c
8	k or l	18	b
9	χ	19	α
10	i	20	a

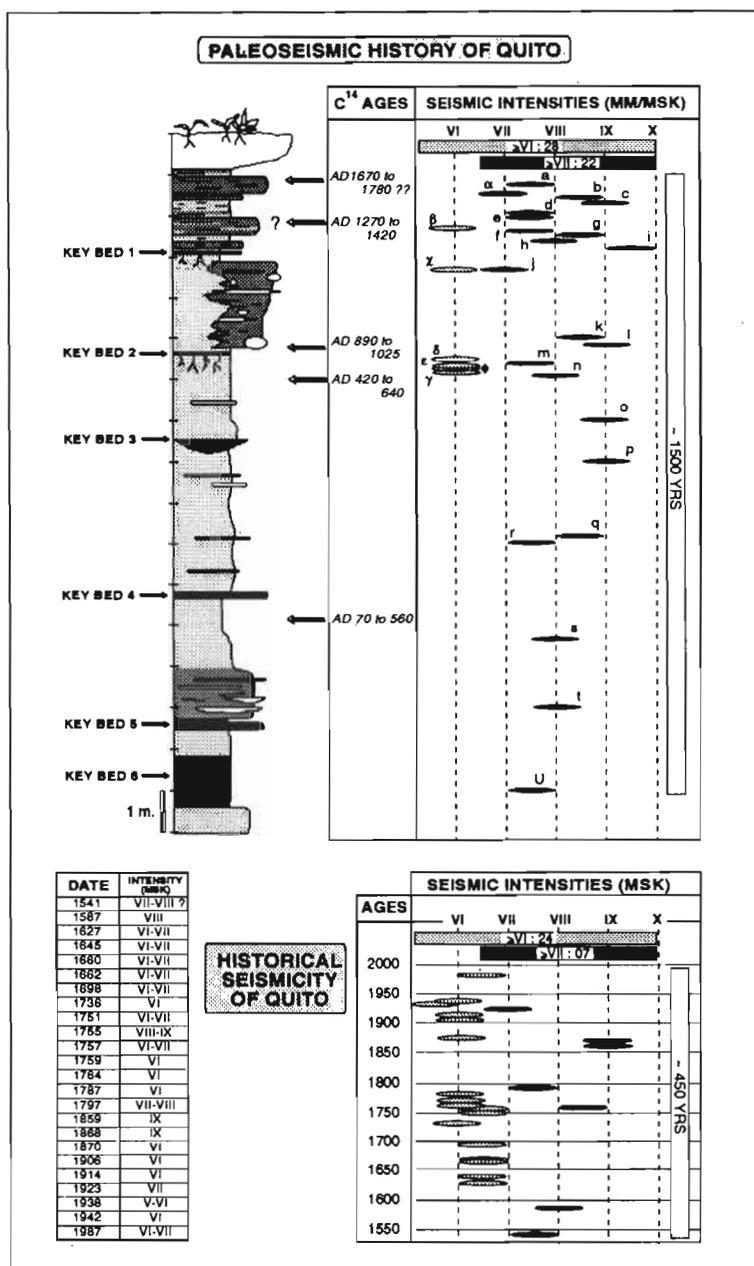


Fig. 13 - Sismicidad histórica de Quito e historia paleosísmica complementaria obtenida con el análisis geológico de la cuenca. Nótese la poca cantidad de eventos de baja intensidad detectados con el método paleosísmico y la relativamente buena coherencia entre la distribución de intensidades históricas y la de intensidades paleosísmicas, para los eventos con intensidades mayores o iguales que VII (considerando el triple de la duración del registro geológico con respecto al registro histórico); además, observar un posible paleosismo con intensidad IX-X entre los siglos X y XVI.

por H. Yepes, algunos eventos cambiaron de intensidad. Se puede comparar dos calendarios sísmicos (Fig. 13), uno obtenido con los datos históricos y el otro con la utilización de la escala Z antes mencionada. Observamos que la distribución de intensidades obtenidas con el estudio del registro geológico holocénico aflorando, indica la ocurrencia de 22 eventos de intensidad $I_n \geq VII$ (MM/MSK) para una duración tres veces más larga que el registro histórico, durante el cual se registraron siete eventos en este rango de intensidad. No podemos esperar correlaciones más exactas, más aún si el mismo proceso de generación de terremotos no es regular.

5. CONCLUSIONES

Entre las varias fuentes sismogenéticas que pueden afectar a la ciudad de Quito, sólo un evento fue relacionado con esta estructura, en 1755, durante los 460 años de historia escrita. Viendo la distribución de los daños, se estima que fue un evento menor a 7 grados Ms, que es el valor de magnitud que se podría esperar, el mismo que produciría intensidades superiores a IX en Quito, en caso de una ruptura completa de los 45 km de la falla. Considerando que el escarpe de falla no se puede analizar directamente, porque se halla cubierto por numerosos deslizamientos, se buscaron otras evidencias de su actividad holocénica. La evolución del relleno de la cuenca norte de Quito indica una actividad tectónica, donde se identifica un fallamiento normal encima de una rampa al nivel de un *piggy back basin* desarrollado atrás de los levantamientos producidos por el movimiento inverso de la falla de Quito. Sin poder analizar el escarpe de falla mismo, la velocidad de la estructura y la recurrencia de los sismos mayores se encuentran todavía mal conocidas. Las estimaciones que se hicieron de la velocidad de esta falla oscilan entre 0.4 y 3-4 mm por año. Estimaciones de otro autor indican una velocidad de 0.5-1 mm por año y una recurrencia de 1500-4000 años para los eventos mayores. El estado actual del estudio de dicha falla no nos permite definir con confianza su tasa de actividad, así que se tuvo que buscar evidencias directas de su actividad paleosísmica.

A pesar de todas las limitaciones del análisis de la paleolicuefacción con fines de reconstrucción paleosísmica, este método se constituye por el momento en la única manera de estudiar la sismicidad que sobrepasa los 500 años de retorno. Con la comparación de los datos de sismicidad histórica y los que provienen del análisis de la paleolicuefacción registrada en los depósitos holocénicos de las paleolagunas de Quito, se ha definido un método de asignación de intensidades sísmicas, asumiendo que el espesor de deformación de niveles paleosísmicos superficiales tipo invaginaciones está relacionada con la intensidad (¿aceleración?). De la escala así establecida se encuentra una buena compatibilidad entre la información histórica y la geológica para los sismos de intensidades iguales a superiores a VII, proyectándose además que ocurrió un sismo de intensidad X, el que no aparece en el registro de 450 años de sismicidad histórica, pero que se esperaba de acuerdo con la recurrencia establecida para el sismo máximo probable de la falla de Quito. La correlación entre el nivel paleosísmico asociado a este evento y deformaciones sismotectónicas en la cuenca conforta esta hipótesis. El análisis de la paleosismicidad geológica y de la sismicidad histórica indica una recurrencia media de 115 años para los eventos de intensidad $I \geq VIII$. En el detalle de la sismicidad histórica, se nota que esta recurrencia puede variar de 168 años hasta sólo 9. De todos modos, viendo la larga lista de fuentes sismogenéticas peligrosas para la ciudad y tomando en cuenta el mecanismo de generación de terremotos, no se podría esperar el tener una recurrencia regular de los eventos sísmicos que afectaron Quito. La paleosismicidad

de la ciudad corresponde a una mezcla de las recurrencias de cada rasgo tectónico superficial y de los sismos de subducción. Obviamente, los terremotos de cada rasgo muestran recurrencias que pueden pasar los cinco siglos. Estos extensos períodos de retorno se podrían determinar gracias al análisis de la paleoicuefacción como la presente, trabajando no sólo en la cuenca de Quito, sino en paleoambientes favorables más cercanos a cada una de las fallas sismogénicas. Se necesita todavía una buena calibración de la escala de intensidades con el análisis de algunos eventos históricos bien conocidos en varios tipos de sedimentos. Conjuntamente con el desarrollo de la tefrostratigrafía que nos permitiría correlacionar los eventos, un largo estudio en todo el país podría permitir establecer esta calibración y además conocer con más precisión la repartición geográfica de los sismos mayores.

Finalmente, vale la pena enfatizar en la gran necesidad de conocer mejor los depósitos holocénicos y cuaternarios no sólo andinos sino en todo el país, así como también la necesidad de dataciones que permitan realizar y afinar estudios de detalle como el presente.

Agradecimientos

Agradecemos a los ingenieros, arquitectos y dueños de los terrenos donde se efectuaron las excavaciones, por permitirnos el libre ingreso para realizar la presente investigación.

Referencias citadas

- ALVARADO, A., 1996 (en preparación) - Evolución geológica cuaternaria y paleosismicidad de la cuenca norte de Quito, Ecuador, Tesis de Grado, Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- AUDEMARD, F.A. & DE SANTIS, F., 1991 - Survey of liquefaction structures induced by recent moderate earthquakes. *Bulletin International Association Engineering Geology*, 4: 5-16, Paris.
- BONILLA, F. & RUIZ, M., 1992 - Evaluación del peligro sísmico en el Ecuador. Tesis de Grado, Escuela Politécnica Nacional, Quito, (unpublished).
- BONILLA, L. F., PÉREZ, V. H., SÁNCHEZ, A., RUIZ, M., YEPES, H. & CHATELAIN, J.-L., 1992 - Análisis preliminar de la microsismicidad de la zona de Quito (Ecuador), período: 1988-1992. *Segundas Jornadas en Ciencias de la Tierra* (abstract):12-14.
- BONILLA, M., MARK, R. & LIENKAMPER, J., 1984 - Statistical relations among earthquake magnitude, surface rupture length and surface fault displacement. *Bulletin Seismological Society of America*, 74(6): 2379-2411.
- CERESIS, 1985 - *Catálogo de terremotos para América del Sur*. Vol. 5-6: 106p.; Ecuador, Lima.
- DARVE, F. & FLAVIGNY, E., 1978 - Simulation de la liquéfaction des sols avec une loi incrémentale. in: *Matériaux et structures sous chargement cyclique, Palaiseau* : 101-105, Paris : Association Amicale Ingénieurs Anciens Elèves de l'École Nationale des Ponts-et-Chaussées.
- DAVENPORT, C., RINGRÖSE, P., BECKER, A., HANCOCK, P. & FENTON, C., 1989 - Geological investigations of late and post-glacial earthquake activity in Scotland. in: *Earthquakes at North-Atlantic Passive Margins: Neotectonics and Post-glacial Rebound* (Sgrefgeren & P. W. Bashan eds.): 175-194.
- DÁVILA, F., 1990 - Geodinámica plio-cuaternaria de la cuenca de Latacunga - Ambato, Callejón interandino entre Salcedo y Pillaro. Tesis Politécnica Nacional, Quito, 192p.
- DEL PINO, I. & YEPES, H., 1990 - Apuntes para una historia sísmica de Quito. in: *Centro histórico de Quito. Problemática y perspectivas: 67-100*; Ecuador: Dirección de Planificación. I. Municipio de Quito.
- EGO, F., 1992 - La tectónica activa en el Norte de los Andes Ecuatorianos. Informe Científico IFEA (unpublished), Quito, 9p.
- EGO, F., SÉBRIER, M., LAVENU, A., YEPES, H. & EGÚEZ, A., 1995 - Quaternary state of stress in northern Andes and the restraining bend model for the Ecuadorian Andes. *Tectonophysics* (accepted).
- GEOTECNIA Y CIMENTOS III, 1980 - Tomo III (Jiménez Salas, coordinador): 751-998; Madrid: Editorial Rueda.

- GEOTÉRMICA ITALIANA SRL, 1989 - Mitigación del riesgo volcánico en el área metropolitana de Quito, 99p., Informe final (unpublished).
- GRUPO LOCAL DE TRABAJO, 1993 - Proyecto escenario de daños por terremotos en Quito, 283p., Informe técnico preliminar, Compilado por OYO Corporation, Japan.
- HEMPTON, M.R. & DEWEY, J.F., 1983 - Earthquake-induced deformational structures in young lacustrine sediments, East-Anatolian Fault, south-east Turkey. *Tectonophysics*, **98**: T7-T14.
- HIBSCH, C., ALVARADO, A., YEPES, H., PÉREZ, V. H. & SEBRIER, M., 1996 - Holocene tectonics and liquefaction / soft-sediment deformation in Quito (Ecuador): a paleoseismic history recorded in lacustrine sediments. *Journal of Geodynamics* (submitted).
- HOLZER, T.L., YOUNG, T.L. & HANKS, T.C., 1989 - Dynamics of liquefaction during the 1987 Superstition Hills, California, earthquake. *Science*, **244**: 56-59.
- ISHIHARA, K., 1985 - Stability of natural deposits during earthquakes. in: *Proceedings of 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, **2**: 321-376; San Francisco.
- ISHIHARA, K. & HSU, H.L., 1986 - Considerations for landslides in natural slopes triggered by earthquakes. *Proceedings of JSCE*, **376/III-6**: 16p.
- ISHIHARA, K. & KOGA, Y., 1981 - Case studies of liquefaction in the 1964 Niigata earthquake. *Soils and Foundations, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, vol. **21**(3): 35-52.
- KANAMORI, H. & Mc NALLY, K., 1982 - Variable rupture mode of the subduction zone along the Ecuador-Colombian coast. *Bulletin Seismological Society of America*, **72**: 1241-1253.
- KUENEN, P. H., 1958 - Experiments in Geology. *Geological Magazine*, **23**: 1-28.
- LAVENU, A., EGO, F., NOBLET, C. & WINTER, T., 1993 - Neogene to present tectonic evolution and stress field in Ecuador. *Second ISAG meeting*: 211-214; UK: Oxford.
- LIBRO PRIMERO DE CABILDOS DE QUITO, 1934 - Tomo I, de 1534 a 1539, Archivo Municipal de Quito.
- LIBRO PRIMERO DE CABILDOS DE QUITO, 1934 - Tomo II, de 1539 a 1543, Archivo Municipal de Quito.
- MÖRNER, N.A., 1985 - Paleoseismicity and geodynamics in Sweden. *Tectonophysics*, **117**: 139-153.
- ÖBERMEIER, S. F., 1989 - The New Madrid earthquakes: an engineering-geologic interpretation of relict liquefaction features. *U.S. Geological Survey Professional Paper*, **1336-B**: 11 Pl., 1 Appendix, 54p.
- ÖBERMEIER, S.F., JACOBSON, R.B., SMOOT, J.P., WEEMS, R.E., GOHN, G.S., MONROE, J.E. & POWARS, D.S., 1990 - Earthquake-induced liquefaction features in the coastal setting of South Carolina and in the fluvial setting of the New Madrid seismic zone. *U.S. Geological Survey Professional Paper*, **1504**: 1 Pl., 44p.
- PECKER, A., 1985 - Comportement des sols sous chargement cyclique. *Génie Parasismique*, 1105p., Paris.
- PENNINGTON, W.D., 1981 - Subduction of the eastern Panama Basin and seismotectonics of north-western south America. *Journal of Geophysical Research*, **86**(B11): 10753-10770.
- PÉREZ, V.H., HIBSCH, C.S., ALVARADO, A.P. & YEPES, H.A., 1994 - Paleosismicidad de la ciudad de Quito (Ecuador) a través del análisis de la paleolocación cuaternaria. *Estudios de Geografía*, **6**: 31-46.
- PETTIJOHN, F.J., POTTER, P.E. & SIEVER, R., 1973 - Sand and sandstones. *Springer*, 618p., New York.
- RINGRÖSE, P.S., 1989 - Palaeoseismic liquefaction event in late Quaternary lake sediments at Glen Roy, Scotland. *Terra Nova*, **1**: 57-62.
- RODRÍGUEZ DE AGUAYO, P., 1897 - Descripción de la ciudad de Quito y vecindad de ella. Por el arcediano de su iglesia. in: *Relaciones Geográficas de Indias-Perú* (Biblioteca de Autores Españoles). Tomo II (Jiménez de la Espada M.): 201-204; Madrid: Atlas.
- SAMANIEGO, P., EGÜEZ, A., HIBSCH, C., VILLAGÓMEZ, R. & SEGOVIA, M., 1994 - Estratigrafía y tectónica de la cuenca de Guayllabamba. in: *Terceras Jornadas en Ciencias de la Tierra, Quito* (Abstract): 49-50.
- SIMS, J.D., 1973 - Earthquake-induced structures in sediments of Van Norman Lake, San Fernando, California. *Science*, **182**: 161-163.
- SIMS, J.D., 1975 - Determining earthquake recurrence intervals from deformational structures in young lacustrine sediments. *Tectonophysics*, **29**: 141-152.
- SOULAS, J.-P., EGÜEZ, A., YEPES, H. & PÉREZ, V.H., 1991 - Tectónica activa y riesgo sísmico en los Andes Ecuatorianos y el extremo Sur de Colombia. *Boletín Geológico Ecuatoriano*, **2**(1): 3-11.
- STUIVER, M. & LONG, A., 1993 - Calibration 1993. *Radiocarbon*, **35**, **1**: 244p.
- TIBALDI, A. & FERRARI, L., 1992 - Latest Pleistocene - Holocene tectonics of the Ecuadorian Andes. *Tectonophysics*, **205**: 109-125.
- TRIFUNAC, M.D. & BRADY, A.G., 1975 - On the correlation of seismic intensity scales with the peaks of recorded strong ground motion. *Bulletin Seismological Society of America*, **65**(1): 139-162.

WINTER, T., 1990 - Mécanismes des déformations récentes dans les Andes équatoriennes. Thèse Univ. Paris-Sud, Orsay, 205p.

YEPES, H., RAMON, P., EGÚEZ, A. & FERNÁNDEZ, J., 1990 - Estudios de riesgo sísmico para las obras complementarias del proyecto Papallacta, 27p., Informe Inédito Empresa Municipal de Agua Potable, Quito.

YOUD, T.L. 1984. - Recurrence of liquefaction at the same site. *8th World Conference on Earthquake Engineering*, 3: 231-238.

Anexo A: Dataciones

# Muestra	Edad radiom.*	C13/C12 ratio	Edad calibrada **	Laboratorio	Nota
#48 (0.3g carbón)	1730 +/- 110 BP	-25 ‰ ₀₀ estimado	AD 70 to 560	Beta Analytic (Miami)	(1)
#49 (suelo)	1540 +/- 60 BP	-25 ‰ ₀₀ estimado	AD 420 to 640	Beta Analytic (Miami)	
#167 (suelo orgánico)	1070 +/- 40 BP	-25 ‰ ₀₀ estimado	AD 890 to 1025	Beta Analytic (Miami)	(2)
#148 (suelo orgánico)	640 +/- 60 BP	-25 ‰ ₀₀ estimado	AD 1280 to 1415	Beta Analytic (Miami)	
#34 (material carbonoso)	80 +/- 50 BP	-22.4 ‰ ₀₀ medido	AD 1670 to 1780 (40%) or 1790 to 1950 (60 %)	Beta Analytic by ETH (Zurich)	AMS (3)

* Tiempo de vida media del isótopo de C14: 5568 yr.

** Calibraciones referidas en Stuiver & Long, 1993. Las calibraciones se presentan como 2 sigma, con una probabilidad de 95%.

(1): para esta pequeña muestra de carbón se usó tiempo de contaje extendido.

(2): los sedimentos con bajo contenido de carbón requirieron un tratamiento especial.

(3): C13/C12 ratios fueron medidos con acelerados. C13 edades ajustadas: 125 +/- 55 BP.

LE VOLCAN CAYAMBE (ÉQUATEUR) : SON ACTIVITÉ AU COURS DES 5 000 DERNIÈRES ANNÉES ET LES MENACES QUI EN RÉSULTENT

*Michel Monzier * **, Pablo Samaniego **, Claude Robin * ***

Résumé

L'étude des produits récents émis par les dômes dacitiques qui constituent la partie sommitale du volcan Cayambe, situé à 60 km au NE de Quito, révèle quatre unités volcaniques comprenant des coulées pyroclastiques à blocs et cendres, des déferlantes et des lahars associés. La plus jeune de ces unités a été émise vers 360 ans BP. Par ailleurs, l'étude des dépôts d'une tourbière du Cayambe met en évidence 23 niveaux de retombées (cendres et lapilli) émis au cours de 3 grands cycles d'activité, de 7 à 10 siècles de durée, depuis 4 000 ans. Le dernier de ces cycles, auquel peuvent être rattachées les quatre phases de coulées pyroclastiques, n'est peut-être pas terminé, comme le suggère une petite éruption intervenue en 1785-1786. Ces résultats donnent un éclairage nouveau sur les menaces que ce volcan, fortement englacé, fait peser sur les populations vivant à son pied.

Mots-clés : *Volcanisme récent, téphrochronologie, Équateur, volcan Cayambe, coulées pyroclastiques, menaces volcaniques.*

EL VOLCÁN CAYAMBE (ECUADOR): SU ACTIVIDAD DESDE LOS ÚLTIMOS 5 000 AÑOS Y LAS AMENAZAS CORRESPONDIENTES

Resumen

El estudio de los productos recientes emitidos por los domos dacíticos que forman la cumbre del volcán Cayambe, ubicado a 60 km al noreste de Quito, revela cuatro unidades de flujos piroclásticos de bloques y ceniza, oleadas y lahars asociados. La unidad más reciente fue emitida alrededor de 360 BP. Además, el estudio de los depósitos de una turbera del Cayambe muestra 23 niveles de caídas (cenizas y lapilli), que corresponden a tres ciclos de actividad, de 7 a 10 siglos de duración cada uno, durante los 4 000 últimos años. El último ciclo, que incluye las cuatro unidades de flujos piroclásticos mencionadas, puede no haber terminado todavía, como lo sugiere la pequeña erupción ocurrida en 1785-1786. Estos resultados enfatizan el peligro que este volcán, cubierto por un espeso casquete glaciar, puede representar para las poblaciones y las infraestructuras establecidas en sus alrededores.

Palabras claves: *Volcanismo reciente, tefrocronología, Ecuador, volcán Cayambe, flujos piroclásticos, peligros volcánicos.*

* ORSTOM, A. P. 17-11-6596, Quito, Équateur.

** Instituto Geofísico, Escuela Politécnica Nacional, A. P. 17-01-2759, Quito, Équateur.

CAYAMBE VOLCANO (ECUADOR): ERUPTIVE ACTIVITY DURING THE LAST 5,000 YEARS AND POTENTIAL HAZARDS

Abstract

The study of recent products emitted by dacite domes located on the upper flanks of Cayambe volcano, situated 60 km to the NE of Quito, yields four pyroclastic units of block and ash flows, surges and associated lahars. The youngest unit was erupted about 360 years BP. Moreover, the identification of numerous airfall deposits (ash and lapilli) in a peat bog reveals that at least 23 volcanic events have occurred since 4,000 years ago, forming 3 main cycles of activity, each 700 to 1,000 years in duration. The last cycle, to which are correlated the four pyroclastic flow units, has probably not ended, as suggested by a small eruption in 1785-1786. These results shed a new light on the potential hazards presented by this large ice-capped volcano.

Key words: *Recent volcanism, tephrochronology, Ecuador, Cayambe volcano, pyroclastic flows, volcanic hazards.*

INTRODUCTION

Situé dans la Cordillère Orientale des Andes équatoriennes, à environ 60 km au NE de Quito, le volcan Cayambe (00° 01,72' S - 77° 59,13' E - 5790 m, Fig. 1) était jusqu'ici mal connu. Cet édifice, considéré comme inactif avant les travaux récents de Hall & Mothes (1994), fait actuellement l'objet d'une étude volcanologique détaillée dans le cadre d'une coopération entre l'ORSTOM et l'Institut Géophysique de l'École Polytechnique Nationale de Quito. Les premiers résultats de ces travaux sont présentés ici, en insistant particulièrement sur l'étude téphrochronologique réalisée dans une tourbière d'altitude, à proximité immédiate des centres d'émission. Ces résultats permettent de reconstituer l'activité de ce volcan au cours des 5 000 dernières années.

1. STRUCTURE

Le Cayambe est un édifice massif, de base approximativement rectangulaire (24 km par 19 km), s'élevant entre 2 800 et 5 790 m d'altitude (Fig. 1). Une calotte glaciaire, atteignant 100 m d'épaisseur, le coiffe au-dessus de 4 800 m d'altitude. De nombreuses langues glaciaires en descendent jusque vers 4 200 m du côté amazonien, très humide et venté, et 4 600 m sur le flanc occidental plus sec. L'ensemble de l'édifice présente aussi les signes de glaciations antérieures beaucoup plus importantes. Les pentes inférieures de la moitié occidentale du volcan sont mises en culture ou consacrées à l'élevage tandis que celles du versant oriental sont couvertes par une forêt humide. Au-dessus de 3 500-4 000 m, le *paramo* (formation herbacée andine typique de ces altitudes) est omniprésent, passant vers le haut au désert de roc et de glace.

Schématiquement, du NW au SE, le complexe volcanique comprend : 1 - le Vieux Cayambe, vaste édifice essentiellement lavique, très érodé et certainement âgé de plusieurs centaines de milliers d'années ; un âge de $0,25 \pm 0,05$ Ma est donné par Barberi *et al.* (1988) pour une roche de ce vieil édifice ; 2 - le Nevado Cayambe, moins volumineux, lui aussi essentiellement effusif au début de sa construction ; cet appareil a connu une phase remarquable d'émission d'ignimbrites soudées et se trouve coiffé par un vaste complexe de dômes formant les points culminants du massif ; l'activité récente de ces dômes est le sujet du présent article ; 3 - le Cône de la Virgen, petit appareil peu élevé (3 882 m) et de faible volume, installé sur les basses pentes orientales du Nevado Cayambe, d'où s'épanchent d'importantes coulées de laves, probablement récentes (quelques milliers d'années ?).

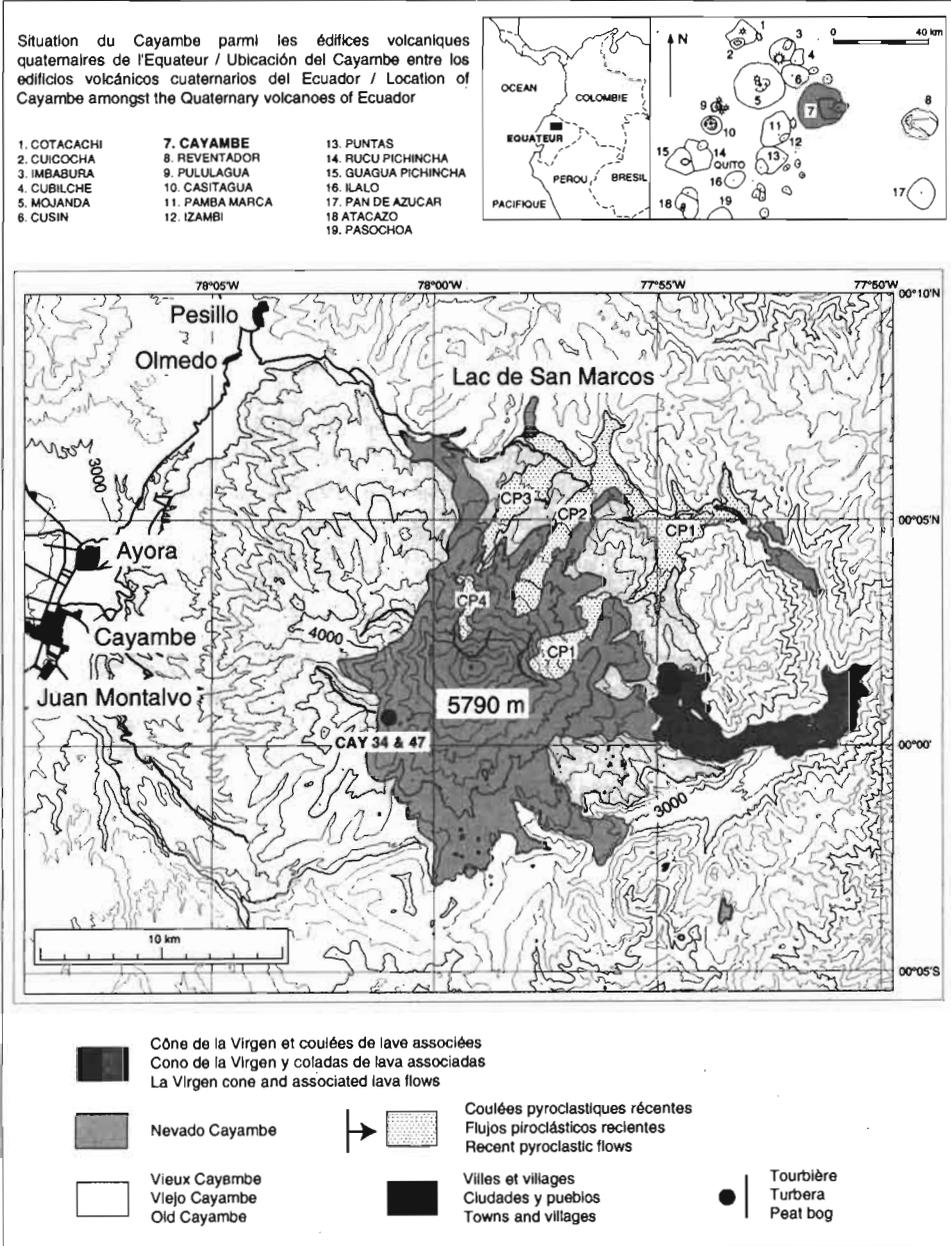


Fig. 1 - Le volcan Cayambe ; situation et carte géologique préliminaire.

2. ACTIVITÉ RÉCENTE DES DÔMES SOMMITAUX

2. 1. Coulées pyroclastiques du versant NE

Quatre unités de coulées pyroclastiques récentes, notées CP1 à 4, ont été reconnues sur le flanc NE du Nevado Cayambe (Fig. 1).

De l'unité CP1, la plus ancienne, l'érosion n'a laissé que des lambeaux de 10 à 20 m d'épaisseur, accrochés aux flancs des vallées. Vers l'amont, les dépôts peuvent être suivis jusqu'au pied d'un dôme sur le flanc oriental de l'édifice, vers 4 800 m d'altitude. Cette unité correspond apparemment à un seul épisode éruptif ayant produit une coulée de cendres à blocs dacitiques denses, de taille inférieure à 30 cm. Les unités CP2 et CP3 sont clairement plus jeunes, car peu érodées et peu boisées. Une légère différence dans le degré d'érosion et la densité de la couverture végétale montre toutefois que CP2 a dû précéder de peu CP3.

L'unité CP2, issue d'un centre d'émission actuellement obstrué par un dôme (4 553 m) aux formes hérissées très fraîches, s'étend vers le NNE sur près de 9 km. Sa largeur est très constante, de l'ordre de 600 à 900 m et son épaisseur visible atteint une centaine de mètres. Elle comprend plusieurs dépôts se succédant sans interruption notable. Un lahar cendreux à blocs vitreux, non vésiculés, de dacite homogène ou hétérogène (bandes sombres et claires très prononcées), clairement dérivé d'une coulée pyroclastique, constitue le dépôt basal. Ce dépôt est surmonté par des horizons massifs résultant de coulées pyroclastiques à cendres et blocs. Les blocs, de taille inférieure à 80 cm, montrent très souvent un bandage net, signe d'hétérogénéité magmatique. Un niveau peu cendreux, à blocs homogènes (> 80 % de blocs en volume), constitue le dépôt sommital de l'unité CP2.

Bien qu'aussi épaisse que la précédente, l'unité CP3 correspond apparemment à une seule, volumineuse, coulée de cendres et blocs, ces derniers étant identiques à ceux de CP2. Quelques grosses bombes (jusqu'à 80 cm de diamètre), vésiculées, craquelées et à surface en croûte de pain, ont été observées dans ce dépôt. Leur couleur gris très clair ou noire, confirme la présence de deux magmas (compositions extrêmes : 61 et 65,5 % SiO_2). Depuis l'altitude 4 100 m, la coulée CP3 s'étend vers le NNE sur plus de 6 km, avec une largeur maximum d'environ 800 m. Lors de sa mise en place, elle a barré l'ancien réseau hydrographique, donnant naissance au Lac de San Marcos. Les trois unités CP1 à CP3 n'ont pu être directement datées, aucun débris végétal n'ayant été observé en leur sein.

L'unité la plus récente, CP4, est clairement différente des trois autres, bien que montrant la même hétérogénéité magmatique que CP2 et CP3. Elle est issue d'un cratère entaillant un dôme sous le sommet du Nevado Cayambe, dôme ayant au préalable donné naissance à CP3 (Fig. 1). CP4 correspond à un dépôt gris-blanc de déferlantes, nu, sans sol ni végétation de couverture, épais d'une dizaine de mètres au moins et formé de cendres grossières incluant des lapilli et petits blocs denses ou très faiblement vésiculés. Le dépôt repose directement sur une série de retombées centimétriques de cendres fines à grossières (14 niveaux pour 43 cm au total) qui ont fossilisé un sol noir de 5 cm d'épaisseur, écrasant et carbonisant partiellement la maigre végétation d'altitude qu'il portait localement. Une datation au C^{14} , réalisée sur ces débris charbonneux a donné un âge de 360 ± 70 BP.

Les hétérogénéités magmatiques, suggérées par les bandages des blocs des unités CP2, 3 et 4, sont confirmées par l'étude minéralogique. Les différences entre les deux phases, sombre et claire, s'expriment en particulier par de très forts zonages dans les pyroxènes et les

plagioclases (ces derniers étant en moyenne plus calciques dans la phase sombre), la présence occasionnelle d'olivine et des compositions nettement différentes entre les verres (pics à 64-66% SiO₂ pour la phase sombre, 73 à 76% pour la phase claire) (Samaniago, 1996).

2. 3. Retombées récentes

De nombreuses coupes téphrostratigraphiques ont été réalisées dans les parties hautes du Nevado Cayambe pour repérer et étudier les niveaux de retombées liées à l'activité récente du complexe de dômes. Deux d'entre elles (CAY 34 et 47) correspondent à de petits puits creusés dans une tourbière, située 4 km à l'WSW du sommet, vers 4 300 m d'altitude (Fig. 1). La tourbière, encore active, est installée dans une cuvette d'origine glaciaire de 200 x 600 m, qui constitue un piège à tephra efficace. Sa surface, très légèrement inclinée, voit de nombreux filets d'eau s'écouler entre les touffes de végétation. Les deux puits, situés à deux altitudes légèrement différentes (environ 2,5 mètres de différence), ont été creusés pour obtenir une coupe synthétique d'environ 4,37 m (Fig. 2).

Un grand nombre de niveaux de cendres, contenant le plus souvent des lapilli, alternant avec des passées de tourbe, ont été relevés et échantillonnés dans les deux puits. En dehors des variations granulométriques d'un niveau à l'autre, cendres et lapilli correspondent généralement à un même matériel dacitique, tout à fait comparable aux roches habituellement observées dans les coulées pyroclastiques et à celles du sommet, au contact avec la calotte glaciaire. Pour cerner l'âge des différents événements observés, des datations C¹⁴ ont été réalisées sur six échantillons de tourbe, échelonnés le long des deux coupes (Fig. 2). Les résultats de ces datations confirment pleinement la justesse de la corrélation qui avait été envisagée sur le terrain entre les deux coupes. Chacune des 23 retombées observées n'ayant pu être datée isolément, une échelle de temps a été établie, basée sur des événements volcaniques considérés comme instantanés et un taux de formation de la tourbe constant au cours de chacune des périodes bornées par une paire de datations. On observe que l'épaisseur de tourbe correspondant à une durée donnée diminue en fonction de l'âge des dépôts : 7,7 à 8 cm/siècle entre la période actuelle et 2 040 BP ; puis 4,5 cm/siècle entre 2 040 et 2 580 BP ; enfin 2,7 cm/siècle entre 2 580 et 3 880 BP. Ces variations peuvent aussi bien refléter une évolution des conditions climatiques dans un sens favorable à la croissance des plantes de la tourbière au cours des quatre derniers millénaires, qu'un phénomène de tassement de la tourbe, l'hypothèse la plus probable étant une action conjointe de ces deux phénomènes. Cette échelle de temps est reportée sur la figure 2, ainsi que les âges déduits pour les événements volcaniques.

3. INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS ET ÉVALUATION DES MENACES FUTURES

3. 1. Cycles éruptifs

Un diagramme (Fig. 3) permet de visualiser facilement l'évolution de l'activité éruptive du Nevado Cayambe pendant les quatre derniers millénaires. L'épaisseur des dépôts donne une idée approximative de l'importance de chaque événement, tandis que l'échelle linéaire du temps fait bien ressortir 3 grands cycles d'activité. Le plus ancien comprend 4 événements, dont les âges sont proches de 3 750, 3 600, 3 520 et 3 150 BP ; il a interrompu une longue période de quiescence, dont la durée peut être estimée à au moins

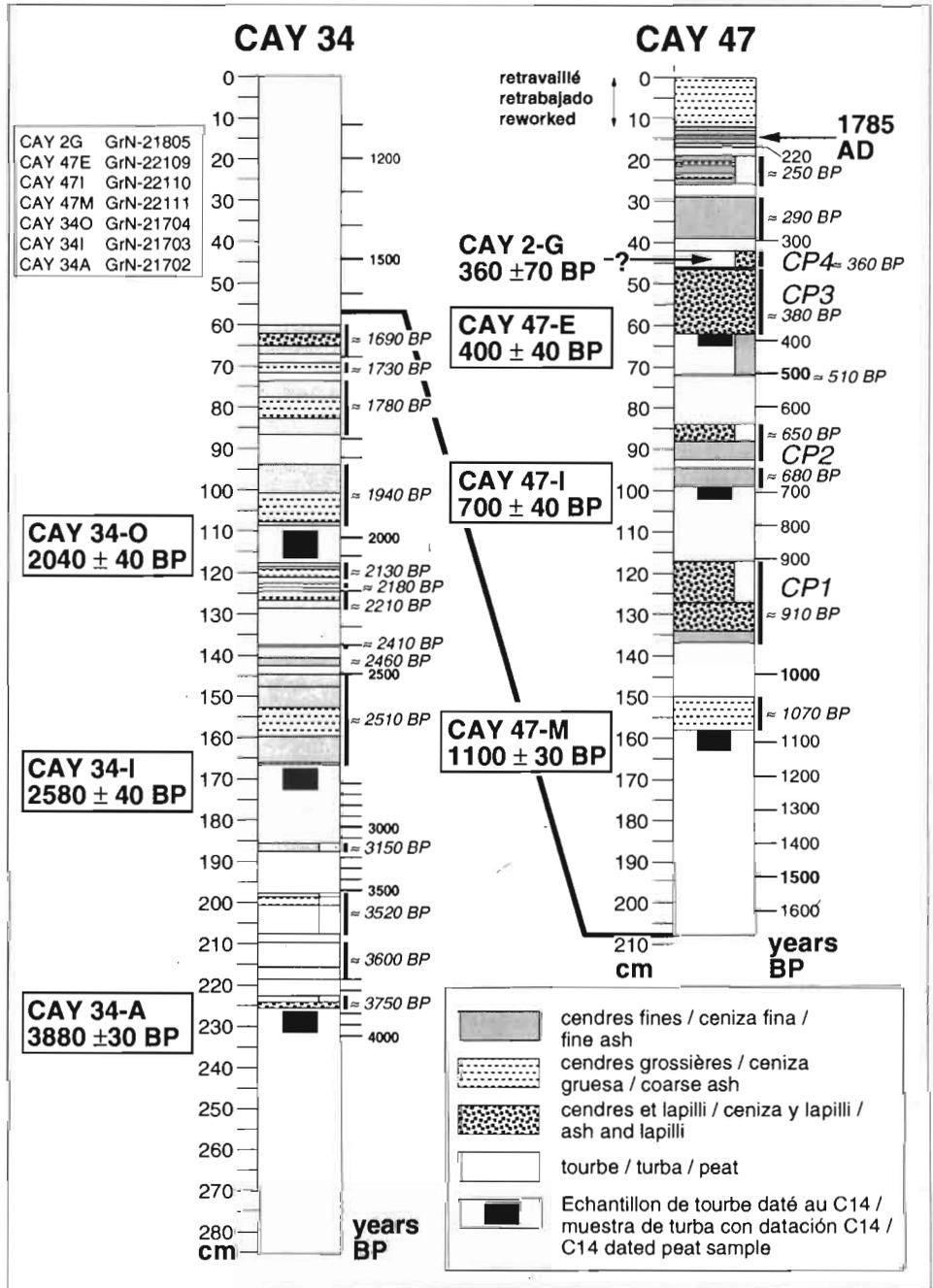


Fig. 2 - Coupes de la tourbière (voir position de cette dernière sur Fig. 1) ; les références analytiques des datations C¹⁴ réalisées à l'Université de Groningen, Pays-Bas (Dr. J. van der Plicht), sont rappelées.

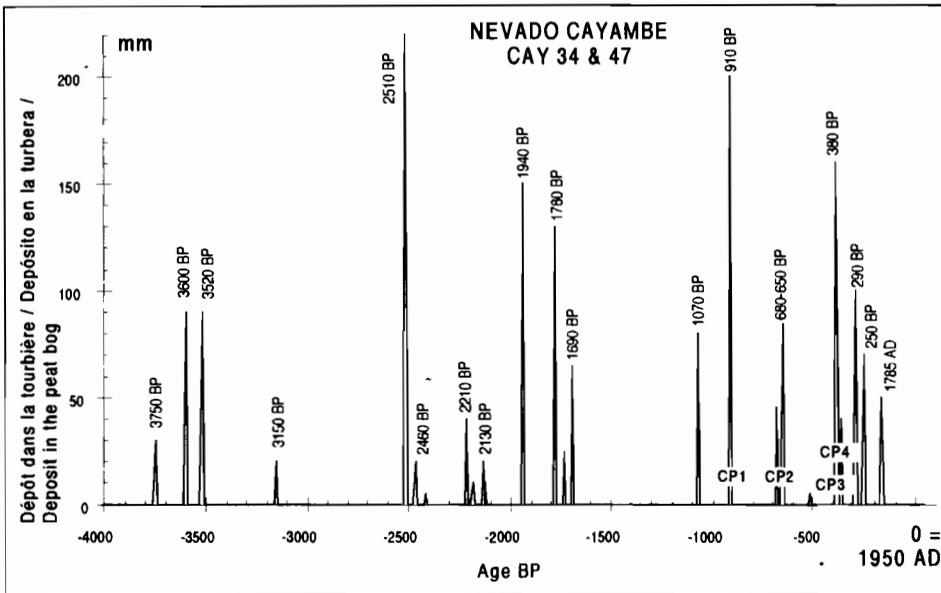


Fig. 3 - Diagramme des éruptions du Nevado Cayambe durant les quatre derniers millénaires.

2000 ans, sur la base de 2,7 cm de tourbe par siècle à ce niveau de la coupe. Le deuxième cycle a débuté vers 2 510 BP par un fort événement, suivi d'une dizaine d'autres dont les mieux marqués se situent vers 2 460, 2 210, 2 130, 1 940, 1 780, 1 730 et 1 690 BP. Le dernier cycle a commencé vers 1 070 BP, et comprend 5 événements importants (910, 680-650, 380, 290 et 250 BP).

Sur la base de leur faciès grossier et de la nature pétrographique des lapilli concordante avec celle des blocs des écoulements pyroclastiques du flanc NE, les retombées datées à 910, 680-650 et 380 BP ont été respectivement mises en relation avec les écoulements CP1, CP2 et CP3. Nous interprétons ces dépôts comme les retombées associées aux colonnes éruptives accompagnant les écoulements pyroclastiques. Les déferlantes CP4, datées directement à 360 ± 70 ans BP (cf. supra), ne seraient représentées dans la coupe CAY 47 que sous la forme de cendres mêlées à de la tourbe, juste au-dessus du niveau de cendres grossières et lapilli attribué à CP3 (380 BP). La faible intensité de cet événement CP4, comparée à celles de CP1-3, et le caractère déferlant des produits vers le Nord, expliquent probablement cette signature peu marquée dans la tourbière.

Deux événements très récents reconnus dans la tourbière (290 et 250 BP) n'ont pu être mis en relation avec d'autres dépôts. Toutefois, l'exploration des flancs Est et Sud du Nevado Cayambe, d'accès très difficile, restant à faire, il n'est pas exclu que ces niveaux de retombées soient en relation avec d'autres écoulements. Enfin, nous relierons les retombées les plus supérieures de la coupe CAY 47, sous les niveaux de remaniement superficiels, à une éruption observée en 1785-1786, et relatée dans une correspondance au Baron de Humboldt (Ascasubi, 1802). Cette éruption, qui se serait produite sur le flanc SE du Nevado (la relation n'est pas très claire à ce sujet), est décrite sous la forme de fortes émissions cendreuse suivies,

semble-t-il, par l'émission d'une coulée en 1786. À cette occasion, les environs de la ville de Cayambe furent recouverts par un dépôt cendreux blanchâtre, épais de 13 mm environ.

3. 2. Évaluation des menaces

L'étude des retombées piégées dans la tourbière et leur datation indique que le Nevado Cayambe a connu au moins 23 événements éruptifs importants au cours des quatre derniers millénaires, regroupés en trois cycles d'activité — d'environ 700, 900 et 1 000 ans, du plus ancien au plus récent — séparés par deux intervalles de quiescence d'environ 600 ans. Le premier cycle semble avoir succédé à une longue période de quiescence de plus de 2 000 ans, tandis que rien n'indique que le dernier soit terminé. Ces résultats montrent que ce volcan est bien plus actif que ne l'indiquaient les rares travaux qui lui ont été consacrés jusqu'ici. Aucune des retombées reconnues sur le Cayambe mais attribuées à des volcans voisins par Hall & Mothes (1994) n'a été identifiée dans la tourbière, qu'il s'agisse de l'événement du Quilotoa (une caldéra située à 140 km au SW du Cayambe) daté au C^{14} près de sa source à 840 ± 50 et 785 ± 50 ans BP (Hall & Mothes, 1994), ou de ceux produits par les volcans Pululahua (55 km à l'Ouest du Cayambe, événement daté à 2305 ± 65 BP ; Hall, 1977 ; Papale & Rosi, 1993) et Cuicocha (50 km au NW du Cayambe, événements datés à 2990 ± 300 BP et 3100 ± 150 BP ; Hillebrandt, 1989). Deux arguments s'opposent à l'attribution d'un ou plusieurs des horizons observés dans la tourbière à ces événements : d'une part des retombées d'âges comparables n'apparaissent pas dans la téphrochronologie présentée ici ; d'autre part les produits d'âge voisins, qui pourraient éventuellement correspondre aux éruptions citées, compte tenu de l'imprécision inhérente à l'évaluation des âges réalisée ici, sont beaucoup trop grossiers pour avoir une origine lointaine. En revanche, le niveau de cendres très fines (argilite de couleur brune), repéré à 290 BP dans la tourbière, pourrait bien correspondre à la dernière éruption, en l'an 1 660 de l'ère actuelle, du Guagua Pichincha, volcan actif situé à 60 km au SW du Cayambe, et au pied duquel est édiflée la ville de Quito.

Les coulées pyroclastiques et déferlantes les plus récentes (CP1 à CP4) ont toutes concerné une zone inhabitée, le flanc NE du Nevado Cayambe. Les retombées importantes qui leur étaient associées n'ont affecté que les parties sommitales de l'édifice, comme le montre leur disparition rapide dans des coupes éloignées du sommet. Compte tenu de la topographie actuelle des lieux, le même scénario est envisageable pour les éruptions à venir, ce qui *a priori* n'entraînerait pas de menace particulière pour les populations. Cependant, lors de telles éruptions, des lahars emprunteraient certainement les rivières s'écoulant vers l'Amazonie, menaçant l'oléoduc trans-équatorien qui longe localement le pied de la Cordillère Orientale. Ce type de menace devrait également être pris en compte dans le projet de barrage hydroélectrique envisagé sur le fleuve Coca.

En cas d'événement concernant la cime même du volcan, un débacle glaciaire pourrait aussi se produire, suivant un scénario comparable à celui du Nevado del Ruiz (Colombie) en 1985. Des lahars (et coulées pyroclastiques ?) empruntant les larges vallées radiales qui descendent directement des zones englacées vers la ville de Cayambe et les gros bourgs environnants, représenteraient alors une menace très sérieuse pour les populations (30 000 personnes environ) habitant ces agglomérations et la riche plaine agricole à l'Ouest du volcan.

Remerciements

Les datations C^{14} présentées dans ce travail ont été réalisées au Centrum voor Isotopen Onderzoek, Rijkuniversiteit de Groningen, sous la direction du Dr. J. van der Plicht, que nous remercions chaleureusement.

Références citées

- ASCÁSUBI, J.J., 1993[1802] - Lettre au Baron de Humboldt (2 pages). in: Ulrike Moheit, -"Von Humboldt, A., Briefe aus Amerika, 1799-1804", Berlin: Akademik Verlag.
- BARBERI, F., COLTELLI, M., FERRARA, G., INNOCENTI, F., NAVARRO, J.M. & SANTACROCE, R., 1988 - Plio-Quaternary volcanism in Ecuador. *Geological Magazine*, **125** (1): 1-14.
- HALL, M.L., 1977 - *El volcanismo en el Ecuador*, 120p., Quito: Instituto Panamericano de Geografía e Historia.
- HALL, M.L. & MOTHESE, P.A., 1994 - Tefrostratigrafía holocénica de los volcanes principales del valle interandino, Ecuador. in: "El contexto geológico del espacio físico ecuatoriano" (Coordinador R. Marocco): 47-67, Quito : Corporación Editora Nacional y Colegio de Geógrafos del Ecuador.
- HILLEBRANDT, C., 1989 - Estudio geovulcanológico del complejo volcánico Cuicocha-Cotacachi y sus aplicaciones, Provincia de Imbabura. Thèse de géologie, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 167p.
- PAPALE, P. & ROSI, M., 1993 - A case of no-wind plinian fallout at Pululagua caldera (Ecuador): implications for models of clast dispersal. *Bulletin of Volcanology*, **55**: 523-535.
- SAMANIEGO, P., 1996 - Estudio volcanológico y petrológico de las fases recientes del volcán Cayambe (Ecuador). Tesis de grado, Facultad de geología, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 162p.

LAS INUNDACIONES EN LA ZONA COSTERA ECUATORIANA: CAUSAS; OBRAS DE PROTECCIÓN EXISTENTES Y PREVISTAS

Frédéric Rossel, Eric Cadier*, Gustavo Gómez***

Resumen

El impacto de las anomalías climáticas de tipo ENSO ("El Niño" / Southern Oscillation) es muy fuerte en la zona costera del Ecuador. El calentamiento del océano que acompaña a estas anomalías implica precipitaciones e inundaciones que provocan pérdidas humanas y materiales, en ocasiones, considerables. Así, la estación lluviosa a consecuencia de "El Niño" excepcional de 1983 ha causado en el Ecuador y el norte del Perú la muerte de por lo menos 600 habitantes y pérdidas materiales estimadas en 650 millones de dólares, habiendo transcurrido varios años para arreglar los daños sufridos en la infraestructura de los dos países. Estas inundaciones son aún más graves debido al relieve débil y al mal drenaje de las grandes llanuras costeras.

En la primera parte, a partir de una regionalización y zonificación de la pluviometría, se evalúa la correlación entre el ENSO y los totales anuales de precipitación del litoral del Ecuador, y se determinan los sectores más afectados. Se analiza enseguida, cuáles son las posibilidades de estimar las precipitaciones mensuales, con uno o varios meses de anticipación, a partir de las anomalías de temperatura superficial del Pacífico oriental.

En la segunda parte, se estudia la cuenca del río Guayas que es el sector en donde la relación entre la pluviometría y el ENSO es la más fuerte del país. Se describen las principales características de las obras de protección contra las crecidas, construidas y proyectadas por la Comisión de Estudios para el Desarrollo de la Cuenca del río Guayas (CEDEGE). Se intenta evaluar su funcionamiento y evidenciar la efectividad de la protección proporcionada por estas obras.

Palabras claves: *Inundaciones, obras de protección, manejo de cuenca, sistemas de alerta, previsiones, ENSO.*

LES INONDATIONS DANS LA ZONE CÔTIÈRE ÉQUATORIENNE : CAUSES ; OUVRAGES DE PROTECTION EXISTANTS ET PRÉVUS

Résumé

L'impact des anomalies climatiques de type ENSO (El "Niño" / Southern Oscillation) est particulièrement important dans la zone côtière de l'Équateur. Le réchauffement de l'océan qui accompagne ces anomalies entraîne des précipitations et des inondations qui amènent des pertes matérielles et humaines parfois considérables. Ainsi, la saison des pluies correspondant au "Niño" exceptionnel de 1983 a provoqué en Équateur et au nord du Pérou la mort d'au moins 600 habitants et des pertes matérielles estimées à 650 millions de dollars. Ces pays ont mis plusieurs années à réparer les dégâts causés à leur infrastructure. Ces inondations sont aggravées par le faible relief et le mauvais drainage de ces grandes plaines côtières.

* ORSTOM, AP 17 11 06 596, Quito, Ecuador. Fax : (593 2) 569 396. E-mail: rossel@orstom.ecx.ec
cadier@orstom.ecx.ec

** INAMHI, 700 Iñaquito y Corea, Quito, Ecuador. Fax (593 2) 448 686 o 468 327

Dans la première partie, à partir d'une régionalisation et d'une zonification de la pluviométrie, nous évaluons la corrélation entre l'ENSO et les totaux pluviométriques annuels de la zone côtière de l'Équateur et nous déterminons les secteurs les plus affectés. Nous analysons ensuite les possibilités de prévision de la pluviométrie mensuelle avec un ou plusieurs mois d'anticipation à partir des anomalies de température superficielle du Pacifique oriental.

Dans la deuxième partie, nous avons étudié le bassin versant de la rivière Guayas qui correspond à la région où la relation entre la pluviométrie et l'ENSO est la plus forte du pays. Nous décrivons les principales caractéristiques des ouvrages de protection contre les crues construits et projetés par la Commission d'études pour le développement du bassin versant de la rivière Guayas (CEDEGE). Et nous essayons d'évaluer leurs fonctionnements et l'efficacité de la protection offerte par ces ouvrages.

Mots-clés : *Inondations, ouvrages de protection, gestion de bassins versants, systèmes d'alerte, prévisions, ENSO.*

FLOODS IN THE ECUADORIAN COASTAL AREA: RESPONSIBLE PATTERNS, EXISTING AND PLANNED PROTECTION EFFORTS

Abstract

The impact of climatic anomalies such as ENSO ("El Niño"/ Southern Oscillation) is very important in the coastal area of Ecuador. Sea warming coming along with these anomalies leads to precipitation and floods that sometimes bring about considerable material and human losses. An example of the occurred in Ecuador and in the north of Peru in the 1983 rainy season which caused the death of at least 600 inhabitants and material losses estimated at 650 millions dollars. It took many years to repair the damage to the infrastructure. These floods were aggravated by the low relief and poor drainage along the large coastal plains.

In the first section, beginning with regionalization and zonification based on rainfall, we evaluate the correlation between ENSO and rain in the Ecuadorian littoral and we determine the most affected area. Subsequently, we analyse the forecasting possibilities of monthly rain with one or several months of anticipation using the anomalies of the orient Pacific surface temperature.

In the second section, we focus on the Guayas river basin where the relation between rain and ENSO is the highest in the country. We describe the principal characteristics of building and planned flood protection works of the Studies Commission for the Guayas river basin development (CEDEGE), and we evaluate the functioning and efficiency of the protection offered by these works.

Key words: *Floods, protection works, watershed management, warning systems, forecasting, ENSO.*

INTRODUCCIÓN

La distribución de las precipitaciones y de los escurrimientos en la zona costera ecuatoriana es muy irregular.

Primeramente en el plano estacional, puesto que en el transcurso del año, el 85% de las lluvias caen en los cuatro primeros meses, mientras que el 15% restante se distribuye en los ocho meses restantes. Los caudales de los ríos grandes pueden variar con una relación superior a 100, entre el caudal de crecida y el caudal de estiaje. Por ejemplo, el caudal del río Daule, en la estación de la Capilla donde tiene una superficie de 4.500 km², puede pasar de 1.800 m³/s en crecida a menos de 12 m³/s en estiaje.

En segundo lugar, la variación de las precipitaciones de un año a otro son muy fuertes; los coeficientes de variación de los totales anuales pueden superar al 0,40. Está generalmente admitido (Nouvelot & Pourrut, 1984) que las oscilaciones climáticas debidas al fenómeno ENSO son responsables de una gran parte de esta irregularidad interanual.

Esta irregularidad trae como consecuencia sequías muy frecuentes, al igual que inundaciones que se presentan con continuidad excesiva, especialmente en las zonas planas y bajas de las llanuras de los ríos costeros, provocando pérdidas humanas y económicas muy severas.

Para intentar mitigar estos problemas, se construyeron o planearon implementar varias obras de protección y control, tales como:

- Presas de uso múltiple, destinadas a retener el caudal pico de las crecidas y almacenar agua para distribuirla en los períodos críticos de estiaje (irrigación, abastecimiento humano, industrial, navegación, transvase para otras cuencas menos favorecidas, generación hidroeléctrica, etcétera);

- Diques y otras obras de contención de crecidas, con el fin de proteger ciudades y zonas pobladas, industriales o cultivadas;

- Sistemas de drenaje, para evacuar las aguas en exceso;

- By Pass, o canales de gran dimensión destinados a evacuar directamente las crecidas de un río hacia el mar u otro río;

- Sistema de alerta de crecidas, para avisar a las poblaciones y permitir un mejor manejo de las obras de contención y regulación.

1. EL "NIÑO" Y LAS ABUNDANTES LLUVIAS EN EL ECUADOR

1.1. Conceptualización del fenómeno

En las provincias costeras del Ecuador, se producen inundaciones que pueden ser determinantes para la economía del país y en casos extremos para la vida de sus habitantes. Desde el evento excepcional de 1983, todos culpan al "Niño" por las fuertes precipitaciones.

Pero, ¿qué es "El Niño"? ¿En qué años ocurrió? ¿En dónde tiene influencia? ¿Es siempre este fenómeno el que provoca las inundaciones? ¿Se podrá algún día prevenir contra sus consecuencias? Estas son las interrogantes que se intenta contestar.

Antes, definamos en forma clara la extrema irregularidad de las lluvias en la zona costera ecuatoriana, debida en gran parte al "Niño". En la Tabla 1, se presentan los valores medios anuales de precipitación para los años "no-Niño", la media de los años "Niño" sin incluir 1983, el año excepcional de 1983 y la media de todo el período para estaciones representativas de cuatro sectores sensibles al ENSO (Fig. 1) con sus respectivos coeficientes de variación, que se explican más adelante.

Tabla 1 - Medias anuales de precipitación en milímetros y coeficientes de variación de cuatro estaciones meteorológicas de la zona costera.

Estación	Años "no-Niño"	Años "Niño" menos 1983	Año 1983	Media del periodo 1964 - 93	Coficiente de variación
Salinas	80	210	2800	200	1,08
Portoviejo	360	660	1970	470	0,72
Guayaquil	750	1650	4560	1060	0,76
La Concordia	2.840	4070	7140	3230	0,31

1.1.1. ¿Qué es "El Niño"?

Fueron los pescadores suramericanos quienes bautizaron con el nombre de "El Niño", al calentamiento superficial del océano, el cual a lo largo de las costas ecuatorianas y peruanas empieza cada año alrededor de Navidad y se prolonga generalmente hasta marzo

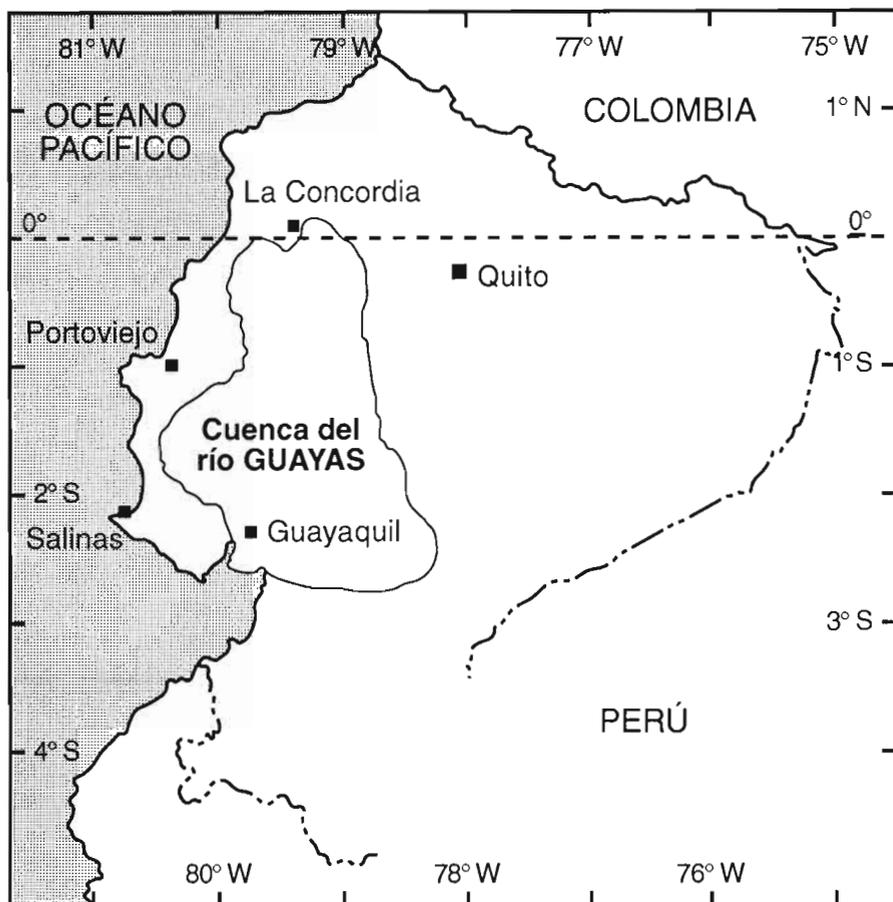


Fig. 1: Mapa de ubicación de la cuenca del río Guayas y de las ciudades citadas.

o abril, en correspondencia a la estación lluviosa. En determinadas ocasiones, ocurre que este evento adquiere una amplitud inusual, con aumento de la temperatura de las aguas oceánicas y lluvias más abundantes. Hoy en día, el término de "El Niño" no se refiere a la situación observada anualmente, sino que está reservado a los eventos anómalos y positivos.

Inicialmente, se pensaba que "El Niño" era un evento local provocado por un debilitamiento de los vientos de baja altura a lo largo del litoral, pero Wyrski (1975) demostró que se trata de un fenómeno mucho más amplio, y formuló su tesis de "la respuesta dinámica del océano al incremento de la intensidad de los alisios". Un resumen de su teoría se reproduce en uno de sus artículos, que define al fenómeno así:

"fuertes alisios del Sur-Este, que soplan durante más de diez y ocho meses, provocan un almacenamiento de agua cálida en el Pacífico oeste. En cuanto estos vientos se debilitan, el agua acumulada tiende a regresar hacia el Pacífico oriental y las costas sur-americanas. La llegada de estas aguas cálidas provocan el incremento del nivel del océano, mientras la termoclina baja, lo que reemplaza el efecto de upwelling y marca el inicio de un "Niño".

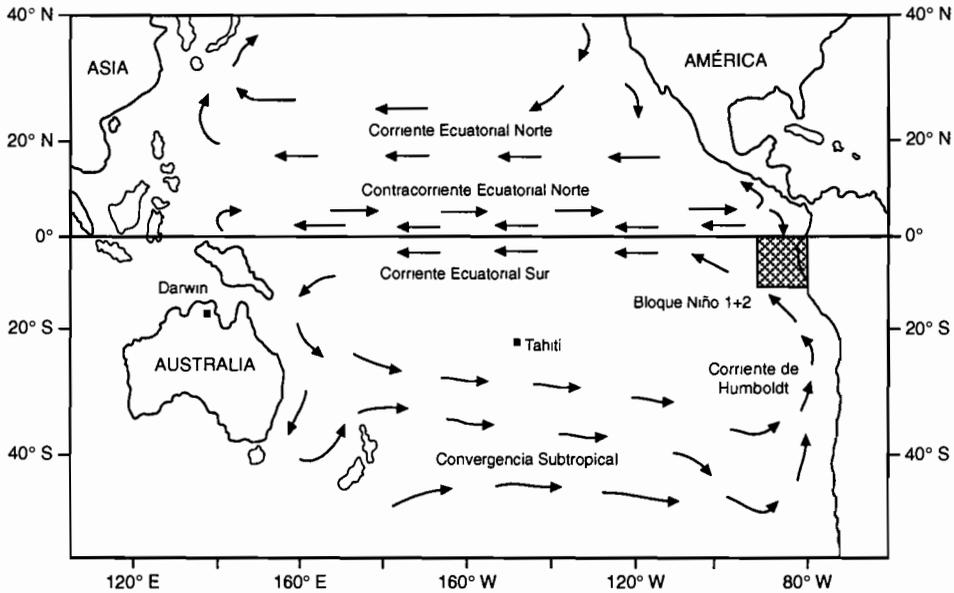


Fig. 2 - Principales corrientes marinas, ubicación de Tahiti, Darwin y del bloque de medición de la temperatura superficial del mar "Niño 1+2".

Por su parte, Bjerknes (1969) propone su teoría de "la interacción termodinámica entre el océano y la atmósfera". En 1966, observó que el calentamiento anormal del océano estaba asociado a la oscilación del Sur. Esta corresponde a una fluctuación de la circulación atmosférica existente entre el sistema de alta presión del Pacífico Sur-Este (Tahiti) y el de baja presión de la región oceánica occidental (Darwin, Australia; Fig. 2). El índice de la oscilación del Sur (IOS) es positivo cuando la diferencia es superior a la desviación normal y negativo en caso contrario. Bjerknes observó que "El Niño" está asociado a un índice negativo. Este se inicia cuando el índice empieza a bajar y concluye cuando el índice alcanza su valor mínimo.

El debilitamiento de los alisios y la elevación de la temperatura superficial del océano contribuyen al reforzamiento de la contra-corriente ecuatorial. En asociación a las ondas de Kelvin que se propagan de Oeste a Este, provocan un aporte de aguas cálidas y por lo tanto un alza del nivel oceánico en el litoral occidental del continente suramericano. Las aguas calientes se distribuyen en parte hacia el Norte, pero principalmente hacia el Sur dando origen a un "Niño".

El SCOR (Scientific Committee for Ocean Research) define "El Niño" de la manera siguiente:

"Es un flujo de agua caliente que, durante un período de por lo menos cuatro meses, presenta una anomalía positiva de temperatura igual o superior al valor de una desviación estándar y se desplaza a lo largo de las costas ecuatorianas y peruanas".

1. 1. 2. En el Ecuador, ¿cómo se presenta este fenómeno?

En los años "Niño", se observa a lo largo de la costa ecuatoriana una intensificación de la corriente cálida proveniente del Norte, que impide a la corriente fría de "Humboldt" alcanzar las latitudes del Ecuador desde el Sur. Esto implica una baja de la termoclina y

bloquea el efecto de "upwelling". De esta manera no hay renovación de agua "caliente" de la superficie del océano por agua "fría" profunda. Paralelamente, se observa un desplazamiento más pronunciado, hacia el Sur, de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) y un decrecimiento de los vientos del Oeste.

La combinación de estos tres fenómenos provoca una evaporación superior a la normal, la conformación de nubes y el movimiento de este potencial de agua hacia el continente. En el encuentro de los relieves costeros y andinos, estas nubes originan fuertes precipitaciones. Su abundancia está principalmente relacionada a la permanencia del fenómeno a lo largo de la estación lluviosa o más allá de ella y no a algunos eventos excepcionales aislados.

1. 1. 3. *¿Cuáles son los años "Niño"?*

Muchos científicos establecieron clasificaciones de los años "Niño" en función del IOS, pero ocurren eventos aún cuando el IOS no sea negativo y hay descensos de este índice que no coinciden con un "Niño". Eso trae como consecuencia el uso de una multitud de clasificaciones distintas (Quinn et al., 1987; Rasmusson & Wallace, 1983, etcétera) que no concuerdan para muchos años. Así, de acuerdo con Nouvelot & Pourrut (1994), se ha adaptado la definición de "El Niño" propuesta por el SCOR, que es la más adecuada para el estudio de las repercusiones del fenómeno en el clima del Ecuador. Se ha considerado el bloque "Niño 1+2" (0-10 °S / 80-90 °W; Fig. 2) como representativo de las anomalías de la temperatura superficial del mar (TSM) de la corriente cálida del norte; este sector es el único del Pacífico oriental para el cual se dispone de una serie cronológica de registro de TSM. De lo dicho anteriormente, se puede presentar una nueva definición del fenómeno en los siguientes terminos:

"Anomalía positiva superior a una desviación estándar de la temperatura superficial del mar media mensual del bloque "Niño 1+2" durante cuatro meses consecutivos o más".

Uno de los intereses de esta definición radica en el hecho de que se consideran solamente los eventos que se desarrollan hacia las costas americanas y se eliminan las anomalías producidas sólo en el Pacífico central.

Para el período 1970 a 1993, se utilizan los datos publicados por el CAC (Climate Analysis Center) de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) en la red Internet, y para el período 1963 a 1969 los datos COADS (Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set) publicados por la NOAA (CEOS, 1994) y el ORSTOM (Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération) (Fig. 3).

Utilizando estos datos y la definición anterior, los eventos "Niño" en el período 1964 a 1993 son: de abril a agosto de 1965, de marzo de 1972 a enero de 1973, de mayo a septiembre de 1976, de agosto de 1982 a noviembre de 1983, de enero a diciembre de 1987, y de marzo a junio de 1992. Se debe asociar estos eventos a los años hidrológicos (del 1° de septiembre al 31 de agosto) 1965, 1972, 1973, 1976, 1983, 1987, 1992. El año 1988, que incluye cuatro meses (septiembre a diciembre), con anomalía positiva superior a un grado, no fue considerado como "Niño", porque registra varios meses (entre marzo y agosto) con anomalía negativa del mismo orden, lo que corresponde a un evento frío. El año 1969 no fue considerado como "Niño" porque contiene solamente tres meses con anomalía superior a un grado.

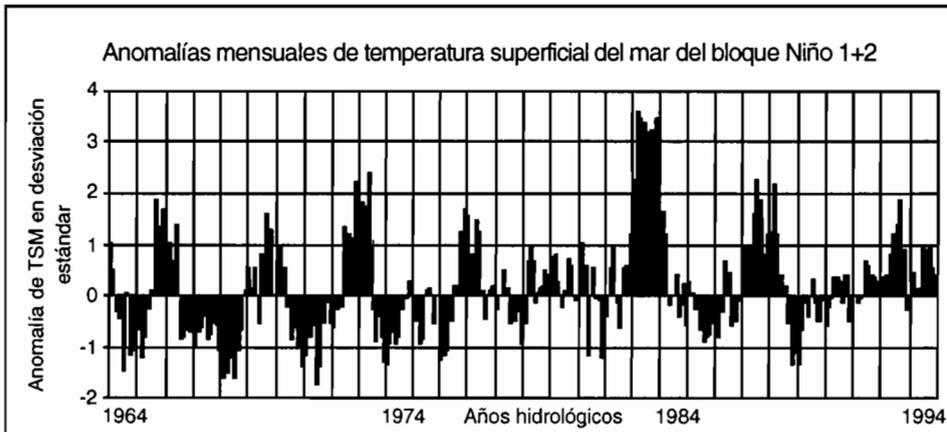


Fig. 3 - Anomalías mensuales en desviación estándar de la TSM del bloque Niño 1+2.

1. 1. 4. ¿Cuál es la influencia del ENSO en los regímenes pluviométricos de la zona costera ecuatoriana?

Se manifestó anteriormente y es de conocimiento general que "El Niño" provoca precipitaciones abundantes en la mayor parte de la costa ecuatoriana. Con excepción del "Niño" de 1982-1983 (Nouvelot & Pourrut, 1984; CEPAL, 1983), no se ha cuantificado la influencia del ENSO en las precipitaciones en el Ecuador.

Con este objetivo, se realizó una zonificación de los totales pluviométricos anuales del litoral (Rossel *et al.*, 1995), poniendo particular atención en los años "Niño", y trabajando con los datos de 230 estaciones pluviométricas de 1964 a 1993. Se emplearon treinta años de información que corresponden al período de funcionamiento de la mayoría de los aparatos y se utilizó el método del "Vector Regional" (Brunet-Moret, 1979) desarrollado en el logicial CLIMAN (Le Goulven & Alemán, 1991).

Este método permite delimitar zonas, dentro de las cuales los totales pluviométricos anuales son pseudo-proporcionales, las variaciones interanuales de las series cronológicas de las estaciones de un grupo pueden ser representadas por una sola serie. Esta serie es el vector regional; se puede considerar que el componente anual del vector es equivalente al promedio de las anomalías pluviométricas de cada estación para el año considerado. Utilizando este método, se dividió la zona costera del país y la vertiente occidental de la cordillera de los Andes en catorce grupos pluviométricos y se definieron cuatro grupos entre el callejón interandino y la región amazónica.

Para caracterizar la relación existente entre el ENSO y los totales pluviométricos se analizó primeramente la coincidencia entre los años "Niño" y los años de lluvias excesivas. Con este fin se realizaron los gráficos de los valores tipificados ($P_t = (P - m)/s$, en donde m y s son, respectivamente, la media y la desviación estándar de la variable P) de los vectores regionales de cada grupo.

Las figuras 4 y 5 de los grupos de Santo Domingo y de Cuenca, permiten visualizar respectivamente un grupo en donde esta relación que resulta ser directa (los siete "Niño" corresponden a excesos de lluvia) y otro en donde no es significativa (dos "Niño" corresponden

a excesos de lluvia, dos a precipitaciones medias y tres a déficit). El análisis de todos los gráficos está resumido en la tercera columna de la Tabla 2, en la cual se indica el número de años "Niño" que corresponden a excesos de lluvia por cada grupo.

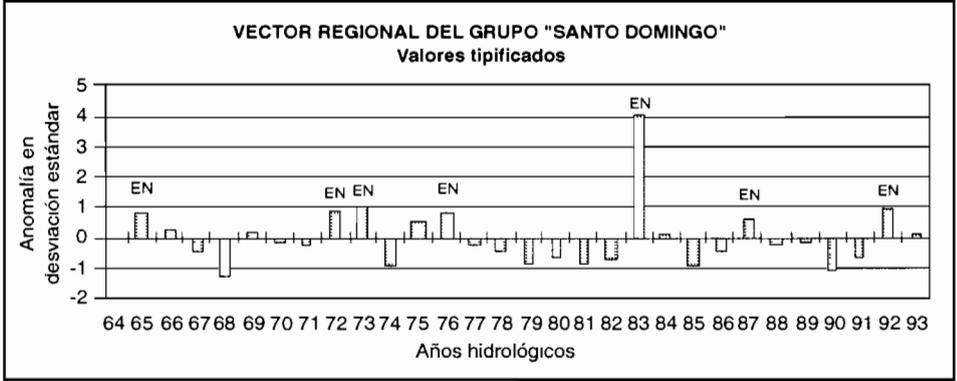


Fig. 4 - Valores tipificados del vector regional de la zona de Santo Domingo. Los años marcados con EN corresponden a los siete "Niño" del período de acuerdo con la definición adoptada. Este grupo presenta una buena relación entre el ENSO y los totales anuales pluviométricos.

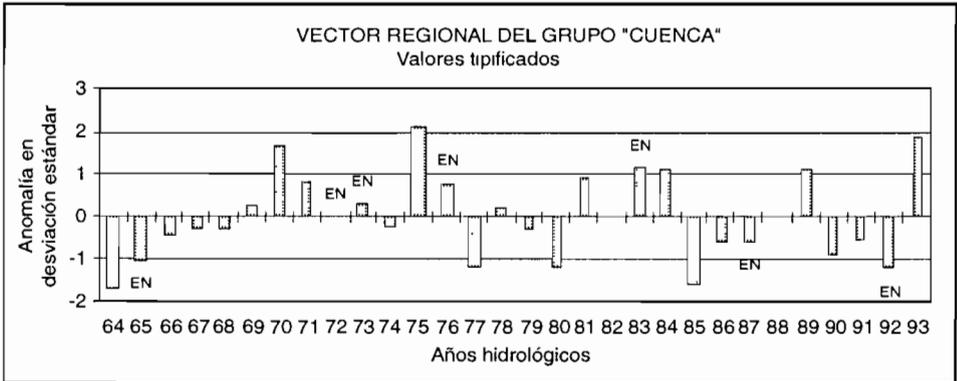


Fig. 5 - Valores tipificados del vector regional de la zona de Cuenca. Los años marcados con EN corresponden a los siete "Niño" del período de acuerdo con la definición adoptada. La relación entre el ENSO y los totales anuales pluviométricos de este grupo no es significativa.

Para percatarse de la importancia de las anomalías correspondientes a los años "Niño", se calculó las diferencias entre las medias pluviométricas de los años "Niño" y de los años "no-Niño". Se expresó estas anomalías de manera absoluta en milímetros y relativa en porcentajes. En el año 1983 se registraron valores extremos (anomalías anuales superiores en muchos grupos a cuatro y en un caso a diez desviaciones estándar), muy superiores a los observados durante los otros años "Niño". Por otro lado se realizó un primer análisis de los vientos dominantes que demostró que los vientos del año 1983 fueron diferentes a los de los otros años "Niño", de tal manera que se creyó útil determinar las diferencias, incluyendo el año 1983, a la media de los años "Niño", y excluyéndolo en un segundo tiempo. Estos valores se encuentran en las cuarta y quinta columnas de la Tabla 2.

Se terminó este análisis con el cálculo de los coeficientes de correlación lineal entre las componentes anuales de los vectores regionales y la TSM anual del bloque "Niño 1+2" para todo el período, excluyendo el año 1983. Los valores de estos coeficientes de correlación además de ser considerados como un índice del nivel de relación entre los totales pluviométricos anuales y el ENSO, permiten tener una idea de la posibilidad de estimar la precipitación estacional y mensual a partir de las anomalías de la TSM del Pacífico oriental. Estos valores se encuentran en las sexta y séptima columnas de la Tabla 2.

En la Tabla 2, se reportan los números y nombres de cada grupo (Fig. 6), la precipitación media anual, el número de años "Niño" que corresponden a excesos de lluvia, la diferencia entre la media de todos los años "Niño" y la de los años "no-Niño", la diferencia entre la media de los años "Niño" menos el evento de 1983 y la de los años "no-Niño", los coeficientes de correlación entre las componentes anuales de los vectores y la TSM anual del bloque "Niño 1+2" para todo el período, y estos mismos coeficientes sin considerar el año 1983.

Tabla 2 - Análisis de la relación entre el ENSO y los vectores regionales.

Número	Nombre	Número de "Niño" que corresponden a años lluviosos	Precipitación media anual en milímetros de todos los años	Diferencia entre los años "Niño" con 1983 y los años "no-Niño"		Diferencia entre los años "Niño" sin 1983 y los años "no-Niño"		Coef. de correlación entre los vectores y la TSM anual con 1983	Coef. de correlación entre los vectores y la TSM anual sin 1983
1	Sto Domingo	7	2860	1483 mm	59 %	1081 mm	43 %	0.81	0.56
2	Los Ríos	7	2060	1285 mm	73 %	986 mm	56 %	0.74	0.50
3	Guayaquil	7	1414	1360 mm	124 %	1042 mm	95 %	0.80	0.58
4	Colimes	7	1284	1219 mm	122 %	1149 mm	115 %	0.57	0.52
5	El Oro	7	964	1071 mm	150 %	650 mm	91 %	0.83	0.55
6	Esmeraldas	6	1590	812 mm	58 %	714 mm	51 %	0.65	0.50
7	Chone	7	1055	704 mm	79 %	401 mm	45 %	0.79	0.44
8	Portoviejo	6	679	701 mm	136 %	433 mm	84 %	0.74	0.32
9	Manta-Jipijapa	7	388	492 mm	180 %	295 mm	108 %	0.71	0.21
10	Zapotal	7	535	903 mm	391 %	601 mm	165 %	0.72	0.31
11	Pajan	6	1061	662 mm	73 %	480 mm	53 %	0.68	0.36
12	San Lorenzo	4	3840	907 mm	25 %	835 mm	23 %	0.32	0.21
13	San Miguel	4	2596	590 mm	24 %	418 mm	17 %	0.55	0.18
14	Jubones	4	670	110 mm	17 %	52 mm	8 %	0.39	0.06
15	Otavalo	2	1146	-70 mm	-6 %	-151 mm	-13 %	0.01	-0.30
16	Ambato	3	595	12 mm	2 %	6 mm	1 %	0.01	-0.14
17	Cuenca	2	909	-18 mm	-2 %	-46 mm	-5 %	0.09	-0.12
18	Puyo	2	4244	42 mm	1 %	85 mm	2 %	0.04	0.04

El análisis de este cuadro permite dividir al país en cuatro sectores, en función del grado de relación entre el ENSO y las precipitaciones anuales (Fig. 6).

a) Un sector en el cual esta relación es **fuerte**, corresponde a la mayor parte del litoral ecuatoriano (grupos 1 a 11), en donde :

- Todos los "Niño" corresponden a años de lluvia excesiva (Fig. 4), con excepción de un "Niño" en tres grupos para los cuales corresponde a un año de pluviometría media.

- La precipitación media de los años "Niño" es superior a la de los años "no-Niño" por lo menos en un 40%. Se nota que esta diferencia aumenta en porcentaje cuando la precipitación disminuye, y es máximo en el grupo Zapotal del extremo Sur-Oeste que incluye la península de Santa Elena. Pero, esta diferencia es más elevada en términos de cantidad absoluta en los sectores próximos a la Cordillera de los Andes que son más lluviosos que los que son distantes a iguales latitudes.

- El análisis de los coeficientes de correlación entre las componentes anuales de los vectores regionales de cada grupo con la TSM del bloque "Niño 1+2", conduce a subdividir este sector en dos, uno en donde la correlación es significativa (grupos 1 a 6) y otro en donde es menos significativa (grupos 7 a 11). Se estudiará ulteriormente a nivel mensual y con criterios sinópticos el origen de esta diferencia. Se observa por el momento que estos dos sectores están separados por las montañas de Chindul y la Cordillera de Colonche con altitud máxima de 700 msnm.

- Los valores comparativamente bajos de los coeficientes de correlación entre las componentes anuales de los vectores de los grupos de Colimes (4) y Esmeraldas (6) con la TSM del bloque "Niño 1+2" considerando el año 1983, son debidos en gran parte a que no se observó en estos dos grupos precipitaciones excepcionales este año.

- La disminución tanto de las diferencias de las medias, como de los coeficientes de correlación si no se considera el año 1983, ilustra el carácter excepcional de este evento ENSO, los valores extremos de TSM y de precipitación medida este año en la mayor parte del sector mencionado.

b) El sector correspondiente a la parte norte del litoral ecuatoriano (grupos 12 y 13) en el cual la relación es **débil**:

- Los años con excedentes de precipitación tienden a corresponder a años "Niño", pero se establece que no es el único fenómeno que provoca lluvias abundantes en este sector, y además tres "Niño" correspondieron a años de precipitación media.

- Las diferencias entre los años "no-Niño" y "Niño" es del orden del 20 al 25 %.

- Los coeficientes de correlación sin 1983 no son significativos ($R \sim 0.20$).

- La fuerte disminución del coeficiente de correlación cuando no se considera el año 1983 para el grupo de San Miguel (13), ilustra el carácter excepcional de los valores de precipitación registrados este año.

c) El sector en el cual se puede decir que no existe una relación significativa entre los totales pluviométricos y el ENSO, a excepción del evento de 1983 y que coincide con el año de precipitación máxima. Este sector corresponde al grupo Jubones (14), que es una región ubicada a más de 1500 msnm en el lado occidental de la Cordillera de los Andes. Las observaciones hechas para el grupo de San Miguel, en situación semejante pero más al norte

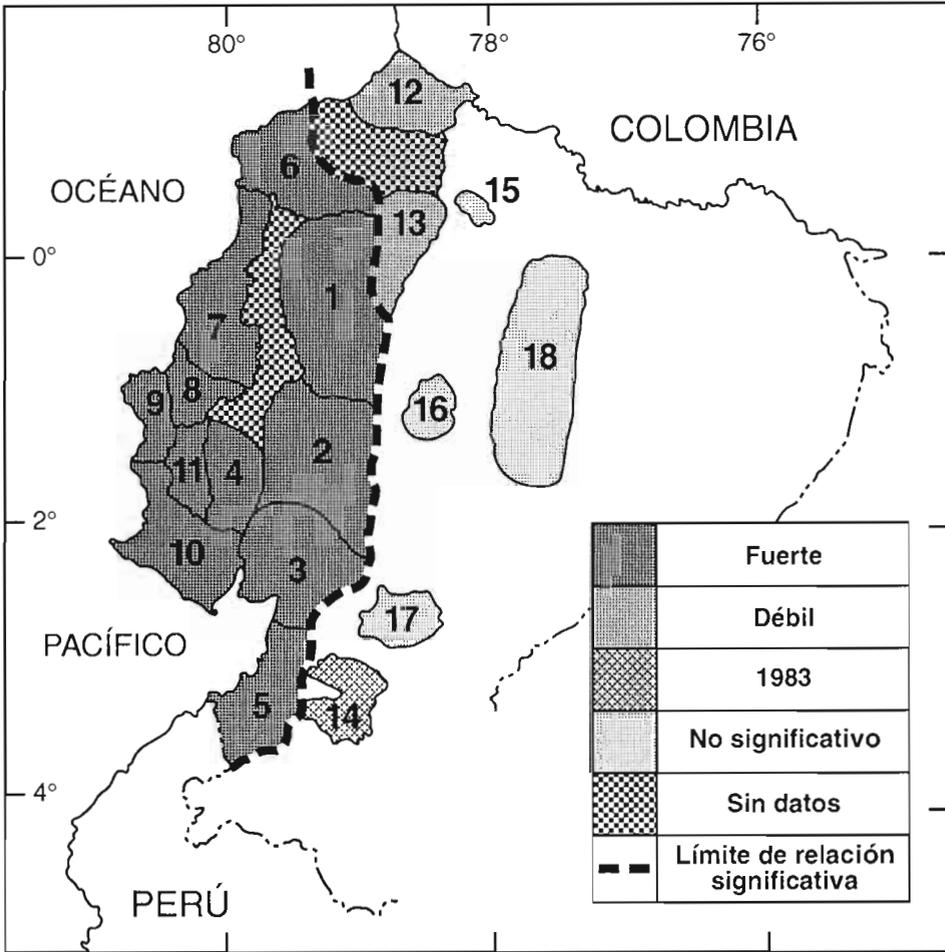


Fig. 6 - Grado de relación entre el ENSO y los totales anuales de precipitación, y límite de relación significativa.

y con altitud menor, permite suponer que este sector se extiende a todas las partes altas de la vertiente occidental de la cordillera. Esta suposición no se pudo verificar por ausencia de información en estas regiones generalmente inhabitadas.

d) Finalmente, el sector correspondiente al callejón interandino y a la vertiente amazónica, en donde la relación es insignificante o aleatoria. Algunos años "Niño" coinciden con años de exceso de lluvia; otros a precipitaciones medias y otros a déficit (Fig. 5). No hay diferencia significativa entre las medias de los años "Niño" y "no-Niño"; los coeficientes de correlación no son significativos, y el año 1983 no presenta un carácter pluviométrico extremo.

En resumen, se puede decir que el ENSO trae como consecuencia sistemática, fuertes precipitaciones en la costa ecuatoriana con excepción de su parte extrema norte, y que los totales pluviométricos de la Sierra y del Oriente no están relacionados con el ENSO a excepción del año 1983, que corresponde al año más lluvioso en las zonas altas de la vertiente occidental de la Cordillera de los Andes.

El presente estudio permitió determinar el **límite de relación significativa entre el ENSO y las precipitaciones anuales en el Ecuador**, que corresponde aproximadamente al piedemonte occidental de la Cordillera de los Andes al Este, y se sitúa entre los grupos Esmeraldas (6) y San Lorenzo (11) al Norte (Fig. 6). Lamentablemente su posición Norte no está muy bien definida por la ausencia de registros pluviométricos en la zona inhabitada del bosque tropical húmedo existente entre los grupos Esmeraldas y San Lorenzo.

1. 1. 5. ¿Serán previsible las precipitaciones en el Ecuador?

Del estudio anterior, se pudo determinar que en el sector ubicado al Oeste del límite de relación significativa y particularmente en su parte próxima a la Cordillera de los Andes, se podrá estimar las anomalías positivas de las precipitaciones a partir de las de TSM del bloque "Niño 1+2".

1. 1. 5. 1. Relación entre las precipitaciones mensuales y la TSM

Se presentan únicamente los resultados preliminares obtenidos de la estación de Pichilingue, que tiene una serie cronológica continua para el período 1964 a 1993 y que es representativa de la zona de Santo Domingo. En primer lugar, se trabajó con los totales pluviométricos mensuales y la temperatura superficial media mensual del mar del bloque "Niño 1+2".

a) Relación entre los valores mensuales de precipitación y de TSM

El coeficiente de correlación lineal entre la TSM del bloque "Niño 1+2" y los totales mensuales de pluviometría en Pichilingue es elevado ($R = 0,80$) y la pendiente de la recta de regresión significativa, con un gradiente de $80 \text{ mm}/^\circ\text{C}$. Se establece que, con temperaturas inferiores a $21,5^\circ\text{C}$ no se producen precipitaciones en Pichilingue. Si se consideran únicamente los meses con TSM superior a $21,5^\circ\text{C}$ se constata que la gradiente de la recta de regresión aumenta sustancialmente para alcanzar $100 \text{ mm}/^\circ\text{C}$ ($R = 0,81$). Aunque estos ajustes sean relativamente buenos, parece que un ajuste polinomial debería representar mejor la relación. La Fig. 7 presenta un ajuste polinomial de segundo orden entre las dos variables, que refleja mucho mejor la relación existente.

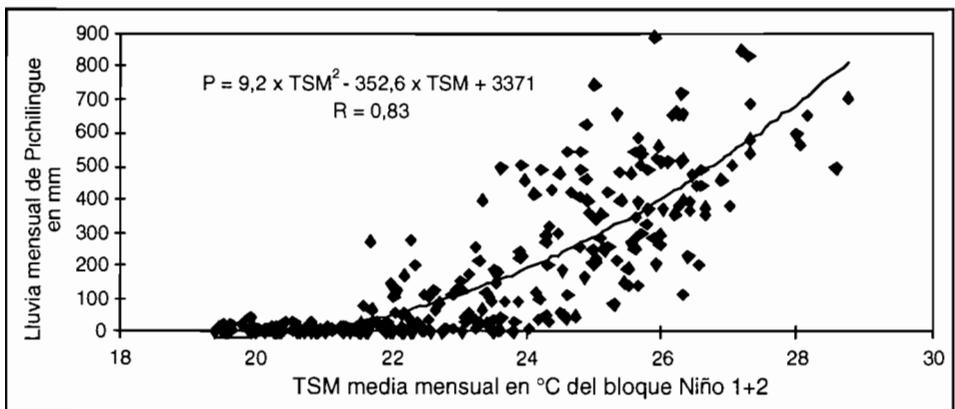


Fig. 7 - Correlación polinomial entre la TSM del bloque "Niño 1+2" y la lluvia de Pichilingue.

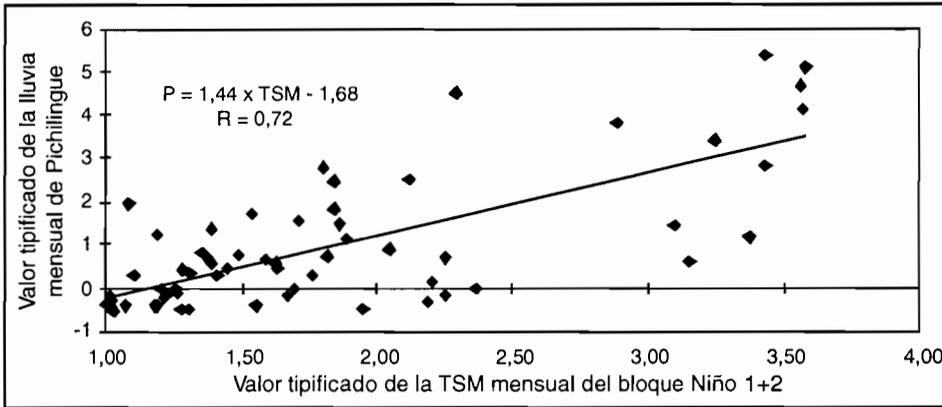


Fig.8 - Correlación entre las anomalías mensuales de TSM del bloque “Niño 1+2” y las anomalías de lluvia de Pichilingue, considerando sólo los meses con anomalía superior a una desviación estándar de TSM.

b) Relación entre los valores mensuales tipificados de precipitación y de TSM

De la misma manera, si se consideran solamente las anomalías de TSM superior a una desviación estándar (Fig. 8), se observa una clara alza de las anomalías de precipitación con las de temperatura del mar.

Estos dos primeros gráficos permiten observar que los totales pluviométricos mensuales están relacionados con la temperatura del mar a lo largo de las costas ecuatorianas y peruanas.

1. 1. 5. 2. Tentativa de previsión

Ahora se analizan las posibilidades de prever las anomalías de precipitación mediante las anomalías de TSM. La relación entre las anomalías de TSM con las de lluvia del mes siguiente es significativa (Fig. 9 : $R = 0,67$ y gradiente = 1,43), y algo muy importante a

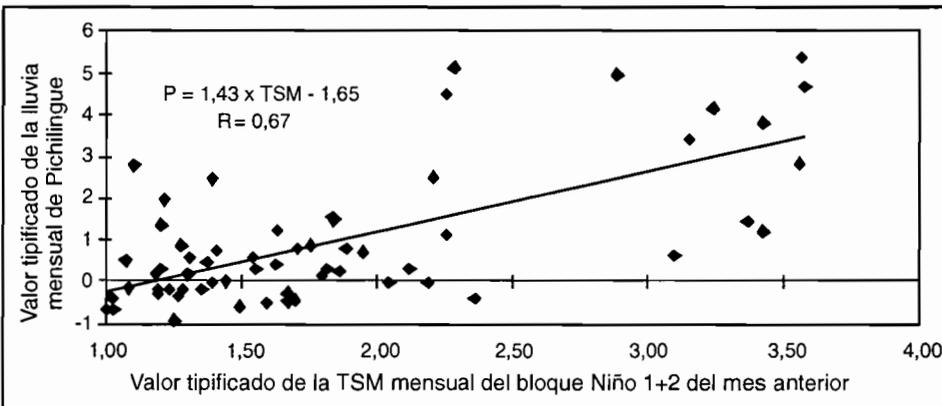


Fig. 9 - Correlación entre las anomalías de lluvia de Pichilingue y las anomalías de TSM del bloque “Niño 1+2” del mes anterior, considerando sólo los meses con anomalía superior a una desviación estándar de TSM (tentativa de previsión).

considerar es que la ecuación de la recta de regresión es casi la misma, lo que permite estimar una probabilidad de ocurrencia de las anomalías de lluvia mensual de Pichilingue a partir de las anomalías de TSM del bloque "Niño 1+2" del mes anterior.

Este primer estudio realizado solamente con valores de la TSM del bloque "Niño 1+2" y los totales pluviométricos mensuales de la estación Pichilingue, indica que las anomalías positivas de la TSM pueden ser consideradas como un indicador de probable abundancia de precipitaciones en el mes siguiente.

Se espera llegar a estimaciones más significativas y tal vez con algunos meses de anticipación utilizando los resultados de los modelos de circulación atmosférica y oceanográfica de los grandes proyectos internacionales, y por otra parte considerando otros parámetros explicativos, como las componentes zonales y meridionales del viento del Pacífico Tropical Oriental, los totales pluviométricos del período anterior, como lo hizo Hastenrath (1990) en el Noreste brasileño, todo esto asociado a un análisis de la situación sinóptica regional.

1. 1. 6. *Conclusión*

Se dividió al sector costero del país en zonas pluviométricas homogéneas, en las que las variaciones interanuales son pseudo-proporcionales. Esto permitió definir en el litoral del Ecuador dos sectores, según la influencia del ENSO en los totales pluviométricos.

Se determinó el límite de relación significativa entre el ENSO y las precipitaciones en el Ecuador, el mismo que corresponde a las estribaciones de la Cordillera de los Andes al Este y se sitúa al Norte entre Esmeraldas y San Lorenzo.

Se demostró, para una estación meteorológica representativa de una región de la costa ecuatoriana, que las precipitaciones mensuales están relacionadas con la temperatura superficial del Pacífico oriental, y se puede afirmar que cuando la TSM del bloque "Niño 1+2" es elevada, la probabilidad de observar en el mes siguiente valores anormalmente elevados de precipitaciones es alta.

Siguiendo este análisis preliminar, se podrá estimar con uno o varios meses de anticipación, la probabilidad de tener excesos de lluvia que originarán las inundaciones que afectarán al litoral ecuatoriano.

2. OBRAS DE PROTECCIÓN EXISTENTES Y PROYECTADAS EN LA CUENCA DEL RÍO GUAYAS

En la primera parte se determinó que existe una marcada influencia del fenómeno ENSO en el litoral ecuatoriano en general y de manera especial en la cuenca del río Guayas, que corresponde en su mayor parte a los grupos pluviométricos más relacionados con el ENSO que son "Santo Domingo", "Los Ríos", "Guayaquil" y "Colimes" (nº1, 2, 3 y 4 de la Fig. 6). Esta marcada influencia ha obligado al gobierno a tomar medidas precautelatorias ante posibles eventos hidrometeorológicos que provocan inundaciones en esta importante zona de desarrollo económico del país, mediante la planificación, diseño y construcción de obras de infraestructura para la protección contra las inundaciones.

2. 1. Descripción de la cuenca del río Guayas

La Cuenca del río Guayas con una superficie de 31.500 km², está situada al centro-oeste del país (Fig. 1). Corresponde al 13% del territorio ecuatoriano, y en ella se concentra el 40% de la población total del país.

El río Guayas está conformado por cuatro grandes tributarios que escurren de Norte a Sur y de Este a Oeste que confluyen al norte de la ciudad de Guayaquil para formar el río Guayas (Fig. 10). Al Oeste, se encuentra el río Daule, de 12.000 km², cuya cuenca está enteramente situada en la zona costera baja. Al centro, el río Quevedo-Vinces, de 6.400 km², con una parte de su cuenca situada en las estribaciones de la cordillera. Más al Este, el río Babahoyo de 7.800 km² con gran parte de la cuenca originada en la Sierra, y al extremo Sureste, los ríos Chimbo y Bulubulu con un área total de 5.200 km². La cuenca del río Chimbo proviene en gran parte de la región interandina.

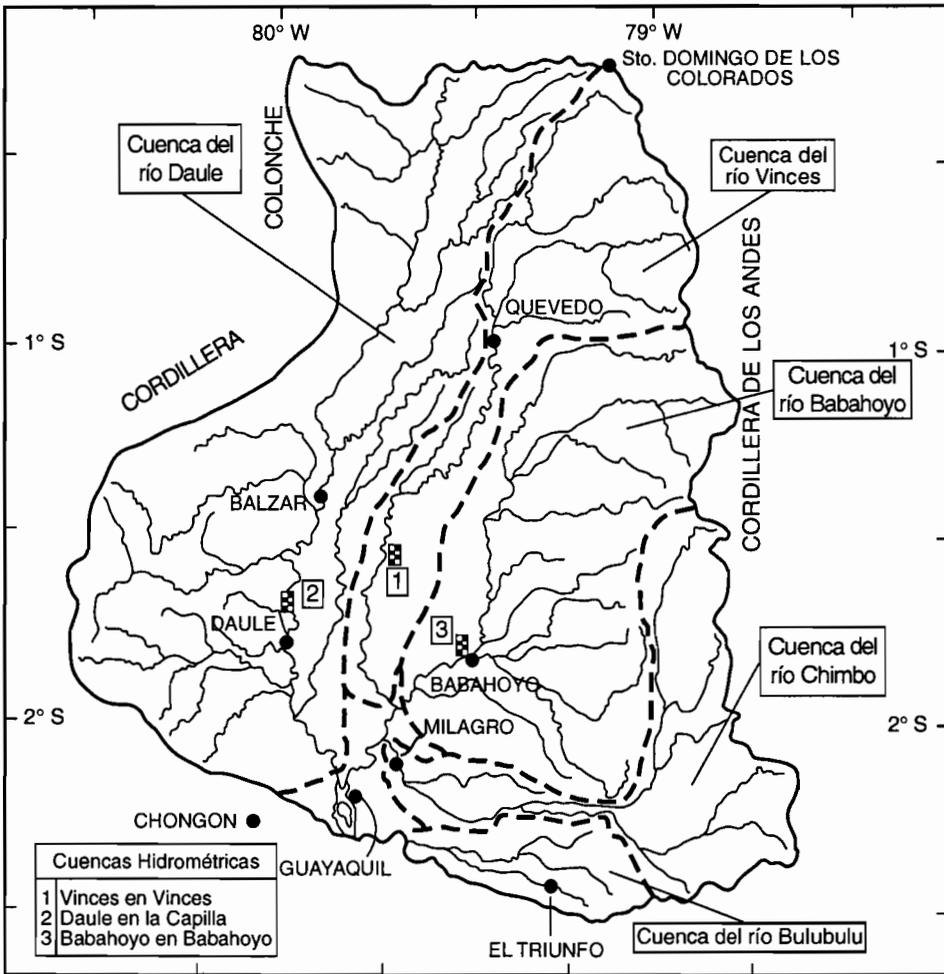


Fig. 10 - Plano base de la cuenca del río Guayas.

El potencial agrícola del río Guayas es actualmente el mayor del Ecuador, tanto en cultivos de subsistencia como en cultivos destinados a la exportación, existiendo más de 300.000 ha fácilmente irrigables, además de la crianza de ganado, etcétera. Entre las principales actividades agrícolas cabe citar algunas destinadas principalmente a la exportación del banano, arroz, café, cacao, y la crianza de camarones, además de otras más tradicionales como la yuca, las hortalizas y los frutales. El agua destinada al riego, constituye el 95% del requerimiento global del Guayas.

Su pluviometría media anual varía de Norte a Sur y de Este a Oeste, de 3.000 mm en el límite Noreste, en Santo Domingo de los Colorados, disminuyendo a 2.200 mm en Quevedo, a 1.200 mm a la altura de las ciudades de Babahoyo y Daule, a 1.000 mm en Guayaquil y a 750 mm en Chongón al extremo Suroeste.

La distribución de los totales anuales es sumamente irregular, sus coeficientes de variación son superiores a 0,40. Como se demostró anteriormente una gran parte de esta irregularidad se debe al fenómeno ENSO, debiéndose resaltar que "El Niño" extraordinariamente fuerte de 1983 quedó grabado en la memoria por la gravedad de los daños ocasionados por las aguas. También la distribución estacional de las precipitaciones es bastante irregular, así el 85% del total de la lluvia se concentra durante los cuatro primeros meses del año.

Como consecuencia, todos estos factores provocan una extrema irregularidad de los caudales en los ríos. Desgraciadamente las situaciones extremas como el exceso de agua (inundaciones) o la falta de la misma (sequías), constituyen la situación más frecuente, de tal manera que ciudades como Vinces, Babahoyo, Quevedo, o Balzar y las zonas agrícolas de este sector son periódicamente azotadas por inundaciones que implican pérdidas económicas severas.

2. 2. ¿Cuáles son las obras de protección existentes o previstas?

Se describen a continuación las obras de protección contra las crecidas existentes y proyectadas en la cuenca del río Guayas (Fig. 11). Esta es la mayor cuenca de los ríos costeros en donde se concentran la mayoría de las obras de protección contra las inundaciones.

La CEDEGE es la entidad encargada de la planificación y ejecución de obras de interés general para esta cuenca y en particular de las obras de regulación y protección contra las crecidas.

2. 2. 1. *Planificación de instalación de presas*

La CEDEGE (1984) tenía elaborado un plan hidráulico a largo plazo que contempla 20 sitios de posibles presas de almacenamiento para la protección de crecidas e irrigación, 2 transvases, 2 derivaciones y 3 proyectos locales de aprovechamiento y conservación. Los volúmenes de estas veinte presas están resumidos en la Tabla 3.

Después de la construcción de estas presas, los caudales de crecida natural (Tabla 4) serían reducidos de acuerdo a las Tablas 5 y 6.

Según la CEDEGE (1984), las presas previstas permitirán una protección contra las inundaciones para un período de retorno de 30 años en la cuenca del río Daule, de 25 años en la cuenca del río Vinces, pero solamente de 5 años en la cuenca del río Babahoyo, que continuará sometida a inundaciones frecuentes. Las presas no resultaron una solución factible para las cuencas de los ríos Chimbo, Bulubulu y Cañar por lo cual fue necesario proyectar un sistema de evacuación de las crecidas por canales de grandes dimensiones llamados "By-Pass".

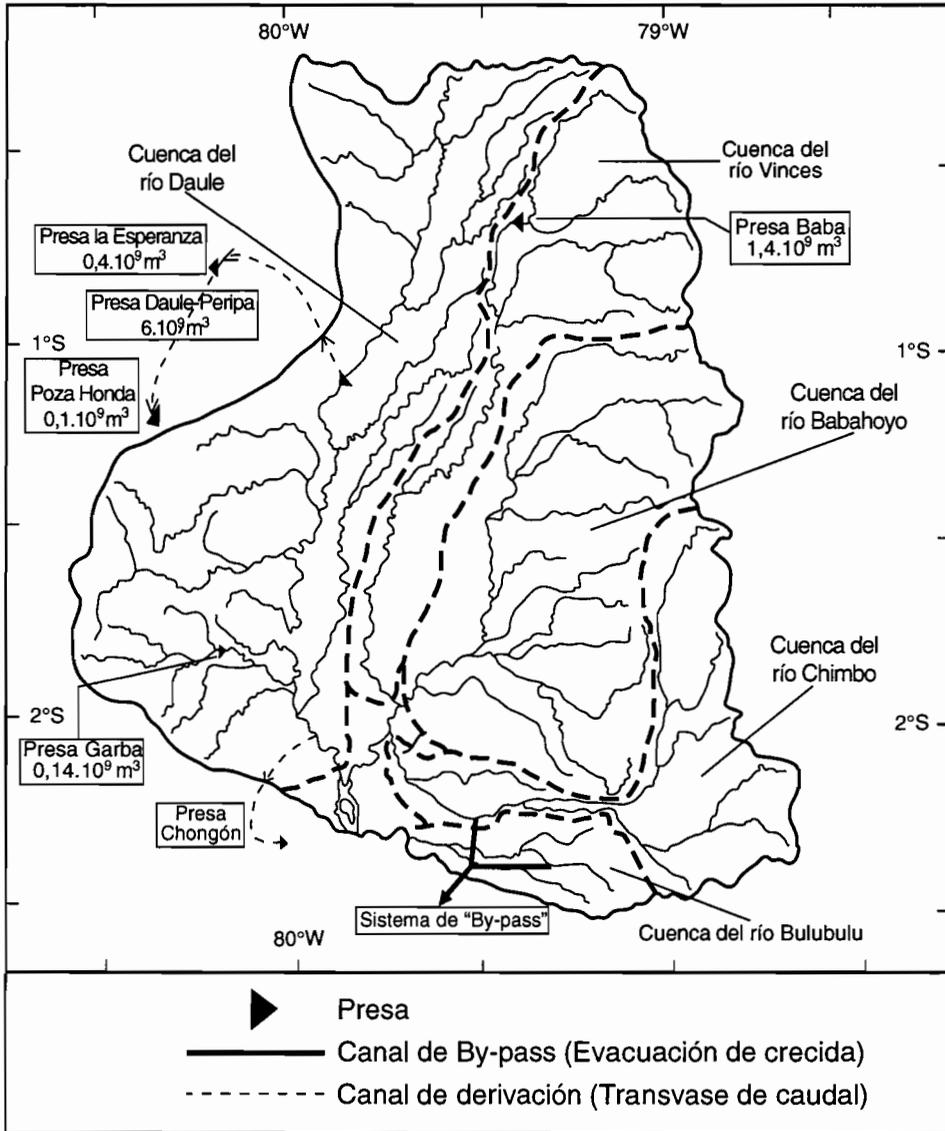


Fig. 11 - Ubicación de las principales obras de protección contra las inundaciones.

2. 2. 2. La presa Daule-Peripa

Se trata de la principal presa de aprovechamiento múltiple de la cuenca del Guayas. Controla una cuenca de 4.500 km², es decir aproximadamente el 40 % de la superficie total de la cuenca del río Daule. Su volumen de 6.10⁹ m³ es superior al escurrimiento medio anual de su cuenca, estimado en 5,3.10⁹ m³.

El lago formado tiene una superficie de 270 km², la presa alcanza una altura de 78 m sobre el lecho del río y una longitud de corona de 250 m., 21 km de dique permiten cerrar el

Tabla 3 - Superficies de las subcuencas y volúmenes de almacenamiento (CEDEGE, 1984).

Sub - Cuenca	Superficie (km ²)	Capacidad de almacenamiento inventariada (10 ⁶ m ³)
Vinces	6.419	3.237
Daule	12.058	7.345
Babahoyo	7.828	1.342
Chimbo-Bulubulu	5.200	0
Total	31.500	11.924

Tabla 4 - Caudales máximos (m³/s) sin obras de regulación (CEDEGE, 1984).

Estación	Período de retorno (años)		
	2	10	50
Daule en la Capilla	1.800	2.600	3.500
Vinces	852	1.135	1.331
Babahoyo	1.624	2.202	2.709

Tabla 5 - Caudales máximos (m³/s) con la primera etapa del plan de regulación, después de la construcción de las siete presas más importantes (CEDEGE, 1984).

Estación	Período de retorno (años)		
	2	10	50
Daule en la Capilla	460	1.430	2.675
Vinces	383	561	668
Babahoyo	1.222	1.620	1.919

Tabla 6 - Caudales máximos (m³/s) con la segunda etapa del plan de regulación, después de la construcción de las veinte presas (CEDEGE, 1984).

Estación	Período de retorno (años)		
	2	10	50
Daule en la Capilla	278	1.073	1.896
Vinces	340	499	594
Babahoyo	1.025	1.358	1.610

lago en las partes más bajas de la divisoria de aguas. Tiene tres compuertas principales diseñadas para evacuar un caudal de crecida de 3.600 m³/s y otro vertedero de emergencia que puede evacuar 800 m³/s suplementarios.

El costo total de la obra está valuado en 1.200 millones de dólares. Está construida y en funcionamiento, faltando la realización de etapas complementarias. Esta presa de aprovechamiento múltiple permitirá :

- a) La irrigación de 50.000 ha en la cuenca baja del río Daule.

b) El transvase de agua para otras presas como las de Poza Honda, La Esperanza o Chongón, situadas fuera de la cuenca del río Guayas en zonas del litoral con déficit de agua permanente.

c) La generación de energía hidroeléctrica a través de una planta de 130 MW o más, diseñada para generar 500 millones de kw.h por año.

d) La presa Daule-Peripa fue diseñada para proteger el valle aguas abajo para una crecida de 30 años de período de retorno, reduciendo el caudal de dicha crecida de 3.200 m³/s a 1.600 m³/s. Este caudal de crecida regularizada de 1.600 m³/s corresponde a la crecida natural que ocurre en promedio cada dos años.

2. 2. 2. 1. Limitación de la protección contra las crecidas de la presa Daule-Peripa

La presa Daule-Peripa constituye sin duda alguna un progreso esencial para la protección de la cuenca baja del Daule contra las inundaciones. Sin embargo es claro que en caso de surgimiento de períodos lluviosos de frecuencia mayor, como fue el caso del invierno catastrófico de 1983, la presa "Daule-Peripa" se llenará en las primeras crecidas, no pudiendo almacenar las crecidas posteriores y su papel se limitará a la reducción provocada por la laminación del pico en el lago.

Sería necesario acoplar al sistema de manejo de esta presa una red hidrometeorológica de alerta que permitirá conocer anticipadamente cuando sea necesario vaciar preventivamente la presa, en el caso que se pronostique la llegada de una crecida muy fuerte. Además, la presa "Daule-Peripa" sólo controla la mitad de la superficie de la cuenca del río Daule y no podrá proteger las zonas inundables situadas cerca de la parte inferior de su curso contra las crecidas originadas en esta misma zona inferior o en el occidente de la cuenca.

2. 2. 3. El sistema de "By-pass" al sur de la cuenca del río Guayas

En el Sur de la cuenca del río Guayas existe una convergencia de varios ríos grandes que fluyen paralelamente de Este a Oeste, a pocos kilómetros uno del otro, cuyas aguas proceden de cuencas importantes, principalmente ubicadas en la Sierra. Se trata de los ríos Chimbo (2.300 km²), Chanchán (1.400 km²) a uno o dos kilómetros al Sur y el río Bulubulu (700 km²), 10 kilómetros más al Sur (Fig. 11). La convergencia de todas estas aguas, a poca distancia, provocan inundaciones frecuentes en estas zonas planas, donde la pluviometría local fluctúa alrededor de los 2.000 y 2.500 mm anuales, tendiendo a agravar la situación.

Esta zona, con una densidad de población relativamente elevada, está azotada por inundaciones frecuentes, y sería muy oneroso construir aquí diques generales de contención o embalses de regulación de tamaño suficiente para proporcionar una protección eficaz. Por estos motivos, la solución encontrada fue la construcción de canales de evacuación de crecidas hacia el océano, diseñados con un período de retorno de 50 años, complementados por un sistema de diques locales de contención y de obras de drenaje, conforme se indica en la Fig. 12.

La primera etapa de este sistema de canales llamado "By-pass" está en fase de construcción y próximamente entrará en operación. Esta red de canales fue creada para evitar que los ríos Chimbo, Bulubulu y Boliche lleguen a niveles de desbordamiento. Para esto se proyectó un esquema hidráulico relativamente complejo, donde los canales recuperan los excesos de agua para desfogar en los esteros cercanos al mar o en la parte inferior del curso de agua del río Bulubulu, llamado Boliche.

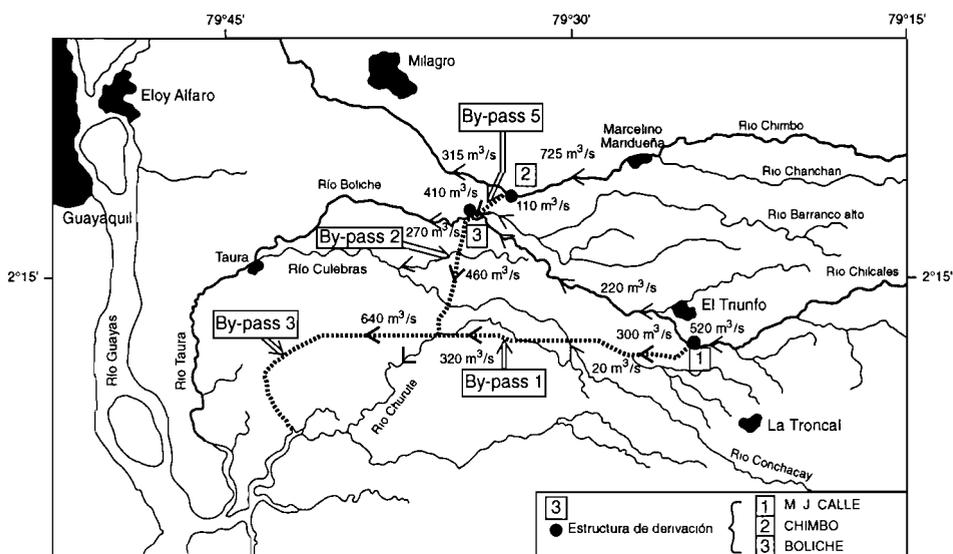


Fig. 12 - Descargas derivadas por los diferentes "By-pass" (CEDEGE, 1995).

Esta obra ambiciosa de carácter regional tiene como objetivo proteger o disminuir el impacto de las crecidas para una zona de casi 10.000 km². El sistema de control de crecidas está basado en cuatro tramos de "By-pass" (tramo 1, 2, 3 y 5) de una longitud total de más de 60 km con canales de ancho variable entre 40 y 120 m, capaces de evacuar caudales de 300 a 640 m³/s.

Se construirán también todas las obras auxiliares como las estructuras de derivación, los sifones invertidos para permitir tanto el cruzamiento de los canales con los ríos así como los puentes para dejar pasar las carreteras, entre otros. A más de esto se profundizarán y encauzarán los cauces más críticos con diques, en los ríos Boliche, Chumbo y Bulubulu, para aumentar su capacidad de evacuación y se protegerá con diques ciudades como el Trunfo, Milagro, etcétera.

2. 3. Protección proporcionada por las obras actuales y proyectadas

La presa Daule-Peripa, que controla la mitad de la cuenca del río Daule, desde su construcción, poco después de las inundaciones catastróficas de 1983, ha proporcionado una protección eficaz contra las crecidas en toda la parte baja de la indicada subcuenca, además de proveer de la suficiente cantidad de agua en los estiajes, permitiendo de esta manera el desarrollo de la irrigación en esta misma subcuenca. Sin embargo, se conoce que la protección ofrecida no puede ser total por no poder controlar las crecidas generadas en la cuenca baja y occidental, pudiendo llenarse completamente en caso de lluvias y escurrimientos extremadamente fuertes como los que se observaron durante "El Niño" de 1983. Aún faltan construirse obras para los demás aprovechamientos previstos, como la producción hidroeléctrica y el transvase de agua hasta la Península de Santa Elena y Manabí, actividades que están siendo implementadas paulatinamente.

El sistema de "By-pass" de la parte Sur de la cuenca del río Guayas, en las subcuencas de los ríos Bulubulu y Chimbo, podrá resolver o por lo menos disminuir los problemas causados por las crecidas originadas en las zonas altas de los referidos ríos, situadas en la Cordillera de los Andes, hasta un período de retorno de cincuenta años.

Quedará evidentemente el problema de las crecidas generadas localmente en los pequeños ríos de esta región sin relieve y sometidos a abundantes lluvias. Para solucionar este problema, como se observa en la Fig. 11, actualmente están siendo proyectadas otras presas, entre ellas la presa Baba con un volumen de $1,4 \cdot 10^9 \text{ m}^3$, situada en la cuenca alta del río Quevedo y la presa Garba con un volumen inferior a $0,14 \cdot 10^9 \text{ m}^3$, situada en un afluente de la margen derecha del curso inferior del río Daule.

El resto de la cuenca del río Guayas está actualmente desprovisto de obras importantes de protección contra las crecidas y la población tiene que convivir con este problema. Las casas de las zonas inundables son construidas sobre columnas, utilizando diques y sobre elevaciones del suelo para poner a salvo el ganado y los bienes. Se utilizan canoas para suplir las deficiencias de las carreteras inundadas.

3. CONCLUSIÓN GENERAL

La zona costera ecuatoriana y principalmente la cuenca baja del río Guayas están frecuentemente sometidas a inundaciones que pueden tener consecuencias devastadoras, agravadas por impactos humanos como la deforestación y erosión en las cabeceras de los ríos, taponamiento de esteros y drenajes naturales, construcción de carreteras, diques, insuficiencia del alcantarillado, etcétera. El mayor riesgo, como consecuencia de las inundaciones, se produce en las actividades productivas que se desarrollan en los valles aluviales o planicies inundables, especialmente en cultivos como el banano, arroz, caña de azúcar, cultivos de ciclo corto y actualmente en la industria camaronera. En año de extraordinaria pluviosidad, las inundaciones pueden provocar la pérdida de vidas humanas.

Desde siglos atrás, el hombre encontró soluciones para mitigar el efecto de los desbordamientos de los ríos. En la cuenca del río Guayas, desde los años sesenta la CEDEGE y otras instituciones del gobierno central, regional o seccional, realizan estudios y construyen obras de protección, tales como embalses de regulación, diques, rellenos de ríos, dragados y canales de derivación. Siendo necesario continuar los esfuerzos de la CEDEGE cumpliendo con las etapas y obras previstas en su plan hidráulico, con miras a ampliarlo a la totalidad del sector costero, la intervención del sector privado, principal beneficiario de estas obras, debería ser fundamental. Sin embargo, deberán tomarse en cuenta las limitaciones de estas obras hidráulicas como los problemas de operación, altos costos e impactos ambientales adversos, por lo que previo a su construcción deberá demostrarse su sostenibilidad a largo plazo.

Pero también existen otras alternativas de solución, no estructurales, que pueden implementarse complementariamente, como la previsión del tiempo a mediano plazo mediante el análisis de la relación existente entre las precipitaciones y parámetros climáticos, tales como la temperatura superficial del Pacífico Oriental (bloque "Niño 1+2") relacionadas con el fenómeno ENSO, lo que permitirá estimar en términos de probabilidad las cantidades de lluvia en los meses venideros, así como de mejorar el manejo de las obras de regulación o control y aumentar la protección proporcionada por éstas.

Referencias citadas

- BJERKNES, J.H., 1969 - Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. *Monthly Weather Review*, 97: 163-172.
- BRUNET-MORET, Y., 1979 - Homogénéisation des précipitations. *Cahiers ORSTOM, Sér. Hydrol.*, 16(3-4) : 147-170.
- CEDEGE, 1984 - Informe de labores de marzo de 1982 a julio de 1984. *CEDEGE*: 54p.
- CEDEGE, 1995 - Resumen de las características técnicas de las obras de control de inundaciones de la cuenca baja del río Guayas. *CEDEGE*: 110p.
- CEOS, 1994 - COADS on CD-ROM, volume 5: Eastern Pacific, a product from the Climate and Eastern Ocean Systems (CEOS) program. *ORSTOM-NOAA*.
- CEPAL, 1983 - Los desastres naturales de 1982-83 en Bolivia, Ecuador y Perú. *Naciones Unidas*: 227 p.
- HASTENRATH, S., 1990 - Prediction of Northeast Brazil rainfall anomalies. *Journal of Climate*, 3: 893-904.
- LE GOULVEN, P. & ALEMAN, M., 1991 - Logiciel CLIMAN (Climatic Monthly Analysis) de traitement des données contenues dans la banque hydroclimatique BHIME. *ORSTOM. Communication personnelle*, 14p.
- NOUVELOT, J.F. & POURRUT, P., 1984 - El Niño. Phénomène océanique et atmosphérique. Importance en 1982-1983 et impact sur le littoral équatorien. *Cahiers ORSTOM, Série Hydrologie*, 21(1) : 39-65.
- NOUVELOT, J.F. & POURRUT, P., 1994 - Anomalies et phénomènes climatiques extrêmes. in: *L'eau en Equateur. Principaux acquis en hydroclimatologie* (P. Pourrut, ORSTOM Editions) : 87-98 ; ORSTOM.
- QUINN, W. H., NEAL, V.T. & ANTÚNEZ DE MAYOLO, S.E., 1987 - El Niño occurrences over the past four and half centuries. *Journal of Geophysics Res.*, 92: 14449-14461.
- RASMUSSEN, E.M. & WALLACE, J.M., 1983 - Meteorological aspects of the El Niño / Southern Oscillation. *Science*, 222: 1195-1202.
- ROSSEL, F., SEMIOND, H. & CLAIRET, S., 1995 - Régionalisation de la pluviométrie annuelle de l'Equateur pour l'étude de l'impact de l'ENSO sur les régimes pluviométriques. *ORSTOM - INAMHI*, 56p.
- WYRTKI, K., 1975 - El Niño: the dynamic response of the equatorial Pacific ocean to atmospheric forcing. *J. Phys. Oceanogr.*, 5: 572-584.

LE GLISSEMENT DE TERRAIN ET LES INONDATIONS CATASTROPHIQUES DE LA JOSEFINA EN ÉQUATEUR

Éric Cadier *, Othon Zevallos **, Pedro Basabe ***

Résumé

Le 29 mars 1993, s'est produit en Équateur un gigantesque glissement de terrain, d'un volume estimé à environ 20 millions de m³, qui a barré le rio Paute. Ce glissement a provoqué un nombre de morts estimé entre 35 et plus de 100. Entre le 29 mars et le 1^{er} mai, un lac de près de 200 millions de m³ s'est formé en amont du barrage constitué par le glissement, noyant une zone fertile et habitée de près de 1 000 ha et provoquant la destruction de routes, de voies de chemin de fer et de la centrale thermoélectrique régionale. Le 23 avril, l'eau a commencé à couler dans le canal d'évacuation creusé dans le barrage pour atténuer la violence de la rupture, motivant l'évacuation des 14 000 habitants de la vallée en aval et la préoccupation des responsables du grand barrage d'Amaluza, situé 60 km en aval, qui produit entre 60 et 75% de l'électricité consommée en Équateur. Le samedi 1^{er} mai, le débit s'est accru de façon spectaculaire passant de quelques dizaines de m³/s à près de 10 000 m³/s, dépassant la plupart des prévisions des experts. Cet écoulement formidable a tout balayé sur son passage : blocs de plusieurs m³, routes, maisons, épargnant de justesse le barrage d'Amaluza au terme d'un suspense éprouvant. Après avoir décrit quelques aspects géotechniques du glissement de terrain et hydrauliques de la rupture du barrage et de la propagation de l'onde de crue, nous comparerons les différentes méthodes utilisées pour prévoir le temps de rupture et le débit de pointe de la crue. Trois méthodes ont été utilisées : l'utilisation d'abaques empiriques, la modélisation physique et la modélisation numérique. Ces prévisions, vitales pour tout ce qui est en aval sont pour le moins délicates. Nous avons constaté de fortes divergences dans les prévisions des experts. On présente enfin quelques aspects de la gestion de cette crise, de la reconstruction qui l'a suivie, ainsi que de la prévention des désastres naturels. La rupture du barrage de la Josefina est un événement de première grandeur, dont la plupart des paramètres sont connus. Elle doit être utilisée pour faire progresser les connaissances et diminuer l'imprécision des méthodes de prévision en matière de rupture des très grandes digues.

Mots-clés : *Glissement de terrain ; barrage ; inondations ; propagation de crues ; rupture de barrage ; modélisation physique, mathématique et prévisions ; gestion de crise.*

* Adresse postale : Mission ORSTOM Apartado 1711-6596 Quito ÉQUATEUR. Mail : cadier@orstom.ecx.ec; Tel-fax d'INSEQ : (5932)468.327; fax de l'ORSTOM 569.396.

** Escuela Politécnica Nacional, Departamento de Hidráulica, Isabel La Católica s/n, Quito, Ecuador. Tel (5932) 507.144; 563.077.

*** Proyecto PRECUPA, Casilla 01-01-1980, Cuenca, Ecuador. Tel (5932) (7) 880.418; 800.463. Fax: 890.900.

EL DESLIZAMIENTO Y LAS INUNDACIONES CATASTRÓFICAS DE LA JOSEFINA EN ECUADOR

Resumen

El 29 de marzo de 1993 se produjo en el Ecuador un gigantesco deslizamiento con un volumen estimado de 20 millones de m^3 que represó el río Paute. El deslizamiento provocó un número de muertos estimado entre 35 y más de 100. Entre el 29 de marzo y el 1 de mayo se formó un lago de cerca de 200 millones de m^3 aguas arriba del deslizamiento que inundó una zona fértil y poblada de casi 1 000 ha, con la destrucción de carreteras, ferrocarriles, y de la central termoeléctrica de la región. El 23 de abril, el agua empezó a salir por el canal de desagüe excavado en la masa deslizada a fin de mitigar efectos mayores. Sin embargo esto motivó la evacuación de los 14 000 habitantes del valle aguas abajo y la preocupación de los responsables de la gran presa de Amaluza ubicada a 60 km aguas abajo, que produce entre el 60 y 75% de la energía eléctrica consumida por el Ecuador. El sábado 1 de mayo, el caudal aumentó de forma espectacular pasando de algunas decenas de m^3/s hasta cerca de 10 000 m^3/s , sobrepasando la mayoría de las previsiones de los expertos. Este enorme flujo arrasó con todo lo que estaba a su alcance: bloques de varios m^3 , carreteras, casas, puentes, etc., salvándose apenas la presa de Amaluza después de un suspense estremecedor. El trabajo presenta algunos de los aspectos geotécnicos e hidráulicos del deslizamiento de la Josefina, la rotura de la presa y la propagación de la onda de crecida. Se comparan además los diversos métodos utilizados para predecir el tiempo de rotura y el caudal de pico de las crecidas. Con tal objeto se utilizaron tres procedimientos: la utilización de ábacos empíricos, la modelización física y la modelización numérica. Estas predicciones, de vital importancia para todo lo ubicado aguas abajo, son muy delicadas. Se constataron fuertes divergencias entre las diversas previsiones de los expertos. Finalmente se analizan algunos aspectos de la situación de crisis, así como las acciones de reconstrucción y de prevención de desastres naturales. La rotura de la presa de la Josefina es un evento de primera magnitud, donde la mayor parte de los parámetros eran conocidos. Estas experiencias deben ser utilizadas para mejorar los conocimientos del fenómeno y disminuir la imprecisión de los métodos de previsión de rotura de grandes presas.

Palabras claves: *Deslizamiento; represamiento; inundaciones; propagación de crecidas; rotura de presa; modelización física, matemática y previsiones; gestión de crisis.*

THE LANDSLIDE AND CATASTROPHIC FLOODING OF THE JOSEFINA IN ECUADOR

Abstract

On the 29th of March 1993, a large landslide with an estimated volume of 20 million m^3 , took place in Ecuador, damming the Paute river. This landslide caused a number of deaths estimated between 35 and more of 100. Between the 29th of March and the 1st of May, a reservoir with a volume of near 200 million m^3 formed upstream of the blockage, flooding almost 1 000 hectares of fertile and occupied land and destroying roads, railways and a regional thermoelectric plant. On the 23rd of April the water started to flow out of the dam through a channel which had been excavated in the dam in order to reduce the further damage. This in turn prompted the evacuation of the 14,000 habitants of the valley downstream, and caused great anxiety among those responsible for the Amaluza dam, situated 60 Km downstream, which produces between the 60 and the 75% of all the electric energy consumed in Ecuador. On Saturday May 1, the river's discharge rose dramatically, nearing the 10,000 m^3/s mark, and exceeding the predictions of most experts. This large flow carried large rocks and destroyed everything in its path like roads, houses, bridges, etc. only leaving standing the Amaluza dam after moments of frightening suspense. This work describes some of the geotechnical and hydraulical aspects of the Josefina landslide, the rupture of the dam and the routing of the flood wave. The various methods used to predict the rupture time and peak discharge of the flood are also compared. Three methods were employed: empirical procedures, scale modelling and numerical modelling. These predictions were of vital importance to everything situated downstream. There were strong differences between the various predictions made by the experts. In addition, some aspects of the crisis management of the reconstruction and of the natural disaster prevention are considered. The rupture of the Josefina dam is an event of first magnitude where most of the parameters were known. The experience gained must be used to improve the knowledge of this kind of events and to reduce the uncertainty of the prediction methods of large dam failure.

Key Words: *Landslide; damming; flooding; flood routing; dam breaking; scale, numerical modelling and prediction; crisis management.*

INTRODUCTION

Le 29 mars 1993 s'est produit au sud de l'Équateur un glissement de terrain d'un volume estimé à environ 20 millions de m³ qui a barré le rio Paute par une digue de 100 m de hauteur, 600 m de largeur et 1,1 km de longueur, formant un lac de près de 200 millions de m³ qui a mis un mois à se remplir. Sa rupture a ensuite provoqué des dégâts importants jusqu'à 100 km en aval. Les dommages directs sont estimés à 147 millions de dollars (CREA, 1993), auxquels il faut ajouter les atteintes à l'environnement, aux voies de communication de l'ensemble de la région et la réduction de la durée de vie du barrage de l'Amaluza. Au-delà de ses lourdes conséquences locales sur le plan humain, économique et social, cette catastrophe a bien failli plonger tout le pays dans une très grave crise énergétique en mettant en péril le barrage d'Amaluza qui fournit près des trois quarts de l'électricité du pays.

Nous décrirons tout d'abord les principales phases de cette catastrophe (Cadier *et al.*, 1994 ; Plaza & Zevallos, 1994 ; Canuti *et al.*, 1994) :

- le glissement de terrain de la Josefina
- le remplissage du lac en amont du barrage formé par le glissement
- le creusement du canal destiné à accélérer et à atténuer la violence de la rupture du barrage formé par le glissement
- la rupture du barrage formé par le glissement de la Josefina
- la propagation de l'onde de crue dans la vallée située en aval, jusqu'au barrage hydro-électrique d'Amaluza

Nous étudierons ensuite plus en détail le scénario de la rupture et comparerons la précision et l'efficacité des différentes méthodes et modèles de prévision de ruptures de digues en terre utilisés.

Nous analyserons enfin quelques aspects de la gestion de l'ensemble de la crise, avant et après la rupture du barrage de la Josefina.

La plupart des données que nous avons utilisées ou citées proviennent de mesures sur le terrain, de laboratoire et de calculs effectués par l'INECEL (Institut Équatorien d'Électrification). Ces mesures concernent les courbes hauteur-volume des différentes retenues, les niveaux de ces dernières au cours des phases de remplissage et de rupture ainsi que les hydrogrammes en différents points du rio Paute, lors de la rupture.

1. LE GLISSEMENT DE TERRAIN DE LA JOSEFINA : CAUSES, DYNAMIQUE ET COMPOSITION

Le 29 mars à 20h 30 un pan entier d'une montagne appelée "*Parquiloma*" (connue localement sous le nom de "*Cerro Tamuga*") et située au nord du rio Paute à une vingtaine de km en aval de la ville de Cuenca, s'est effondré, tuant au moins 35 personnes et détruisant une route vitale et unique qui permettait de relier les villes de Paute, de Gualaceo et le barrage de l'Amaluza, à Cuenca et au reste du pays. Les premières estimations du volume de ce glissement ont été très variables : entre 20 (Plaza & Eguez, 1993), 36 (Aguilera & Romo, 1993) et 44 millions de m³ (James, 1993). Des calculs plus précis effectués à partir d'une restitution photogrammétrique ont fourni une estimation de 19 millions de m³ (Sevilla, 1993 ; 1994). Ce glissement, présentant une pente de 25 à 45% et couvrant une surface de 40 ha, a barré le rio

Paute en constituant une digue de 100 m de hauteur, 600 m de largeur et 1,1 km de longueur, derrière laquelle s'est ensuite formé un lac de 200 millions de m³. Les figures 1 et 2 permettent de situer ce gigantesque éboulement.

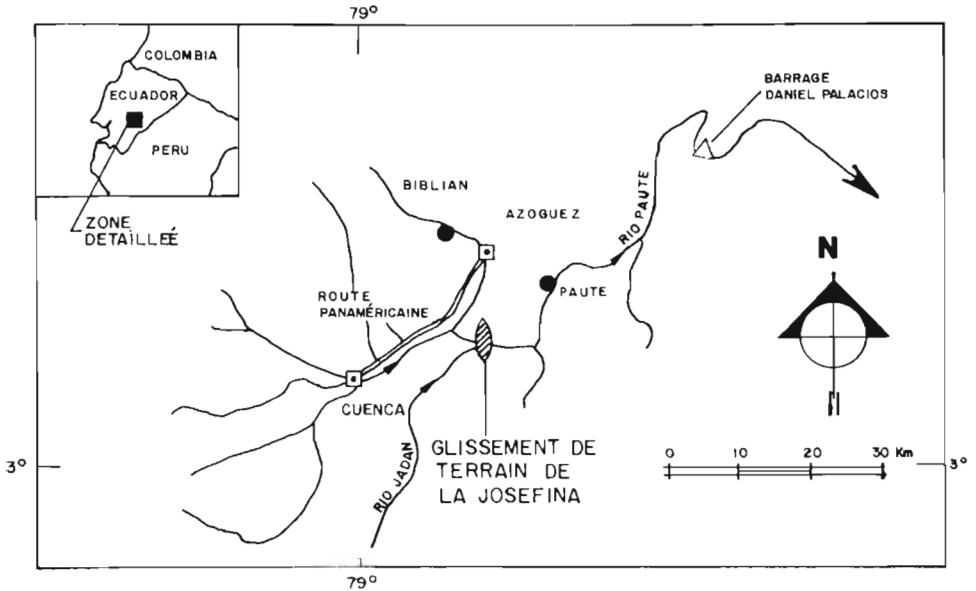


Fig. 1 - Carte de situation.



Fig. 2 - Vue du glissement et du lac depuis l'amont, un jour avant la rupture (photo C. Menendez). (A) Tête du glissement ; (B) Direction du mouvement ; (C) Accumulation des matériaux ayant glissé ; (D) Canal creusé dans la partie la plus basse du glissement ; (E) Lac accumulé en amont du glissement.

Cette zone fait partie du bord occidental d'un bassin sédimentaire interandin qui est composé d'un mélange de roches sédimentaires, métamorphiques et parfois volcaniques du néogène (Plaza & Eguez, 1993). Il y aurait eu en réalité deux glissements successifs. Le premier, constitué de roches relativement peu disloquées, a été recouvert quelques instants plus tard par un second glissement ou éboulement rocheux, dans lequel, au contraire, toutes les couches du sol ont été mélangées, des blocs rocheux disloqués de toute taille étant enserrés dans du matériel fin et pulvérulent. Ceci a été confirmé par une étude sismique du barrage et a pu être constaté dans les coupes du glissement postérieures à la rupture. La vitesse du glissement a dû être grande, puisque des morceaux de la route située rive gauche, du côté du glissement, ont été projetés à plusieurs centaines de mètres sur l'autre rive, à une altitude plus élevée, attestant d'une forte énergie cinétique. Selon Zevallos (1994), la densité moyenne des matériaux du glissement a été estimée à 2,76, avec une porosité de 15%, un angle de friction de 45°, une cohésion de 0,5T/m² et un D50% de 100 mm.

1. 1. Les causes du glissement

La convergence et la superposition de plusieurs facteurs semblent avoir déclenché ce mouvement de terrain. Tout d'abord, il se situe dans une zone tectonique avec des intrusions locales propices à ce genre d'accident. Un glissement plus ancien a d'ailleurs été mis en évidence (Sevilla, 1994). Des plans de faille, très inclinés et dirigés vers la vallée ont pu favoriser l'éboulement. Les pluies ont été, le mois précédant l'événement, deux fois plus élevées que la normale (Acosta & Salazar, 1993). On a fait état de crevasses par où s'engouffrait l'eau, en amont du glissement, mais on peut aussi supposer que des carrières situées dans sa partie inférieure et dans lesquelles de l'eau s'écoulait ont contribué à le fragiliser à la base. En tout état de cause les origines du déclenchement du phénomène sont probablement multiples et restent un sujet très polémique. De plus, peu d'informations sont disponibles sur la situation antérieure à ce glissement dans la mesure où le secteur n'était pas surveillé.

2. LE REMPLISSAGE DE LA RETENUE : L'INONDATION DES ZONES EN AMONT DU GLISSEMENT DE TERRAIN

L'eau s'est accumulée derrière le barrage formé par le glissement de terrain de la Josefina. Un lac de 200 millions de m³ a mis plus d'un mois à se remplir.

Les dégâts ont été considérables. Entre 800 (INECEL, 1993) et 1000 hectares (Zeas, 1994) de fond de vallée fertile et relativement peuplée ont été inexorablement noyés ainsi que d'importants axes routiers, une voie de chemin de fer, une usine thermoélectrique régionale et une partie de la banlieue de la ville de Cuenca. On a pu observer de nombreux glissements induits provoqués par la saturation des talus plongeant dans les eaux du lac, tout d'abord lors de la montée des eaux, mais surtout au moment de la vidange rapide de la retenue au cours de laquelle les pressions hydrostatiques dans le sol n'ont pas eu le temps de se dissiper.

Durant ce mois, le débit moyen de la rivière a été de 71 m³/s. Les valeurs maximales et minimales enregistrées ont été respectivement de 186 et de 25,6 m³/s (Zevallos, 1994). Par ailleurs, les valeurs maximales à retenir en liaison avec la retenue sont les suivantes :

Cote de l'eau : 2 362,3 m

Profondeur maximum de la retenue : 77 m

Volume de la retenue : 200 millions de m³

Longueur du lac : 9 km

Surface inondée : 800 à 1 000 ha

2. 1. Les difficultés de prévision de la montée des eaux du lac

Les premières estimations du temps de remplissage de la retenue ont été de mauvaise qualité. Cela est lié d'une part à une sur-évaluation des débits entrants, estimés initialement à 100 m³/s, alors qu'une baisse des précipitations au cours du remplissage a induit une diminution des débits. D'autre part, le volume du réservoir créé par le glissement a été sous-estimé.

Cette mauvaise estimation initiale, qui aurait pu sans doute être corrigée, a eu pour conséquence :

- a) de suspendre trop tôt le creusement du canal, dont le radier aurait pu être encore abaissé, ce qui aurait pu éviter de noyer une bonne centaine d'hectares et permis de réduire un peu plus le débit de pointe au moment de la rupture.
- b) d'évacuer près de 15 jours trop tôt les populations habitant en aval, ce qui a entraîné une certaine lassitude et une démobilisation au moment fatidique de la rupture du barrage.

Nous reviendrons à la fin de cet article sur plusieurs aspects de la gestion de cette crise.

3. CREUSEMENT DU CANAL D'ÉVACUATION D'EAU : SITE CHOISI ET TECHNIQUES EMPLOYÉES

Afin de diminuer les effets de l'inondation et de la rupture du barrage, l'armée a creusé un canal d'écoulement de 18 m de profondeur, de 6 m de largeur à sa base et de 407 m de longueur, dont la section transversale a été reportée sur la figure 3. On avait, au préalable, analysé et rejeté d'autres solutions peu viables comme un tunnel, le pompage, le dynamitage et la stabilisation et/ou la transformation du glissement de terrain en un barrage permanent.

Jusqu'à 21 engins de terrassement ont enlevé 165 000 m³ de matériaux en 13 jours. Le rabaissement de la crête de près de 20 m a évité l'inondation de 250 ha supplémentaires en amont. Si l'on n'avait pas creusé ce canal, le volume de la retenue aurait atteint 330 millions de m³ et le débit, au moment de la rupture, aurait été proche de 30 000 m³/s avec des conséquences encore plus graves (Zevallos, 1993).

On ne peut que regretter l'arrêt prématuré de ces travaux le 14 avril, provoqué par la sous-évaluation du temps de remplissage, mais aussi par la crainte, qui s'est révélée à posteriori peu justifiée, de voir ce barrage rompre sur plus d'un kilomètre de longueur sous l'effet d'un phénomène de renard hydraulique. De plus, les techniciens étaient pressés par le temps et plusieurs machines utilisées de manière trop intensive ont été détériorées. Les cinq derniers mètres du canal ont ainsi été creusés avec un talus beaucoup trop raide, dans des conditions très dangereuses.

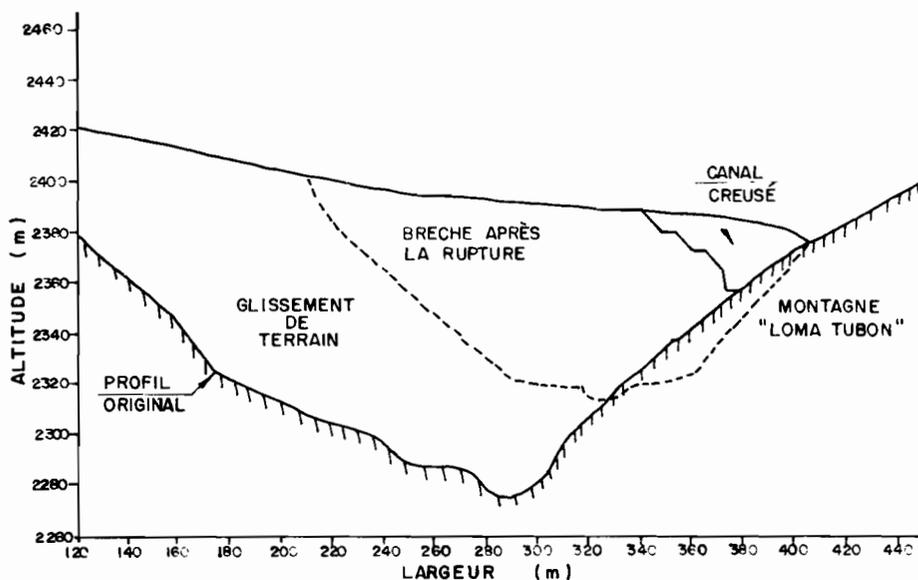


Fig. 3 - Section transversale du canal d'évacuation (adapté de Aguilera & Romo, 1993).

Enfin, quand l'eau a commencé à s'écouler, le canal d'évacuation a été très souvent obstrué par des éboulements développés dans ses parois à la fois trop raides et constituées de matériaux non consolidés. L'eau, par son action érosive, provoquait ainsi l'obstruction du canal qu'elle était censée creuser. En conséquence, ces éboulements ont retardé de cinq ou six jours le moment de la rupture et augmenté le niveau du lac de quatre mètres supplémentaires qui n'avaient pas été prévus.

Les dimensions finales du barrage et du canal (Fig. 2) sont les suivantes :

Cote du fond de la retenue : 2 280 m

Cote du radier du canal : 2 356,6 m

Profondeur de la retenue au point de déversement : 76,6 m

Longueur du canal : 407 m

Pente du talus de la partie supérieure : 1V:4H

Pente du talus des cinq derniers mètres : entre 100 et 200%

4. LE PROCESSUS DE RUPTURE DU BARRAGE DE LA JOSEFINA

À l'inverse du remplissage, le processus de rupture est difficile à prévoir. On ne sait pas exactement quand il se déclencherà ni le temps que mettra la digue à être emportée. C'est ce temps qui conditionnera le débit maximum et donc l'importance des inondations et des dégâts en aval. Dans le cas de la Josefina, c'était le plus mal connu des facteurs de risques et aussi le plus grand puisque l'existence même de la ville de Paute et du barrage de l'Amaluza était en jeu. Deux facteurs peuvent permettre de diminuer ce débit maximum :

- Il faut que le volume à évacuer soit le plus faible possible, donc que la rupture du barrage ait lieu le plus tôt possible, d'où l'intérêt du creusement du canal.
- Quand le processus exponentiel de rupture est amorcé, il faut, au contraire, le ralentir le plus possible. Ceci n'a pas pu être réalisé lors de la rupture de la Josefina.

4. 1. La phase d'érosion régressive dans le canal

L'eau a commencé à s'écouler par le canal le 23 avril. Les experts prévoyaient une durée de un à trois jours pour que le seuil d'érosion régressive remonte les 407 m du canal, atteigne son extrémité amont et provoque la rupture du barrage. Il en aura fallu sept au cours desquels le canal aura été sans cesse obstrué par les éboulements qui, en amont, ont fait remonter le niveau du lac de quatre mètres. Le désarroi des responsables et des populations était tel, que la veille de la rupture, le Comité de gestion de crise a suspendu provisoirement l'alerte rouge, permettant ainsi aux populations d'accéder aux zones interdites situées dans la vallée en aval.

À posteriori, en analysant les causes du retard du processus érosif dans le canal, on peut tirer un certain nombre d'enseignements :

- a) Les pentes latérales près du fond du canal étaient trop fortes et le fond du canal trop étroit, d'où son obstruction répétée par des éboulements de terrain.
- b) La pente longitudinale du canal était trop faible, et par conséquent, en amont du seuil d'érosion régressive, l'eau n'avait pas la capacité d'enlever les plus grands blocs des éboulements.
- c) Il aurait été souhaitable d'installer dès le début un système permettant de traverser le canal (petit téléphérique ou bateau sur le lac), facilitant le déblaiement des éboulements obstruant le canal.

4. 2. La rupture du barrage

Cette rupture a eu lieu, dans un contexte de démobilisation générale, le samedi 1^{er} mai au matin, c'est-à-dire près d'une semaine après la date prévue. Une fois amorcé, le processus de rupture a été plus rapide que ne l'avaient supposé la plupart des experts. Le 30 avril, à 17h30, les militaires avaient tiré des missiles anti-char, pour tenter, sans succès, de fissurer un gros bloc qui obstruait le canal. Le 1^{er} mai au matin, à 5h30 le débit est estimé à environ 200 m³/s. Puis tout va très vite. Le processus de rupture est amorcé. À 7h15, les mesures limnimétriques indiquent que le niveau du lac commence à baisser. À 8h, la télévision montre des images impressionnantes des écoulements et de l'érosion du barrage. Entre 9h et 10h, on observe une baisse du niveau du lac de plus de 4 mètres, ce qui correspond à un volume évacué de 30 millions de m³ et donc à un débit moyen proche de 9 000 m³/s. Les estimations du débit maximum, qui ont eu lieu vers 9h 40, oscillent entre 9 000 m³/s et 14 000 m³/s et celle de la vitesse maximum immédiatement en aval du lieu de rupture entre 15 et 20 m/s.

Il aura fallu 24 heures supplémentaires pour que l'écoulement atteigne un régime d'équilibre. Le volume total écoulé a été de 175 millions de m³ dont 75 millions entre 8h et

11h le 1^{er} mai. Comme l'avaient prévu les modèles, un lac résiduel de 40 mètres de profondeur, à la cote de 2 322,4 m, et d'un volume approximatif de 20 millions de m³, a subsisté en amont.

5. LA PROPAGATION DE LA CRUE EN AVAL

La pointe de crue a atteint la ville de Paute en une heure et demie et l'Amaluza en trois heures, comme prévu. Dans les biefs inondés, les hauteurs d'eau étaient de l'ordre de 6 et 8 mètres dans les parties les plus larges, de 12 à 25 ou peut-être 30 mètres dans les secteurs plus encaissés. On a par exemple relevé un niveau maximum de 24 mètres à la station hydrométrique de Paute A.J. Dudas (ou Chalacay) (INECEL, 1993), située à mi-chemin entre La Josefina et l'Amaluza, dans une gorge étroite. Des routes, des ponts et des maisons ont été détruits jusqu'en Amazonie, à 160 kilomètres en aval du barrage de la Josefina, bien au-delà du barrage d'Amaluza.

La propagation de la crue et les zones inondées dans les 60 km de vallée séparant la Josefina du barrage d'Amaluza ont été correctement prévues par des modèles comme le modèle de DAMBRK (voir plus loin). L'inondation s'étant produite de jour, il n'y a pas eu de victimes, l'évacuation des habitants ayant pu être organisée normalement. Cependant, la moitié de la ville de Paute a été détruite, des kilomètres de routes ont été emportés et de nombreux champs ont été rendus stériles. La morphologie du fond des vallées a été profondément modifiée par des dépôts alluviaux pouvant atteindre plusieurs mètres. Un grand nombre de glissements de terrain "secondaires" ou "induits" ont eu lieu lors de la crue, la rivière déséquilibrant des pans entiers de montagne.

Le barrage d'Amaluza avait été heureusement vidé au maximum par l'INECEL, qui avait baissé son niveau de 31 m, ce qui lui permettait de stocker un volume de crue de 51 millions de m³. Le débit maximum entrant dans la retenue n'était plus que de 8 000 (Aguilera & Romo, 1993 ; Zeas, 1993) à 10 000 m³/s (Zeas, 1993). L'usine hydroélectrique avait été arrêtée et toutes ses entrées avaient été fermées et calfeutrées en prévision d'une submersion. Après laminage et stockage par la retenue, on a mesuré un débit déversé maximum de près de 5 000 m³/s (Cepeda, 1995), alors que l'évacuateur de crue était dimensionné pour 7 700 m³/s. Des simulations ont montré que, si l'on n'avait pas creusé le canal d'évacuation, le débit de pointe aurait été de 30 000 m³/s, ce qui aurait probablement provoqué la destruction du barrage d'Amaluza.

Au barrage, deux turbines ont été remises en marche trente heures après la crue, de manière prématurée cependant, dans la mesure où la concentration de sédiments en suspension était encore élevée. Notons aussi la bonne qualité de l'évacuateur de crue qui a supporté sans dommage un écoulement tout à fait exceptionnel.

Un volume de sédiments estimé à 1,2 millions de m³ (Jerves, 1995) a néanmoins pénétré dans le barrage d'Amaluza au cours de cette crue. Si l'on considère les sédiments encore mobilisables le long des 60 km de lit, on peut supposer que la vie utile de ce barrage a été notablement réduite.

En fin de compte, près de 175 millions de m³ ont été évacués, le niveau d'eau a diminué de 40 m, en laissant une retenue résiduelle de 20 millions de m³ (postérieurement, le niveau de cette retenue a été baissé artificiellement de 7 mètres supplémentaires). Il y a eu un nombre

de morts estimés entre 35 (Cruz, 1993), 72 (Chamot *et al.*, 1993) et même 150 (Zeas, 1994), tous provoqués directement par le glissement de terrain, sur lequel on dénombrait 22 petites maisons. Si la rupture s'était produite de nuit, il y aurait probablement eu d'autres victimes parmi les habitants de la vallée située en aval, qui n'auraient pas pu s'échapper. Cruz (1993) estime les dégâts directs à 150 millions de dollars US, 35 morts, 6 420 sinistrés, 40 km de route revêtue détruits, 1 800 ha de terres stérilisées, sans compter les atteintes à l'environnement et la réduction probable de la vie utile du barrage d'Amaluza.

6. COMPARAISON DES DIVERSES MÉTHODES DE PRÉVISION DE RUPTURE DE BARRAGES EN TERRE

6. 1. Généralités

La rupture des barrages naturels dépend de la taille et de la géométrie du glissement des matériaux qui le composent, du débit de la rivière et de la présence de contrôles rocheux. La majorité des glissements a une durée de vie très courte. Parmi les 63 cas étudiés par Schuster & Costa (1986), 22% ont été emportés en moins d'une journée et la moitié a lâché dans les 10 jours suivant le glissement.

La principale cause de rupture est le débordement (*overtopping*). Dans ces cas-là, la rupture est presque toujours très rapide et elle produit de fortes crues et inondations. Plus le débit de la rivière est important, la taille du barrage faible et le matériau fin, plus la rupture sera violente. Le début de la formation de la brèche de rupture se produit quand l'érosion régressive du talus, partant de l'aval, est remontée jusqu'à la partie amont du barrage.

Les barrages formés par des glissements sont en général plus massifs que ceux construits par l'homme. Ils sont d'autant plus stables que le rapport entre leur largeur à la base et leur hauteur est élevé (Schuster & Costa, 1986). Ils peuvent aussi devenir permanents lorsque le débit est trop faible pour éroder les matériaux du glissement ou quand il existe des contrôles géologiques. La caractéristique la plus importante qui empêche la rupture est la résistance à l'érosion des matériaux, par cuirassement.

6. 2. Étude bibliographique

Les recherches existantes, en majorité, envisagent le problème de façon mathématique en admettant l'hypothèse simplificatrice d'une rupture instantanée ou alors elles ne tiennent pas compte du processus d'érosion du barrage. Chen & Ambruster (1980), Hunt (1984), Schocklitsh (*US corps of eng.*, 1960) et plus récemment Gozali & Hunt (1993) ont fait d'importantes recherches expérimentales sur la rupture instantanée et graduelle de barrages. Cependant, dans toutes ces études, le flux produit par la rupture du barrage est simulé par une opération de vannes et non comme le résultat d'un processus d'érosion.

Macdonald & Langridge-Mompolis (1984), Hagen (1982), Schuster & Costa (1986) et Froelich (1987), se sont appuyés sur des cas historiques dans le monde et ont proposé des équations et des abaques empiriques pour estimer le débit de crue produit par la rupture d'un barrage. Ces méthodes, certes utiles, présentent les inconvénients suivants :

- 1) elles n'indiquent pas si le barrage rompra ou non ;
- 2) elles ne tiennent pas compte des caractéristiques des matériaux qui composent le barrage ;

3) hormis la hauteur, elles ne prennent pas en compte la taille du barrage ;

4) elles ne donnent pas d'informations sur le temps et l'hydrogramme de rupture.

Les modèles disponibles ou commercialisés de rupture de barrages, comme celui de BREACH et celui de DAMBRK développés par Fread (1984), sont fondés sur de fortes simplifications du processus d'érosion du barrage ; leurs résultats ne sont donc pas toujours très fiables.

Les modèles physiques de rupture de barrages ont été appliqués à des cas particuliers comme celui du barrage de Sarras (Escande, 1961), ou celui du glissement de Mayunmarca en 1974 au Pérou (Chang & Alva, 1991).

6. 3. Les prévisions effectuées au cours de la crise

Les études de rupture du barrage de la Josefina ont eu pour objectif de prévoir ses effets dans la vallée en aval et d'élaborer des scénarios permettant de gérer le projet hydroélectrique d'Amaluza. La prévision du débit de pointe est absolument vitale pour la sécurité de tout ce qui est en aval.

Plusieurs groupes de travail indépendants ont été constitués. Malgré la divergence des études et des résultats, tous sont tombés d'accord sur la sévérité des conséquences de la rupture du barrage. Un groupe a cependant soutenu que le barrage ne romprait pas, ou alors que la rupture se produirait sur une période comprise entre 3 et 15 jours (Penille & Jacome, 1993).

Les difficultés rencontrées pour effectuer des prévisions fiables soulignent l'intérêt de l'information rassemblée ci-dessous afin d'essayer d'améliorer la connaissance et les méthodes de prévision de ce type de rupture.

6. 3. 1. Les méthodes empiriques

En utilisant l'abaque proposé par Schuster & Costa (1986), qui permet de comparer le cas particulier de la Josefina à l'ensemble des catastrophes similaires connues, on trouve, pour un barrage de 83 mètres de hauteur et un volume de 200 millions de m³, un débit maximum de 10 000 m³/s, ce qui est proche de la réalité.

En revanche, la formule de Hagen (1982) donne un débit de pointe de 28 200 m³/s, donc nettement surestimé.

6. 3. 2. Modélisation numérique

Natale (1993) de l'Université de Pavie, en collaboration avec l'Université de Cuenca, a utilisé son modèle d'érosion fondé sur les équations de continuité de l'érosion et des sédiments. Il a retenu cinq hypothèses et a finalement considéré que la rupture en 72 heures constituerait le cas le plus critique. Durant cette période 177 millions de m³ devaient s'écouler. Selon cet auteur, le débit de pointe devait atteindre un peu moins de 2 000 m³/s, 22 heures après le début de l'écoulement.

James *et al.* (1993b), de l'*US Corps of Ing.*, en collaboration avec l'Université de Cuenca, ont testé le modèle de Natale à partir d'une couche de 25 m d'épaisseur (D50% = 10 cm, n = 10%), située sur une autre couche de granulométrie plus grossière (D50% = 70 cm, n = 50%).

La cote initiale était de 2 358 m et le débit de la rivière de 100 m³/s. Selon les auteurs, le débit maximum devait être de l'ordre de 2 700 m³/s, 26 heures après le début du passage de l'eau.

Avec le modèle de DAMBRK on est parti de l'hypothèse d'un temps de rupture de 15 heures, d'une brèche finale de 100 mètres, avec une pente latérale de 1:1. Le débit résultant, dans le cas le plus défavorable, a été de près de 5 500 m³/s. On a aussi utilisé ce modèle pour prévoir les niveaux maxima d'eau en aval le long de la rivière. Pour cela la rivière a été divisée en 34 biefs. Par mesure de sécurité, ont été adoptées, pour le plan d'évacuation des populations, les conditions les plus pessimistes, avec des niveaux de submersion compris entre 7,8 et 19,3 mètres (Aguilera & Romo, 1993).

Zevallos *et al.* (1993) de l'EPN, en collaboration avec l'INECEL, ont utilisé le modèle BREACH pour simuler la rupture du barrage. Ils ont adopté les conditions suivantes : érosion de la crête de 12 à 25 mètres, débit initial de la rivière 80 m³/s, largeur maximum de brèche de 50 m ; pente de la rivière 0,017 et coefficient de rugosité de Manning du canal de 0,05.

Pour la propagation de la crue dans le lit, ils ont utilisé le modèle DAMBRK avec sa version d'onde dynamique, qui utilise l'équation de mouvement la plus complète. Pour cela on a divisé la rivière en 30 biefs. Pour le laminage de la crue dans la retenue d'Amaluza on a utilisé le modèle HIDRO1 développé à l'EPN (*Escuela Politécnica Nacional de Quito*). Celui-ci utilise la méthode du Puls modifiée.

Les résultats de ces simulations ont été les suivants : débit maximum au barrage de la Josefina : de 7 100 à 16 500 m³/s ; débit maximum entrant dans le barrage d'Amaluza : de 5 500 à 12 000 m³/s ; débit maximum déversé au barrage d'Amaluza de 0 à 3 033 m³/s ; profondeurs maximums des zones inondées de 8 à 16 m ; temps de montée : de 6 à 8 heures et temps de transfert de la crue à la ville de Paute et à Amaluza respectivement de 1,5 et 3 heures. La figure 4 reproduit les hydrogrammes observés en plusieurs sites.

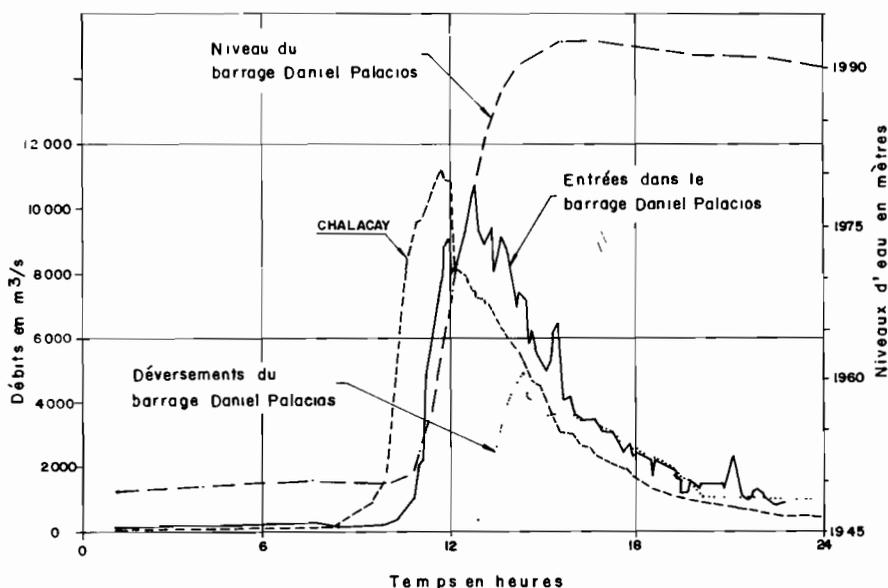


Fig. 4 - Hydrogramme de rupture en plusieurs sites.

6. 3. 3. *Modélisation physique*

Pour avoir une meilleure précision sur la rupture du barrage, on a construit un modèle sans distorsion à l'échelle de 1:200, avec la similitude de Froude. On a modélisé le diamètre des matériaux sans correction d'échelle linéaire et le poids spécifique a été le même. Ceci assure que le paramètre de mobilité de Shields est le même sur le modèle et le prototype et garantit la reproduction du phénomène d'érosion (Zevallos *et al.*, 1993).

Les matériaux constitutifs

La localisation, le type et les caractéristiques des matériaux, tant en surface qu'en profondeur ont été les paramètres les plus importants retenus pour la modélisation de la rupture, mais en même temps ils ont été la source de la plupart des incertitudes et des divergences. Les valeurs moyennes adoptées pour la modélisation sont les suivantes :

Poids spécifique du matériel : 2,76 T/m³

Granulométrie :

D50%= 100mm (0,1 mm - 2.000mm) ;

D90/D30=30

Porosité : 15 % (10-50%)

Angle de friction : 45°

Cohésion : 0,5 T/m²

Angularité : élevée

En raison de l'incertitude existante à propos des matériaux constituant le barrage, Zevallos (1993) a utilisé deux granulométries qui conduisent à deux hypothèses de rupture : l'une, optimiste, où le barrage se stabilise à la cote 2 345 grâce à la présence de gros blocs et, l'autre, pessimiste, qui simule un barrage homogène de matériau moyen.

	Hypothèse optimiste	Hypothèse pessimiste
Granulométrie (D50%) :	25 cm	10 cm
Cote initiale crête (m)	2 356,6	2 356,6
Débit maximum (m ³ /s)	7 900	16 000
Durée de la rupture (h)	8	6
Durée de la phase érosive avant la rupture (h)	37	36
Volume évacué (millions de m ³)	75	185
Cote d'équilibre (m)	2 345	2 314
Volume final (millions de m ³)	125	15

Les deux essais réalisées par Rivero & Marin (1993) sur un modèle d'échelle 1:150 avec D50% = 15 cm ont donné les résultats suivants :

	1er essai	2 ^{ème} essai
Cote initiale (m)	2 353	2 358,85
Volume emmagasiné (millions de m ³)	126	150
Débit maximum (m ³ /s)	8 000	6 500
Temps de montée (heures)	21	30
Cote d'équilibre (m)	2 330,85	2 329,85
Volume final (millions de m ³)	36	33

Les figures 5, 6 et 7 permettent de comparer le modèle réduit avec la réalité.



Fig. 5 - Simulation sur modèle réduit : phase initiale d'érosion régressive lente du canal.



Fig. 6 - L'érosion exponentielle réelle du barrage de la Josefina.

Insistons sur le fait que toutes ces estimations ont été réalisées avant la rupture, pour tenter d'estimer un débit maximum, encore inconnu mais d'importance vitale pour tout ce et ceux qui existent en aval. La divergence de ces prévisions atteste de leur complexité.



Fig. 7 - Simulation sur modèle réduit : phase d'érosion exponentielle du barrage.

6. 4. Comparaison des méthodes de prévision de rupture

a) L'abaque proposé par de Schuster & Costa (1986), d'utilisation très simple, a donné une bonne approximation du débit maximum de crue.

b) La combinaison de modèles réduits physiques et mathématiques est recommandée pour simuler la rupture de barrages et ses effets en aval. Leur utilisation est cependant délicate, car les résultats fournis par ces modèles sont très sensibles aux paramètres d'entrées que l'on ne connaît pas toujours. Il est en particulier absolument indispensable d'estimer correctement la granulométrie du barrage pour pouvoir simuler correctement sa rupture.

c) Le modèle DAMBRK a été précieux pour simuler la propagation de la crue. Il ne permet malheureusement pas de simuler la rupture du barrage, puisqu'il nécessite des données non connues (hauteur de la brèche, temps de rupture). De plus, ne prenant pas en compte le transport solide, il n'a pas pu reproduire correctement les niveaux de l'eau dans les premiers kilomètres en aval du barrage où le fond de la vallée s'est trouvé rehaussé de plusieurs mètres par les dépôts provenant de la rupture du barrage.

d) Le modèle BREACH s'est révélé inadapté car il demande lui aussi que l'on fixe la cote finale d'équilibre du barrage et la largeur finale de la brèche qui

sont justement des inconnues. D'autre part ce modèle présente de sérieuses insuffisances et une certaine instabilité par rapport à la variation de paramètres tels que l'inclinaison des talus et la largeur de la crête. Dans ce modèle, le diamètre moyen du matériau qui constitue le barrage n'a pas d'influence sur la rupture, ce qui ne correspond pas à la réalité.

e) Les difficultés rencontrées pour la réalisation de bonnes prévisions ont montré la nécessité d'améliorer les connaissances dans les domaines suivants :

- les caractéristiques spécifiques du site de la catastrophe : débit de la rivière, hauteur du barrage, volume emmagasiné, courbe hauteur-volume, dimensions du barrage, dimensions du canal d'écoulement, matériaux qui forment le barrage, etc.

- le processus d'érosion des barrages. Il faut étudier, en particulier, l'interaction du flux de l'eau et des sédiments en condition d'écoulement torrentiel non permanent, la taille de la brèche de rupture, la sédimentation dans le lit en aval, la hauteur de stabilisation du barrage et en conséquence l'hydrogramme de crue qui en résulte.

7. QUELQUES LEÇONS ET ASPECTS DE LA GESTION DE CETTE CRISE

7. 1. Nature et conscience du danger

Le glissement de terrain de La Josefina et ses conséquences ont montré l'importance qu'il faut attribuer à ce type de danger dans le cadre d'une planification locale et régionale, pour tenter d'épargner les vies humaines, les biens et les infrastructures. Cet événement a aussi mis en évidence la grande vulnérabilité de la région à des phénomènes naturels de tout ordre, parmi lesquels il faut citer les menaces morphologiques, géologiques et hydrométéorologiques, qui sont souvent aggravées par l'action de l'homme. Tous ces facteurs, associés à la localisation des habitants, déterminent finalement les risques que courent les populations.

Après la catastrophe, plusieurs voix se sont élevées pour dénoncer l'absence de planification et de prévention. Dans les communautés scientifiques, techniques et parmi les autorités, on s'est interrogé sur les causes de l'événement et sur les possibilités qu'il y avait de l'éviter ou du moins de le prévoir.

La zone de La Josefina était connue pour son instabilité. Les crevasses près de la ligne de crête et les incessantes déformations de la route qui passait dans sa partie inférieure, en sont la preuve. Ainsi, deux ans avant la catastrophe, une inspection du site relatée par la presse (journal "El Tiempo" du 19/03/91 à Cuenca) fut effectuée par des autorités locales accompagnées d'un ingénieur du Service Géologique National. L'article de presse signalait que le danger d'un glissement était imminent et que la situation nécessitait une intervention immédiate, car susceptible de provoquer des dommages imprévisibles dans la mesure où le fond de la vallée pouvait être obstrué à tout moment et retenir les eaux du rio Paute. Il était en même temps fait mention de crevasses ainsi que de la nécessité de suspendre l'exploitation de la carrière située au pied du futur glissement.

Cela montre bien que l'information préalable n'était pas absente. C'est avant tout la conscience réelle du danger qui a fait défaut aux institutions, chargées de prendre des décisions face à un énorme risque potentiel dont la probabilité d'occurrence, de l'aveu même des spécialistes, était difficile à évaluer.

7. 2. Réponse institutionnelle, structures mises en place

Il s'agit de bien distinguer les institutions chargées de gérer ce type de situation et ses conséquences : celles qui existaient avant le glissement de terrain ; celles qui ont été mises en place très rapidement afin de gérer un événement dont l'ampleur était totalement inhabituelle ; celles, enfin, qui ont été chargées, après la crise, de la réhabilitation des zones sinistrées ou de la prévention de désastres ultérieurs.

La prévention et la gestion de ce type de catastrophe est normalement du ressort de la "*Junta Provincial de Defensa Civil*", appuyée par les départements techniques de plusieurs autres institutions (Forces Armées, INECCEL, CREA, Services Géologiques des Ponts et Chaussées, etc).

Face à l'ampleur de l'événement, la gestion de la crise a été confiée dès le début à deux organismes spécialement créés : le "*Comité de gestión de crisis*" sous la responsabilité de l'Armée, et le "*Consejo de Programación de obras emergentes en la Cuenca del Paute y de sus afluentes*". Ces derniers ont demandé l'appui et coordonné l'action d'universités équatoriennes et de plusieurs organismes nationaux et internationaux. Sur le plan international, les experts de la Division des Affaires Humanitaires (DHA) des Nations Unies, du Corps Suisse d'Aide en cas de Catastrophe (ASC), de l'ORSTOM, ainsi que des experts chiliens, italiens, nord-américains et suisses sont intervenus en tant que conseillers techniques. L'aide aux populations civiles a pour sa part été assurée par la Croix Rouge, l'Église, l'USAID, l'Union Européenne et plusieurs ONG.

Après la crise, la réhabilitation des zones sinistrées a été confiée au même "*Consejo de Programación de obras emergentes en la Cuenca del Paute y de sus afluentes*" qui a souvent coordonné directement le financement et la construction d'ouvrages, et négocié et canalisé les aides de divers gouvernements ou institutions équatoriennes et étrangères. Un important projet de reconstruction, d'un montant de 14 millions d'ECU est en phase de négociation avec l'UE.

Dans le domaine de la prévention, il faut citer plus particulièrement le projet PRECUPA de coopération entre diverses institutions équatoriennes et l'organisation Suisse, ASC, déjà citée, qui était déjà intervenue comme conseiller au cours de la catastrophe. Le projet PRECUPA a pour objectif d'assurer la prévention et la réduction des risques d'origine géotechnique, géologique/sismique, et d'inondation sur l'ensemble du bassin du rio Paute, ainsi que le contrôle de la qualité des eaux du lac résiduel en amont du glissement. L'une des préoccupations du projet PRECUPA est l'utilisation des résultats de ses études par l'information des populations, la formation des techniciens et l'appui aux organismes équatoriens de protection civile.

8. CONCLUSIONS : LES ENSEIGNEMENTS DE CET ÉVÉNEMENT MAJEUR

Nous avons apporté quelques éléments d'information sur les aspects géotechniques du glissement de terrain et sur l'importance des dégâts causés par les inondations tant en aval qu'en amont du barrage de la Josefina. Nous avons abordé quelques aspects humains, sociaux et institutionnels de cette crise et de sa gestion, déjà largement traités par plusieurs auteurs (Cruz, 1993 ; Leone & Velásquez, ce numéro, etc). Nous essayerons, dans cette conclusion, de montrer ce que cette crise de la Josefina nous a appris. Les institutions

équatoriennes ou internationales seront-elles mieux préparées, à l'avenir, pour faire face à un événement similaire ? Avons-nous su profiter des nombreuses informations existantes sur ce désastre majeur pour faire progresser nos connaissances sur les mécanismes fondamentaux des phénomènes qui en sont à l'origine ? Quelles sont les recommandations que nous pourrions faire ? Citons enfin l'ouvrage fondamental "Sin plazo para la esperanza", tout récemment compilé par Zevallos *et al.* (1996) et qui réunit les points de vue les plus importants sur ce drame aux multiples facettes.

8. 1. La gestion en temps réel de la crise

La crise a été coordonnée par une cellule qui a dû répondre immédiatement aux questions des décideurs, parfois sans disposer de tous les éléments nécessaires. Cette cellule a fait ce qu'elle a pu. On a signalé, à posteriori ses erreurs et ses points faibles, comme les divergences dans la prévision de la montée du lac ou des débits maximums au moment de la rupture. Mais cette cellule a permis de creuser le canal, sans lequel le barrage d'Amaluza aurait été probablement détruit, et d'organiser les secours et les évacuations.

Comment faudrait-il organiser une future cellule de crise ? Comme cela a été le cas, il faut qu'elle soit capable de se mobiliser très vite, car la majeure partie des barrages sont emportés en quelques jours. Souvent, tout ce que l'on peut faire est délimiter les zones menacées et organiser les évacuations. Pour cela, il faut pouvoir disposer très rapidement d'une équipe rodée, disposant de moyens de transport et de reconnaissance (la contribution de l'armée est ici essentielle). Cette équipe doit être composée de spécialistes en *géologie/géotechnique* (équipés d'instruments de mesure des caractéristiques mécaniques des sols, munis d'outils de reconnaissance sismique ou de radars, etc), de *topographes/cartographes*, d'*hydrauliciens*, d'*hydrologues* et de *spécialistes de ruptures de digues* en terre. À ce sujet, il est nécessaire de maintenir en permanence une unité opérationnelle capable de réaliser en des temps très brefs des modèles réduits physiques et mathématiques permettant de simuler et donc de prévoir la violence de la rupture de la digue.

8. 2. La gestion post-crise et la réhabilitation

Il y a eu beaucoup d'intervenants : organismes gouvernementaux équatoriens ; organismes étrangers (dont l'aide est allée de dons ponctuels d'un gouvernement à la mise en oeuvre de projets globaux comme ceux de la CEE ou de PRECUPA) ; ONG diverses ; l'Église, etc. Il est hors de notre propos de débattre de cette question pourtant extrêmement importante pour la réorganisation d'une région touchée par une crise de cette ampleur, analysée par Léone et Velásquez (ce numéro).

8. 3. La prévention

Le premier problème est de savoir où va se produire un glissement dangereux. Le second, plus délicat, est de savoir quand.

Peut-on faire un inventaire des glissements les plus dangereux ? Éloigner les populations des zones trop risquées ? Prévoir des solutions alternatives pour les infrastructures vitales et parfois uniques comme les routes, les ponts, les oléoducs, les lignes électriques ? Est-ce que l'on aurait pu prévoir ce glissement de terrain (en Équateur, c'est le deuxième en 6 ans après celui del PISQUE près de Quito) ou bien est-on condamné à réagir seulement après coup ?

8. 4. L'utilisation de l'information acquise pour améliorer les connaissances fondamentales sur ce type de phénomène

Nous évoquerons seulement ici la question de la rupture de la digue qui, après le glissement de terrain, est apparue comme étant l'un des phénomènes les plus difficilement prévisibles.

8. 4. 1. *La divergence des prévisions*

Jusqu'à l'heure de la rupture, les prévisions des experts étaient extrêmement divergentes. Certains, comme les experts chiliens (Penille & Jacome, 1993) pensaient que ce barrage, de plus d'un kilomètre de long ne céderait pas. La majorité des experts se rangeait à l'avis de Natale (1993) qui prévoyait un débit maximum proche de 2 000 m³/s ; seuls Zevallos *et al.* (1993) et Rivero & Marin (1993) ont cerné la réalité en effectuant des prévisions comprises entre 6 000 et 16 000 m³/s. En prenant simultanément toutes les hypothèses les plus défavorables, ils ont même obtenu une estimation de 40 000 m³/s.

Ces divergences montrent bien que les connaissances sur l'évolution de ce genre de rupture sont insuffisantes. Tout dépend, en fait, de la vitesse de l'eau, de sa densité, mais aussi du pourcentage global de roches de grande taille, qui restent sur place et constituent une base. C'est le barrage résiduel qui a stoppé le processus érosif. Mais, en terme de prévision, le problème est de savoir quelle peut-être la vitesse du processus érosif et quand et à quelle hauteur peut avoir lieu la stabilisation du barrage résiduel.

Nous avons été témoins de la manière inexorable et rapide dont les blocs de plusieurs dizaines de tonnes ont été emportés l'un après l'autre, après que les eaux eurent déblayé le matériel plus fin et peu cohérent. Ce manque de cohésion du matériel qui les entoure est, à notre avis, l'une des clefs de la rapidité de la rupture, au même titre que la granulométrie des matériaux. Mais comment intégrer cela aux modèles ?

8. 4. 2. *Intérêt scientifique du suivi de cette catastrophe*

Les mesures, films et observations réalisés sur le site de la Josefina représentent une occasion exceptionnelle de faire progresser nos connaissances dans le domaine des ruptures de digues, dans celui des transports hydrauliques de gros blocs par de fortes vitesses, ou dans celui de l'ingénierie des pentes, puisque l'on connaît parfaitement les variations des niveaux d'eau qui ont provoqué les glissements de terrains. Nous avons ici une occasion unique de rassembler les éléments utiles pour une meilleure prévision et une gestion plus efficace du prochain désastre de cette nature qui peut survenir dans de nombreuses régions du globe, notamment dans les Alpes.

Références citées

- ACOSTA, T. & SALAZAR, J., 1993 - Hipótesis sobre el origen del deslizamiento La Josefina y geomorfología del área de influencia. in: *Memorias del Coloquio Científico el Deslizamiento de la Josefina*, 13p., 8 fig., 1 map., Quito: EPN.
- AGUILERA, E. & ROMO, M., 1993 - Deslizamiento "La Josefina": Planificación y Decisiones para el manejo de la crisis, 6p., 6 fig., 1 tab., Coloquio. EPN. Quito-Ecuador, 21-23 de julio.
- CADIER, E., ZEVALLOS, O. & VACCA, A., 1994 - Le glissement de terrain et les inondations catastrophiques de La Josefina en Équateur. in: *Actes des 23èmes journées de l'hydraulique de la SHF*, 1: 355-358 ; Nîmes.
- CANUTI, P., FRASONI, A. & NATALE, L., 1994 - La Josefina rockslide and rio Paute landslide dam, Ecuador 2) Failure of the rio Paute landslide dam. *Landslide News*, N°8: 6-7, Japon Landslide Society.
- CEPEDA, L., 1995 - Manejo de la central Hidroeléctrica Paute durante el desfogue de la Josefina. En fase de publicación.
- CHAMOT, P., STUDER, Y. & WIRZ, F., 1993 - *El deslizamiento La Josefina en el valle del río Paute, Cuenca, Ecuador*, 47p. + 77 p. annexe Bern: DHA/UN, ASC (Suiza).
- CHANG, L. & ALVA, J.E., 1991 - Deslizamientos y Aluviones en el Perú, CISMID: Universidad Nacional de Ingeniería.
- CHEN, C.L. & AMBRUSTER, J.T., 1980 - Dam-Break Wave Model: Formulation and Verification. *Journal of The Hydraulics Division, ASCE*, Vol. 106, N° HY5: 747-767.
- C.R.E.A., 1993 - Evaluación preliminar de los daños por el deslizamiento de la Josefina.
- CRUZ, M., 1993 - Evaluación de daños. Defensa Civil.
- ESCANDE, L., 1961 - The Influence of Certain Parameters on a Sudden Flood Wave Downstream from a Dam, *La Houille Blanche*, N° 5.
- FREAD, D.L., 1984 - DAMBRK: The NWS Dam-Break Flood Forecasting Model, National Weather Service, Office of Hydrology, Silver Spring, Md.
- FROELICH, D.C., 1987 - Embankment-Dam Breach Parameters. in: *Proceedings of 1987 National Conference on Hydraulic Engineering*: 570-575, ASCE, NY.
- GOZALI, S. & HUNT, B., 1993 - Dam-Break Solutions for a Partial Breach, *Journal of Hydraulic Research, IAHR*, Vol. 31, N° 2: 205-214.
- HAGEN, V.K., 1982 - Re-evaluation of Design Floods and Dam Safety. in: *14th ICOLD Congress*, Rio de Janeiro.
- HUNT, B., 1984 - Perturbation Solution for Dam-Break Floods. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 110, N° 8.
- INECEL, 1993 - Varias comunicaciones personales inéditas.
- JAMES, M., 1993 - Análisis de experiencias de roturas de presas para la preparación de un plan de emergencia. in: *coloquio científico "El deslizamiento de la Josefina"*, 11p., Quito.
- JAMES, M., GALARZA, L., CISNEROS, F., CORDERO, P., de BRIEVE, B., ABRIL, B. & MARTINEZ, F., 1993 - Informe de Resultados de los Modelos Matemáticos, 21 de Abril de 1993.
- JERVES, L., 1995 - Sedimentación del embalse Amaluza por efecto de la crecida de la Josefina. Comunicación personal.
- LÉONE, F., VELÁSQUEZ, E., 1996 - Analyse en retour de la catastrophe de la Josefina (Équateur, 1993): Contribution à la connaissance du concept de vulnérabilité appliqué aux mouvements de terrain. *Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines*, 25(3) :
- MACDONALD, T.C. & LANGRIDGE-MOMPOLIS, J., 1984 - Breaching Characteristics of Dam Failures, *Journal of Hydraulics, A.S.C.E* 110, N° 5, May: 567-586.
- NATALE, L., 1993 - Reporte técnico de la misión italiana sobre simulación de erosión en la presa sector La Josefina Río Paute. Abril 7.
- PENILLE, I. & JACOME, A., 1993 - Informe. Deslizamiento Josefina Ciudad de Cuenca-Ecuador, Abril.
- PLAZA, G. & ZEVALLOS, O., 1994 - La Josefina rockslide and rio Paute landslide dam, Ecuador 1) The La Josefina rockslide. *Landslide News*, N° 8, Japon Landslide Society.
- PLAZA, G. & EGUEZ, A., 1993 - Consideraciones geológico-geotécnicas sobre el deslizamiento de la Josefina. in: *Memorias del Coloquio Científico el Deslizamiento de la Josefina*. Quito: EPN.

- RIVERO, J. & MARIN, L., 1993 - Breve descripción del comportamiento del Modelo Hidráulico de la Presa La Josefina, Guayaquil, 16 de abril.
- SCHUSTER, R.L. & COSTA, J.E., 1986 - A Perspective on Landslide Dams, Landslide Dams: Processes, Risk, and Mitigation. *Geotechnical Special Publication No. 3*, ASCE: 1-20, qR.L. SCHUSTER Ed.
- SEVILLA, J.H., 1993 - El Deslizamiento "La Josefina". Consideraciones Geológicas.
- SEVILLA, J.H., 1994 - The Josefina landslide and its implications in the electrical service for the Republic of Ecuador. in: *Proceedings 7th international IAEG Congress: 1801-1810*, Rotterdam: Balkema.
- U.S.ARMYCORPSOFENGINEERS, 1960 - Floods Resulting From Suddenly Breached Dams: Conditions of Minimum Resistance. Hydraulic Model Investigation, Miscellaneous Paper No.2-374, Report No. 1, Waterway Experiment Station, Vicksburg, Missisipi.
- ZEAS, R., 1993 - El deslizamiento de la Josefina, tragedia nacional. in : *Coloquio científico: El deslizamiento de la Josefina*, Quito, Ecuador : EPN, 21-23 juillet.
- ZEAS, R., 1994 - *El deslizamiento de la Josefina, tragedia nacional*. U. de Cuenca: Instituto de investigaciones de ciencias técnicas.
- ZEVALLLOS, O., 1993 - El deslizamiento de La Josefina - Evaluación Hidráulica. Coloquio. EPN. Quito-Ecuador, 21-23 de julio.
- ZEVALLLOS, O., 1994 - Expériences de modélisation physique et mathématique pour la prévision de rupture de barrages. in : *Actes des 23èmes journées de l'hydraulique de la SHF*, 1: 261-267; Nimes.
- ZEVALLLOS, O., BASTIDAS, L. & VALDOSPINOS, N., 1993 - Estudio del Proceso de Rotura del Embalse La Josefina Río Paute, Quito-Ecuador: Escuela Politécnica Nacional, abril 20.
- ZEVALLLOS, O., FERNÁNDEZ, M.A., PLAZA, G.N. & KLINKICHT, S.S., 1996 - *Sin plazo para la esperanza. Reporte sobre el desastre de la Josefina, Ecuador 1993*, 348p., Quito : EPN-USAID-CSS.

AVANCE EN LA PREVENCIÓN DE DESASTRES NATURALES EN LA CUENCA DEL RÍO PAUTE, ECUADOR

Pedro Basabe, Eduardo Almeida**, Patricio Ramón***

*Rodrigo Zeas***, Lénin Alvarez****

Resumen

El enorme deslizamiento de La Josefina que represó el río Paute en marzo de 1993 y sus funestas consecuencias, pusieron de manifiesto la importancia que se debe asignar a los fenómenos naturales desastrosos y la falta de estudios de prevención. Basados en esta experiencia, el Cuerpo Suizo de Socorro junto con instituciones ecuatorianas, llevan a cabo un proyecto piloto y multidisciplinario, desde 1994 hasta 1997, a fin de estudiar y monitorear los diferentes fenómenos naturales que pudieran afectar la cuenca del río Paute en una extensión de 3.700 km². En ella se ubica Cuenca, la tercera ciudad del país, y sectores rurales con un total de 700.000 habitantes. Se presentan los resultados del primer año de actividades, en dos de sus seis campos de investigación. **Geológicamente** se ha logrado identificar las áreas de terrenos inestables elaborándose mapas geológicos, de fenómenos y de amenazas, a escala 1:25.000, que cubren 380 km². Los deslizamientos fueron clasificados en activos, latentes y relictos, alcanzando volúmenes entre 1x10⁹ y 1x10⁷ m³. Las inestabilidades están ligadas sobre todo a la presencia de rocas sedimentarias y metamórficas incompetentes y a depósitos coluviales o eluviones, agravándose los fenómenos en la época de lluvias. Dieciséis zonas de mayor actividad fueron detectadas; su estudio establece mapas de vectores de velocidad, a escala 1:10.000. Un caso particular es el deslizamiento de Paccha que alcanza movimientos de hasta 8.400 cm/año. Se han instalado redes de monitoreo geodésico a fin de investigar dichas zonas. En el campo de la **hidrometeorología** se está implementando la red unificada de medición, monitoreo y alerta a inundaciones. Paralelamente, investigaciones sobre inundaciones en la ciudad de Cuenca (400.000 hab) indican su alta vulnerabilidad, considerando recurrencias desde decenales a milenales para la modelización de la propagación de las inundaciones en los cuatro ríos que la atraviesan. Las zonas de riesgo fueron identificadas en mapas de inundaciones probables, indicándose recomendaciones y conclusiones. **Adicionalmente** el proyecto complementa la red y el monitoreo sísmológico del sur del Ecuador y el monitoreo limnológico de los lagos remanentes de La Josefina. Participa en el fortalecimiento de Defensa Civil y vela por la transferencia de tecnología con el apoyo de expertos y de cursos de formación profesional. Gracias al trabajo interinstitucional y la difusión continua de los resultados, éstos son desde ya tomados en cuenta en la planificación del territorio y de obras de infraestructura.

Palabras claves: *Fenómenos naturales, desastres naturales, prevención, geología, deslizamiento, derrumbe, hidrometeorología, crecida, inundación.*

* Proyecto PRECUPA/CSS, P.O. Box 01-01-1980. Cuenca-Ecuador, E-mail: pbasabe@precupa.org.ec

** INECEL, P.O. Box: 17-12-108, Quito-Ecuador.

*** Universidad de Cuenca IICT, P.O. Box: 01-05-1890. Cuenca-Ecuador, E-mail: unil@ecua.net.ec

PREMIERS RÉSULTATS SUR LA PRÉVENTION DES DÉSASTRES NATURELS DANS LE BASSIN DU RIO PAUTE, ÉQUATEUR

Résumé

L'énorme glissement de terrain de La Josefina, qui a barré la rivière Paute en mars 1993 et ses conséquences funestes, ont mis en évidence l'importance qui doit être prêtée aux catastrophes naturelles et au manque d'études de prévention. En se basant sur cette expérience, le Corps suisse de secours et diverses institutions équatoriennes ont lancé un projet pilote et pluridisciplinaire, pour la période 1994-1997. Celui-ci a pour but l'étude et le suivi des phénomènes naturels qui pourraient affecter le bassin de la rivière Paute sur une surface de 3.700 km². Dans cet espace vivent 700.000 personnes, entre la population rurale et celle de Cuenca, troisième ville du pays. Les résultats de la première année d'activités sont présentés, sur 2 de ses 6 champs d'action. Géologiquement, on a pu identifier les zones de terrains instables en élaborant des cartes géologiques, des phénomènes et de dangers à une échelle de 1:25.000 sur une surface de 380 km², les glissements de terrain ont été classés en actifs, potentiels et anciens avec des volumes entre 1x10⁵ y 1x10⁹ m³. Les instabilités sont surtout liés à la présence des roches sédimentaires et métamorphiques incompétentes ou des colluvions et éluvions peu compacts, ces phénomènes s'aggravent dans la saison des pluies. Seize zones les plus actives ont été délimitées et étudiées au 1:10.000 avec des cartes de vecteurs de vitesse. Le glissement de Paccha est un cas particulier avec des mouvements pouvant aller jusqu'à 8.400 cm/an. Des réseaux de mesure géodésique ont été installés afin de suivre et d'étudier l'activité des principaux glissements. Dans le domaine de l'**hydrométéorologie** un réseau unifié de mesure et d'alerte de crues et d'inondations sera implanté. Parallèlement des recherches sur des inondations dans la ville de Cuenca (400.000 hab.) montrent sa haute vulnérabilité, en considérant des récurrences décennales à millénaires pour la modélisation de la propagation et des inondations des quatre rivières qui la traversent. Les zones à risque ont été identifiées sur des cartes d'inondations et des recommandations ont été faites. De plus le projet complète le réseau de suivi sismologique au sud de l'Equateur et limnologique des lacs résiduels de La Josefina, et participe au renforcement de Défense Civile ainsi qu'à un transfert de technologie avec la présence des experts et des cours de formation professionnelle. Grâce au travail interinstitutionnel et à la diffusion continue des résultats, ceux-ci sont d'ores et déjà considérés dans la planification du territoire et les ouvrages d'infrastructure.

Mots clés : *Phénomènes naturels, désastres naturels, prévention, géologie, glissement, éboulement, hydrométéorologie, crue, inondation.*

ADVANCES IN THE PREVENTION OF NATURAL DISASTERS IN THE RIO PAUTE DRAINAGE, ECUADOR

Abstract

The enormous Josefina landslide that dammed the Paute river in March 1993 and its terrible consequences have clearly shown the importance of recognising natural disaster phenomena and the lack of prevention studies. Based on this experience, the Swiss Disaster Relief Unit together with Ecuadorian institutions began a multidisciplinary pilot project in 1994 to run until 1997 to study and monitor the different natural phenomena that could affect the Paute river basin whose area is 3.700 km². Here are located Cuenca, the third city of the country, and the rural regions for a total of 700.000 inhabitants. Some results of the first year of studies are herein presented for 2 of the 6 fields of research. The **geological** studies have identified the unstable terrains and mapped the geology, the phenomena and the hazards at 1:25.000 scale covering 380 km². The unstable zones were classified as active, latent or relict which embrace volumes between 1x10⁵ and 1x10⁹ m³. These instabilities are chiefly related to incompetent sedimentary and metamorphic rocks and coluvial deposits or eluvions. The phenomena are aggravated in the rainy seasons. Sixteen zones of major active landslides were identified, which were studied on a scale of 1:10.000 with speed vector maps. A special case is the Paccha landslide that attained movements up to 8.400 cm/year. A geodesic monitoring network has been installed to investigate more precisely these zones. In the area of **hydrometeorology** an automatic network is being implemented to monitor and give flood alerts. Also flood studies in the four rivers of the city of Cuenca (Pop. 400.000) shows its high vulnerability based upon flood propagation models for 10 yrs. and 1000 yrs. The regions of risk were identified in probable inundation maps, complemented with recommendations and conclusions. **In addition** the project strengthens the seismological network in Southern Ecuador and the limnological monitoring of the Josefina Lakes. Finally we are collaborating to improve Civil Defence and to transfer new technology with outside professional help and teaching. The interinstitutional collaboration and the continuous diffusion of the results have already promoted regional planning and infrastructure development.

Key words: *Natural phenomena, natural disasters, prevention, geology, landslide, collapse, hydrometeorology, flood.*

1. ANTECEDENTES

El territorio continental ecuatoriano se encuentra en una región geodinámica activa, responsable de la ocurrencia de desastres naturales que han impactado seriamente en la sociedad y economía ecuatoriana, desde épocas prehistóricas. En la última década, el Ecuador fue afectado por varios fenómenos naturales y por lo menos dos de ellos provocaron desastres: un terremoto de magnitud 6,9 ocurrido el 7 de marzo de 1987 en la región de El Reventador, vertiente oriental de los Andes septentrionales, que produjo cerca de 3.000 muertes, y el megadeslizamiento de "La Josefina", ocurrido en la margen izquierda del río Paute, en los Andes meridionales. En marzo de 1993, cerca de 25 millones de m³ de roca (Frassoni, 1994) se deslizaron en el sitio La Josefina, matando a 72 personas (Chamot *et al.*, 1993). La masa deslizada represó al río Paute, formando un lago de 190 millones de m³ (INECEL, 1993) e inundando un área de 1.000 ha (Zeas, 1993), con la destrucción de zonas habitadas, agrícolas e industriales, del principal eje vial y férreo de la región y graves daños en la central térmica regional.

A una distancia de 85 km aguas abajo de La Josefina se encuentra la presa Amaluza, cuya central hidroeléctrica abastece el 60% de la demanda energética del país. A fin de evitar una mayor inundación se abrió un canal de 18 m de profundidad, removiéndose 165.000 m³ (Zeas, 1993) en la masa deslizada, provocando el desagüe. El 1 de mayo de 1993, la rápida erosión regresiva conllevó una crecida con caudales máximos del orden de 11.000 m³/s (INECEL, 1993), produciéndose enormes inundaciones aguas abajo, con destrucción de la red vial y de las viviendas. Las márgenes de los ríos fueron afectadas hasta 120 km aguas abajo, según los reportes conocidos desde la ciudad de Méndez al inicio de la Amazonia. La presa de Amaluza no sufrió averías directas, gracias al manejo del embalse que amortiguó la crecida.

Estos desastres evidenciaron que la población y la infraestructura puesta a su servicio son altamente vulnerables al impacto de fenómenos naturales; además, se puso de manifiesto la imperiosa necesidad de realizar estudios sobre el origen de tales fenómenos y los peligros que implícitamente están asociados a ellos. La finalidad de estos estudios es obtener información a ser utilizada por los entes de planificación nacional y local en el diseño y construcción de obras, así como para mitigar el impacto de futuros fenómenos en la población, en sus bienes y en las obras de infraestructura.

2. MARCO Y ESTUDIOS DE PREVENCIÓN

Un año después del deslizamiento de La Josefina y de las gestiones pertinentes, el 30 de marzo de 1994, los gobiernos de Ecuador y Suiza suscribieron un convenio de cooperación técnica, científica y económica en el marco de la prevención de desastres naturales. El objetivo fundamental es apoyar al Ecuador de una manera concreta, fortaleciendo su capacidad en este campo, gracias a un proyecto piloto denominado Prevención-Ecuador-Cuenca-Paute (proyecto PRECUPA), el mismo que se basa en una fuerte cooperación entre instituciones ecuatorianas y el Cuerpo Suizo de Socorro en caso de catástrofe (CSS), ente que participa en América Latina desde los años setenta.

El proyecto tiene como área de acción la mayor unidad geográfica que se puede definir en la zona. Comprende así la cuenca hidrográfica del río Paute (Fig. 1), en su parte alta y media, abarcando una superficie de 3.635 km² desde 4.200 hasta 2.200 msnm. En su interior se encuentran las ciudades de Cuenca y Azogues, capitales provinciales, así como una importante población rural que representa un 50% de un total de 700.000 habitantes.

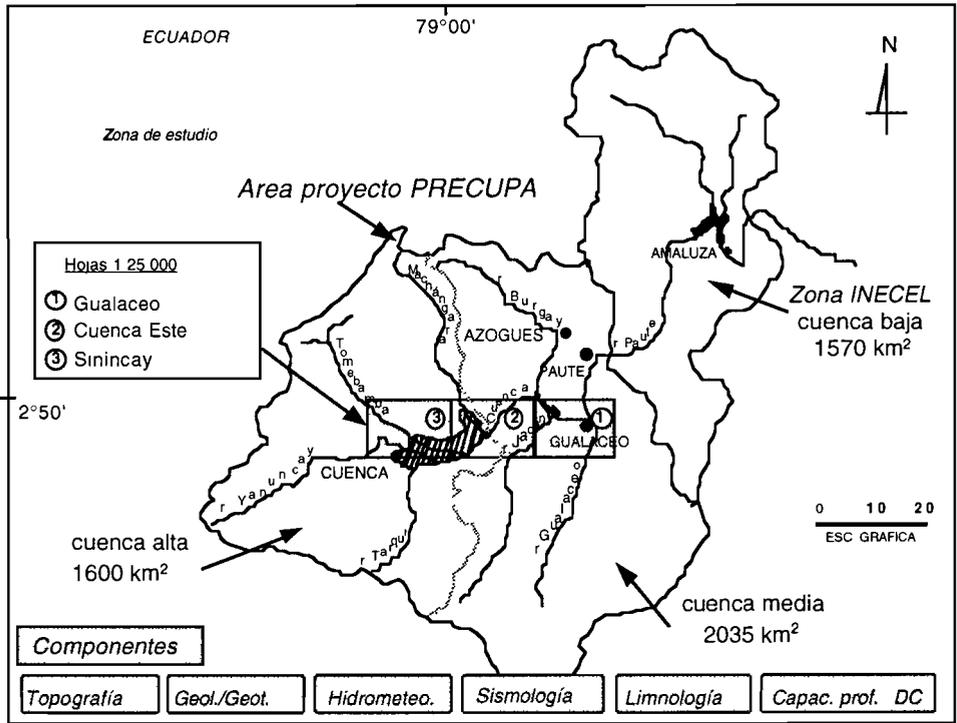


Fig. 1 - Zona de acción general del proyecto PRECUPA; áreas de estudio 1:25.000 y componentes técnico - científicos.

Las actividades se desarrollan en varios componentes: Topografía, Geología/Geotecnia, Hidrometeorología, Sismología, Limnología y Capacitación. En cuanto a la Topografía, sus actividades están dirigidas a brindar el apoyo a las otras disciplinas; por ejemplo, al momento se encuentra instalada una red geodésica, compuesta por 11 vértices de primer orden, 46 de segundo orden y 62 puntos de monitoreo, así como varios puntos de control de desplazamientos en fisuras, lo cual servirá para vigilar los movimientos del terreno en 23 zonas de inestabilidad. Complementan el trabajo varias acciones tendientes a mejorar la disponibilidad de material cartográfico en esta región (fotos aéreas, imágenes de satélite y mapas digitalizados).

Las amenazas de origen geológico son trascendentales en la región; en este campo se llevan tareas a fin de detectar los terrenos inestables, sus tipos, causas y peligrosidad. Un estudio regional fue así desarrollado en las zonas de mayor susceptibilidad, ubicadas en tres hojas 1:25.000 con una superficie total de 380 km² (Fig. 1). La cartografía geológica actualizada y mapas de localización de fenómenos de inestabilidad fueron desarrollados para cada hoja. Adicionalmente, para el cañón del Paute, alrededor de La Josefina (la hoja 1, Gualaceo) se efectuó un mapa de zonificación de unidades geotécnicas, y el mapa de peligrosidad a terrenos inestables. Una vez definidas las zonas de mayor actividad y riesgo, éstas son estudiadas en detalle a escala 1:10.000. Ejemplos del estudio regional y local son presentados (cf. punto 3 de este texto).

Debido a su posición en la región de montaña, con alta pluviosidad y valles poblados, las amenazas hidrometeorológicas son importantes y latentes. Así, se desarrolla para la cuenca del río Paute una red unificada e interinstitucional de medida, monitoreo y alerta a crecidas e inundaciones, que servirá además para el manejo hídrico de la toda la cuenca y el enlace a la red nacional. Al presente, se ha finalizado el inventario y el diseño de la red con un sistema óptimo de transmisión a tiempo real. Series hidrometeorológicas existentes han sido utilizadas por la Universidad de Cuenca para establecer las principales zonas de inundación de la ciudad; se presenta una síntesis (*cf.* punto 4 de este texto).

La región austral ha carecido de monitoreo sismológico adecuado. La red sismológica de base de la Universidad de Cuenca está actualmente operacional y próximamente estará más completa, con cinco estaciones fijas y dos móviles. Un grupo profesional local ha sido capacitado y ejecuta el mantenimiento, transmisión y detección de la sismicidad de la región. La cartografía de peligrosidad sísmica con precisiones sobre la actividad neotectónica son los objetivos finales trazados.

Luego del desagüe de La Josefina por la ruptura de su presa, quedaron lagos remanentes. Uno estanca parcialmente las aguas del río Paute en su cuenca media, donde afluyen las aguas servidas de las ciudades de Cuenca, Azogues y de la zona rural más densamente poblada. El monitoreo limnológico del lago y de los ríos ha sido incrementado con la Municipalidad de Cuenca y con el equipo de muestreo de agua y sedimentos apropiado. Los análisis mostraron la alta contaminación en nitrógeno, fósforo, bacterias, aceites y grasas (Neira, 1995), estudiándose las alternativas de saneamiento. Dicha Municipalidad construye lagunas de depuración de aguas servidas y contribuye al mejoramiento medioambiental de la región.

En cada componente participan expertos internacionales de Suiza, transfiriendo nuevas tecnologías a la contraparte local. Esto ha permitido la capacitación local y el desarrollo de metodologías adaptadas a la región y al país. Se facilita además cursos de formación profesional. Finalmente, el fortalecimiento de Defensa Civil con su nuevo sistema de comunicación y organización conllevará a una mejor prestancia para la preparación y atención en caso de desastres.

La aplicación de los resultados es constante, gracias a la participación de profesionales nacionales y la acogida de las autoridades e instituciones, para considerar la variable "desastre natural" en los diferentes campos de la planificación del territorio y de su infraestructura.

3. PRIMEROS RESULTADOS DE LOS ESTUDIOS GEOLÓGICOS

La primera etapa de los estudios geológicos fue realizada en una área de 380 km² distribuidos en tres hojas a escala 1:25.000 (Fig. 1). Un inventario de los terrenos afectados por fenómenos de inestabilidad fue necesario, identificándose en cada caso el tipo de fenómeno responsable, así como los factores condicionantes y desencadenantes. Para los casos de mayor actividad y riesgo de la población, son elaborados estudios más detallados a escala 1:10.000.

El río Paute tiene su origen en las cumbres occidentales de la cordillera de los Andes, para luego recorrer llanuras sedimentarias y cortar bruscamente la cordillera oriental en su camino hacia la Amazonia. Las rocas sedimentarias rellenan una cuenca alargada, en

principio intramontana de 100 x 30 km, denominada la cuenca de Cuenca, con orientación paralela al rumbo general de la cordillera andina (N20°E a N40°E). Esta cuenca está constituida principalmente por sedimentos continentales fluviales y lacustres, con un fuerte aporte volcánico, depositados desde el Mioceno inferior hasta el Plioceno (Noblet *et al.*, 1988; Hungerbühler *et al.*, 1995); al occidente, los sedimentos de la cuenca descansan en discordancia sobre rocas volcánicas de edad cretácica; y al oriente reposan, también discordantemente, sobre rocas metamórficas paleozoicas.

3. 1. Fenómenos de inestabilidad del terreno

Los problemas de inestabilidad del terreno detectados, son ocasionados por los siguientes tipos de fenómenos: deslizamientos, derrumbes, caída de bloques, flujos de lodo y escombros, reptación y erosión laminar. Se identificaron 57 deslizamientos definidos como activos, latentes y relictos, en las tres hojas indicadas en la Fig. 1 (Almeida *et al.*, 1996). Los estudios se basaron en recomendaciones suizas sobre la cartografía de inestabilidades (Kienholz & Krummenacher, 1985; EPFL, 1985). La Fig. 2 presenta un esquema del mapa de fenómenos a escala 1:25.000 en la zona de La Josefina y el cañón del Paute, entre El Descanso y Gualaceo. Se puede apreciar como otras zonas de inestabilidad importantes existen en este sector.

Una evaluación de las zonas inestables localizadas en las tres hojas de estudio (Fig. 1) se expone en las Fig. 3, 4 y 5. La primera de éstas versa sobre el volumen aproximado de cada deslizamiento por hoja 1:25.000, resaltando la alta concentración existente en la parte oriental y central.

La distribución de los deslizamientos refleja en buena medida las condiciones geológicas basadas principalmente en el comportamiento geomecánico de los macizos rocosos, su exposición, litología, estructura e hidrogeología. En efecto, hacia los relieves occidentales la cantidad de deslizamientos es relativamente pequeña; aproximadamente el 1% de su superficie está afectada por estos fenómenos. Las partes altas de la cordillera, constituidas de gruesos paquetes lávicos, pese a ser bisectados por profundos valles glaciares, no presentan indicios de inestabilidad debido a las buenas condiciones de la roca. Los deslizamientos volumétricamente (Fig. 3) más grandes se presentan en depósitos de materiales piroclásticos alterados, que se localizan en pendientes fuertes.

En la parte central del área, dominada por la serie sedimentaria de la cuenca de Cuenca, los problemas de inestabilidad del terreno debidos a deslizamientos son relativamente abundantes; aproximadamente el 20% de la superficie de esta zona es afectada por estos fenómenos, y la mayoría tiene un volumen que supera el millón de metros cúbicos (Fig. 3). De los 23 deslizamientos identificados, un porcentaje relativamente elevado son activos, destacándose entre todos el megadeslizamiento Paccha localizado en la periferia de la ciudad de Cuenca (*cf.* punto 3.1 de este texto).

La razón para que esta área central, la más densamente poblada del austroecuadoriano, sea muy afectada por deslizamientos, es de carácter geológico. En la cuenca sedimentaria son comunes las lutitas y limolitas lacustres incompetentes, alternadas con areniscas tobáceas, aunque más competentes pueden presentarse meteorizadas y fracturadas. Esta situación es agravada con la presencia de agua que satura y altera las capas finogranulares. Las areniscas por su lado presentan disgregación y desplazamientos en bloques.

78° 52.5' W

78° 54' W

2° 50' S

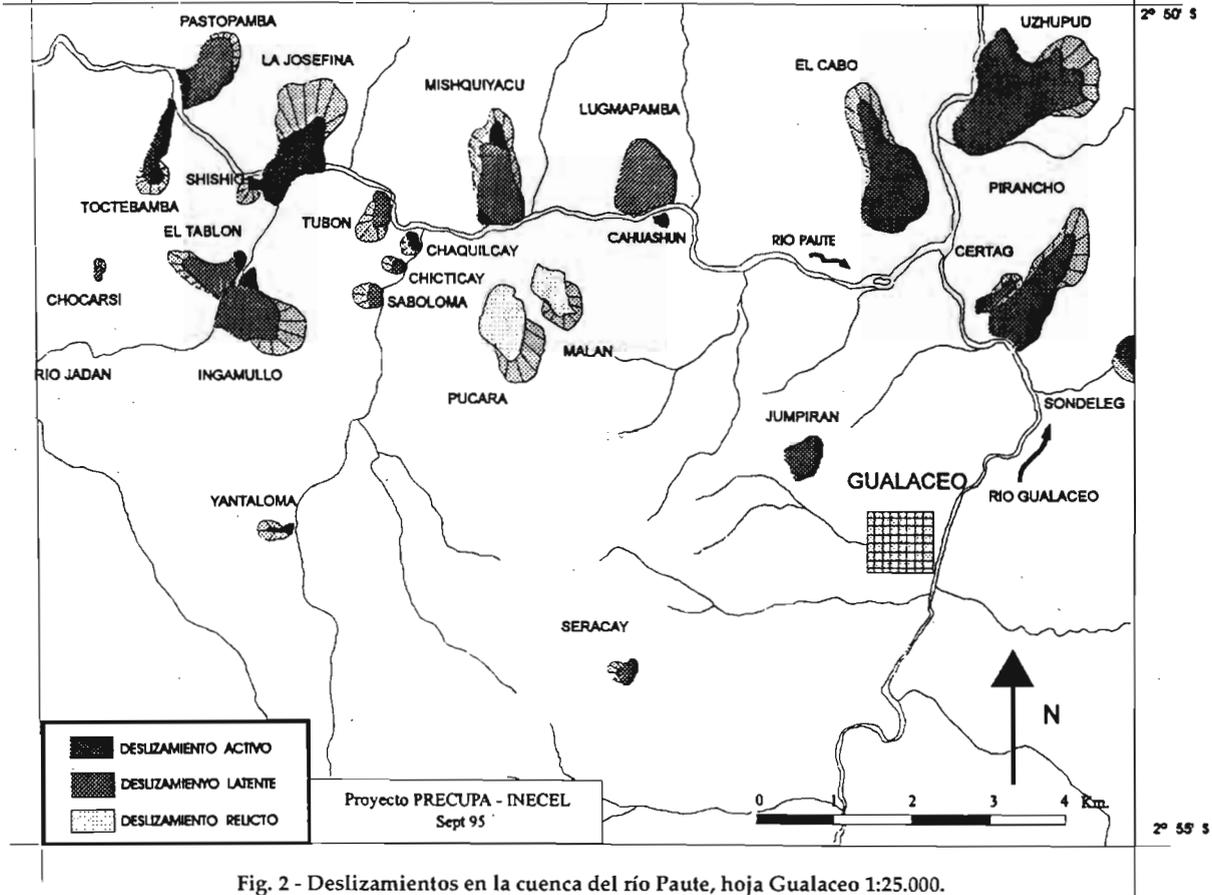


Fig. 2 - Deslizamientos en la cuenca del río Paute, hoja Gualaceo 1:25.000.

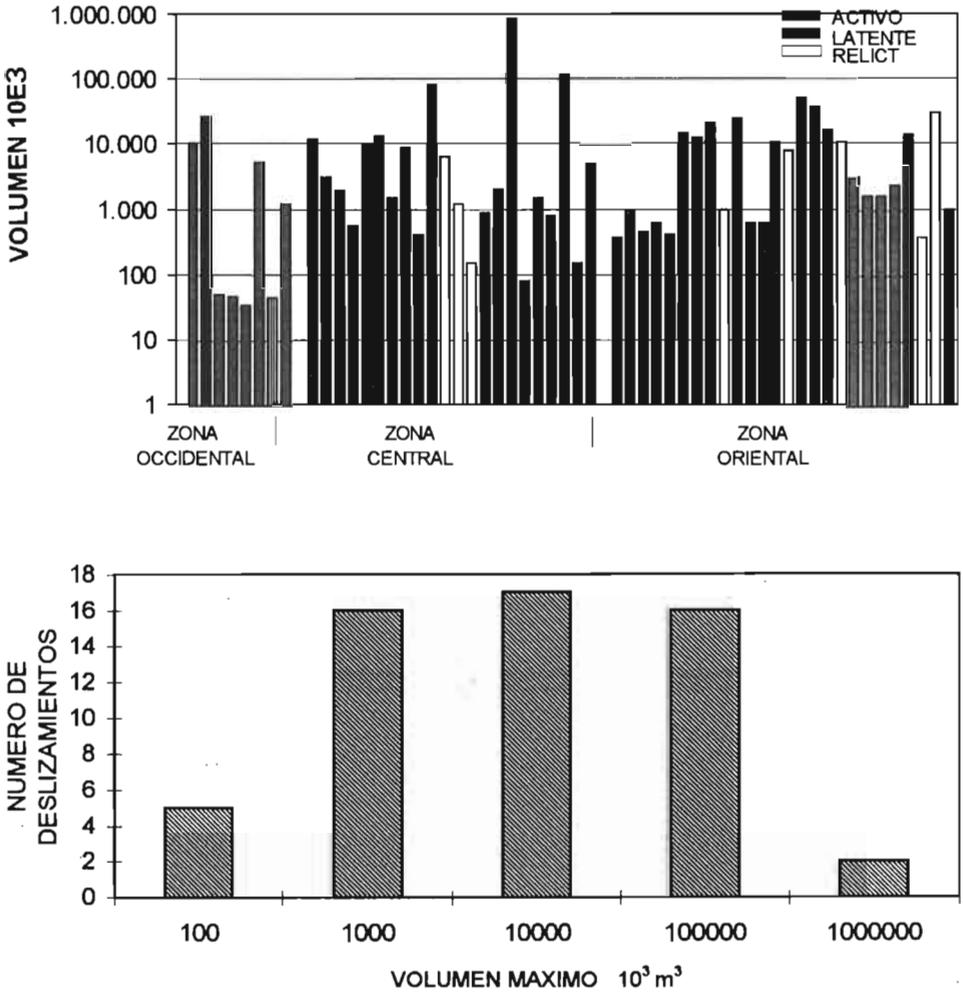


Fig. 4 - Frecuencia de distribución de deslizamientos en función del volumen

En la parte oriental del área (Fig. 3), donde se encuentra el núcleo cristalino de la cordillera de los Andes, los problemas debidos a deslizamientos también son frecuentes (26 deslizamientos identificados). Pese a que representan sólo el 7% de la superficie de esta zona, ellos se concentran en el cañón del Paute, donde destaca el deslizamiento de La Josefina (Fig. 2). En esta zona los problemas son originados básicamente por las condiciones de los macizos rocosos y la abrupta morfología. En este sector el río Paute forma un valle estrecho y profundo, conformado por rocas metavolcánicas e intrusivas, que en ciertos sectores tienen un elevado grado de fracturación; tal es el caso del intrusivo donde está La Josefina y de rocas altamente foliadas y fracturadas (filitas y esquistos) del basamento metamórfico.

Agrupando los deslizamientos de las tres zonas estudiadas se puede apreciar su número y sus volúmenes que con frecuencia sobrepasan el millón de metros cúbicos (Fig. 4). Esto indica el peligro que pueden representar los terrenos inestables en la región y llama la atención que se les debe brindar a fin de evitar en lo posible sus efectos.

La Fig. 5 presenta la relación existente entre la litología de base (*bedrock*) y la actividad de los deslizamientos, evidenciando que ellos se producen principalmente en dos litotipos: en rocas sedimentarias y en metamórficas. Los problemas son ocasionados por la presencia de rocas incompetentes, que aparte de su litología, se deben a su estructura, fracturación, exposición y meteorización.

En el caso de las rocas sedimentarias de la cuenca de Cuenca, los inconvenientes son derivados en su gran mayoría por la presencia de estratos de lutitas y limolitas, a menudo meteorizados o alterados a arcillas expansivas, a lo largo de los cuales se producen movimientos debido a su baja resistencia mecánica en presencia de agua. Dichos estratos se intercalan con areniscas o conglomerados competentes pero afectados por discontinuidades de diversa índole, lo que permite que las capas expuestas en escarpes o fuertes pendientes tiendan a descomprimirse produciendo grandes grietas, dislocaciones o desprendimientos de bloques.

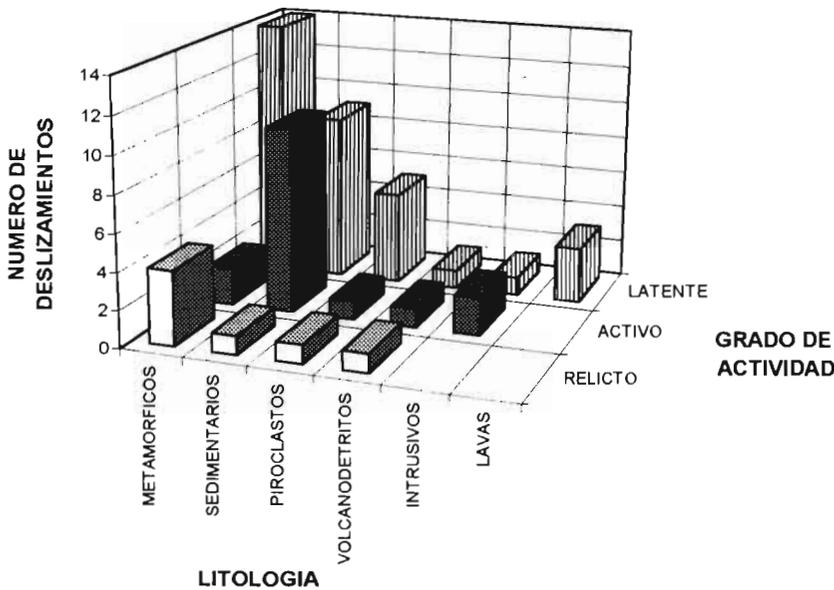


Fig. 5 - Actividad de los deslizamientos en función de la litología.

En cuanto a las rocas metamórficas, las que generan problemas de inestabilidad son principalmente las filitas y en menor grado los esquistos, a causa de su fracturación y existencia de planos de foliación muy desarrollados. Esta relación es particularmente importante para definir, en función de la litología, las áreas más o menos susceptibles a inestabilidades.

El estudio incluyó también la identificación de áreas afectadas por otros tipos de fenómenos como: derrumbes, caída de bloques, erosión fluvial, erosión laminar y reptación. Los dos últimos son muy frecuentes, ocasionando la degradación del ecosistema y la pérdida de la capacidad productiva de los suelos. Un factor desencadenante para su ocurrencia es, lamentablemente, la actividad antrópica. Especial importancia se brindó a la identificación de depósitos coluviales poco compactos y eluviones que puedan causar inestabilidades.

El proyecto complementa este componente con un estudio geotécnico con el objeto de caracterizar las unidades geológicas en función de su competencia, exposición, fracturación y condiciones geomecánicas. Finalmente se seleccionarán sitios tipo en las zonas de mayor inestabilidad donde se efectuarán ensayos y estudios de estabilidad, definiendo obras correctivas.

3. 2. Un caso particular: el deslizamiento de Paccha

Al NE de la ciudad de Cuenca, en la zona central, hoja N°2 (Fig. 1, 3) se localiza una de las áreas de inestabilidades activas, motivo de las investigaciones 1/10.000 (Fig. 6). Los límites morfológicos definen una cuenca aledaña al río Paute, casi confinada, que engendra el megadeslizamiento de Paccha en una zona rural propensa a la densificación poblacional y urbanización

Su origen geológico se debe a un anticlinal erodado en una alternancia de rocas sedimentarias competentes e incompetentes. Los flancos SE y NO resultantes exponen capas de areniscas mientras en las zonas bajas prevalecen lutitas y limolitas tectonizadas y parcialmente alteradas, pertenecientes al núcleo del anticlinal. Los movimientos empiezan en los escarpes a lo largo de los 6 km que conforman el flanco SE con fracturación y volcamiento de bloques de areniscas, para luego continuar en las zonas bajas con la presencia de los clastos finogranulares que suelen alterarse a arcillas higroscópicas que al mantener el agua, contribuyen a procesos de expansión y posterior desaturación.

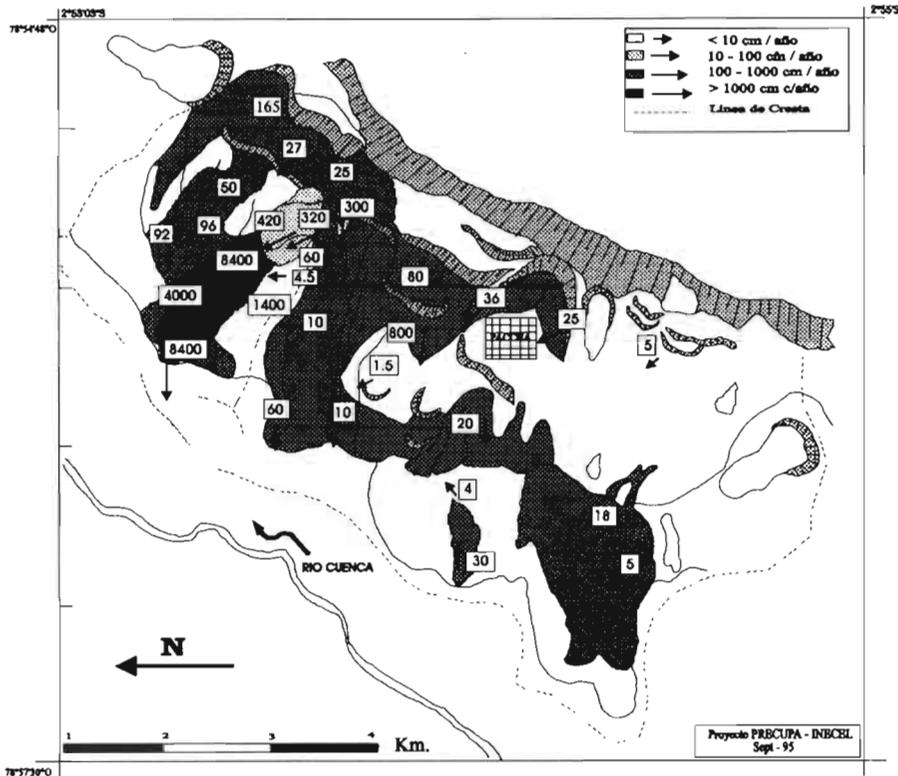


Fig. 6 - Velocidades de desplazamiento en el deslizamiento

El resultado es que una serie de terrenos inestables con movimientos diferenciales se extienden en un área de 1.700 ha alcanzando velocidades relativas de hasta 8.400 cm/año (Fig. 6) y un volumen total estimado en 850 millones de metros cúbicos. Estos desplazamientos casi no han causado víctimas pero sí importantes daños, volviendo casi inservibles las áreas más activas. Las autoridades han sido advertidas, llevándose a cabo estudios socioeconómicos y adaptaciones en el contexto de la planificación y desarrollo territorial.

4. HIDROMETEOROLOGÍA

La conformación de una red hidrometeorológica unificada es necesaria para el monitoreo y prevención de crecidas e inundaciones en toda la cuenca del río Paute. En ella participan varias instituciones ecuatorianas.

Basado en estudios probabilísticos de distribución de precipitaciones se determinó la necesidad de implementar pluviógrafos automáticos en las cabeceras de la cuenca alta con el fin de asegurar el registro de las fuertes precipitaciones en altura. En la cuenca media se requiere de pluviógrafos y limnógrafos automáticos para la alerta de las zonas pobladas inmediatamente aguas abajo. Finalmente en la cuenca baja es menester la instalación de limnógrafos automáticos que servirán para el control y elaboración de modelos matemáticos. Una transmisión básica telemétrica VHF y UHF permitirá la obtención de datos a tiempo real, pudiendo ser mantenida y operada por las instituciones participantes locales. Adicionalmente la transmisión satelitaria será desarrollada.

Con la información disponible ya se han desarrollado estudios hidrometeorológicos por parte de la Universidad de Cuenca a través de su Instituto de Investigaciones de Ciencias Técnicas (IICT) y la Municipalidad de Cuenca, estudio denominado "Protección de márgenes y control de inundaciones de los ríos que atraviesan la ciudad de Cuenca". Estos trabajos de investigación serán completados con mayores datos de la nueva red y ampliados para las cuencas alta y media del río Paute en el marco del proyecto PRECUPA. A continuación se presentan los resultados del mencionado trabajo.

4.1. Vulnerabilidad

La ciudad de Cuenca está atravesada por los ríos Tarqui, Yanuncay, Tomebamba, Machángara y una quebrada importante de nombre Milchichig. Esta ubicación muy importante y feliz desde el punto de vista paisajístico, en la que resalta la singular belleza de las orillas y avenidas que bordean a los ríos, entraña sin embargo un grave peligro para la ciudad, convirtiéndola en una zona de alto grado de vulnerabilidad producto de los desbordamientos causados por inundaciones en períodos de crecientes (INAMHI, 1993).

Según investigación de los periódicos de Cuenca durante este siglo (Mercurio & El Tiempo, de 1920 a 1994), se obtuvo los siguientes datos. Las crecientes más importantes datan de 1936, cuando dos eventos, el 20 de marzo y el 4 de abril, como producto de fuertes precipitaciones en la zona alta del Cajas, se produjeron pérdidas de vidas humanas, destrucción de puentes, muros y suspensión del servicio de agua potable de la ciudad. En 1950 crecen extraordinariamente los ríos Tomebamba, Yanuncay y Machángara, ocasionando graves daños incluso pérdidas de vidas humanas.

Hacia la segunda mitad del siglo, en el año de 1988, el río Tomebamba nuevamente provocó alarma en la ciudad produciendo destrozos como la obstrucción de la captación para el agua potable de la ciudad. En 1989, el 19 de junio se produce la crecida del río Yanuncay, la misma que ocasiona cuantiosos daños en la zona sur. En 1994, en abril y en mayo los ríos de la ciudad presentan un aumento extraordinario de caudal produciendo inundaciones y pérdidas significativas en varios sectores aledaños a sus riveras. En agosto del mismo año se desborda el río Machángara causando destrozos en algunas parroquias rurales y parte de la ciudad.

4. 2. Estudios y resultados obtenidos

El estudio incluyó un levantamiento planimétrico de 32 km y nivelación del eje longitudinal de los 4 ríos de la ciudad, así como el levantamiento de 169 perfiles transversales en los lechos y orillas de los ríos que completan la información cartográfica 1:10.000.

El modelo de tránsito de avenidas requiere del caudal máximo de cada río. Lo ideal sería utilizar toda la información registrada de niveles y de aforos disponibles en cada río. A falta de ésta se generó los caudales máximos utilizando modelos matemáticos de relación precipitación-escorrentía. Se determinaron así los parámetros: tiempo de ascensión, tiempo base, coeficiente de escorrentía, caudales-pico, medios, y los hidrogramas para varios periodos de retorno por río (Fig.7).

Los valores de coeficientes de rugosidad son también requeridos por el modelo de tránsito de avenidas realizándose una investigación y análisis sobre los métodos de determinación existentes.

Con este fin se analizaron métodos empíricos, fotográfico, de resistencia para lechos de río con grandes rugosidades (Bathurst, 1985), el método de Liashenko, el de las medidas de velocidad, así como el de medidas de rugosidad y el del servicio de conservación de suelos.

De todos ellos se eligieron para el cálculo de rugosidades los siguientes:

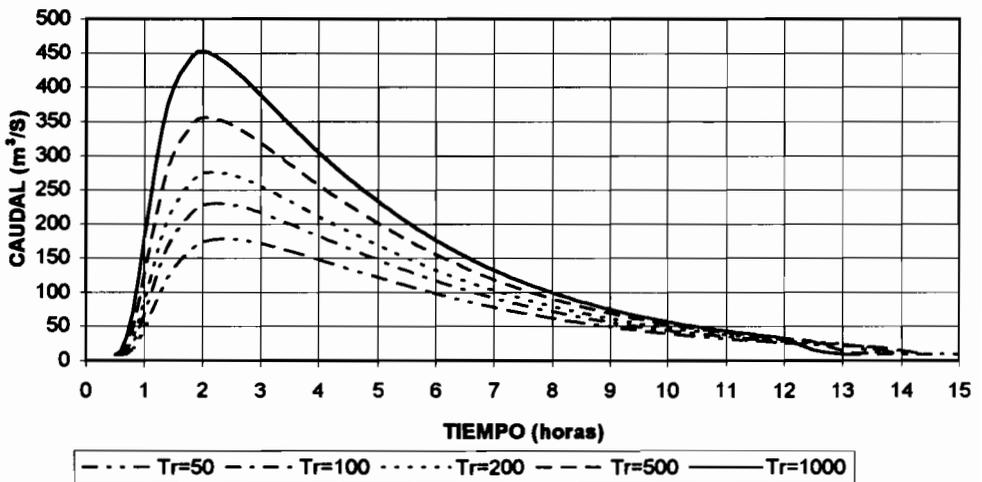


Fig. 7 - Hidrogramas para el río Tomebamba con periodos de retorno de 50, 100, 200, 500 y 1.000 años.

- Método de las medidas de rugosidad: tiene la misma función que la ecuación de Limerinos. Los valores obtenidos se pueden considerar como coeficientes base del lecho del río, ya que en relación a los otros métodos da coeficientes de rugosidad bajos; esto se debe a que el método no considera características adicionales del lecho.

- Método de las medidas de velocidad: los valores son obtenidos a partir de los datos de aforos realizados con molinete y la exactitud está en función directa de la precisión del mismo, proporciona rugosidades a diferentes niveles, según las alturas tomadas para el aforo.

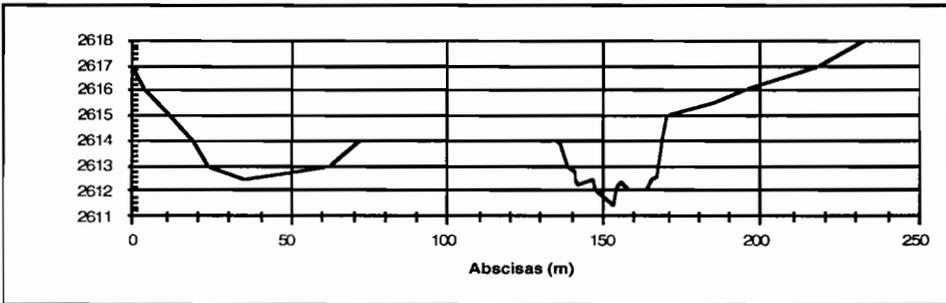
- Método del servicio de conservación de suelos: puede ser adoptado para el uso en pronóstico de niveles y velocidades durante eventos futuros de flujo; la altura de flujo, los cambios de forma del canal, las irregularidades, curvatura, meandros, obstrucciones y vegetación son considerados y deben ser ajustados acordemente. Habiéndose obtenido magníficos resultados para distintos eventos.

Este método que conjuga los resultados de los dos anteriores fue utilizado en el cálculo y la modelización de todas las secciones estudiadas (Fig. 8).

Hace algunos años se empleaba como única alternativa la modelización física para sistemas de ríos. En la actualidad se tienen ya sofisticados modelos computacionales, basados en resolución de ecuaciones matemáticas, como son los modelos de onda dinámica.

Para realizar la modelización fue necesario evaluar los siguientes paquetes : MicroFSR; HYRRM; HYFAP; RBM-DOGGS ; SALMON-F (Wallinford, U.K.); DAMBREAK (U.S. Army); HIDRO1 (E.P.N - Ecuador).

RIO TOMEBAMBA
 Sección To. 0+0500
 Dambreak 0000



Cota (msnm)	Ancho (m)	Reserva (m)	Rugosidad
2611,45	1,0	0,0	0,043
2612,05	15,5	0,0	0,043
2612,25	22,0	0,0	0,043
2612,50	24,0	0,0	0,043
2613,90	32,0	0,0	0,043
2614,00	96,5	0,0	0,043
2615,00	97,5	0,0	0,072
2616,00	123,0	0,0	0,075

Fig. 8 - Sección tipo para el cálculo de la rugosidad.

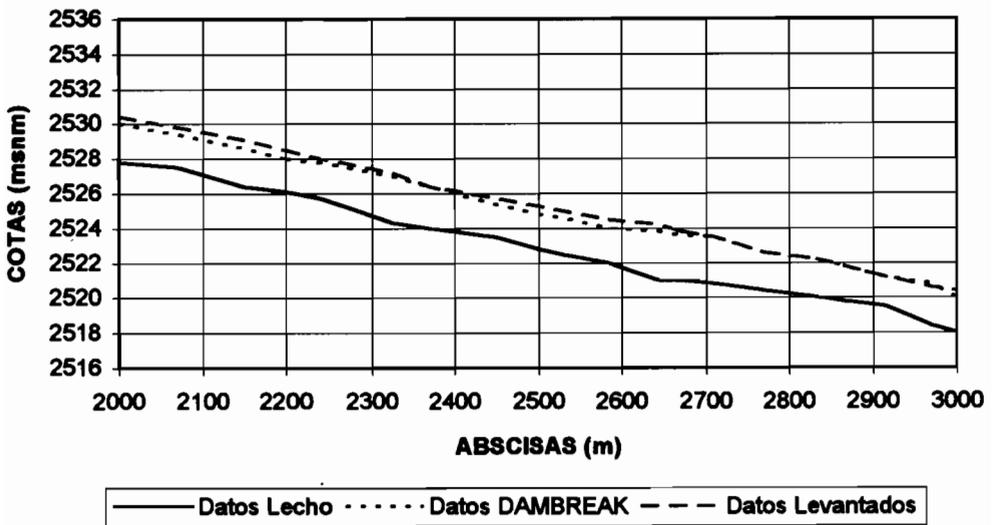


Fig. 9 - Calibración y ajuste de un tramo del río Tarqui, comparando los resultados del modelo DAMBREAK con datos reales levantados topográficamente.

Luego del análisis de los diferentes paquetes se adoptó el modelo DAMBREAK (Fred, 1988) en base a la experiencia adquirida durante el desastre de La Josefina, obteniéndose resultados satisfactorios. En el presente estudio el modelo fue utilizado para transitar hidrogramas catastróficos por el cauce de los ríos y obtener las cotas de inundación.

La calibración y ajuste de las corridas obtenidas con el modelo, se realizó comparando sus resultados con información real de caudales picos y niveles de inundación obtenidos en base a levantamientos topográficos. Algunos sitios en los cuatro ríos estudiados presentaron conflictos, los mismos que fueron superados gracias a afinamientos en las rugosidades y la mejor determinación de las características morfológicas de las secciones en cuestión (Fig. 9).

En las simulaciones de inundaciones probables se usó períodos de recurrencia que se consideran normales, extraordinarios, destructivos, catastróficos y devastadores, como son 50, 100, 200, 500 y 1000 años respectivamente, considerando todas las posibilidades de crecida en los cuatro ríos a fin de determinar las zonas de riesgo por inundación en cada uno.

4. 3. Zonas de riesgo

En el río Tomebamba, el principal por atravesar el centro de la ciudad, se tienen varias zonas de riesgo afectando a distintos sectores, comenzando por los agrícolas en las afueras de la ciudad y los residenciales, de educación, hoteleros, deportivos, religiosos dentro de ella. Las inundaciones pueden ser muy peligrosas llegando a 450 m a partir de las orillas, lo que produciría grandes pérdidas.

Para el río Yanuncay que atraviesa sectores residenciales y sur de la ciudad, su desborde ocasionaría grandes problemas en viviendas y en las nuevas urbanizaciones asentadas a sus orillas ya que se presentan inundaciones de aproximadamente 250 m laterales en los tramos más críticos. En la parte baja inundaría zonas recreativas y de hospitales. En síntesis este río es considerado el de mayor peligro siendo vulnerable un vasto sector metropolitano entre él y el río Tomebamba hasta su confluencia.

En el río Tarqui, que baña el sector suroccidental, hay una zona residencial bien definida que se vería afectada con una inundación extensa de 150 m de magnitud. Los otros tramos no se consideran de mayor peligro puesto que afectan a zonas despobladas, debiendo ser considerados en la planificación del territorio.

Para el río Machángara que se encuentra al noreste de la ciudad y en cuya orilla derecha se asienta el parque industrial. Este no se vería muy afectado por encontrarse a una cota superior siendo vulnerables los espacios verdes y áreas colindantes.

5. CONCLUSIONES

- Desde el punto de vista geológico se confirmó la vulnerabilidad de la región ante fenómenos naturales desastrosos y particularmente la existencia de extensas zonas de terrenos inestables que deben ser estudiadas.

- En la cuenca del río Paute, los deslizamientos más grandes, tanto activos como latentes, ocurren con mayor frecuencia en formaciones sedimentarias, donde la presencia de lutitas y arcillas expansivas es predominante, y en terrenos metamórficos constituidos por filitas fracturadas y descomprimidas. Se aprecian zonas de coluviales y eluviones.

- En la zona del cañón del río Paute alrededor de La Josefina, importantes deslizamientos antiguos y otros latentes han sido detectados.

- Dentro de las grandes masas inestables activas, se determinaron velocidades máximas de 8.400 mm/año y volúmenes máximos de 850 millones de metros cúbicos, siendo frecuentes los deslizamientos que sobrepasan el millón de metros cúbicos.

- Otros fenómenos de inestabilidad de gran incidencia en el área son la reptación y erosión laminar, cuyos factores desencadenantes son primordialmente antrópicos como el incendio y tala de bosques naturales.

- En el campo de la hidrometeorología, las investigaciones sobre los cuatro ríos de montaña que atraviesan la ciudad de Cuenca arrojan mapas de inundaciones probables, delimitando zonas de mayor peligrosidad y riesgo que históricamente han afectado la ciudad.

- La metodología usada para la determinación de los coeficientes de rugosidad en cada uno de los niveles y secciones, es la adecuada y se acerca a los valores obtenidos experimentalmente para ríos de régimen torrencial. El comportamiento observado con el modelo DAMBREAK para ríos de montaña fue satisfactorio y confiable para el tránsito de avenidas en ríos de estas características.

- Las precipitaciones de gran magnitud, duración e intensidad, que se producen en las partes altas de las subcuencas hidrográficas del río Paute, tienen respuestas muy rápidas ya que en términos generales las ondas de crecientes generadas por ellas llegan hasta la ciudad en el transcurso de dos a tres horas. Las causas de estas respuestas son entre otras la deforestación, así como también la eliminación del colchón amortiguador en los pajonales, lo que ha hecho que el drenaje en estas cuencas sea en menor tiempo.

- La construcción de algunos puentes sobre los ríos de la ciudad, han venido a estrechar el cauce, lo cual hace que al producirse inundaciones ocurran embalsamientos y su consecuente inundación hacia aguas arriba, aumentando la vulnerabilidad en dichos sectores.

- En síntesis se tiene actualmente conocimiento sobre la vulnerabilidad de la cuenca del Paute a terrenos inestables y a las amenazas hidrometeorológicas de la ciudad de Cuenca, debiendo ampliarse los estudios a toda la cuenca y tender a una normativa conjuntamente con las instituciones responsables a fin que los resultados que ya están siendo tomados en cuenta en la planificación del territorio tengan su base legal y aplicable en el marco de la prevención de desastres naturales y en función de los requerimientos socioeconómicos de la población.

Agradecimientos

Finalmente nos cumple resaltar que todos los trabajos realizados han sido posibles gracias a la participación directa de instituciones ecuatorianas, haciendo realidad la cooperación internacional, la capacitación profesional y la aplicación de los resultados en sus diferentes dominios.

Referencias citadas

- ALMEIDA, E., BASABE, P., RAMON, P. & SERRANO, C., 1996 - Terrenos inestables en la cuenca del río Paute, Ecuador, Convenio CSS-INECEL, p., Cuenca: en edición.
- BATHURST, J., 1985 - Flow resistance estimation in mountain rivers, Informe de hidráulica, 15 p., U. K.: inédito.
- CEPEDA, L., 1993 - Proyecto Hidroeléctrico Paute, Medidas de Mitigación y Situación del Proyecto frente al Desastre de La Josefina, Informe interno del Instituto Ecuatoriano de Electrificación, INECEL, 13 p., Ecuador: inédito.
- CHAMOT, Ph., STUDER, J. & WIRZ, F., 1993 - El deslizamiento de La Josefina en el valle del río Paute, Cuenca - Ecuador, Consultoría de ingeniería, apoyo en el manejo del desastre, CSS/DHA, 130p., Berna.
- DUTI, 1985 - Detection et utilisation des terrains instables, Rapport final, 264 p., Suiza: Ecole Polytechnique Federale de Lausanne.
- FRASSONI, A., 1994 - La Frana di Sbramento de La Josefina sul Rio Paute, Ecuador, in: *Geoingenieria Ambientale e Mineraria GEAM* (Memorie e Note): 139-147; Italia.
- FREAD, D., 1988 - *The NWS DAMBREAK Model. Volumen I y II, Theoretical background/ User documentation and Appendices*, Manual del programa DAMBREAK National weather service (NWS), 100p., USA.
- HUNGERBUHLER, D., STEINMANN, M., WINKLER, W., SEWARD, D., EGUEZ A., HELLER F & FORD, M., 1995 - An integrated study of fill and deformation in the Andean intermontane basin of Nabón (Late Miocene), southern Ecuador. *Sedimentary Geology*, 96: 257-279; Elsevier.
- INAMHI, 1993 - Estudio de inundaciones probables para la Ciudad de Cuenca, Informe del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, INAMHI, 130 p., Quito.
- INECEL, 1993 - Deslizamiento La Josefina, Datos Generales, Informe interno del Instituto Ecuatoriano de Electrificación, INECEL, 12 p., Quito.
- NEIRA, 1995 - Estudio sobre los contaminantes del lago de La Josefina, Informe ETAPA, 44p., Cuenca.
- NOBLET, C., LAVENU, A. & SCHNEIDER, F., 1988 - Étude géodynamique d'un bassin intramontagneux tertiaire sur décrochements dans les Andes du Sud de l'Équateur: l'exemple du Bassin de Cuenca. *Géodynamique*, 3: 117-138; Paris.
- KIENHOLZ, H. & KRUMMENACHER, B., 1995 - *Légende modulable pour la cartographie des phénomènes*. OFEE et OFEFP. Office fédérale de l'économie des eaux N°6, Berne, 19 y anexos.
- OFEF & OFEFP, 1995 - *Légende modulable pour la cartographie des phénomènes*. Recomendaciones, 37 p., Suiza.
- ZEAS, R., 1993 - *El deslizamiento de La Josefina, "tragedia nacional", monitoreo: datos y mediciones efectuadas*, 17 p., Cuenca: Instituto de Investigaciones de Ciencias Técnicas -ICT-Universidad de Cuenca.

**QUELQUES ASPECTS DE LA
VULNÉRABILITÉ**

**ALGUNOS ASPECTOS DE LA
VULNERABILIDAD**

ANALYSE EN RETOUR DE LA CATASTROPHE DE LA JOSEFINA (ÉQUATEUR, 1993) : CONTRIBUTION À LA CONNAISSANCE DU CONCEPT DE VULNÉRABILITÉ APPLIQUÉ AUX MOUVEMENTS DE TERRAIN

Frédéric Léone *, Elkin Velásquez * **

“La terre de l’Équateur est friable. Il arrive qu’elle s’ébranle, cède, s’écroule. *Hay tempestad, hay que tener miedo*. Il faut avoir peur, disent les gens du pays, voyant approcher la pluie, car la pluie délite et effondre la montagne. Il arrive que plusieurs s’effaissent, et quand toute la saison a été pluvieuse, de tout le relief du pays il ne reste rien. Les Andes ont baissé comme des bougies en une nuit et toute la vie doit se refaire sur de nouvelles bases...”
Henri Michaux, 1928
“ECUADOR”

Résumé

Cet article dresse une description et une reconstitution de la catastrophe de la Josefina (Équateur, printemps 1993) aussi bien sur le plan phénoménologique (enchaînement, caractéristiques, hypothèses de déclenchement, reconstitution numérique du volume déplacé, etc.) que sur le plan socio-économique (analyse des pertes et des dommages, gestion de la crise).

Un protocole d’analyse particulier, reposant sur les notions de processus d’endommagement et d’éléments exposés vient éclairer le thème de la vulnérabilité tel qu’il est défini dans les analyses de risque. Cela se traduit en particulier sur le plan structurel et corporel par la création d’une matrice d’endommagement, encore partielle, mais qui laisse entrevoir de nombreuses perspectives d’applications.

Mots-clés : *Vulnérabilité, risque, glissement de terrain, dommages, catastrophe, Équateur.*

*Laboratoire de la Montagne Alpine-Institut de Géographie Alpine, 17 rue M. Gignoux, 38 031 Grenoble, France.

**INGEOMINAS, Área Ingeniería Geoambiental, Diagonal 53, N° 34-53, Santafé de Bogotá, Colombia.

ANÁLISIS DE LA CATÁSTROFE DE LA JOSEFINA (ECUADOR, 1993): CONTRIBUCIÓN A LA DEFINICIÓN DEL CONCEPTO DE VULNERABILIDAD APLICADO A LOS MOVIMIENTOS DE TERRENO

Resumen

Este artículo presenta una descripción y una reconstitución de la catástrofe de la Josefina (Ecuador, primavera de 1993). Se analizan tanto los aspectos fenomenológicos del evento (mecanismos, hipótesis sobre el desencadenamiento, reconstitución numérica del volumen desplazado, etc.) como los aspectos relacionados a las pérdidas, los daños y la gestión de la crisis.

Se analizan igualmente las nociones de proceso generador de daños y de elemento expuesto, con el fin de refinar el concepto de vulnerabilidad y de riesgo. Este análisis se materializa, al menos desde el punto de vista corporal y estructural, en una matriz de daños que aunque todavía es parcial, deja entrever un sinnúmero de aplicaciones.

Palabras claves: *Vulnerabilidad, riesgo, deslizamiento, daños, catástrofe, Ecuador.*

JOSEFINA'S DISASTER BACK ANALYSIS (ECUADOR, 1993). CONTRIBUTION TO VULNERABILITY CONCEPT APPLIED TO MASS MOVEMENTS

Abstract

This paper sets a description and reconstitution of Josefina disaster (Ecuador, spring 1993) with particular attention on phenomenon and socio-economic aspects. A special analysis about damages come to perfect our knowledge of vulnerability concept in risk assessment.

Key words: *Vulnerability, Risk, Landslide, Damage, Disaster, Ecuador.*

1. UN ÉVÈNEMENT CONVULSIF AUX EFFETS DÉVASTATEURS

1. 1. Présentation

Le 29 mars 1993, à 21 heures, un glissement de terrain d'ampleur exceptionnelle plongeait l'Équateur dans une situation de crise éprouvante dont le dénouement n'est apparu qu'au soir du premier mai suivant, soit trente trois jours plus tard (Fig. 1).

Le glissement en question s'est produit sur le versant de la colline Parquiloma située en rive gauche du rio Paute à hauteur de sa confluence avec le rio Jadan, au lieu dit "La Josefina", environ 20 km au nord-est de la cité de Cuenca, capitale de la province de l'Azuay dans le sud de l'Équateur (cf. Fig. 2).

De par sa brutalité et son ampleur, ce phénomène peut être qualifié, à l'échelle historique, d'événement convulsif (cf. Hermelin & Velásquez, 1993) comparable à ceux qui, en d'autres lieux d'Amérique du Sud, ont généré dans le passé des catastrophes aussi meurtrières que celles de Ranrachirca, Montaro ou Yungay en 1962, 1974 et 1977 au Pérou. Il survient juste avant le glissement des mines d'or de Zambija dans l'extrême sud de l'Équateur (9 mai 1993, 350 victimes).

Bien que très peu médiatisé en Europe, l'événement de la Josefina a été vécu sur l'ensemble du territoire équatorien comme un drame national. Son analyse "à chaud", menée à la faveur d'une mission de reconnaissance en octobre 1993 s'est révélée être l'occasion d'éclairer certains aspects de la vulnérabilité des biens et des personnes exposées à des phénomènes de mouvements de terrain.



Fig. 1 - Vue générale depuis l'ouest du glissement de terrain de la Josefina (cliché F. Leone, octobre 1993) avec 1 : surface de rupture, 2 : accumulations de pied, 3 : lac résiduel, 4 : tracé du niveau maximum atteint par le lac, 5 : secteur sinistré par l'onde de submersion.

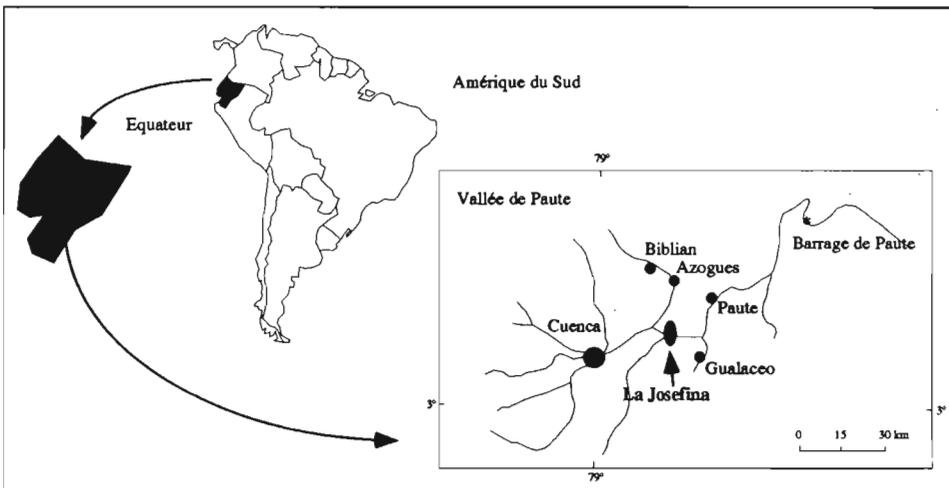


Fig. 2 - Plan de situation de la vallée de Paute et du glissement de la Josefina.

1. 2. Un enchaînement de phénomènes

La catastrophe de la Josefina résulte d'un enchaînement de phénomènes dommageables induits les uns des autres.

Le glissement principal, survenu en deux phases espacées de quelques secondes, est venu obstruer instantanément le fond de la vallée du rio Paute barrant son cours tout comme celui du rio Jadan.

Le barrage ainsi formé a été imposant par ses dimensions (1 100 m de long pour 500 m de large et 100 m de haut) et présentait une structure géologique suffisamment cohérente pour résister à la montée des eaux en amont.

Il s'en est suivi la formation de deux lacs de retenue dont la réunion s'est faite le 17 avril suivant. Le remplissage s'est poursuivi jusqu'au 1 mai, pour laisser place à une nouvelle phase phénoménologique particulièrement dévastatrice : l'onde de submersion consécutive à la rupture du barrage naturel. La surface couverte par les lacs a atteint 800 hectares (9 km de long), ce qui représentait un volume d'eau d'environ 200 millions de m³ (cf. Fig. 3).

La ruine, par érosion régressive, du barrage naturel a débuté dès le septième jour depuis l'aval et a connu son paroxysme le premier mai à l'aube. Elle a alors libéré en 6 heures (de 8 h à 14 h), environ 170 millions de m³ d'eau à forte charge solide (environ 13 millions de m³ de volume solide).

Compte tenu de la rapidité de la rupture, la vidange du lac s'est accompagnée sur ses berges d'une multitude de glissements (environ une cinquantaine) induits par la décompression hydraulique des versants initialement immergés. Le plus volumineux d'entre eux (environ 1 million de m³) s'est déclenché sur la rive opposée à celle du glissement principal, au lieu dit Cerro Chocar's.

Les estimations du débit de pointe, enregistrées vers 9h40, ont donné des valeurs comprises entre 9 000 et 14 000 m³/s. La largeur finale de la brèche a été de 20 mètres et la pente longitudinale d'équilibre de 1,3 %, proche de la pente d'origine de la rivière.

La vague déferlante s'est propagée sur plus de 60 km en aval avec des vitesses oscillant entre 5 et 20 m/s et des hauteurs d'eau comprises entre 6 et 15 m. Sous son passage, le fond de la vallée du rio Paute a été largement remodelé par effets de creusement ou d'accumulation. Il laisse apparaître par endroits des dépôts de plusieurs mètres d'épaisseur. Cette crue a généré à son tour un certain nombre de glissements induits par affouillement des pieds de versants, en plus des traditionnels effets d'érosion des berges. En fin de compte le niveau de la retenue s'est abaissé de 40 m pour laisser place à un lac résiduel de 30 millions de m³.

1. 3. Des pertes considérables

Sur le plan humain on a dénombré 71 victimes (disparitions comprises) du seul fait du glissement (ensevelissement de deux haciendas, de trente habitations, d'une école, ...), mais la mise en sécurité des zones exposées à la crue aval a nécessité l'évacuation de 14 000 personnes en majeure partie relogées sur place dans des campements provisoires.

Sur le plan matériel, les dégâts ont été considérables puisque le bilan économique des seules pertes directes (dommages matériels) s'élève à 147 millions de dollars U.S. (C.R.E.A.,

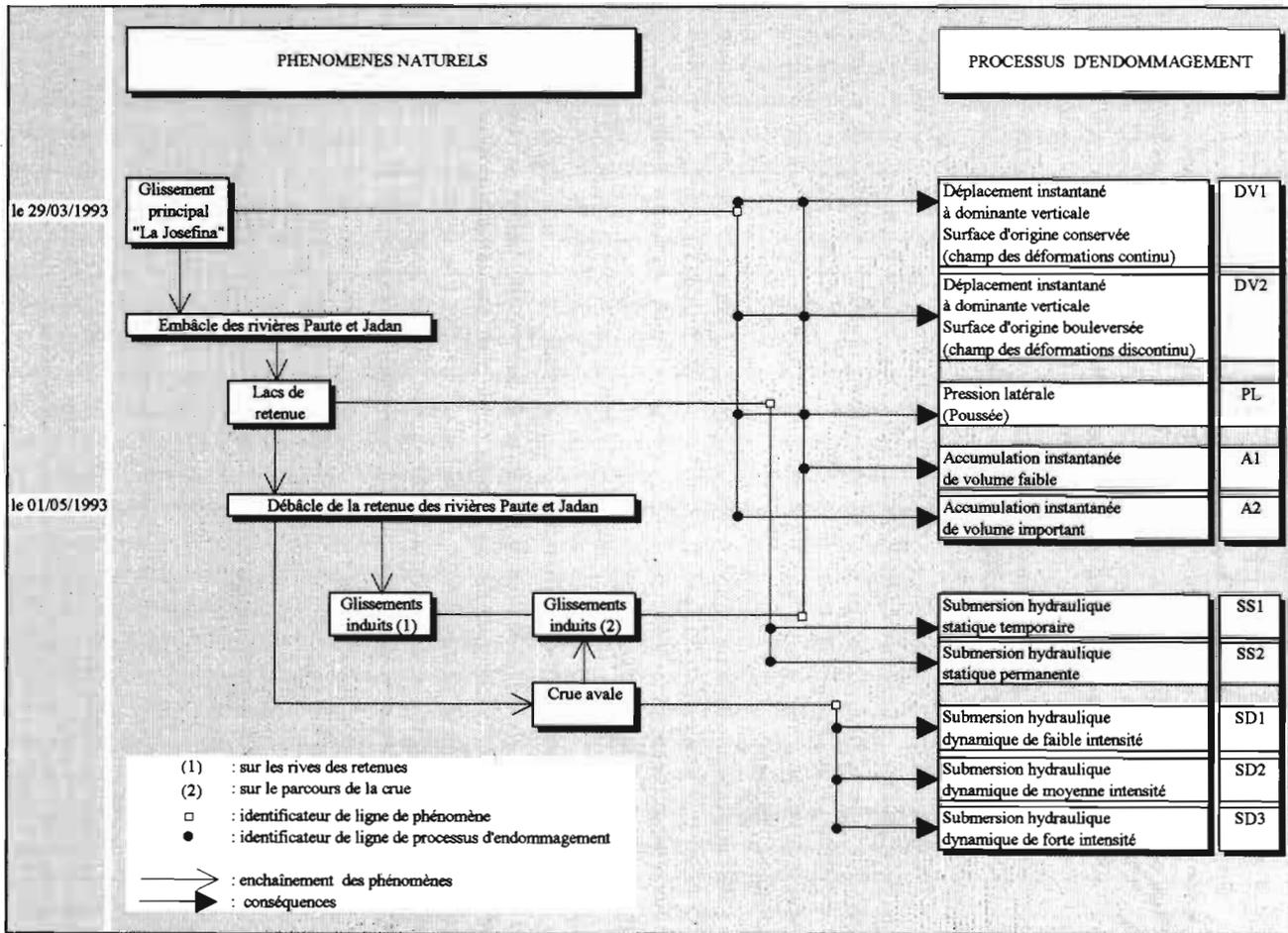


Fig. 3 - Enchaînement des phénomènes et processus d'endommagement associés.

1993), ce qui représente environ 1,5 % du P.N.B. de l'Équateur pour l'année 1993. La crue a détruit à elle seule 1 500 maisons, 20 km de routes, trois ponts d'intérêt vital, sans compter de nombreuses plantations et installations agricoles. Elle a endommagé la moitié de la ville de Paute sur laquelle la pointe de la crue est parvenue après 1 heure et demie.

En amont de la retenue, les effets de l'inondation dans la plaine d'El Descanso se sont fait ressentir sur des zones résidentielles, agricoles et industrielles (une centaine de maisons, six fabriques, quatre entreprises agricoles, six ponts, 40 km de routes et plusieurs km de voie ferrée ont été touchés). La route panaméricaine, principal axe d'échange nord-sud, est restée coupée plusieurs mois tandis qu'une centrale thermoélectrique s'est retrouvée noyée, libérant ses réserves d'hydrocarbures qui sont venues polluer les eaux de la retenue.

Les cultures n'ont également pas été épargnées et au total, sur l'ensemble des secteurs, ce sont près de 2 500 hectares de terres agricoles qui ont été sinistrées plus ou moins sévèrement.

Plus grave encore, la durée de vie du barrage hydroélectrique de Paute (ou barrage Daniel Palacios) situé 60 km en aval de la Josefina (70 % de la production nationale) est remise en question aujourd'hui ; d'une part du fait de sa sédimentation prématurée (le volume solide déposé par la crue y a été estimé à 4 millions de m³) et d'autre part du fait de la possibilité de voir sa prise d'eau menacée d'obstruction par un glissement ancien réactivé par l'onde de submersion.

Les implications sur le programme de développement hydroélectrique de l'Équateur sont d'autant plus graves qu'il était prévu, avant la manifestation de la Josefina, d'implanter un nouveau barrage en amont et en complément de celui de Paute. Ce projet semble à l'heure actuelle pour le moins retardé.

1. 4. Une gestion de crise difficile

Dès le lendemain du glissement de terrain, un décret présidentiel formait un comité de gestion de crise sous la responsabilité de l'armée. Sur le plan international, des conseillers techniques sont venus se prononcer sur ce qui est apparu très vite comme une menace suprême : la possibilité d'une rupture de la digue naturelle (1). Mais les pronostics fondés sur les résultats de nombreux modèles de rupture divergèrent (2) (Zevallos, 1994).

C'est de cet état d'imprévisibilité qu'est née une situation de crise qui s'est accrue au rythme de la montée des eaux et qui a motivé l'évacuation de nombreuses populations civiles.

Mais la diffusion trop rapide par les médias des résultats bruts fournis par les modèles de prévisions, ont parfois déclenché une agitation prématurée qui est venue compliquer la tâche des autorités.

(1) La rupture des barrages naturels dépend de leur taille, de leur géométrie et de leur composition ainsi que du débit entrant de la rivière et de la présence ou non de contrôles rocheux. En règle générale leur durée de vie est courte. Sur 63 cas étudiés par Schuster & Costa (1986), la rupture est survenue en moins d'une journée pour 22%, et dans les 10 jours suivant le glissement pour 50% d'entre eux.

(2) Ces modèles ont mis en oeuvre des simulations soit numériques, soit physiques. Les estimations du délai avant la rupture variaient de 3 à 15 jours et une équipe soutenait même qu'elle ne se produirait pas. Les prévisions du débit de pointe variaient pour leur part de 2 000 à 40 000 m³/s.

Finalement, la rupture tant redoutée s'est avérée être un grand soulagement pour les autorités et les populations inondées en amont tandis qu'elle annonçait la désolation pour les personnes situées en aval.

Cependant les effets liés de l'inondation en amont et de la crue aval ont été considérablement réduits par le creusement d'un canal d'écrêtement de la retenue qui a mobilisé 21 engins de terrassement. Il a permis de rabaisser du niveau du lac de 20 m et de diminuer l'inondation de 250 hectares en amont. Sans ce canal, le volume total du lac aurait approché les 330 millions de m³ et le débit de pointe de la crue 30 000 m³/s, ce qui se serait avéré fatal pour le barrage de Paute (3) (Cadier *et al.*, 1994) ; barrage qui avait heureusement été vidangé de 50 millions de m³ en prévision de la rupture.

Ceci dit, les conséquences auraient pu être plus dramatiques encore. En effet, les premières estimations du temps de remplissage de la retenue ont été faussées du fait d'une surestimation des débits entrants (67,4 m³/s en réalité et en moyenne pour ce mois là).

Ceci a eu pour effet de contraindre les autorités à suspendre trop tôt le creusement du canal et à déclencher l'alerte maximum également trop tôt, ce qui a entraîné une certaine lassitude et démobilitation des populations au moment fatidique de la rupture.

Par ailleurs, au niveau du canal, des pentes latérales creusées trop raides et un profil longitudinal au contraire pas assez marqué ont favorisé des éboulements et des obstructions à répétition qui sont venus retarder le moment de la rupture de plusieurs jours.

2. ANALYSE DU GLISSEMENT PRINCIPAL

2. 1. Contexte géologique et géomorphologique

Le glissement de la Josefina (*cf.* Fig. 4) a affecté un massif intrusif granodioritique situé dans un contexte de roches métavolcaniques, de roches sédimentaires crétacées, de roches volcaniques oligo-miocènes et de sédiments continentaux néogènes. Sur le plan géomorphologique, on se trouve en bordure orientale du bassin intramontagneux néogène de Cuenca, au niveau d'une zone de verrou de la vallée de Paute, et vraisemblablement à l'emplacement même d'un ancien glissement (Plaza & Eguez, 1993).

Sur le plan tectonique, on est en présence d'un contexte de grandes failles qui affectent les formations lithologiques précédentes selon trois familles de directions préférentielles : N20°, N115° et N145°. Elles sont les conséquences des mouvements compressifs et distensifs des différentes phases de l'évolution géologique des Andes équatoriennes (Plaza & Eguez, 1993).

2. 2. Caractéristiques géométriques et cinématiques

Il s'agit d'un glissement de type translationnel présentant une cicatrice de tête de forme semi-circulaire et un dénivelé de 300 m. La surface de rupture orientée est/ouest a une pente de 45° et couvre 0,4 km². La surface totale concernée (rupture et dépôts) est proche de 1 km². Sa longueur totale est de 1,5 km et sa largeur totale de 600 m. Les accumulations de pied présentent une hauteur maximale de 100 m et se composent de blocs anguleux de très

(3) Le débit maximum déversé par le barrage de Paute aurait été largement supérieur aux 5 000 m³/s mesurés en réalité après laminage et stockage, alors que l'évacuateur de crue y est dimensionné pour 7 000 m³/s.

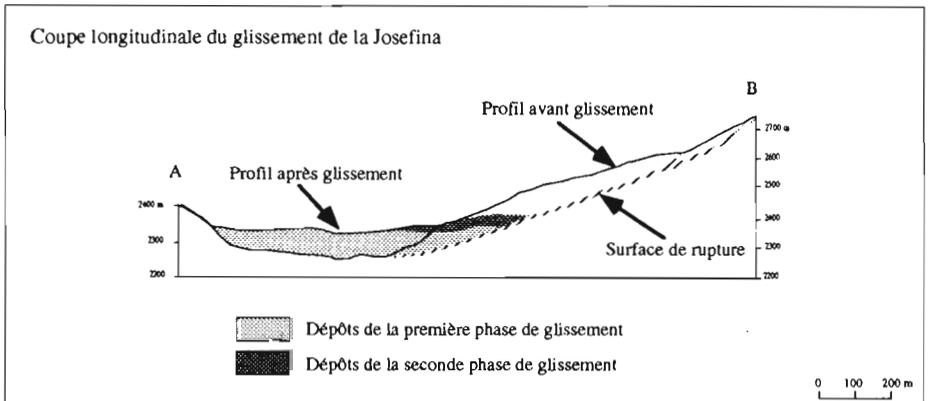
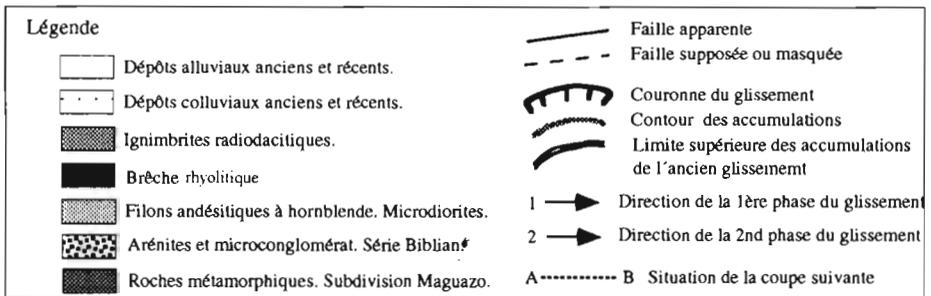
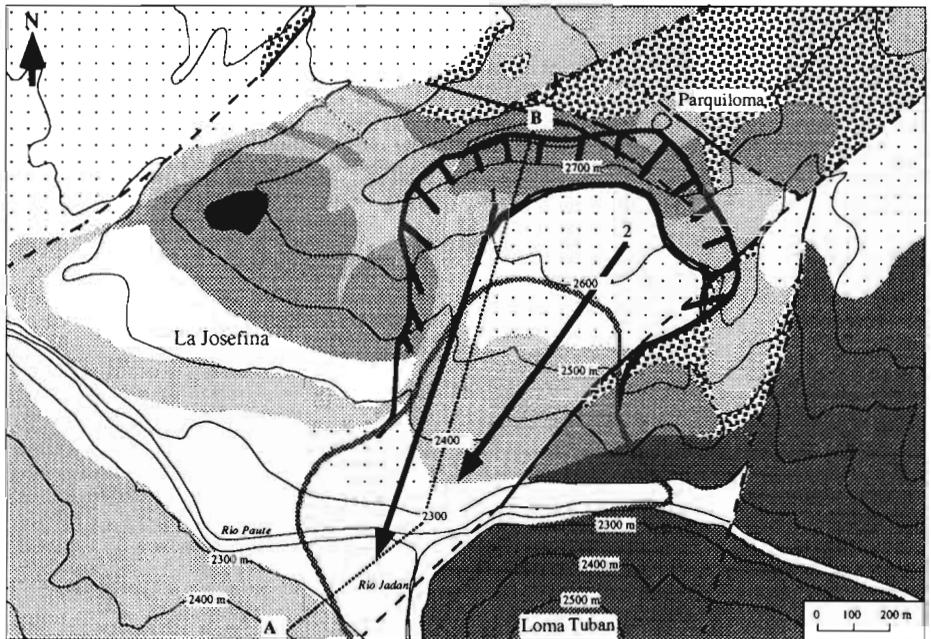


Fig. 4 - Glissement principal : contexte géologique (modifié d'après Plaza *et al.*, 1993 et Latorre *et al.*, 1993).

bonne résistance. Leur texture est globalement hétérogène avec des blocs de diamètre oscillant entre 0,5 et 2 m.

Une reconstitution numérique du volume déplacé obtenue par différentiels de modèles numériques de terrain (avant et après le glissement) a permis d'estimer avec précision le volume total du glissement à 28 millions de m³ (cf. Fig. 5). Ce résultat diffère de certaines estimations fournies par les experts équatoriens et américains (20 millions de m³ selon Plaza & Eguez, 1993 ; 36 millions de m³ selon Aguilera & Romo, 1993 et 44 millions de m³ selon James, 1993).

D'après les témoignages, la cinématique du glissement s'est caractérisée par deux phases de mouvement quasi-simultanées en direction du sud. La première phase semble avoir remanié des terrains en place dont la surface d'origine est en partie conservée. La seconde phase est venue recouvrir les accumulations de la première par des dépôts largement plus désorganisés, d'aspect pulvérulent par endroits.

2. 3. Hypothèses de déclenchement

Pour tenter d'éclairer les hypothèses de déclenchement de la première phase du glissement on distingue deux catégories de facteurs. Il s'agit :

- de **facteurs permanents** qui apparaissent sous forme de conditions lithologiques, structurales et topographiques favorables à l'instabilité du versant. La lithologie est intervenue indirectement, de par sa nature même (granodiorites), en résistant à la météorisation pour donner un relief escarpé (pentes comprises entre 25 et 45°) favorisant l'effet de la gravité.

Mais plus déterminant semble être le rôle joué par la tectonique qui est venue en quelque sorte prédécouper ce massif intrusif par un jeu de failles, soit sub-parallèlement à la surface de rupture (direction N115°), soit selon l'axe de la pente (direction N20°). C'est probablement d'ailleurs à la faveur de cette dernière famille de failles que s'est faite l'érosion tardive du versant. Érosion marquée par deux profonds talwegs qui semblaient délimiter exactement le volume correspondant à la première phase de glissement (cf. Fig. 5a et 6) ;

- de **facteurs déclenchants** proprement dits, qui ont probablement eu des effets cumulés. Ils ont vraisemblablement été ici d'ordre hydraulique et anthropique.

Concernant l'hypothèse d'un déclenchement hydraulique, il est fort probable qu'une infiltration massive des eaux météoriques au sein du massif ait pu augmenter de manière significative la pression interstitielle pour engendrer un premier mouvement qui a répercuté la mise en pression au reste de la zone. Cette infiltration a pu se faire à la faveur des plans de fracturation (4) et notamment au niveau des deux talwegs précédemment cités. Ceci dit, une inconnue demeure quant à l'origine d'une telle quantité d'eau nécessaire à l'amorce du premier mouvement, quand on voit la taille relativement réduite

(4) Certains témoignages font état, avant la catastrophe, de crevasses situées en amont du glissement et dans lesquelles s'engouffrait l'eau.

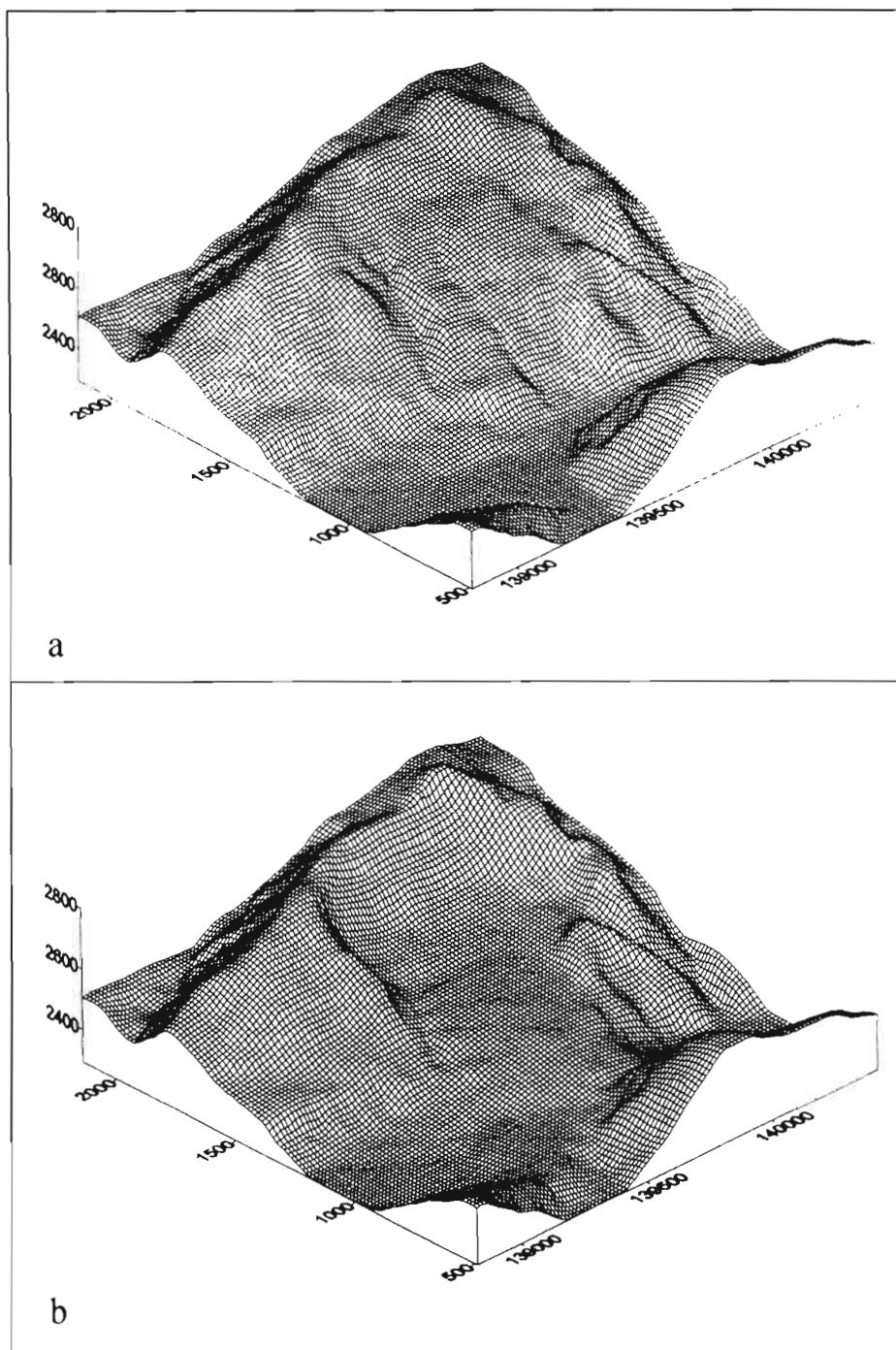


Fig. 5 - Modèles numériques de terrain du site de la Josefina, avant (a) et après (b) le glissement.

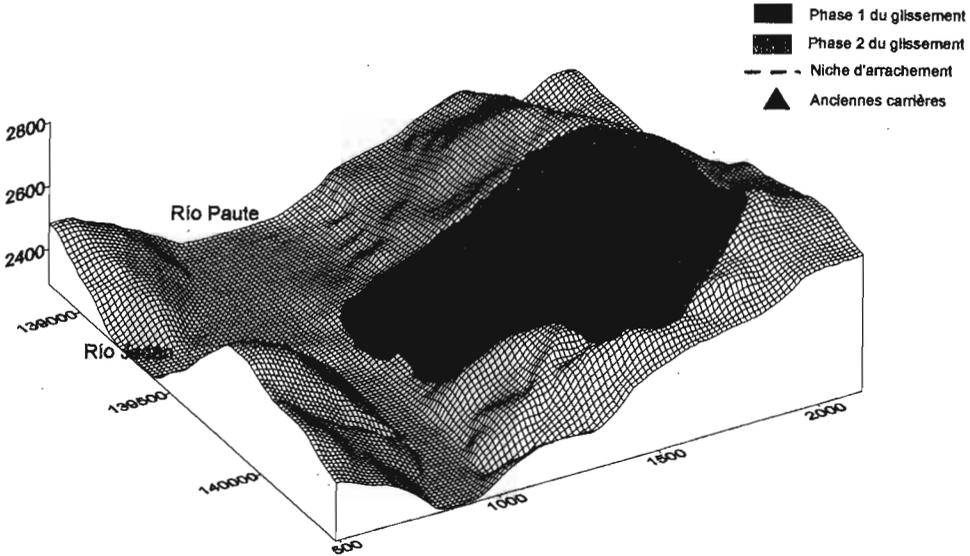


Fig. 6 - Localisation des deux phases de glissement.

du bassin versant qui alimente la zone glissée. En effet, les précipitations ont été élevées durant le mois précédent le glissement, mais non exceptionnelles pour la région. Elles ne peuvent expliquer à elles seules le déclenchement.

Enfin on se doit d'évoquer une cause anthropique qui a pu contribuer à destabiliser ce versant. Il s'agit de la présence en pied de massif de carrières de pierres de constructions qui présentaient des prolongements souterrains et dont l'exploitation était menée de manière empirique, nécessitant parfois l'emploi d'explosifs.

Concernant la dynamique générale du glissement et en particulier le déclenchement de sa seconde phase, on a, sur la base des informations disponibles, mis en oeuvre un algorithme de calcul de stabilité tridimensionnel. La surface du glissement semble avoir été déterminée par des plans de diaclase. On a donc reconstruit une surface de glissement limitée par plusieurs plans de diaclase et pris en compte des caractéristiques géotechniques (cohésion et angle de frottement) comparables à celles de matériaux similaires que l'on trouve dans les Andes septentrionales.

Le calcul de stabilité (coefficient de sécurité) a été réalisé d'abord pour la totalité de la zone glissée en conditions sèches puis ensuite selon l'hypothèse d'un premier glissement survenu sur le côté ouest de la même zone (ce qui correspond à la première phase de glissement). La différence entre les deux coefficients de sécurité a été de l'ordre de 0,1.

Bien que les données utilisées ne soient qu'approximatives et que le calcul ait été fait pour des conditions sèches, la comparaison entre les deux facteurs de sécurité renforce l'hypothèse de l'action destabilisatrice du premier glissement sur le second qui a correspondu probablement au remaniement d'une zone anciennement glissée (matériaux déjà disloqués).

Effectivement, la disparition du support latéral constitué par la première masse glissée a entraîné une variation des conditions d'équilibre du massif. Cette variation, dans des conditions limites, est tout à fait suffisante pour expliquer le mouvement du reste de la masse mobilisée (cf. Fig. 6).

Ceci dit, pour affiner ces hypothèses il paraît nécessaire de disposer de davantage de données de terrain et de considérer les conditions limites d'équilibre imposées par la présence d'eau.

3. ANALYSE DES DOMMAGES

3. 1. Présentation

Une mission de reconnaissance a été menée sur le site même de la Josefina au mois d'octobre 1993 (cf. Léone, 1994), soit 5 mois après la catastrophe. Elle a permis d'élaborer, à partir d'un certain nombre d'éléments d'informations (témoignages, coupures de presse, rapports techniques, extraits de journaux télévisés, observations de terrain, etc.), non seulement une reconstitution des faits tels qu'ils apparaissent au début de cet article mais également une analyse plus poussée des modes d'endommagement associés à cette catastrophe. Cette analyse des dommages répond à un besoin grandissant de voir se généraliser en matière de phénomènes de mouvements de terrain ce que les techniciens appellent des constats d'endommagement (cf. Leone *et al.*, 1995), à l'instar de ce qui se fait déjà depuis de nombreuses années en sismologie.

Le but est d'arriver à constituer à terme une matrice d'endommagement (quantification de l'interaction *élément exposé/phénomène* par un taux d'endommagement), qui vienne s'insérer dans des scénarios de risques générés par des mouvements de terrain (cf. Léone, 1996).

Dans le cadre de cet article, on s'est limité à l'analyse détaillée des dommages structurels et corporels. Cette analyse a nécessité la mise au point d'un protocole défini par les notions et étapes suivantes :

3. 2. Les processus d'endommagement

La compréhension de la complexité des dommages associés à cette catastrophe a nécessité dans un premier temps de caractériser les phénomènes impliqués par leurs types de processus d'endommagement. Par processus d'endommagement on désigne l'action préférentielle du phénomène sur les biens ou les personnes qui y ont été exposés. La difficulté majeure étant, à posteriori, d'arriver à apprécier ce qu'a été l'intensité de ce processus physique, et le cas échéant au moins les critères de mesure de cette intensité.

Ceci conduit à retenir deux grandes classes de processus d'endommagement qui permettent de caractériser l'ensemble des phases phénoménologiques de la catastrophe (cf. Fig. 3). Il s'agit de processus mécaniques (résultat de l'action des glissements, principal et induits) et hydrauliques (résultat de l'action de la retenue et de la crue).

Les processus mécaniques comprennent :

- des **champs de déplacements instantanés à composante dominante verticale**. Ils se caractérisent par une amplitude des déplacements (supérieure ou égale à 30 m) et par l'allure des déformations (continues ou discontinues : ce qui se traduit sur le terrain par une conservation ou non de la surface d'origine) ;

- des **effets de poussées latérales** (en pied de certains glissements) quand le processus suivant n'est pas venu les masquer ;
- des **effets d'accumulation** (ou d'épandage) des matériaux remaniés par les glissements ; en distinguant les volumes de quelques centaines de m³ (glissements induits) à plusieurs milliers voire millions de m³ (glissement principal et quelques glissements induits).

Les processus hydrauliques comprennent :

- des **effets de submersion statique temporaire** (pour les zones ayant été comprises entre le niveau maximum du lac temporaire et celui du lac rémanent d'octobre 1993). Ces zones ont connu une montée des eaux progressive et lente caractérisée par des vitesses faibles et peu de charges solides. Cela a correspondu à une tranche de hauteur d'eau de 40 m (dénivelé maximum entre les deux lacs) et à une durée d'immersion de 33 jours ;
- des **effets de submersion statique permanente** (pour les zones couvertes par le lac résiduel toujours présent à l'heure actuelle). Sa profondeur atteint par endroits environ 30 m et la sédimentation y est prononcée. On doit aussi y associer les effets d'une pollution par hydrocarbures ;
- des **effets de submersion dynamique** (associés à la crue) pour lesquels on distingue trois classes d'intensité :
 - **forte intensité** : pour les zones exposées à des vitesses de 20 m/s durant quelques heures et à un transport solide élevé. Le résultat a été une forte abrasion (de plusieurs mètres) associée à des dépôts tels (jusqu'à 4 m) qu'on y constate un remodelage total du lit de la rivière. Les hauteurs d'eau y ont atteint 15 m et même plus ;
 - **moyenne intensité** : pour les zones exposées à des vitesses plus modérées (5 à 10 m/s) et où l'érosion du lit est moins marquée (seuls les dépôts dominant) ;
 - **faible intensité** : pour les secteurs ayant connu surtout des débordements latéraux du lit (simple inondation avec des hauteurs d'eau jusqu'à 5 m) et où l'érosion et les dépôts ont été insignifiants du fait de vitesses d'écoulement faibles.

On a procédé à une cartographie de ces zones sur la base de photographies aériennes (non redressées) et de reconnaissances de terrain (cf. Fig. 7). La principale difficulté a été d'apprécier l'extension des différentes classes d'intensité de la crue. Cela a nécessité de faire la synthèse d'indices très variés et dispersés (indices de terrain, témoignages oraux, coupures de presse, photographies, extraits de films, etc.).

On a restreint cette reconstitution spatiale des phénomènes à la portion de vallée la plus sinistrée, dans un secteur compris entre la plaine de El Descanso et la ville de Paute, ce qui représente une distance d'environ 20 km.

3. 3. Typologies des modes d'endommagement

On a pris en compte un certain nombre d'éléments affectés par cette catastrophe et dressé pour chacun d'entre eux une typologie des modes d'endommagement classés par ordre d'intensité croissante (cf. Tableau 1). Cela donne au total 32 classes réparties entre 12 types d'éléments qui sont :

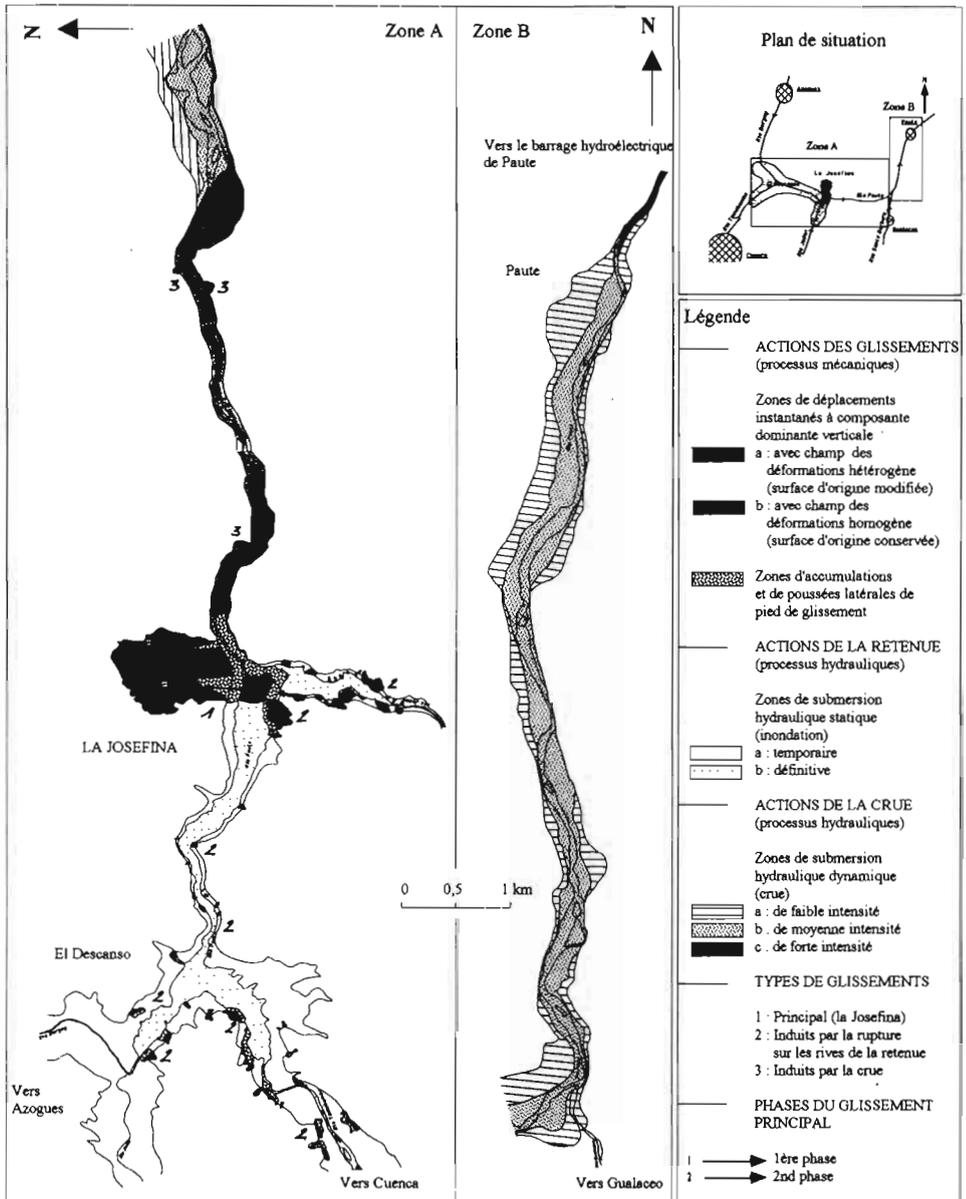


Fig. 7 - Cartographie des différents processus d'endommagement.

NATURE DES ELEMENTS EXPOSES		ID	MODES D'ENDOMMAGEMENT	NATURE DES DOMMAGES
BATIMENTS	B1, B2	I	Dommmages légers non-structuraux (gros oeuvre non-touché). Stabilité non-affectée. Mobilier endommagé.	STRUCTURELS
		II	Fissuration des murs, mais la stabilité n'est pas affectée. Réparations non-urgentes	
		III	Déformations importantes, lézards largement ouverts, fissures apparaissant dans des éléments de la structure. Stabilité affectée. Portes et fenêtres inutilisables. Evacuation nécessaire	
		IV	Fracturation des structures. Désolidarisation des parties. Effondrement partiel du plancher et brèches dans les murs. L'évacuation s'impose. La réhabilitation semble compromise	
			Effondrement partiel à total ou immersion définitive qui nécessite une évacuation du site et compromet toute réhabilitation.	
RESEAUX	ROUTE	R	I	Dégradation de la chaussée
		II	Affaissement de la plate-forme ou obstruction de la chaussée de faible volume (dizaines de m3)	
		III	Obstruction de la chaussée de volume élevé (centaines de m3)	
		IV	Rupture de la plate-forme ou immersion définitive	
	LIGNE ELECTRIQUE	L	I	Distorsion
			II	Rupture ou immersion définitive
	VOIE FERREE	VF	I	Obstruction partielle de la voie (dizaines de m3)
		II	Déformation légère de la voie	
		III	Obstruction totale (centaines de m3) ou déformations importantes de la voie	
	IV	Rupture du ballast ou immersion définitive		
SURFACES NATURELLES	TERRAIN ET SOL	T	I	Dégradation du sol
		II	Remaniements topographiques mineurs	
		III	Remaniements topographiques majeurs ou immersion définitive	
	COURS D'EAU	CE	I	Partiellement obstrué
		II	Totalement obstrué	
	PLAN D'EAU	PE	I	Pertes hydrauliques
	II	Comblement partiel		
SOUS-ELEMENTS	OCCUPATION VEGETALE	OV	I	Perturbations végétales
		II	Destruction ou dépérissement	
	MOBILIER	MB	I	Endommagés mais récupérables
	II	Détruits et irrécupérables		
STOCKS, RECOLTES	S	I	irrécupérables	
INDIVIDUS		I	Préjudice moral ou gêne liés à une évacuation	CORPORELS
		II	Troubles psychologiques	
		III	Blessure physique sans séquelles (blessure légère)	
		IV	Blessure physique entraînant une invalidité (blessure grave)	
		V	Décès ou disparition	

B1 : bâti de qualité médiocre (en terre et sans fondations)

B2 : bâti de bonne qualité (en maçonnerie et avec fondations)

ID : intensité des dommages

Tableau 1 - Échelles d'endommagement structurel et corporel.

- les bâtiments, distinction faite entre ceux construits en maçonnerie avec des fondations et ceux en terre sans fondations (en pisé) ;
- les routes ;
- les lignes électriques aériennes ;
- la voie ferrée ;
- les terrains et les sols associés ;
- les cours d'eau ;
- les plans d'eau (barrage de Paute) ;
- les occupations végétales (flore naturelle et cultures) ;
- le mobilier associé aux bâtiments ;
- les stocks et les récoltes engrangées ;
- les individus.

3. 4. Matrice d'endommagement

Pour chaque catégorie de processus d'endommagement, on a tenté de dresser à partir de constats de terrain, le ou les niveaux d'endommagement rencontrés pour les différents éléments retenus ci-dessus, bien entendu lorsque ceux-ci étaient représentés sur la zone. Ceci a conduit à l'élaboration d'une matrice d'endommagement (cf. Tableau 2).

L'intérêt de cette hiérarchisation des dommages est d'apprécier rétrospectivement la réalité des pertes associées à cette catastrophe. Pertes qui ne sont pas toujours totales, contrairement aux hypothèses retenues par ceux qui ont eu la charge d'en dresser le bilan (cf. C.R.E.A., 1993 et Defensa Civil, 1993). Il existe en effet dans la réalité une modulation des

		PROCESSUS D'ENDOMMAGEMENT										
		MECANIQUES					HYDRAULIQUES					
		DV1	DV2	PL	A1	A2	SS1	SS2	SD1	SD2	SD3	
ELEMENTS AFFECTES	BATIMENTS	B1	IV	V	-	-	V	III-IV-V	V	I-II	III-IV-V	V
		B2	-	V	III-IV	-	V	I-II	V	I	II-III-IV	V
		MB1	-	II	-	-	II	II	II	I-II	II	II
		MB2	-	II	II	-	II	II	II	I-II	II	II
	RESEAUX	R	-	IV	-	II-III	IV	0-I	IV	0-I	II-III	IV
		L	I	II	-	I	II	0	II	0-I	II	II
		VF	-	-	-	I	-	I	IV	-	-	-
	SURFACES NATURELLES	T	II	III	-	II	III	0	III	I	II	III
		OV	I	II	-	I-II	II	I-II	II	0-I	I-II	II
		CE	-	-	-	I	II	-	-	-	-	-
		PE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	II
	INDIVIDUS	III	-	-	-	V	-	-	I	-	-	-

-	: configuration non-observée ou impossible
□	: élément peu affecté
□	: élément moyennement affecté
■	: élément très affecté (irré récupérable)
□	: conséquences écologiques (pollution par hydrocarbures) suite à l'immersion de la centrale thermo-électrique de El Descanso
□	: conséquences énergétiques avec la réduction de la durée de vie du barrage hydroélectrique de Paute

Tableau 2 - Matrice d'endommagement structurel et corporel (éléments affectés et processus d'endommagement sont respectivement codés dans le tableau 1 et la figure 3 ; les valeurs en chiffres romains renvoient aux intensités des dommages codées dans le tableau 1).

pertes qui dépend essentiellement de l'intensité des phénomènes et du comportement des éléments qui y sont exposés.

Ainsi, on peut voir que pour une même catégorie d'éléments, les intensités d'endommagement sont variables d'une classe de magnitude à l'autre, et qu'inversement pour une même classe de magnitude peuvent être représentés plusieurs niveaux de dommages suivant la nature des éléments affectés.

Par exemple, bien qu'elles ne puissent être réoccupées ultérieurement pour des raisons évidentes de sécurité, des habitations situées en surface du glissement principal ont été épargnées malgré un déplacement vertical de plusieurs dizaines de mètres.

De la même façon, la crue a entraîné des dommages très variables. Si tous les biens situés sur la zone amont de forte intensité ont été rasés, il en est allé différemment pour ceux affectés par la classe d'intensité faible : ainsi la ville de Paute a été en partie submergée, mais les bâtiments ont résisté à la montée des eaux. Ils ont pu rapidement être réoccupés malgré des dégâts surtout d'ordre mobilier.

4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'analyse de cette catastrophe de la Josefina a donné l'occasion de reconstituer dans le détail un enchaînement d'événements induits les uns des autres, en mettant à profit une richesse d'informations rarement rencontrée en pareilles occasions.

L'analyse détaillée des phénomènes et l'appréciation de leur intensité à partir d'indices divers ont permis une structuration des dommages associés à cette catastrophe sous forme de matrice.

En terme d'applications potentielles, une telle matrice peut devenir un outil de base indispensable pour affiner l'évaluation des pertes globales imputables à une catastrophe en général.

En effet, une fois qu'on est capable d'affecter à chaque mode d'endommagement un taux d'endommagement calculé sur un coût de remise en état du bien, on a les moyens pour l'ensemble du stock d'éléments représenté sur la zone exposée d'établir le montant économique des pertes matérielles (cf. Léone, 1996).

Cette approche peut aussi être utilisée à but prospectif, pour tenter de prévoir ce que seront les pertes potentielles d'une zone menacée par un phénomène pressenti. On entre alors dans le domaine des scénarios de vulnérabilité et de risque (cf. Velásquez *et al.*, 1995).

Mais de tels développements ne peuvent se faire qu'à condition de perfectionner notre connaissance du thème de la vulnérabilité, en généralisant ce type d'analyse en retour, pour mieux comprendre, donc mieux prévoir.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier toutes les personnes qui ont bien voulu mettre à leur disposition les données et moyens nécessaires à la réalisation de cet article. Ces remerciements s'adressent en particulier aux représentants de la Défense Civile équatorienne ainsi qu'à ceux de l'ORSTOM, du BRGM et du CIFEG. Ils s'adressent également à la société J.P.A Consultants.

Références citées

- AGUILERA, E. & ROMO, M., 1993 - Deslizamiento "La Josefina": planificación y decisiones para el manejo de la crisis. in : *Actes du colloque sur la Josefina*, 11p., École Polytechnique Nationale : Quito, Équateur.
- C.R.E.A., 1993 - *Evaluación preliminar de los Daños causados por el represamiento y desfogue del río Cuenca*, 43p., Ecuador: Instituto De Investigaciones Sociales (IDIS), Universidad de Cuenca.
- CADIER, E., ZEVALLOS, O. & VACCA, A., 1994 - Le glissement de terrain et les inondations catastrophiques de la Josefina. in : *Actes de l'université européenne d'été sur les risques naturels : session 1994 mouvements de terrain*, 4p., Auron, France : Pôle Grenoblois Risques Naturels, Université J. Fourier, Grenoble.
- DEFENSA CIVIL, 1993 - Evaluación de daños. in : *Actes du colloque sur la Josefina*, 14p., Quito, Équateur : École Polytechnique Nationale.
- HERMELIN, M. & VELÁSQUEZ, E., 1993 - El papel de los eventos convulsivos en la evolución del paisaje en el trópico húmedo de montaña. in : *Resumés VI Cong. Colo. de Geología*, Medellín, Colombia : U. EAFIT.
- JAMES, M., 1993 - Análisis de experiencias con presas con fallas para la preparación de un plan de emergencia. in : *Actes du colloque sur la Josefina*, 11p., Quito, Équateur : École Polytechnique Nationale.
- LATORRE, C., ALMEIDA, E, TAPIA, W. & RAMÓN, P., 1993 - Geología del Deslizamiento la Josefina, 29p., Quito, Équateur : Rapport technique, INECEL.
- LÉONE, F., 1994 - Catastrophe de la Josefina : éléments d'information, 63p., Rapport de mission B.R.G.M.-C.I.F.E.G 1993, Département Risques naturels et Géoprospective, B.R.G.M. Marseille, France.
- LÉONE, F., 1996 - Concept de vulnérabilité appliqué à l'évaluation des risques générés par les phénomènes de mouvements de terrain. Thèse de doctorat, Spécialité Géographie, Université J.F. Fourier, Laboratoire de la Montagne Alpine/Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Grenoble, France, 276p.
- LÉONE, F., ASTE, J.P. & VELÁSQUEZ, E., 1995 - Contribution des constats d'endommagement au développement d'une méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité appliquée aux phénomènes de mouvements de terrain - *Bulletin de l' Association de Géographes Français*, N°4 : 350-371.
- PLAZA, G. & EGUEZ A., 1993 - Consideraciones geológico-geotécnicas sobre el deslizamiento de la Josefina. in : *Actes du colloque sur la Josefina*, 10p., Quito, Équateur : École Polytechnique Nationale.
- SHUSTER, R.L. & COSTA, J.E., 1986 - A perspective on Landslides Dams: Processes, Risk, and Mitigation. *Geotechnical Special Publication*, N° 3, April 7 : 1-20, R.L. Shuster Ed., ASCE.
- VELÁSQUEZ, E., ASTE, J.P. & LÉONE, F. 1995 - Réflexion sur les besoins de communication entre les divers intervenants dans la prévention des risques générés par les mouvements de terrain. Les apports des scénarii de risques. *Bull. Assoc. Géogr. Franç.*, N°4 : 372-386.
- ZEVALLOS, O., 1994 - Expérience de modélisation physique et mathématique pour la prévision de rupture de barrages. in : *Actes de l'université européenne d'été sur les risques naturels : session 1994 mouvements de terrain*, 7p., Auron, France : Pôle Grenoblois Risques Naturels, Université J. Fourier, Grenoble.

REPRÉSENTATIONS CARTOGRAPHIQUES DES FACTEURS DE VULNÉRABILITÉ DES POPULATIONS EXPOSÉES À UNE MENACE VOLCANIQUE APPLICATION À LA RÉGION DU VOLCAN COTOPAXI (ÉQUATEUR)

Robert D'Ercole *

Résumé

Suivant une définition sociale, la vulnérabilité est la propension plus ou moins prononcée à subir des dommages. L'atténuation des risques naturels auxquels les hommes sont confrontés suppose la réduction de la vulnérabilité en matière de vies humaines, de biens et d'activités. Il s'agit au préalable d'identifier les facteurs de vulnérabilité, d'en mesurer la portée, et de localiser dans l'espace les secteurs les plus sensibles. La cartographie de la vulnérabilité et de ses facteurs est une étape indispensable vers une cartographie globale du risque à laquelle de nombreux chercheurs et décideurs aspirent.

À partir de l'exemple des régions des provinces du Pichincha et du Cotopaxi exposées aux conséquences de l'activité du volcan Cotopaxi, l'article propose quelques jalons méthodologiques pour une cartographie de la vulnérabilité des populations menacées. Des typologies spatiales de vulnérabilité sont représentées à partir d'une analyse factorielle. La carte intégrée des facteurs de vulnérabilité permet la réalisation de diagnostics locaux, tandis qu'une troisième carte fournit des orientations pour des actions de préparation. Une réflexion est également menée sur l'intérêt et sur les limites d'utilisation de ces cartes.

Mots-clés : *Vulnérabilité, cartographie, risque volcanique, Cotopaxi, Équateur.*

CARTOGRAFÍA DE LOS FACTORES DE VULNERABILIDAD DE LAS POBLACIONES EXPUESTAS A UNA AMENAZA VOLCÁNICA

APLICACIÓN A LA REGIÓN DEL VOLCÁN COTOPAXI (ECUADOR)

Resumen

Según una definición social, la vulnerabilidad es la propensión más o menos pronunciada a sufrir perjuicios cuando ocurre un fenómeno natural destructor. La mitigación de los riesgos naturales que enfrentan los hombres supone la reducción de la vulnerabilidad de éstos, de sus bienes y actividades económicas. Se trata previamente de identificar los factores de vulnerabilidad, medir sus consecuencias y localizar los sectores más sensibles. La cartografía de la vulnerabilidad y su factores constituye una etapa indispensable para una cartografía global del riesgo, la cual buscan los científicos y los tomadores de decisiones.

Basado sobre el ejemplo de los sectores amenazados por el volcán Cotopaxi en las provincias de Pichincha y Cotopaxi, el artículo presenta algunos métodos de cartografía de la vulnerabilidad poblacional. Apoyándose en un análisis factorial, los tipos espaciales de vulnerabilidad están representados en un primer mapa. El segundo, al integrar los factores de vulnerabilidad permite un

* Département de géographie, Université de Savoie, Chambéry

diagnóstico sector por sector, mientras el tercer mapa propone algunas recomendaciones en cuanto a la preparación de la población. Se discute también el interés, los límites y el uso de estos mapas.

Palabras claves: *Vulnerabilidad, cartografía, riesgo volcánico, Cotopaxi, Ecuador.*

CARTOGRAPHY OF VULNERABILITY OF PEOPLE AT RISK

CASE-STUDY : THE COTOPAXI VOLCANO AREA (ECUADOR)

Abstract

According to a social definition, vulnerability is the more or less pronounced propensity to bear damage when a natural phenomenon strikes. Mitigation of natural hazards means the reduction of vulnerability of himself, of his property and of his economic activities. Firstly, it is necessary to identify the vulnerability factors, to measure their consequences and to locate the sectors posing the biggest problems. Mapping vulnerability and its factors is an indispensable step towards global risk cartography which is the goal of researchers and risk managers.

Based on the case study of the Pichincha and Cotopaxi provinces which are at risk from the Cotopaxi volcano, this article gives methods for the cartography of people's vulnerability. Spatial vulnerability typologies shown on a map are based on a multivariate analysis. The map integrating vulnerability factors allows a local diagnosis, whereas a third map gives advice for preparative measures. Lastly, the advantages and the limits of the use of such maps are discussed.

Key words: *Vulnerability, Cartography, Volcanic risk, Cotopaxi volcano, Ecuador.*

1. UNE PROBLÉMATIQUE : LA VULNÉRABILITÉ ET SA CARTOGRAPHIE

La notion de vulnérabilité prête généralement à confusion. Le débat dont elle a fait l'objet lors d'un récent colloque (1) a permis de dégager deux définitions complémentaires. La première, technique et plus ancienne, considère la vulnérabilité comme un indice (de 0 à 1) ou un pourcentage de ce qui peut être perdu (vies humaines, biens, valeurs diverses) en un lieu donné en cas de catastrophe. La deuxième, sociale, désigne la vulnérabilité comme la propension à subir des dommages, suivant la capacité de réponse des sociétés concernées vis-à-vis de menaces d'origine naturelle, anthropique ou mixte. La complémentarité de ces deux définitions vient du fait que si la première s'attache principalement aux conséquences potentielles tangibles sur les éléments exposés d'un événement catastrophique donné, la deuxième porte plus particulièrement son regard sur les facteurs anthropiques qui tendent à moduler le poids de ces conséquences. La seule présence de populations dans les zones à risque constitue un facteur de vulnérabilité, mais cette dernière s'accroît lorsque les conditions propices se multiplient : la forte croissance de cette population, les modes irrationnels d'occupation et d'utilisation du sol, les contraintes socio-économiques et psycho-sociologiques, les faiblesses fonctionnelles à propos de gestion de l'urgence ou encore les déficiences institutionnelles ou politico-administratives du système de gestion des risques et de ses rouages.

De nombreuses études, en sciences humaines, ont analysé la plupart de ces facteurs de vulnérabilité, permettant de mieux comprendre les situations porteuses de risque. L'un des problèmes majeurs réside dans la cartographie de la vulnérabilité et de ses facteurs,

(1) Colloque international de Clermont-Ferrand, "Croissance urbaine et risques naturels dans les pays en développement", (2-3 dec. 1994). Voir notamment la synthèse de la table ronde portant sur le thème de la vulnérabilité (D'Ercole, 1994b). Voir également l'article de Thouret & D'Ercole (1996).

compte tenu d'une menace potentielle donnée. Y parvenir supposerait réaliser une véritable carte de risque combinant, d'après la définition du risque, la menace (ou aléa, c'est-à-dire le phénomène selon sa nature, sa probabilité d'occurrence et sa capacité destructrice) et la vulnérabilité exprimant à la fois les enjeux, les dommages potentiels, mais aussi les facteurs humains susceptibles d'accroître les conséquences de l'événement.

La prise de conscience de cette complexité fait que les documents que l'on appelait cartes de risque il y a quelques années encore, sont devenus cartes d'aléas ou de menaces potentielles, dans la mesure où ils ne représentent que la nature et l'extension possible des phénomènes considérés.

Ont été ensuite appelés cartes de risque les documents où les enjeux humains (ou éléments exposés) étaient superposés aux aléas. Mais cela est encore insuffisant car le facteur humain peut facilement moduler l'effet des aléas sur les enjeux. Les différences parfois énormes en ce qui concerne le nombre de victimes enregistrées ces dernières années à la suite de séismes comparables et dans des conditions de densité humaine voisines, au Japon et aux États-Unis d'une part, en Arménie ou en Iran d'autre part, illustrent bien ce problème (2). Le croisement de l'aléa et des enjeux doit donc être complété par une approche qualitative considérant le facteur anthropique pour lequel il s'agit de distinguer, ne serait-ce qu'artificiellement, le technique du social.

Dans le premier cas, il s'agit par exemple de cartes issues de zonages ou de microzonages sismiques prenant en compte les caractéristiques physiques du site comme la topographie ou les propriétés mécaniques des sols et, en même temps, la qualité de l'habitat et des infrastructures (exemple des scénarios sismiques de Quito : voir Chatelain et al. dans ce numéro).

Dans le deuxième cas, les quelques cartes existantes ou en cours d'élaboration s'intéressent plus particulièrement aux populations exposées et tentent de déboucher sur une hiérarchisation socio-spatiale des facteurs de vulnérabilité que ces populations présentent (Chardon, 1994). C'est dans cet esprit que l'analyse et la cartographie de la vulnérabilité de la population exposée au volcan Cotopaxi ont été réalisées.

VULNÉRABILITÉ DE LA POPULATION EXPOSÉE AU VOLCAN COTOPAXI : LES BASES DE LA CARTOGRAPHIE (3)

Le volcan Cotopaxi (5 897 m) est situé à 60 km au sud de Quito et domine deux bassins peuplés. Au Nord, dans la province du Pichincha, les cuvettes de Machachi et de Los Chilllos avec la petite ville de Sangolqui et celle de Tumbaco, sont séparées par de vieux reliefs volcaniques érodés et parcourues par des cours d'eau issus du Cotopaxi (rio San Pedro, Santa

(2) 25 000 morts en Arménie le 7 décembre 1988 ; 45 000 en Iran le 21 juin 1990, contre 62 et 34 aux États-Unis respectivement les 17 octobre 1989 et 17 janvier 1994 ; 239 et 5 300 au Japon les 12 juillet 1993 et 17 janvier 1995 (Kobé). Ce dernier séisme est de loin le plus meurtrier depuis le grand séisme du Kanto de 1923. On peut néanmoins imaginer qu'un événement aussi violent (7,2 de magnitude), au foyer proche de la surface (13 km) aurait occasionné un bilan beaucoup plus lourd dans un pays en développement.

(3) Nous fournissons brièvement ici les données de base ayant permis de déboucher sur une cartographie synthétique des facteurs de vulnérabilité de la population menacée par le Cotopaxi. Pour de plus amples informations sur ces données ou sur d'autres aspects des travaux réalisés entre 1988 et 1991 dans la région du Cotopaxi, nous renvoyons le lecteur à la thèse de doctorat qui en fait la synthèse (D'Ercole, 1991). Plusieurs rapports ou publications ont également développé certains aspects de la recherche engagée (voir références bibliographiques : D'Ercole, 1989 ; 1990 ; 1991 ; 1992 ; 1993 ; 1994a ; D'Ercole & Moncayo, 1991 ; Peltre & D'Ercole, 1992).

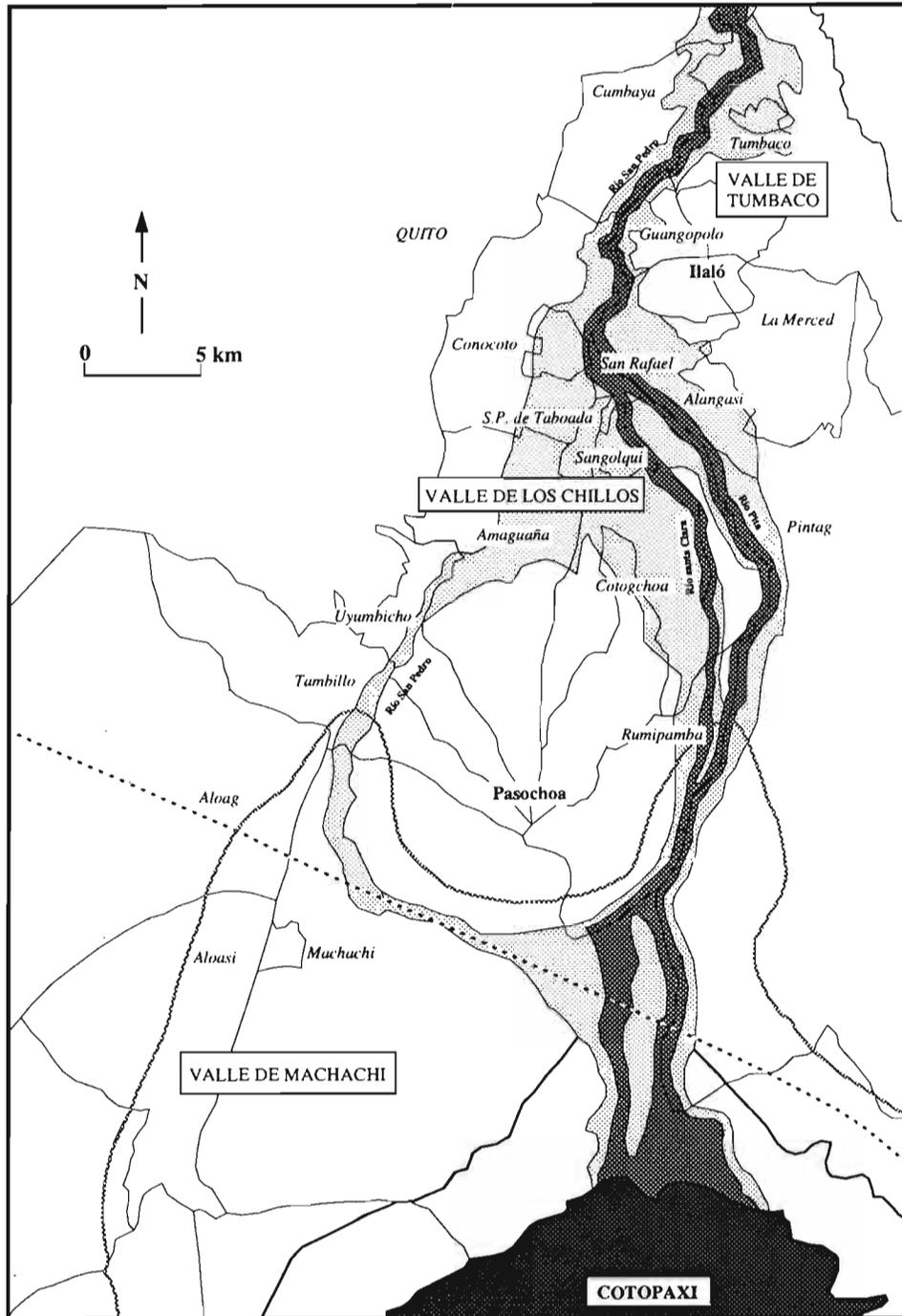
Clara, Pita). Au Sud, dans la province du Pichincha, le bassin prend la forme d'un long plan incliné incisé par de nombreux cours d'eau également issus des flancs du volcan, et se prolonge par la vallée du rio Cutuchi dans laquelle se trouve la capitale de la province, Latacunga.

Ces deux bassins ont maintes fois été dévastés par le volcan dans le passé, comme en 1742, 1768 et 1877, notamment en raison de l'écoulement de lahars (coulées de débris et de boue liées à la fonte brutale d'une partie du glacier recouvrant le Cotopaxi, sous l'effet des produits incandescents émis pendant une éruption). Deux points sont d'ores et déjà à noter. D'une part, la dernière grande éruption, en 1877, a fait un millier de victimes dans une région dix fois moins peuplée qu'aujourd'hui. D'autre part, les principaux dommages humains et matériels ont toujours été plus importants dans la province méridionale, habitée depuis longtemps, alors que les lahars recouvraient les territoires d'haciendas à très faible densité humaine dans la province du Nord. Aujourd'hui les données ont changé, car si le volcan menace plus de 300 000 personnes, les deux tiers d'entre elles sont concentrées dans les régions exposées de la province du Pichincha. Parmi ces 300 000 personnes, la moitié est menacée par les lahars en zone de risque majeur et mineur (vaste zone recouverte par les lahars produits lors d'une grande éruption il y a 2 400 ans) et environ 35 000 d'entre elles se situent dans la zone de risque majeur (zone affectée par les lahars de 1877, représentative des secteurs affectés durant la période historique).

La carte des aléas (ou des menaces potentielles) du Cotopaxi, bâtie par l'École Polytechnique Nationale de Quito (Hall & Von Hillebrandt, 1988) à la suite de premiers travaux nord-américains (Miller *et al.*, 1978), permet de repérer ces différentes zones ainsi que les secteurs susceptibles d'être affectés par d'autres phénomènes éruptifs comme les écoulements et retombées pyroclastiques et les avalanches de débris type Mont St. Helens (Fig. 1). Elle a constitué la base physique et spatiale de notre étude. Pour sa part, la figure 2 superpose les limites des menaces et la population matérialisée ici par sa densité. Elle permet notamment d'observer la forte concentration de population dans la vallée de los Chillos, liée à l'extension de la ville de Quito située à l'Ouest et en amont. Comme cela a été signalé précédemment, il ne s'agit là que d'une ébauche de carte de risque dans la mesure où elle réduit le fait humain à sa plus simple expression : sa répartition et sa densité.

Malgré un système de surveillance du volcan qui commence à s'étoffer, aucun ouvrage de génie civil ne protège les populations face à la force destructrice des lahars. Dans l'hypothèse d'une éruption imminente ou effective du Cotopaxi, la sauvegarde des populations dépend donc de la capacité des hommes, depuis les autorités centrales jusqu'à ceux dont la vie est en jeu, à gérer la situation de crise et notamment à réussir la seule parade possible : l'évacuation préventive ou d'extrême urgence des plus exposés vers des lieux sûrs. Or, ce qui peut se résumer en un geste de sauvegarde, simple en théorie lorsqu'il s'agit seulement de s'élever de quelques dizaines de mètres pour se mettre à l'abri des coulées, est dans la réalité la source d'une multitude de problèmes et de contraintes. De nombreux exemples indiquent que les évacuations sont rarement réussies, notamment dans les pays en développement, dans la mesure où les réalités sociales battent régulièrement en brèche les solutions techniques. Cela se traduit par l'absence de messages d'alerte livrant la population à elle-même (éruption du Chichón en 1982), par des messages qui ne parviennent pas ou sont mal interprétés (Armero en 1985), ou par de fréquents refus d'évacuer (région du volcan Galunggung en

Province du Pichincha



Province du Cotopaxi

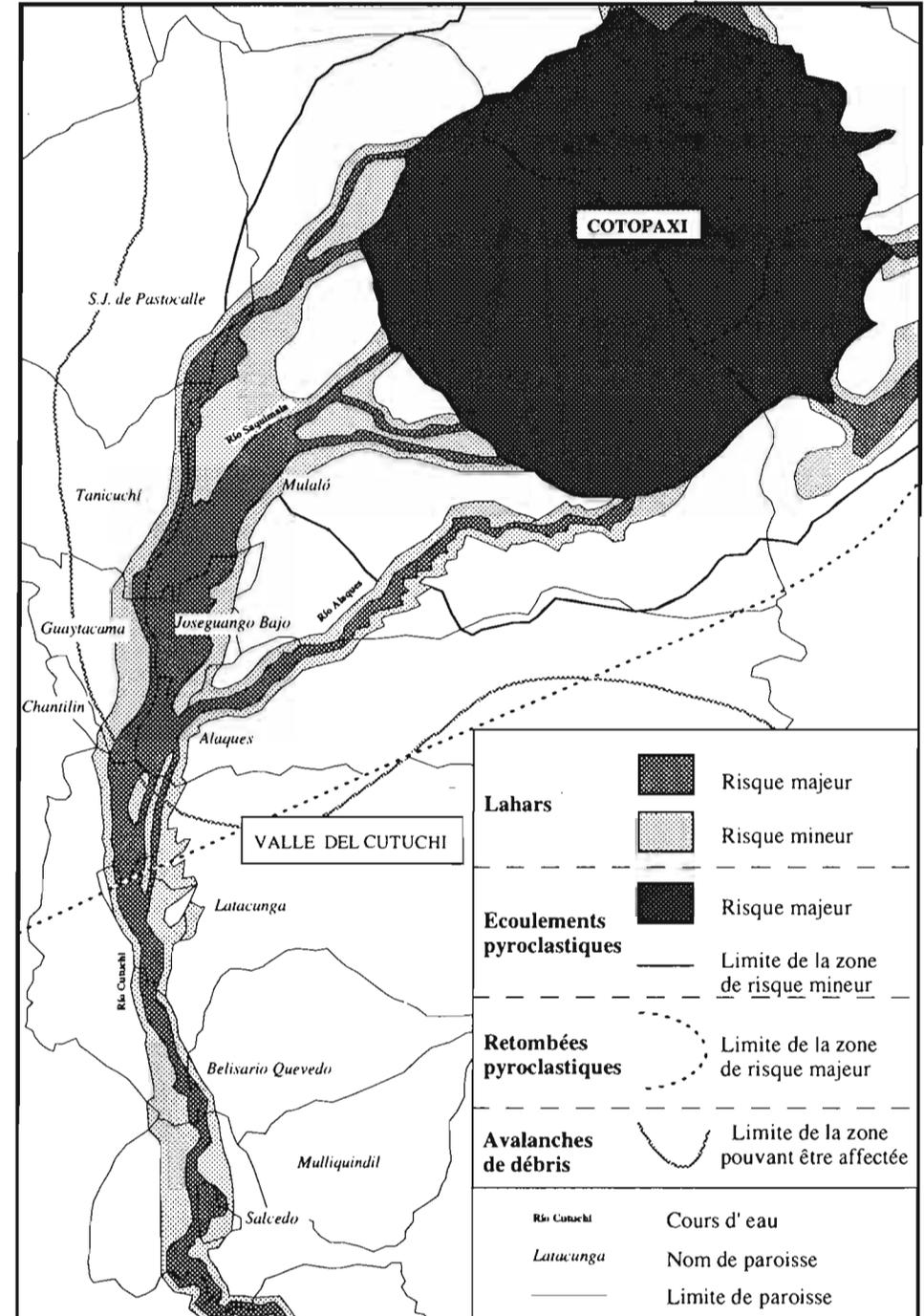


Fig. 1 - Carte des menaces potentielles du volcan Cotopaxi (d'après la carte établie par l'École Polytechnique Nationale de Quito, 1988).

Indonésie en 1982, village de Murillo exposé à une nouvelle menace du Nevado del Ruiz en 1988) (4). À ces situations touchant les collectivités dans leur ensemble, il convient d'ajouter tous les comportements individuels non rationnels, liés entre autres au besoin de confirmation des messages, à l'état de l'environnement, au fait que la famille soit réunie ou pas, au souci que procure la sauvegarde de certains biens (animaux notamment), à l'expérience antérieure, aux connaissances préalables des risques et des moyens de s'en protéger, aux préjugés ou encore au fatalisme (5). La relation déterministe stimulus / réaction (stimulus de l'environnement ou lié aux messages d'alerte quelle que soit la forme) n'est donc ni directe ni optimale, car il existe de nombreux processus médiateurs entre les deux, constituant autant de facteurs de vulnérabilité.

L'un des objectifs des études réalisées dans la région du Cotopaxi a donc été d'identifier et d'analyser ces processus médiateurs, et d'en réaliser une cartographie thématique, puis synthétique. L'analyse des travaux portant sur la question a permis de tracer trois axes de recherche correspondant aux processus guidant la prise de décision des individus dans le choix d'adaptations, notamment en période d'urgence : la perception du risque, la connaissance des moyens de protection et l'existence de facteurs contraignants d'ordre technique et social (tableau 1). Les travaux de recherche se sont appuyés sur une longue campagne d'enquêtes menée auprès de 2 200 personnes habitant les régions exposées au volcan Cotopaxi. Toutes ces personnes ont été localisées dans l'espace au sein de 116 unités territoriales de base (Fig. 3), délimitées en fonction de la nature de la menace et de

Etapes du processus	Processus d'adaptation à moyen ou long terme (1)	Processus d'adaptation à très court terme (2) (Période d'urgence avec alerte)	Axes de recherche
Identification de la menace	Si conscience d'une menace, appréciation de sa probabilité d'occurrence et de sa magnitude	Confirmation de l'exactitude du message concernant la menace	Perception du risque (de la menace et du risque personnel)
Estimation du risque	Estimation des conséquences possibles pour soi et définition du niveau de risque personnel		
<i>Poursuite du processus au dessus d'un certain seuil de perception du risque (variable selon les personnes)</i>			
Recherche des adaptations	Considération de l'éventail des solutions possibles parmi celles qui sont connues	Considération des solutions proposées par les messages et/ou d'autres solutions	Connaissance des moyens de protection
Evaluation des adaptations	Evaluation selon : <ul style="list-style-type: none"> • la compatibilité avec les caractéristiques de l'environnement • la faisabilité technique • la rentabilité de l'opération (efficacité, coût) • la conformité sociale (lois, traditions, etc) 	Evaluation selon : <ul style="list-style-type: none"> • la possibilité d'adopter une ou plusieurs solutions selon les circonstances du moment • l'efficacité supposée des différentes solutions et, si les solutions sont jugées possibles et efficaces, • les aspects socio-culturels 	Facteurs contraignants d'ordre technique et social

En fonction de l'évaluation, choix de l'adaptation qui offre le meilleur résultat

(1) Selon le modèle de Kates (1970), repris dans ses grandes lignes par Burton et al. (1978) et Warnick (1979)

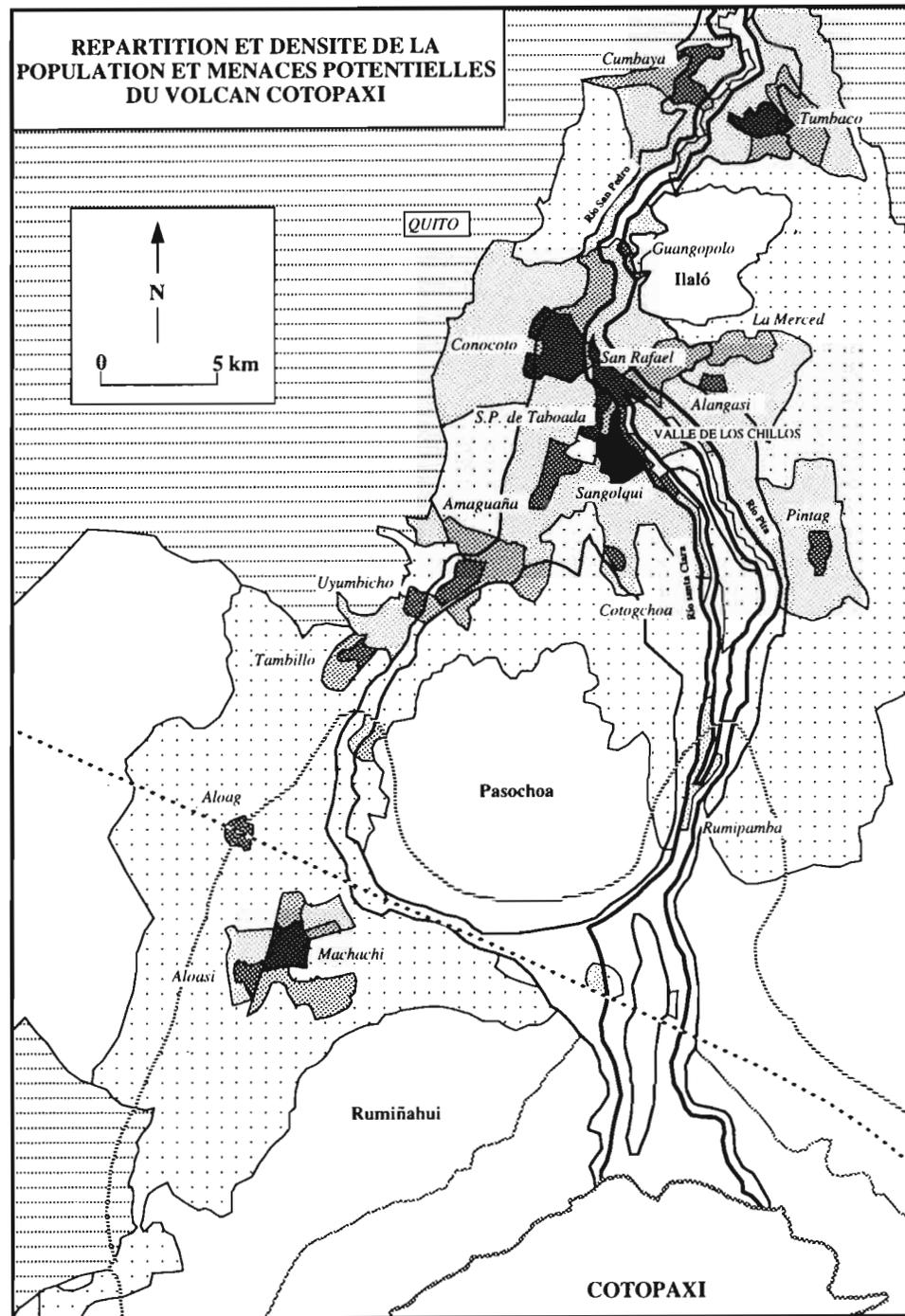
(2) Selon le modèle de Perry (1983)

Tab. 1 - Processus de prise de décision des individus dans le choix d'adaptations, en prévision d'une catastrophe naturelle.

(4) Pour plus de détails sur ces exemples, voir D'Ercole, 1991. Voir également Voight, 1990.

(5) Pour plus d'informations sur ces questions, voir notamment UNDR0, 1987, mais aussi de nombreux autres ouvrages et publications (D'Ercole, 1991, bibliographie)

Province du Pichincha



Province du Cotopaxi

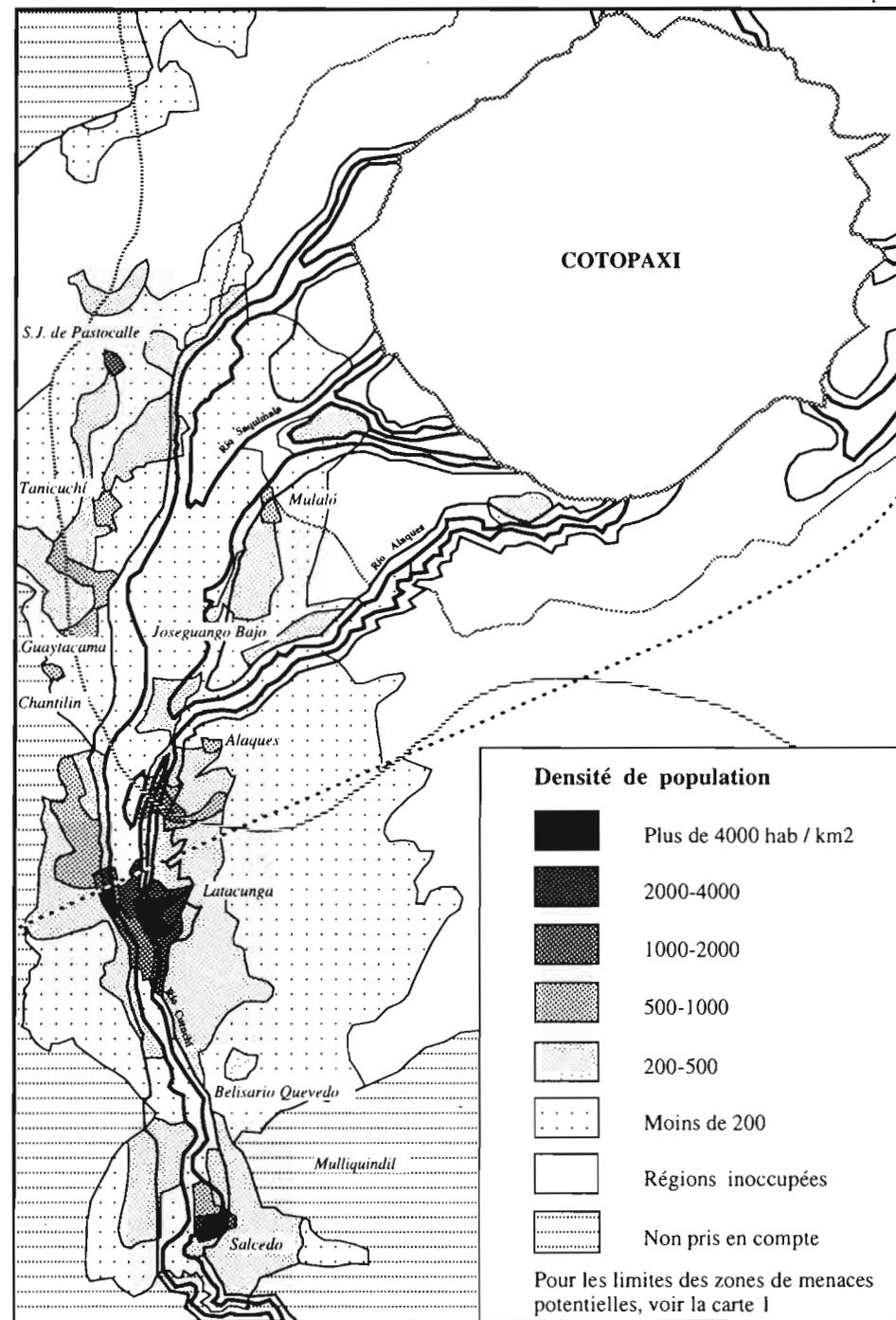


Fig. 2 - Répartition et densité de la population et menaces potentielles du volcan Cotopaxi.

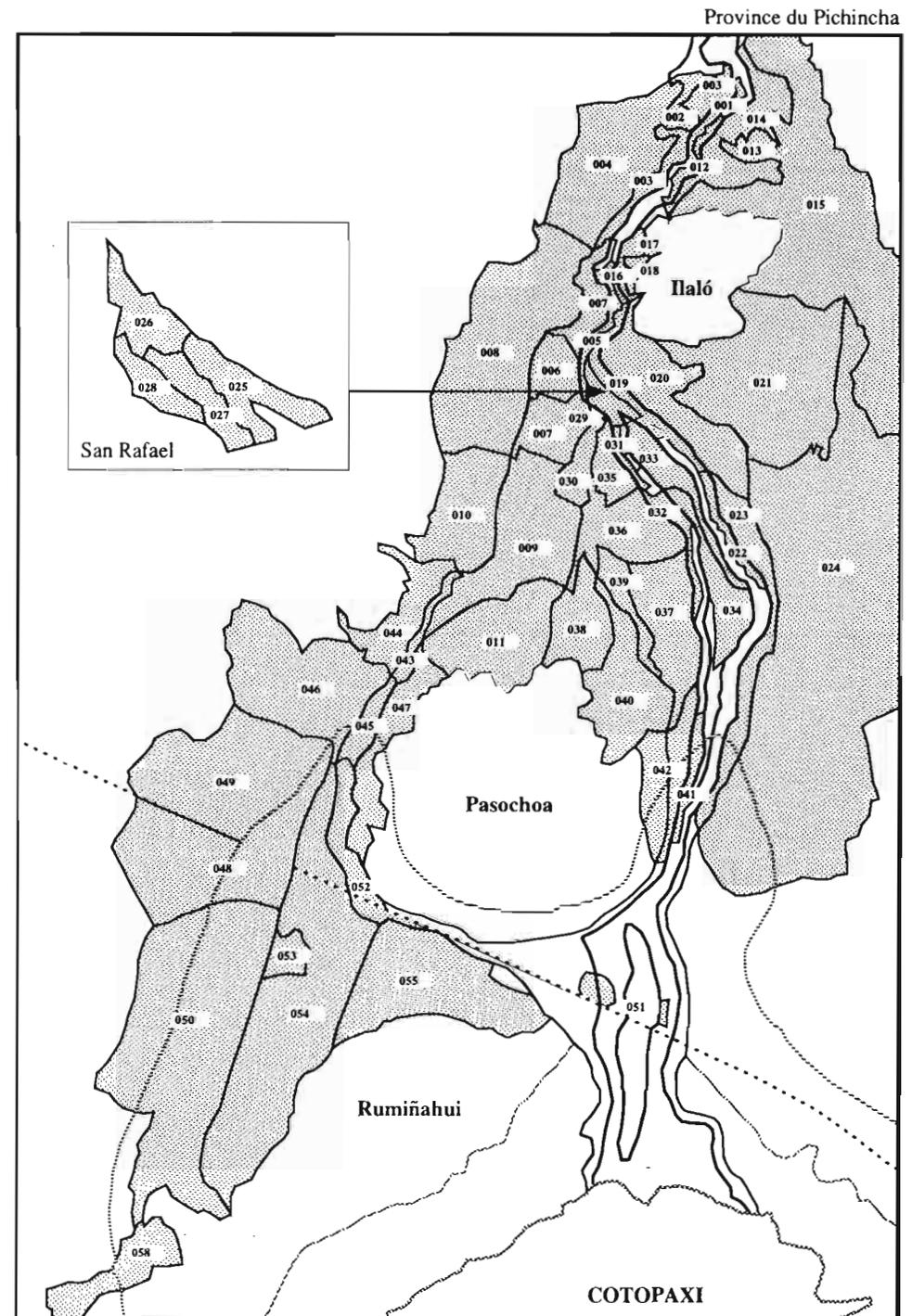
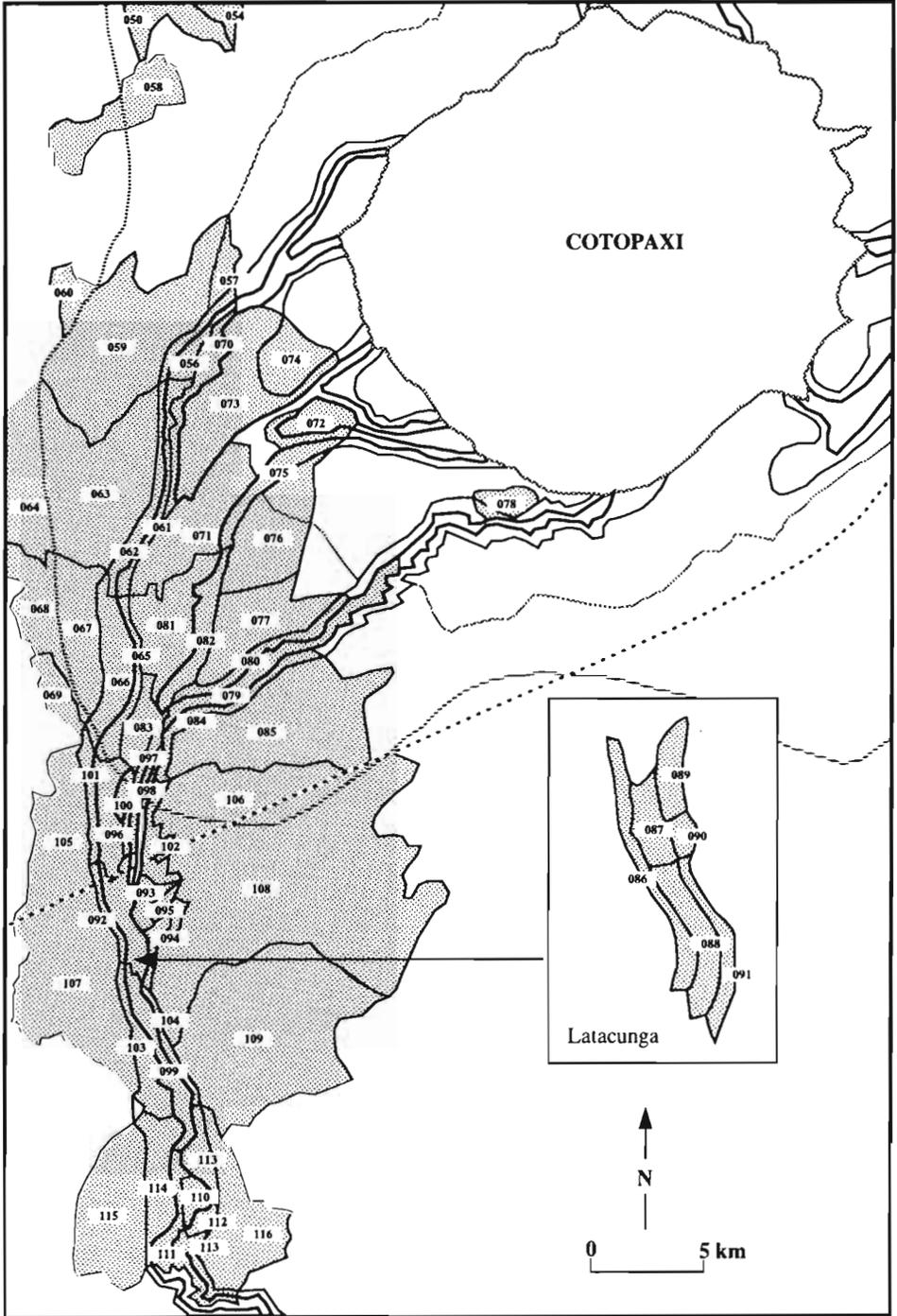


Fig. 3 - Les 116 unités territoriales de base de la région d'étude.



l'intensité du risque, des subdivisions administratives (les paroisses, *parroquias*, correspondant aux communes françaises), du type de population (urbain, péri-urbain, rural villageois, rural des haciendas, rural profond) et de sa densité.

Les réponses au questionnaire proposé ont permis de déterminer des degrés de perception du risque, de connaissance des moyens de protection et d'existence de facteurs contraignants d'ordre social vis-à-vis d'une éventuelle évacuation (tableau 2). Ces variables de premier ordre ont été analysées et cartographiées, par exemple :

- la carte de la perception du risque prenant en compte l'ensemble des secteurs enquêtés et montrant clairement la diminution de la perception avec la distance (6) ainsi que des différences très sensibles entre les provinces du Pichincha et du Cotopaxi (Fig. 4) ;

- la carte de la connaissance des moyens de protection face à une éruption du type de celle du 26 juin 1877 mettant notamment en évidence les erreurs possibles dans le choix des voies d'évacuation ;

- pour ce qui concerne les facteurs contraignants d'ordre social, les cartes des comportements déclarés dans l'hypothèse d'un ordre d'évacuation, et de la confiance vis-à-vis de personnes, organismes ou institutions susceptibles d'intervenir dans la gestion d'une crise (distinction faite entre les intervenants intérieurs et extérieurs à la paroisse).

Ces variables de premier ordre ont également été croisées avec une douzaine de variables explicatives : variables de localisation, socio-économiques, portant sur l'information des populations et ses sources (tableau 2). Les facteurs contraignants d'ordre technique ont été traités séparément et ont également débouché sur la réalisation de documents cartographiques (accessibilité de la population par radio ou par contact direct).

Nous avons enfin tenté, à partir de ces données et documents de base, de réaliser des cartes synthétiques des facteurs de vulnérabilité analysés. Comme pour le reste de l'étude, l'objectif était double : informer et développer une méthodologie. Suivant des méthodes différentes, deux cartes ont ainsi été réalisées : une carte des facteurs de vulnérabilité obtenue à l'aide d'une analyse factorielle et une carte intégrée des facteurs de vulnérabilité bâtie suivant une méthode simple de superposition. Une troisième carte, plus opérationnelle et plus lisible pour un public non initié, fournit enfin une orientation pour des actions de préparation des populations.

2, CARTOGRAPHIE DES FACTEURS DE VULNÉRABILITÉ À PARTIR D'UNE ANALYSE FACTORIELLE

2. 1. Méthodologie

La zone de risque majeur de lahars a été retenue pour cette première carte synthétique qui s'appuie sur une technique d'analyse des données multivariée, l'analyse factorielle. Celle-ci met en relation 616 personnes interrogées dans cette zone, avec les trois variables qui constituent le fondement de la recherche : la perception du risque, la connaissance des

(6) À 5 km du volcan, plus de 65% de la population interrogée a conscience d'être personnellement en danger mais ce chiffre tombe à moins de 20% à plus de 40 km du volcan. Or, compte tenu des caractéristiques de l'écoulement des lahars, le danger n'est pas forcément proportionnel à la distance. Rappelons qu'Armero se situait à environ 50 km du Nevado del Ruiz.

VARIABLES	DESIGNATION DES MODALITES ET CODIFICATION		
VARIABLES DE PREMIER ORDRE (facteurs de vulnérabilité)	Perception du risque personnel	1- Elevée à très élevée 2- Relativement élevée 3- Relativement faible 4- Faible à très faible	
	Connaissance des moyens de protection	5- Indication de mesures efficaces 6- Indication de mesures pouvant être dangereuses 7- Ignorance déclarée	
	Facteurs contraignants d'ordre social	8- Pas ou peu de facteurs de ce type 9- Existence (évacuation sous condition) 10- Existence (refus de l'évacuation)	
Variables de localisation			
AUTRES VARIABLES RETENUES POUR L'ETUDE (variables explicatives)	Distance au volcan	<ul style="list-style-type: none"> • 15-25 km • 26-35 km • 36-45 km • plus de 45 km 	
	Obstacles topographiques masquant le Cotopaxi	<ul style="list-style-type: none"> • Aucun obstacle • Obstacles mineurs • Obstacles majeurs 	
	Variables socio-économiques		
	Niveau socio-économique	<ul style="list-style-type: none"> • Faible à très faible • Relativement faible • Relativement élevé • Elevé à très élevé 	
	Activité professionnelle	<ul style="list-style-type: none"> • Prof. libérales, enseignants • Personnel administratif • Commerçants • Artisans • Ouvriers • Pers. de services • Agriculteurs 	
	Type de population	<ul style="list-style-type: none"> • Urbain • Péri-urbain • Rural villageois • Rural haciendas • Rural "profond" 	
	Sexe	<ul style="list-style-type: none"> • Homme • Femme 	
	Age	<ul style="list-style-type: none"> • 15-29 ans • 30-44 ans • 45-59 ans • 60 ans et plus 	
	Nombre de personnes dans le ménage	<ul style="list-style-type: none"> • 1 ou 2 • 3 ou 4 • 5 ou 6 • 7 et plus 	
	Temps de résidence	<ul style="list-style-type: none"> • Moins de 5 ans • 5-14 ans • 15 et plus (a vécu ailleurs) • Depuis toujours 	
	Confiance	<ul style="list-style-type: none"> • Personne ou famille • Intérieur paroisse • Intérieur et extérieur • Extérieur paroisse 	
	Information et sources		
	Connaissance de la catastrophe du Nevado del Ruiz	<ul style="list-style-type: none"> • N'en a jamais entendu parler • En a entendu parler 	
	Source d'information sur le Cotopaxi	<ul style="list-style-type: none"> • Aucune • Conversations • Médias • Conversations et médias • Ecole, protection civile 	

Tab. 2 - Principales variables utilisées pour l'étude de la vulnérabilité des populations exposées à l'activité du Cotopaxi.

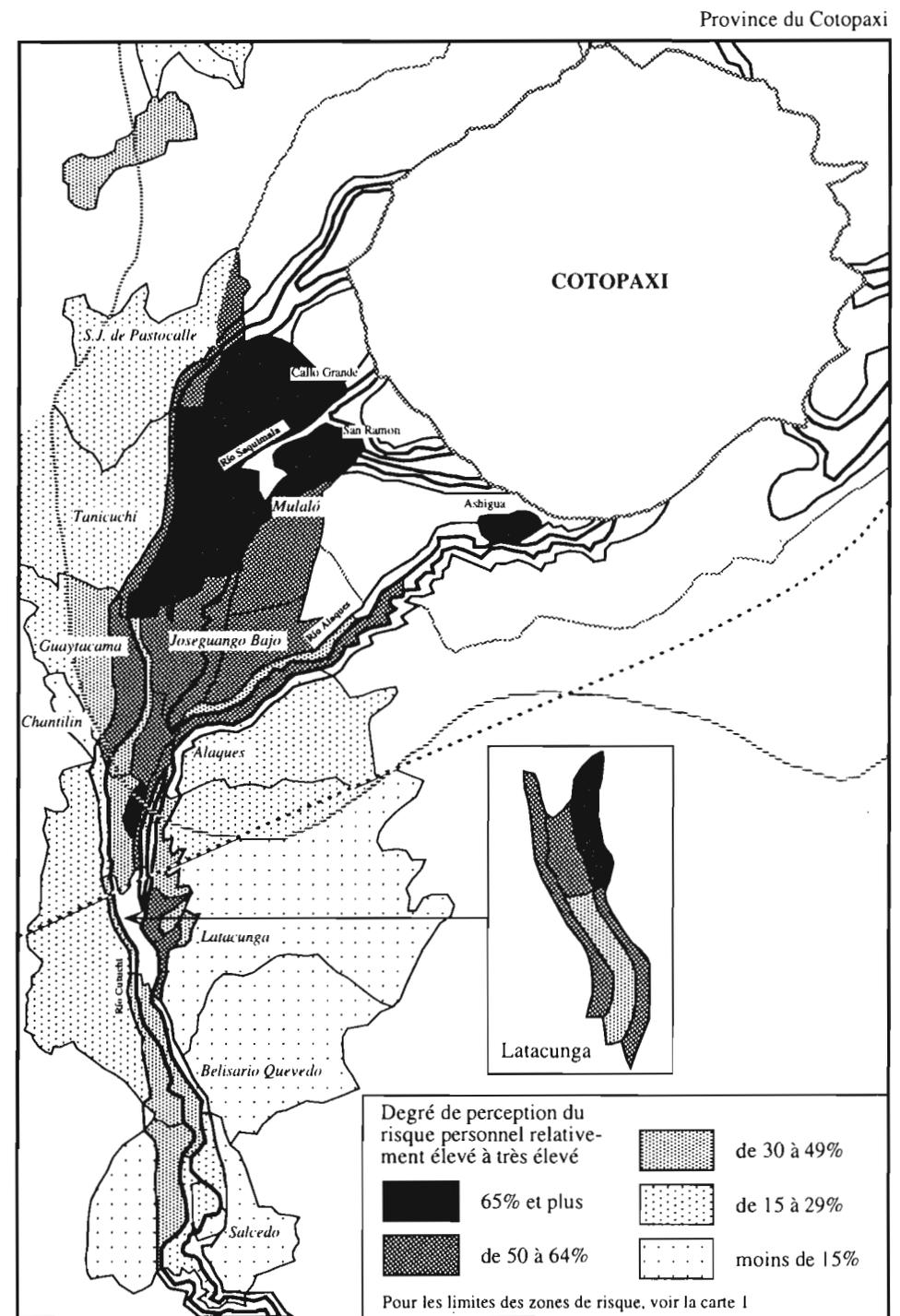
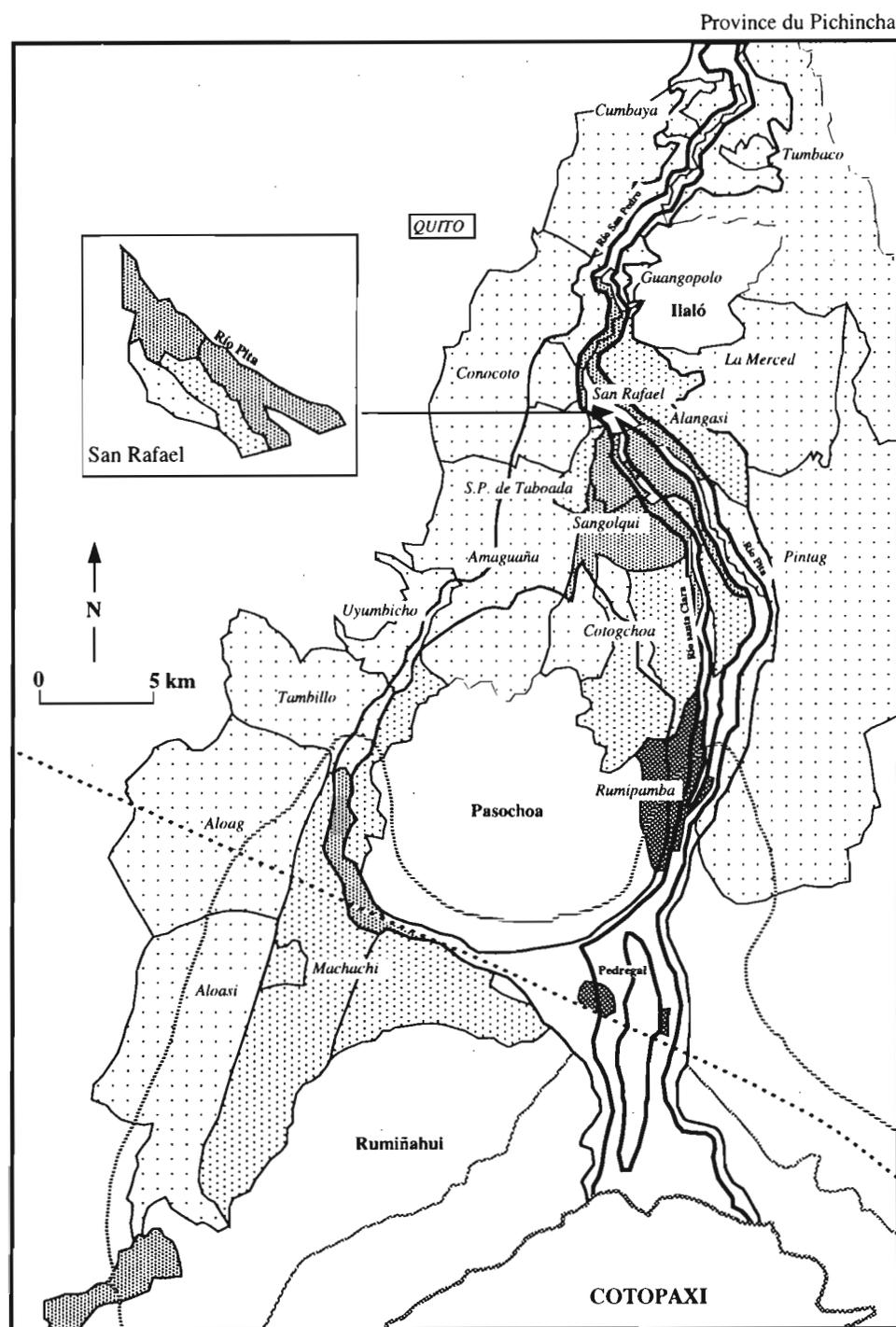


Fig. 4 - Carte de la perception du risque personnel lié à une éventuelle éruption du volcan Cotopaxi.

moyens de protection et l'existence de facteurs contraignants d'ordre social (7). Ces trois variables, décomposées en 10 modalités (tableau 2), sont des variables qualitatives ordinales. Le choix du traitement statistique s'est ainsi porté sur une analyse factorielle des correspondances (A.F.C.).

La figure 5 représente le plan factoriel correspondant à l'échantillon statistique. Seuls les deux premiers axes ont été retenus, car ils présentent l'avantage de concentrer le plus d'information et de prendre fortement en compte les trois variables retenues. Il s'agit en fait d'un plan semi-brut dans la mesure où, dans le nuage de points, les modalités ont été distinguées des individus, et ces derniers ont été figurés selon la province et la paroisse d'origine. Cependant, en dépit d'une opposition facilement observable entre les provinces du Pichincha et du Cotopaxi, le document reste difficilement interprétable. C'est pourquoi, il s'est avéré utile de déterminer au préalable, sur le plan factoriel, des aires répondant à des types de vulnérabilité destinés, dans un deuxième temps, à être mis en relation avec les individus.

Dans la figure 6, les points associés aux modalités respectives de chacune des trois variables ont été reliés et un sens, répondant à une vulnérabilité croissante, a été donné aux courbes ainsi construites. En fonction de l'emplacement et du sens des modalités, ont été tracées, de manière empirique, neuf aires correspondant à autant de types de vulnérabilité. Si l'on considère les facteurs contraignants d'ordre social comme étant les facteurs de comportement les plus problématiques du secteur d'étude (8), la vulnérabilité croît du type 1 au type 7, les types 8 et 9 n'étant que des types de transition. Il devient alors plus facile d'interpréter le plan factoriel semi-brut (Fig. 5), du moins à l'échelle provinciale, et possible d'envisager une étude plus fine, à celle des paroisses.

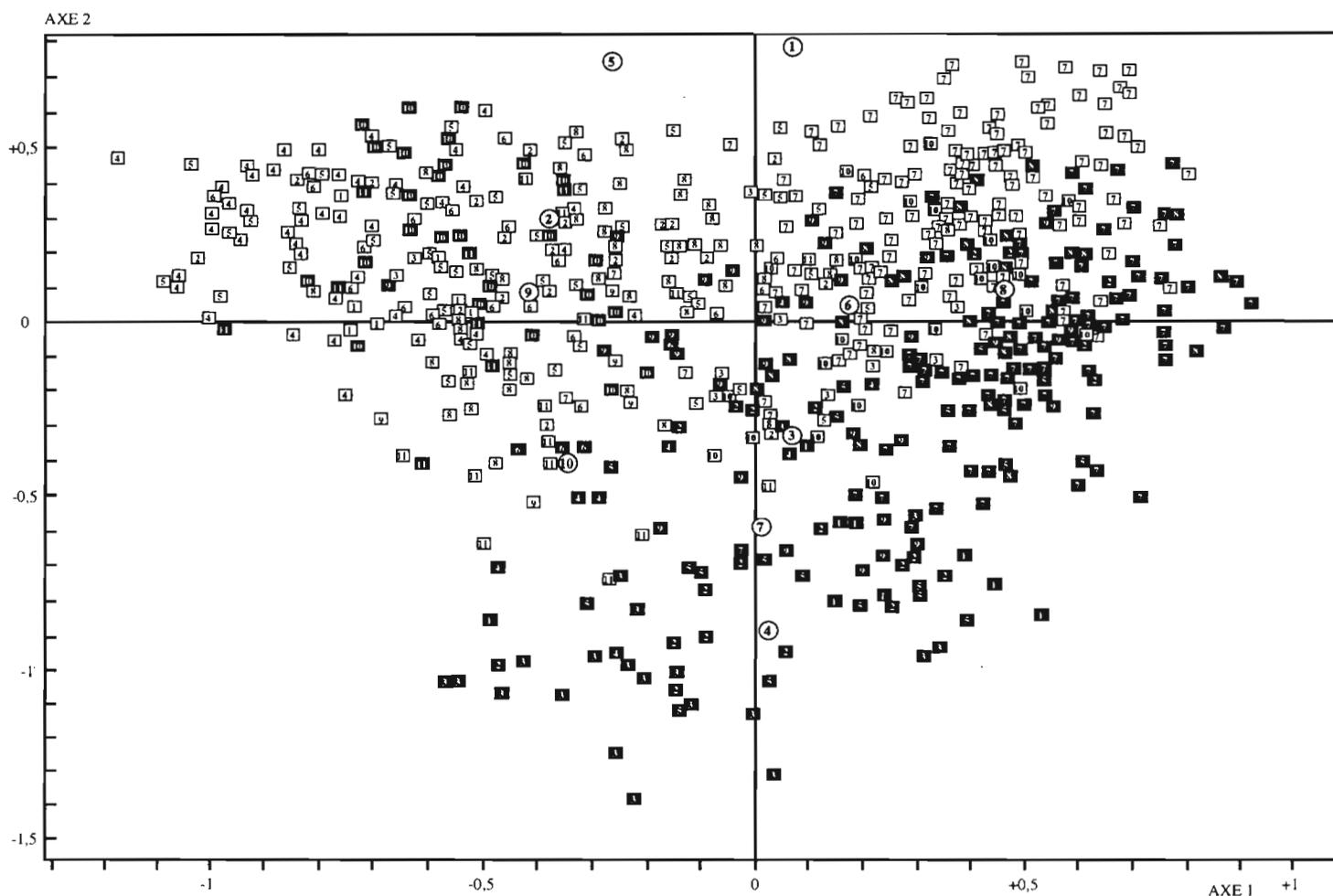
3. 2. Les contrastes à l'échelle des provinces

À l'échelle provinciale, les contrastes sont particulièrement sensibles. La vulnérabilité de la population de la province du Pichincha se caractérise globalement par une faible perception du risque et l'ignorance des moyens de protection mais, en contrepartie, l'impact potentiel des facteurs contraignants d'ordre social est plutôt faible. Dans la province du Cotopaxi, la perception du risque est plutôt élevée, les moyens de protection un peu mieux ou plutôt moins mal connus, mais le comportement en cas d'ordre d'évacuation risque de poser problème en raison du poids des facteurs contraignants d'ordre social. Deux explications majeures permettent de comprendre cette différence.

D'une part, compte tenu d'une sensibilisation très insuffisante de la population à la question des risques, la perception du risque est élevée là où la mémoire collective des catastrophes passées est encore présente. C'est globalement le cas dans la province du

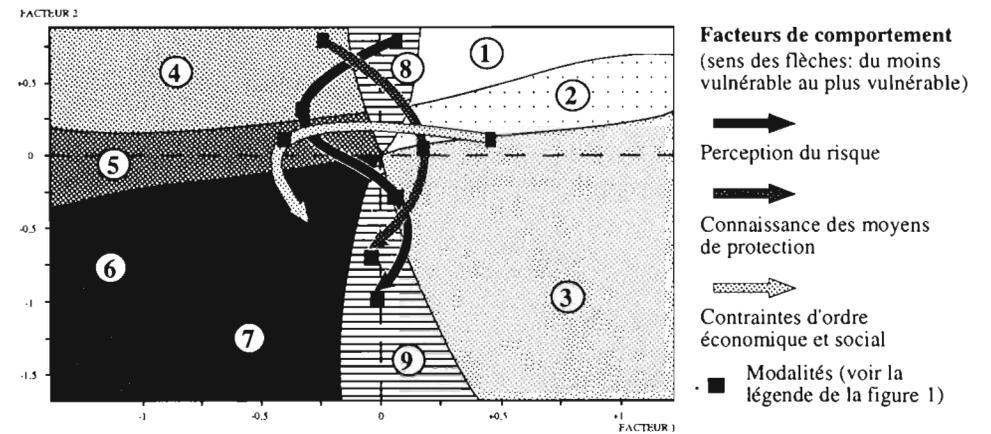
(7) En fait l'analyse a porté sur un plus grand nombre de variables : les trois variables de premier ordre qui ont permis la réalisation cartographique et qui seules, sont retenues dans cet article, mais aussi 12 autres variables de second ordre, explicatives (tableau 2), qui ont par ailleurs permis de réaliser une typologie sociale de la vulnérabilité (D'Ercole, 1991).

(8) L'enquête a par ailleurs indiqué que 50% des personnes interrogées dans la zone de risque majeur de lahars émettent de sérieuses réserves quant à l'éventualité d'une évacuation ou déclarent qu'elles la refuseraient quelles que soient les conditions. Parmi les principales raisons évoquées, outre les attitudes fatalistes : les problèmes d'ordre logistique concernant l'évacuation elle-même, mais surtout les conditions de vie durant la période d'évacuation, le souci posé par les biens possédés (les animaux notamment), la crainte du pillage, celle de l'expropriation, l'absence de confiance vis-à-vis de ceux qui émettraient l'ordre d'évacuation, etc.



Individus représentés selon la province et la paroisse de résidence		Variables et modalités	
Province du Pichincha	Province du Cotopaxi	Perception du risque personnel	
1 Cumbaya	1 San Juan de Pastocalle	1 Elevée à très élevée	2 Relativement élevée
2 Conocoto	2 Tanicuchi	3 Relativement faible	4 Faible à très faible
3 Tumbaco	3 Guaytacama	Connaissance des moyens de protection	
4 Guangopolo	4 Mulalo	5 Indication de mesures efficaces	
5 Alangasi	5 Alaquas	6 Indication de mesures pouvant être dangereuses	
6 Pintag	6 Joseguango Bajo	7 Ignorance déclarée	
7 San Rafael	7 Latacunga urbain	Facteurs contraignants d'ordre social	
8 Sangolqui urbain	8 Latacunga rural	8 Pas ou peu de facteurs de ce type	
9 Sangolqui rural	9 Belisario Quevedo	9 Existence (évacuation sous condition)	
10 Rumipamba	10 Salcedo urbain	10 Existence (refus de l'évacuation)	
11 Machachi	11 Salcedo rural		

Fig. 5 - Classification par A.F.C. de la population interrogée dans la zone de risque majeur de lahars (plan factoriel semi-brut constitué par les axes 1 et 2).



Types	Perception du risque	Moyens de protection efficaces	Facteurs contraignants d'ordre social	Commentaires
①	Elevée à très élevée	Plutôt connus	Impact potentiel relativement faible	Vulnérabilité la moins prononcée
②	Plutôt élevée	Plutôt ignorés		Vulnérabilité essentiellement liée aux facteurs cognitifs
③	Faible à très faible	Ignorés		
④	Elevée à très élevée	Plutôt connus	Impact potentiel élevé (conditions données à l'ordre d'évacuation)	Vulnérabilité essentiellement liée aux facteurs contraignants d'ordre social
⑤	Plutôt élevée	Plutôt ignorés		
⑥	Faible à très faible	Ignorés		Vulnérabilité la plus prononcée liée à la fois aux facteurs cognitifs et aux facteurs contraignants
⑦	Faible à très faible	Ignorés	Impact potentiel très élevé (refus de l'ordre d'évacuation)	
⑧	Plutôt élevée à très élevée	Plutôt connus	Transition entre types 1/2 et types 4/5	
⑨	Faible à très faible	Ignorés	Transition entre type 3 et type 7	

Fig. 6 - Les types de vulnérabilités selon les données de l'analyse factorielle.

Cotopaxi déjà fortement peuplée lors des dernières grandes éruptions. Cette mémoire collective est pratiquement inexistante dans la province du Nord, notamment dans le bassin de Los Chillos pratiquement vide d'hommes il y a encore quelques décennies. Elle est utile pour maintenir la perception du risque à un niveau relativement élevé, elle permet de se

souvenir du danger, mais elle n'est pas suffisamment fidèle ou adaptée aux conditions de vie actuelles pour fournir des solutions viables de protection en cas de crise. Et, dans ce domaine, l'opposition entre les deux provinces est moins nette.

D'autre part, ces provinces se différencient par leur composition sociale. La population des régions menacées de la province du Pichincha est plus urbaine, du moins dans les mentalités, car très proche de Quito d'où elle provient très souvent, et le niveau économique et social est globalement plus élevé. Mis à part la capitale provinciale et la petite ville de Salcedo, la population méridionale est essentiellement paysanne, plus pauvre. Les communautés paysannes indiennes y sont nombreuses et la méfiance vis-à-vis des initiatives extérieures est souvent très forte. Malgré une perception du risque plus élevée, l'évacuation serait plus délicate à mener dans cette province (d'après l'enquête, plus de 60% des personnes interrogées dans cette province sont susceptibles de poser problème en cas d'évacuation, alors que ce chiffre est de l'ordre de 40% dans la province du Pichincha).

3. 3. Les types paroissiaux de vulnérabilité

Ces premières observations, très générales, ont été nuancées à l'échelle des paroisses. Pour cela, ont été disposés, sur un fond de carte paroissial, les plans factoriels représentant la répartition des nuages de points des individus de chacune des paroisses considérées (Fig. 7). De plus, à Sangolqui, Latacunga et Salcedo, la population urbaine a été distinguée de la population rurale. Les aires de vulnérabilité étant également représentées, il est alors possible de discerner des types paroissiaux de vulnérabilité. Les mêmes phénomènes ont été présentés d'une manière différente en disposant sur le plan factoriel les noms de chacune des paroisses approximativement sur le centre de gravité du nuage de points, ce qui donne un résultat un peu moins précis mais plus synthétique (Fig. 8). Quatre grands types paroissiaux de vulnérabilité peuvent être distingués.

3. 3. 1. Le type urbain

Les moins vulnérables sont manifestement les secteurs urbains des paroisses de Latacunga, Sangolqui et Salcedo, dont plus de 15 000 habitants vivent en zone de risque majeur de lahars. Néanmoins, ces villes présentent des degrés de vulnérabilité sensiblement différents. Le poids des facteurs contraignants peut être considéré comme faible dans chacun des cas, mais la différence est liée à la perception du risque et à la connaissance des moyens de protection qui rend Salcedo plus vulnérable que Sangolqui, et Sangolqui plus vulnérable que Latacunga. Cet ordre peut être rattaché à la mémoire locale des conséquences des éruptions du Cotopaxi. Latacunga est la ville la plus fréquemment affectée et plusieurs centaines de ses habitants ont péri sous l'effet des lahars aux XVIII^e et XIX^e siècles. Sangolqui a essentiellement connu des dégâts matériels en marge de la ville de l'époque, qui ne bordait pas encore tout à fait le rio Santa Clara susceptible d'acheminer les lahars. La ville de Salcedo n'a jamais été touchée directement, mais les lahars ont traversé les terrains inoccupés alors, entre le noyau ancien et le rio Cutuchi. Ces terrains font, depuis une quinzaine d'années, l'objet de la convoitise de promoteurs et les constructions se développent très rapidement.

3. 3. 2. *Le type péri-urbain*

Le deuxième type, représentatif d'une vulnérabilité plus accentuée que dans le cas précédent, est représenté par un ensemble de paroisses de la province du Pichincha localisées dans les bassins de Los Chillos et de Tumbaco. Il s'agit de San Rafael, Cumbaya, Guangopolo, Conocoto, Alangasi, de la partie rurale de Sangolqui et, à un moindre degré, de la paroisse de Tumbaco. Le cas de San Rafael, sensiblement différent, justifie la distinction de deux sous-types :

- type péri-urbain pur

Ce type est représenté par la paroisse de San Rafael dont plus de 5 000 personnes sont installées dans la zone de risque majeur de lahars. La population issue du noyau originel est très faible par rapport à celle qui, en peu d'années, est venue depuis Quito s'installer dans cette paroisse au cadre et au climat particulièrement agréables. Le niveau socio-économique est élevé, comme l'est celui de la confiance vis-à-vis des organismes ou institutions extérieures à la paroisse, susceptibles d'intervenir en cas de crise. San Rafael est d'ailleurs la seule paroisse du secteur d'étude dont la population accorde une plus grande confiance aux institutions extérieures plutôt qu'à celles de l'intérieur, ce qui s'explique par son caractère essentiellement résidentiel et une vie professionnelle au sein de la capitale. Cette population ne devrait pas, logiquement, s'opposer à un ordre d'évacuation. Elle demeure cependant vulnérable dans la mesure où l'absence d'une quelconque tradition orale fait que la conscience du risque reste globalement faible. Mais le plus inquiétant, peut-être, est l'ignorance des moyens de protection dans un secteur parcouru par plusieurs rios susceptibles d'acheminer le danger et de générer de graves problèmes logistiques en cas d'urgence.

- type péri-urbain mixte

Également placées dans le type péri-urbain, les autres paroisses (environ 5000 personnes vivant dans la zone de risque majeur de lahars) présentent, à la différence de San Rafael, une population plus diversifiée. Le développement des secteurs péri-urbains est de plus en plus marqué, mais il subsiste un ou plusieurs noyaux anciens de population villageoise ou paysanne. Dans les plans factoriels, les nuages de points des individus traduisent bien ce phénomène et il est manifeste, comme cela peut facilement s'observer à Conocoto, Tumbaco ou Alangasi, qu'au moins deux types de populations cohabitent. Le point commun de toutes ces paroisses (y compris San Rafael) est la faiblesse de la perception du risque et l'ignorance des moyens de protection. En revanche, le comportement en cas d'ordre d'évacuation risque d'être hétérogène, compte tenu de niveaux socio-économiques, d'un degré de confiance vis-à-vis des organismes de protection civile et de modes de vie sensiblement différents. Pour simplifier, à une vie communautaire assez marquée au sein des noyaux villageois s'oppose un individualisme très net des péri-urbains, ce qui peut engendrer des difficultés en cas d'évacuation.

3. 3. 3. *Le type rural à forte mémoire collective*

Le troisième type de vulnérabilité regroupe une majorité de paroisses de la province du Cotopaxi (Mulaló, Tanicuchi, Alagues, Joseguango Bajo, San Juan de Pastocalle, la partie

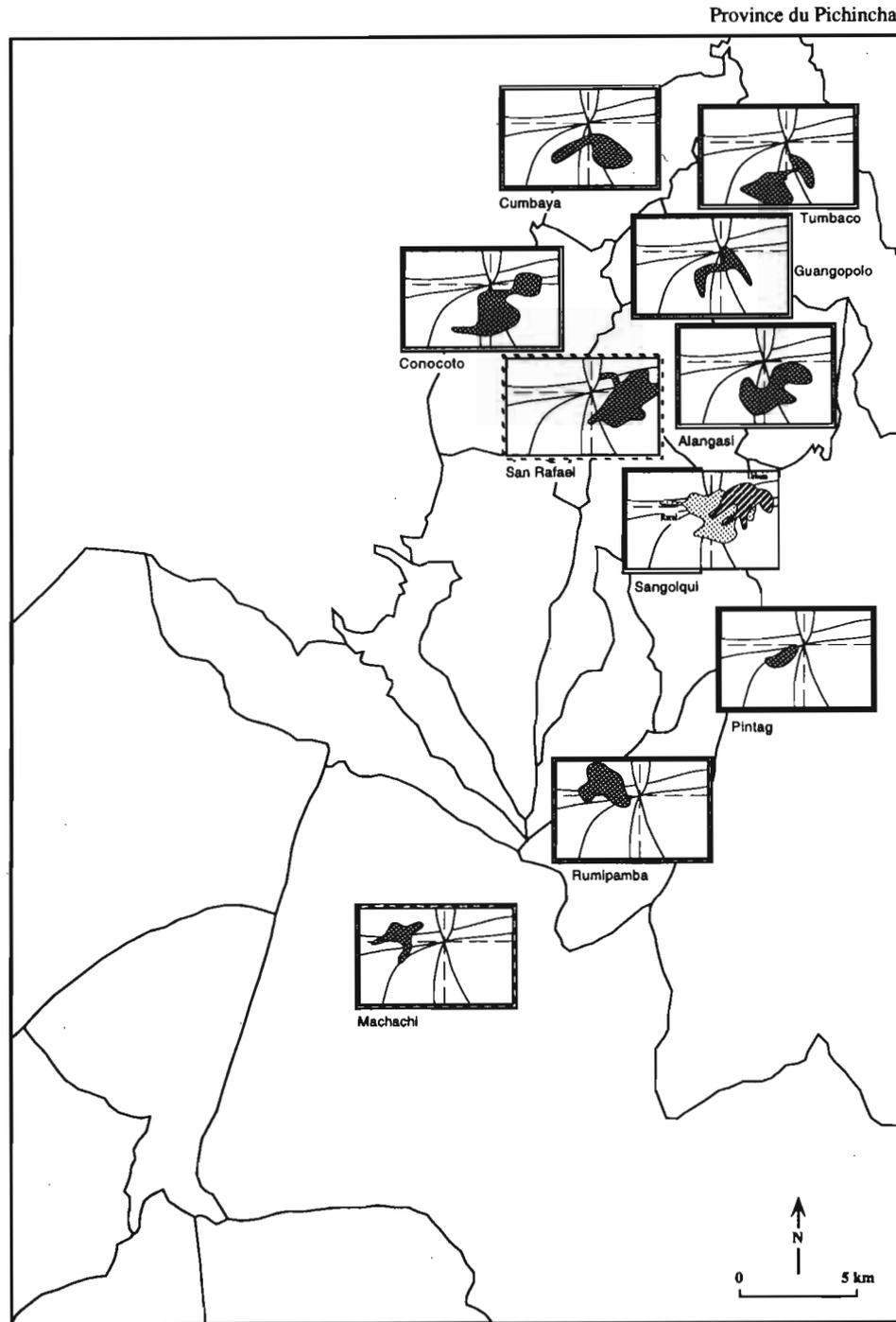


Fig. 7 - Carte des types paroissiaux de vulnérabilité, selon la répartition des nuages de points dans le plan factoriel des individus (zone de risque majeur des lahars).

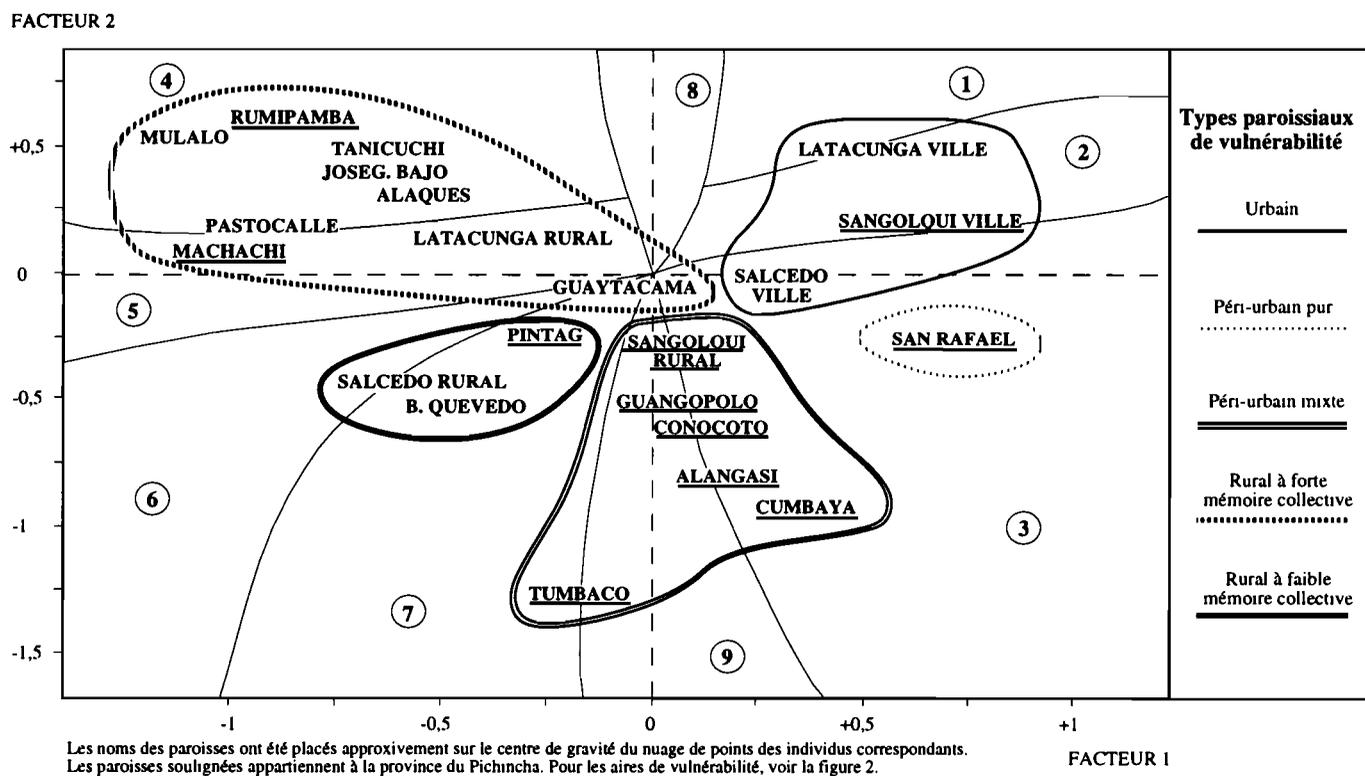


Fig. 8 - Types paroissiaux de vulnérabilité (zone de risque majeur de lahars).

rurale de Latacunga et, dans une certaine mesure, Guaytacama), ainsi que deux paroisses de la province septentrionale (Rumipamba et Machachi dont la zone de risque majeur de lahars, la seule considérée ici, se situe exclusivement en milieu rural). Dans ces paroisses, plus de 6 000 personnes sont installées dans la zone de risque majeur de lahars

Ces paroisses rurales, au peuplement ancien, ont toutes plus ou moins souffert du volcan durant les siècles passés, mais les éruptions ont été plus durement ressenties par certaines d'entre elles, comme Rumipamba et surtout Mulaló. La perception du risque, alimentée par une mémoire collective vivace, y est parfois très élevée. Les moyens de protection sont globalement mieux connus qu'ailleurs, mais il s'agit là d'une appréciation toute relative qui ne doit pas masquer de réelles faiblesses. Néanmoins, le trait de vulnérabilité le plus marquant est lié aux caractéristiques économiques et sociales de la population. En l'état actuel des choses, les refus d'évacuer peuvent être nombreux en cas d'urgence.

Des sous-types peuvent être distingués, le plan factoriel tendant à indiquer que ces problèmes seront moins aigus dans les paroisses les moins isolées socialement et géographiquement (Guaytacama et la partie rurale de Latacunga, les plus proches de la capitale provinciale). Tanicuchi, Alaques et Joseguango Bajo font pour leur part figure de paroisses intermédiaires entre les deux premières et le groupe plus préoccupant constitué par Rumipamba, Mulaló, San Juan de Pastocalle et Machachi.

3. 3. 4. *Le type rural à faible mémoire collective*

Le dernier groupe est représenté par Pintag et surtout Belisario Quevedo et la partie rurale de Salcedo. Ce sont là vraisemblablement les paroisses les plus vulnérables de la région d'étude, du moins en zone de risque majeur de lahars. Les populations occupant cette zone sont heureusement relativement peu nombreuses (moins d'un millier de personnes au total). Mais il faudrait ajouter à cet effectif une partie des habitants d'autres paroisses, notamment celles qui, comme Tumbaco, comportent au moins deux types de populations dont l'un d'entre eux présente, au vu de la répartition des nuages de points, des caractéristiques comparables à celles de Belisario Quevedo ou de la partie rurale de Salcedo. Cette vulnérabilité cumule une faible à très faible perception du risque (la mémoire collective n'a retenu aucune conséquence notable des éruptions passées du Cotopaxi et les populations de ces paroisses sont pour la plupart éloignées du volcan), l'ignorance des moyens de protection et, comme dans le cas précédent, l'existence de facteurs contraignants d'ordre social. De plus, ce type de vulnérabilité est plutôt diffus dans l'espace, ce qui le rend plus difficilement saisissable.

4. LA CARTOGRAPHIE INTÉGRÉE DES FACTEURS DE VULNÉRABILITÉ

4. 1. **Méthodologie**

La carte intégrée des facteurs de vulnérabilité prend en compte un espace sensiblement plus important que la carte réalisée à partir de l'analyse factorielle. Aux secteurs situés en zone de risque majeur de lahars ont été rajoutés des secteurs soumis à d'autres types de menaces (chutes de cendres, écoulements pyroclastiques), mais dont le risque commun est d'être cernés par les lahars dans l'hypothèse d'une éruption comparable à celle de 1877. Si une évacuation préventive ne peut être pratiquée suffisamment tôt, la population se trouverait ainsi piégée et de nombreuses personnes seraient susceptibles de commettre de

graves erreurs de jugement en tentant par elles-mêmes de trouver un lieu de refuge. Plus de 10 000 personnes vivent dans ce type de zone, ce qui porte à environ 45 000 le nombre de personnes prises en compte par la carte, parmi lesquelles 834 (occupant 46 des 116 secteurs de base) ont été soumises à l'enquête.

Dans ce document, les informations recueillies tout au long de l'étude à propos des facteurs physiques, techniques et humains de vulnérabilité (9) ont été synthétisées et intégrées par un système de superposition de figurés (Fig. 9). Trois niveaux de lecture sont possibles selon le type de figuré employé (voir la légende) :

- Les figurés linéaires (à l'exception des rivières, de la route Panaméricaine et des limites des secteurs) matérialisent les facteurs physiques. Les limites des zones de risque sont directement issues de la carte des menaces potentielles. De plus, ont été indiqués, en divers points, les temps approximatifs de passage des lahars dans l'optique d'une éruption du type de celle de 1877.

- Les trames représentent les facteurs cognitifs et sociaux de vulnérabilité. Un jeu de hachures (verticales lorsque la perception du risque est faible, horizontales lorsque les moyens de protection sont ignorés) et de grisés (ordonnés selon l'accroissement de la vulnérabilité en fonction du comportement déclaré en cas d'ordre d'évacuation et des principaux facteurs sociaux de comportement), permet de distinguer, pour chaque unité territoriale de base, des types précis de vulnérabilité liés à ces facteurs.

Pour conserver une logique de lecture, l'ensemble des possibilités théoriques ont été présentées en légende, mais le nombre de secteurs répondant à une situation réelle a été signalé. Il est ainsi facile d'observer qu'il n'existe aucun secteur affichant une vulnérabilité humaine minimale (forte perception du risque, bonne connaissance des moyens de protection et absence de facteurs contraignants d'ordre social), alors qu'à l'opposé huit secteurs affichent une vulnérabilité maximum.

Par ailleurs, afin de réduire la complexité de la carte, chacun des facteurs considérés comporte deux modalités (connaissance/ignorance, comportement déclaré positif ou négatif, etc.). Le seuil de 50% de la population répondant à chacune des situations a été choisi pour les déterminer (10).

- Les figurés ponctuels correspondent aux facteurs techniques et logistiques de vulnérabilité pris en compte dans cette carte, à la différence de la précédente. Les symboles de forme carrée ordonnent les problèmes d'accessibilité de la population dans l'hypothèse de la diffusion d'un message d'alerte (compte tenu de l'éloignement des principales voies de communications, de la dispersion de la population et de l'accessibilité de cette dernière par radio ou par contact direct). Les symboles circulaires indiquent les principales difficultés logistiques prévisibles dans l'hypothèse d'une évacuation d'urgence.

(9) Il s'agit principalement des informations consignées dans les cartes suivantes : menaces potentielles du volcan Cotopaxi, répartition de la population, perception du risque personnel, connaissance des moyens de protection et problèmes logistiques, comportement déclaré dans l'hypothèse d'un ordre d'évacuation, niveau socio-économique et confiance, accessibilité de la population par radio ou par contact direct.

(10) Par exemple, ont été considérés comme secteurs présentant une forte perception du risque, ceux dont 50% de la population interrogée ou plus, affiche une perception du risque assez élevée à très élevée. Il s'agit là, bien entendu, de regroupements simplificateurs mais qui demeurent suffisamment significatifs. En outre, pour plus de précisions, il est toujours possible de se reporter aux cartes thématiques.

4. 2. Les diagnostics locaux

La carte intégrée des facteurs de vulnérabilité peut permettre, à l'instar de la carte réalisée à partir de l'analyse factorielle, de mettre en évidence des types régionaux et locaux de vulnérabilité. Cependant, l'intérêt de ce document est avant tout de suivre une démarche inverse et de réaliser des diagnostics locaux de vulnérabilité à partir de chacun des 46 secteurs considérés qui pourraient constituer autant d'unités préventives. Nous prendrons, pour nous expliquer, quelques exemples représentatifs de situations suffisamment contrastées.

La paroisse de San Rafael est subdivisée en quatre quartiers délimités par trois rivières potentiellement très dangereuses : les rios Pita, Santa Clara et San Pedro. Les habitants de ces quartiers présentent des caractères physiques et humains de vulnérabilité comparables : ils sont tous situés en zone de risque majeur de lahars, leur perception du risque est globalement faible et les moyens de protection sont ignorés. Cependant, en raison d'un niveau socio-économique élevé et d'une forte confiance vis-à-vis des pouvoirs officiels, ils ne devraient, dans l'ensemble, opposer aucune résistance à un ordre d'évacuation, ce que confirme l'enquête par ailleurs. On notera néanmoins qu'une partie de la population du quartier «Général Enriquez», pourrait poser quelques problèmes, ce qui s'explique par la présence dans ce quartier, constituant le noyau ancien de la paroisse, d'une population plus hétérogène sur le plan social.

La population de San Rafael devrait être facilement accessible dans l'hypothèse de la diffusion d'un message d'alerte. En revanche les problèmes logistiques se présentent de manière très inquiétante pour les trois quartiers («Rumiñahui», «El Progreso» et «General Enriquez») qui sont bordés par les rios dangereux, ce qui rend obligatoire le franchissement de ponts pour trouver un lieu sûr. De plus, ces trois quartiers possèdent un parc automobile important, vraisemblablement avec Sangolqui, le plus important de la région. Compte tenu de l'individualisme marqué des populations péri-urbaines, il est très probable qu'en l'état actuel de préparation des individus, une situation d'urgence entraîne une congestion de la circulation ainsi que des mouvements de panique. Le cas du quartier «Capelo» est beaucoup moins préoccupant sur le plan logistique dans la mesure où seule sa partie occidentale est longée par un rio susceptible d'acheminer des lahars.

Des problèmes comparables à ceux de San Rafael sont observables dans deux quartiers de Latacunga («Ciudadela del Chofer» et «San Felipe») bordés à l'Est par le rio Cutuchi et à l'Ouest par le rio Pumancuchi. Ce dernier n'est pas issu du Cotopaxi, mais il peut, comme dans le passé, recevoir les coulées de boue par débordement du lit du rio Cutuchi au nord de la ville. Les quartiers situés à l'Est du rio Cutuchi («Los Sauces», «Rosero Sanchez» et «Centro/Loreto») sont moins vulnérables en raison de leur position, mais aussi d'une perception du risque plus élevée dans ces quartiers plus anciennement peuplés que les précédents. Cependant, en dépit d'une localisation moins dangereuse, les moyens de protection sont généralement ignorés. En effet, la ville s'étale encore largement à l'Est, les lieux de refuge sont malaisés, difficiles à repérer. Au contraire, le quartier occidental «Pumancuchi» bénéficie d'un effet de marge et les élévations sont plus facilement repérables et accessibles.

Le cas de «Rumipamba» (province du Pichincha) permet un autre type de diagnostic. Que ce soit grâce à une mémoire collective encore efficace ou à la proximité du vieux volcan Pasochoa pouvant servir de refuge, les problèmes ne se posent guère en terme de perception

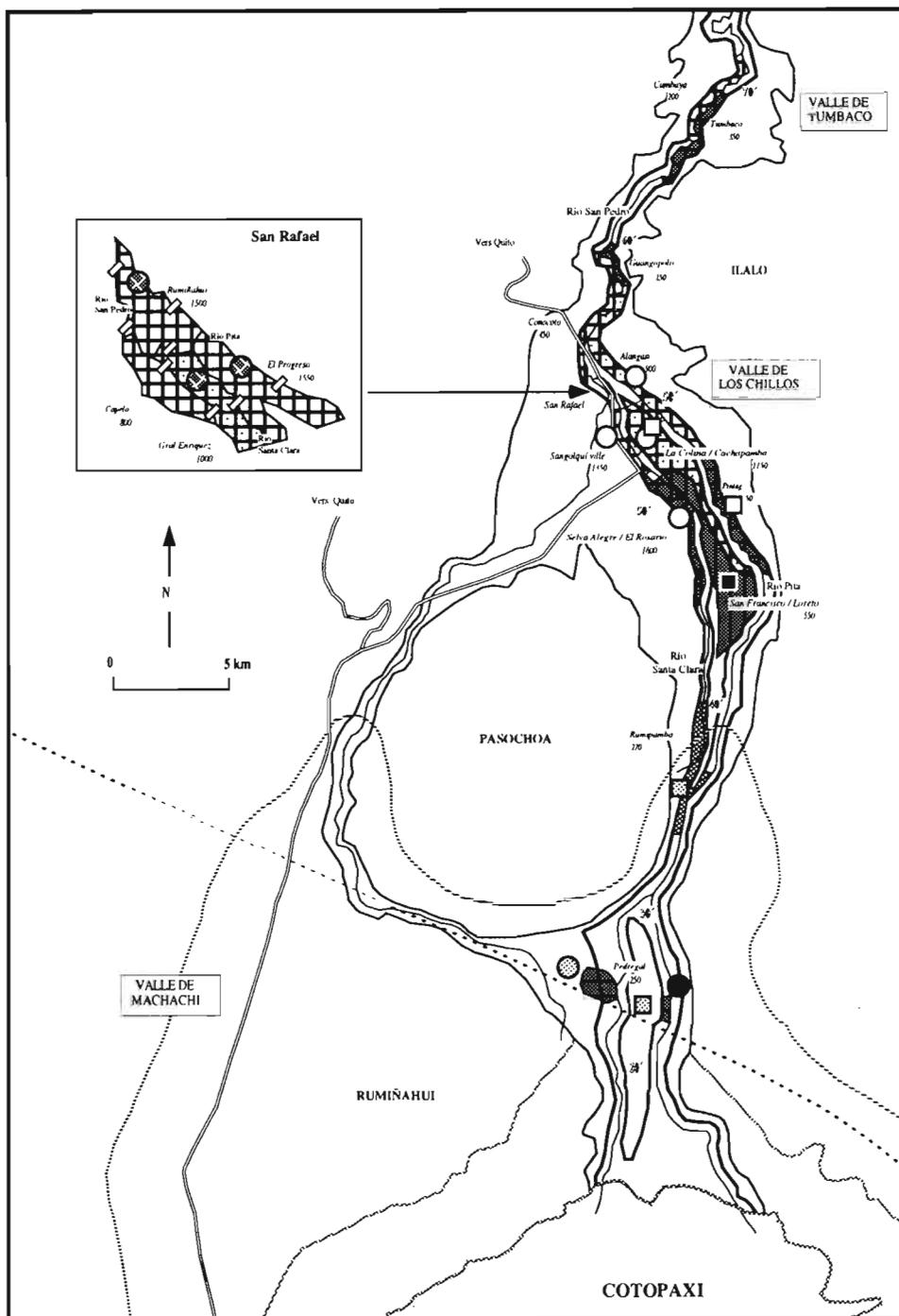
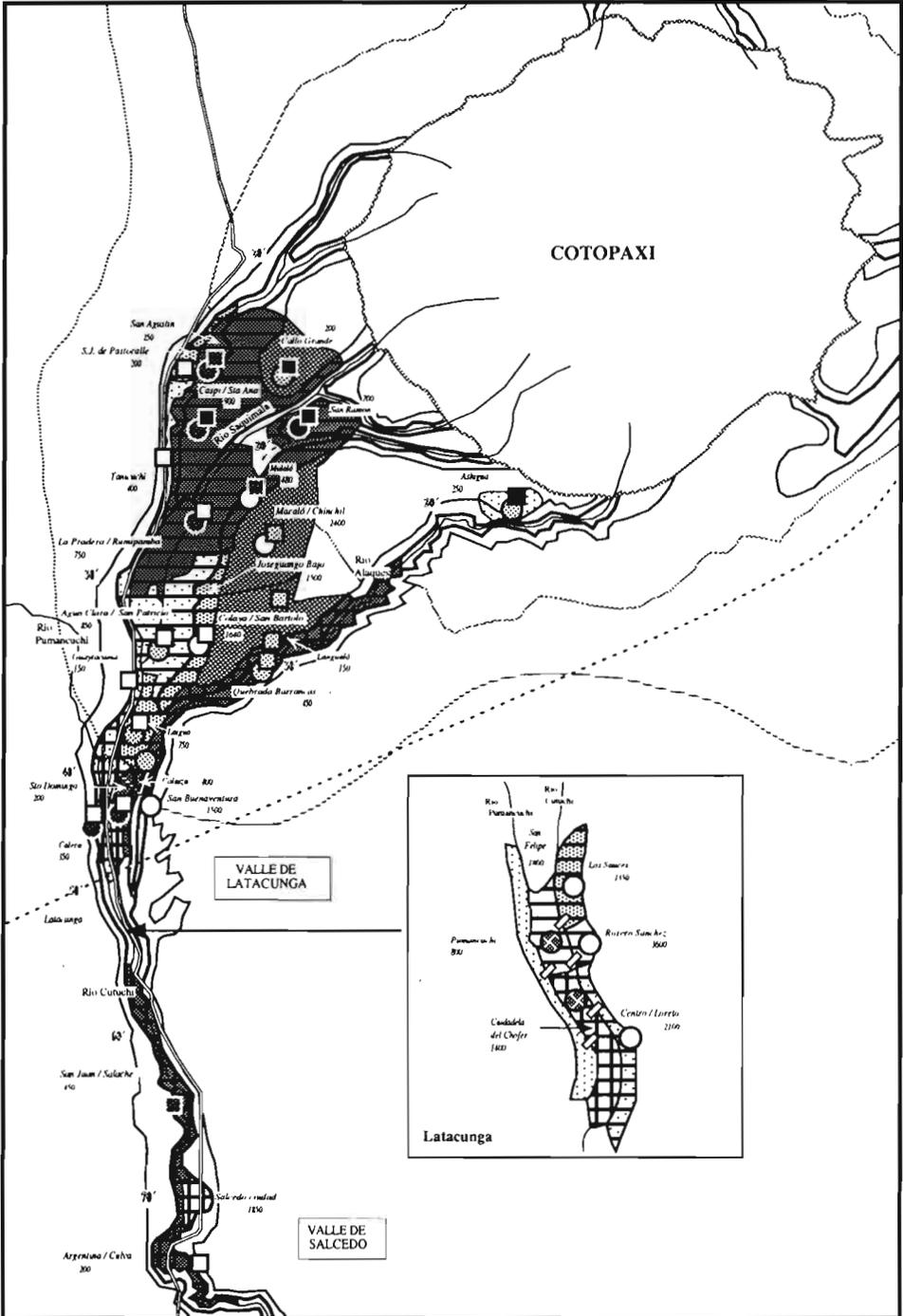
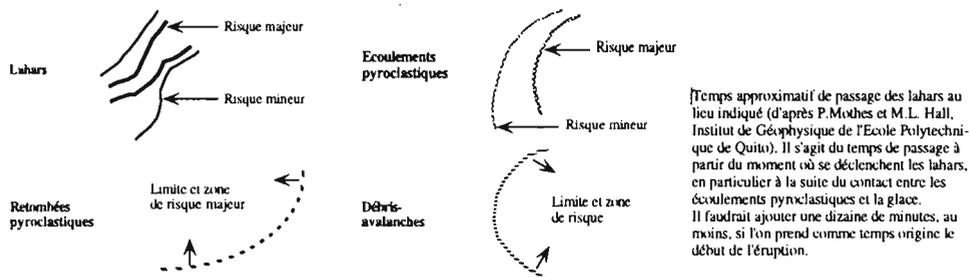


Fig. 9a et b - Carte intégrée des facteurs de vulnérabilité de la population installée dans les secteurs à haut risque face à une éruption du Cotopaxi type 26 juin 1877 (voir légende page 501).



MENACES POTENTIELLES ET LIMITES DES ZONES POUVANT ETRE AFFECTEES
(d'après la carte des menaces potentielles du Cotopaxi réalisée en 1988 par l'Institut de Géophysique de l'Ecole Polytechnique de Quito)



(Ind. agrom.) 000	Nom et effectif de population du secteur	Rio Alajques	Principaux cours d'eau susceptibles d'acheminer les lahars
PASOCHOA	Noms des principaux volcans (inactifs à l'exception du Cotopaxi)		Route Panaméricaine
			Ponts (représentés uniquement sur les agrandissements)

FACTEURS PERCEPTIFS ET COGNITIFS

FACTEURS COGNITIFS ET SOCIAUX DE COMPORTEMENT

FACTEURS SOCIAUX COGNITIFS

Comportement déclaré positif en cas d'ordre d'évacuation	Pas ou peu de problèmes de comportement en perspective. Niveau de vie plutôt élevé et confiance vis-à-vis des autorités plutôt forte. Fragilité du comportement. Peut devenir négatif en raison d'un niveau de vie plutôt bas et/ou d'une confiance vis-à-vis des autorités plutôt faible.
Comportement déclaré négatif en cas d'ordre d'évacuation	Fragilité du comportement. Peut devenir positif en raison d'un niveau de vie plutôt élevé ou d'une confiance vis-à-vis des autorités plutôt forte. De graves problèmes de comportement en perspective. Niveau de vie plutôt bas et confiance vis-à-vis des autorités plutôt faible.

Forte perception du risque		Faible perception du risque	
Connaissance des moyens de protection	Ignorance des moyens de protection	Connaissance des moyens de protection	Ignorance des moyens de protection
3	2	5	8
4	9	1	8

Les symboles rectangulaires possédant un contour renforcé correspondent à des situations existantes dans le cas de la région du Cotopaxi. En dessous de chaque symbole est indiqué le nombre de secteurs qui correspondent à chacune des situations.

ACCESSIBILITE DE LA POPULATION DANS L'HYPOTHESE DE LA DIFFUSION D'UN MESSAGE D'ALERTE

Accessibilité par radio	Eloignement des principales voies de communications	Dispersion de la population	Type d'accessibilité	Symboles
Plutôt difficile (plus de 20 % de la population du secteur n'évoque pas la radio habituellement)	Secteurs éloignés	Population plutôt dispersée à très dispersée	Population difficilement accessible (radio et contact direct)	
	Secteurs non éloignés	Population plutôt dispersée à très dispersée	Population difficilement accessible (radio et à un moindre degré par contact direct)	
Plutôt facile	Secteurs éloignés	Population plutôt dispersée à très dispersée	Accès à la population difficile par contact direct surtout	
	Secteurs non éloignés	Population plutôt dispersée à très dispersée	Accès à la population pouvant présenter des difficultés par contact direct surtout	
		Population plutôt concentrée à très concentrée	Population facilement accessible	Sans symbole

PROBLEMES LOGISTIQUES PREVISIBLES DANS L'HYPOTHESE D'UNE EVACUATION D'URGENCE

- Secteurs dans lesquels une évacuation préventive paraît nécessaire. En cas d'urgence, compte-tenu du peu de temps disponible, il n'existe aucune route d'évacuation présentant un minimum de sécurité.
 - Secteurs dans lesquels une évacuation d'urgence présentera inévitablement de graves problèmes logistiques, faute d'une préparation préalable solide adaptée à chaque famille. Les voies d'accès direct aux lieux de refuge sont inexistantes ou insuffisantes. Le franchissement de rios dangereux est nécessaire dans la plupart des cas et il est rendu difficile par le faible nombre de ponts. Les voies d'évacuation sûres sont limitées et dépendent de la localisation précise de chaque individu. De plus, une grande partie de la population de ces secteurs a une idée erronée du lieu de refuge qui peut convenir. La situation de ces secteurs est un peu moins grave que dans les cas précédents. Les possibilités de refuge et les voies d'accès y sont plus nombreuses et moins hasardeuses, mais sont souvent peu évidentes pour la population. Cela est lié à la relative multiplicité des solutions (variables selon le lieu où l'on se trouve), ou à la trop grande proximité du volcan qui peut pousser des gens à sortir d'une zone relativement peu dangereuse pour se rendre dans une zone qui l'est beaucoup plus. Là encore, une solide préparation préalable, cas par cas, est indispensable.
 - Le parc automobile à l'intérieur de ces secteurs est important. Le faible nombre de voies d'évacuation, bien qu'apparemment directes, et le franchissement obligatoire de rios dangereux peuvent entraîner une congestion de la circulation et des mouvements de panique en cas d'urgence. Une évacuation à pied ou par transport collectif paraît souhaitable. Une préparation de la population destinée à lui faire prendre conscience de ce problème est nécessaire.
 - Dans ces secteurs, les lieux de refuge sont plus facilement accessibles et les voies d'évacuation plus faciles à repérer que dans les cas précédents.
 - Le principal problème est lié aux idées préconçues, généralement erronées des lieux de refuge et des voies d'évacuation, d'une partie non négligeable de la population. Faute d'une préparation préalable, cette donnée peut compliquer le déroulement d'une évacuation qui ne devrait pas présenter de difficultés majeures sur le sur le plan logistique.
- Les secteurs ne possédant pas de symbole circulaire ne devraient pas présenter, globalement, de problèmes d'ordre logistique. Les habitants peuvent assez facilement sortir de la zone dangereuse et se rendre en lieu sûr, si l'opération d'évacuation est bien menée par les autorités.

du risque ou de connaissance des moyens de protection. En revanche, la population est assez difficilement accessible, essentiellement en raison de son éloignement et de sa dispersion (11). L'alerte constitue donc un problème sérieux dans cette communauté paysanne qui, de plus, se montre très méfiante vis-à-vis de l'extérieur.

Les contraintes économiques et sociales, les problèmes de confiance pèsent tout autant dans les secteurs du type «San Agustín», «Caspi/Santa Ana» ou «San Ramón» (province du Cotopaxi). Malgré une conscience du risque élevée, il s'agit là de secteurs paysans particulièrement vulnérables. Un ordre d'évacuation rencontrera inévitablement de nombreux obstacles sociaux, mais plus grave encore, de grosses difficultés sont prévisibles en cas de diffusion d'une alerte et dans le domaine logistique. La question de l'alerte est cruciale, car ces secteurs très proches du volcan seraient atteints ou isolés par les lahars en très peu de temps (moins d'une demi-heure). De plus, la population est difficilement accessible que ce soit par la route ou par l'intermédiaire de la radio. D'autre part, les caractéristiques topographiques locales (vastes espaces quasi plans sans élévations suffisamment marquées, traversés par plusieurs rios extrêmement dangereux) font que les moyens de protection sont ignorés. Les solutions proposées par les personnes interrogées (notamment traverser les rivières pour atteindre les hauteurs occidentales) peuvent difficilement être mises en oeuvre en cas d'imminence du danger. Les lieux de refuge sont peu visibles, leur choix dépend du lieu précis où chacun se trouve et très souvent obligent les gens à se rapprocher du volcan. Dans certains cas, comme à San Ramon, les routes d'évacuation sont si hasardeuses que seule une évacuation préventive peut être efficace.

Le dernier exemple de diagnostic concerne les secteurs «San Juan/Salache» et «Argentina Culva» (sud de la province du Cotopaxi). Ils sont représentatifs de milieux ruraux à dominante paysanne, éloignés du volcan, et à faible mémoire collective. La perception du risque y est faible et les facteurs contraignants d'ordre social importants. Il s'agit, surtout dans le cas du secteur «San Juan/Salache», de populations pauvres et très méfiantes qu'il sera difficile d'évacuer en cas de nécessité. Celles-ci ne sont guère éloignées des principales voies de communications, mais elles sont dispersées et une fraction non négligeable n'est pas accessible par radio. Fort heureusement, les problèmes d'ordre logistique sont moins complexes que dans le cas de «San Agustín» ou «Caspi/Santa Ana».

5. VERS UNE CARTOGRAPHIE PLUS OPÉRATIONNELLE : LA CARTE D'ORIENTATION POUR DES ACTIONS DE PRÉPARATION

À chaque type de vulnérabilité doivent correspondre des réponses appropriées. Si les cartes précédentes fournissent des informations sur la vulnérabilité régionale et locale, elles ne guident pas directement l'utilisateur dans ses choix en matière de prévention. Dans ce sens, nous avons réalisé une carte d'orientation pour des actions de préparation de la population, découlant des principaux caractères de vulnérabilité enregistrés dans chaque secteur de la région étudiée (Fig. 10). En outre, la carte est plus conventionnelle, plus facilement lisible dans la mesure où elle est constituée à partir d'un jeu classique de trames. Enfin, dans ce document, l'ensemble des régions exposées est pris en considération, quelle que soit l'intensité du risque.

(11) L'accessibilité de cette population par le biais de la radio semble possible bien que nous ayons vu, chez les habitants de secteur, de nombreux transistors ne pouvant fonctionner faute de piles que l'on achète très occasionnellement.

Trois ensembles de régions ont été distinguées (à très faible risque, à risque faible ou modéré, à risque élevé à très élevé), elles-mêmes subdivisées selon la nature des problèmes humains rencontrés (perception du risque, connaissance des moyens de protection, comportements potentiels).

Un commentaire développé pour chaque type de région accompagne la carte : le texte de la légende en fournit les éléments essentiels. Il apparaît notamment que, suivant la localisation de la population, son expérience et ses acquis, la préparation peut être menée plus ou moins rapidement. Elle peut être plus ou moins poussée quant à son contenu, plus ou moins personnalisée également. Elle peut être aussi plus ou moins délicate à mener sur le plan de l'approche des populations concernées. Elle doit enfin mettre l'accent sur des problèmes techniques et logistiques particuliers, notamment dans les secteurs où un figuré circulaire porte l'attention sur ce type de question. C'est par exemple le cas dans plusieurs secteurs situés au nord de Latacunga où une préparation personnalisée, à l'échelle des hameaux, des pâtés de maisons, voire des familles, s'impose. En effet, les possibilités de trouver un refuge y sont limitées et le choix de chemins pour y parvenir peut s'avérer très délicat, en raison d'une topographie peu différenciée sur un vaste espace susceptible d'être parcouru par les lahars.

6. CONCLUSION : INTÉRÊT, LIMITES ET PERSPECTIVES D'UNE CARTOGRAPHIE DE LA VULNÉRABILITÉ DE POPULATIONS EXPOSÉES

Au terme de la présentation de ces quelques cartes destinées à représenter dans l'espace la vulnérabilité d'une population exposée à une menace volcanique, il convient de se poser la question de l'intérêt, des limites et des perspectives qu'elles offrent. Leur intérêt est double.

Ces cartes dépassent les seules cartes de menaces potentielles ou les cartes superposant les enjeux humains aux menaces. Par l'étude des populations exposées (ce qui constitue bien entendu une approche réductrice des enjeux humains, mais en même temps un angle d'attaque de la vulnérabilité particulièrement révélateur), elles permettent de pénétrer les processus sociaux et psycho-sociologiques dont bien souvent dépend l'ampleur d'une catastrophe, notamment dans le cas des éruptions volcaniques pour lesquelles la gestion des crises est primordiale (12).

Nous avons axé nos efforts sur la méthodologie, deuxième intérêt de cette entreprise. Les techniques utilisées ne sont pas originales en elles-mêmes, mais elles le sont dans le domaine de recherche sur les risques. L'analyse factorielle a permis de réaliser une carte qui autorise avant tout une appréciation d'ensemble des phénomènes, ainsi que la constitution d'une typologie spatiale de la vulnérabilité en fonction de variables pré-déterminées. Cependant, une telle carte n'a aucune valeur en soi, sans les informations fournies par le reste de l'étude, sans lesquelles il est difficile de tirer des conclusions. La carte intégrée est plus pratique. Elle vise surtout à établir des diagnostics sur la vulnérabilité d'un lieu donné. La

(12) Dans le cas des séismes, par exemple, il n'est pas question de minimiser le rôle de la gestion des crises, mais il est évident que dans ce cas, le facteur technique est primordial, notamment en ce qui concerne la qualité des constructions. De plus, il n'existe encore aucune méthode fiable pour s'appuyer sur des signes annonciateurs d'un séisme, à la différence des éruptions volcaniques. Enfin, et c'est peut-être le point le plus important, la gestion d'une crise préalable à une éruption volcanique peut être très longue (jours, mois, voire années) ou déboucher sur l'absence d'éruption.

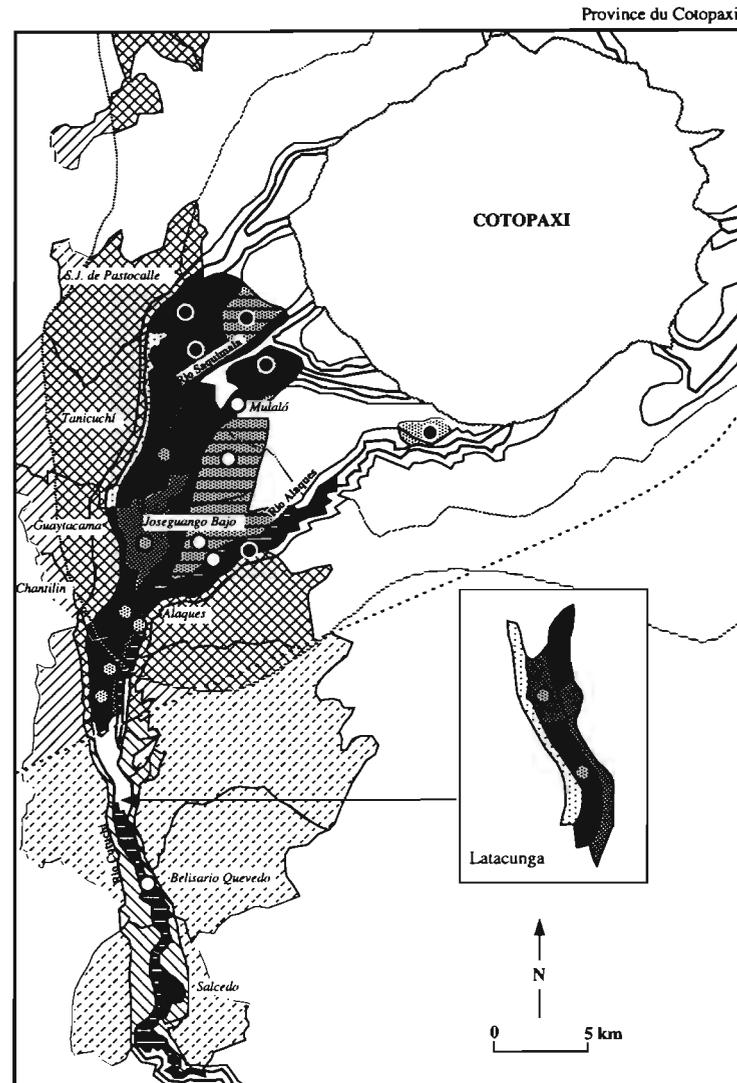
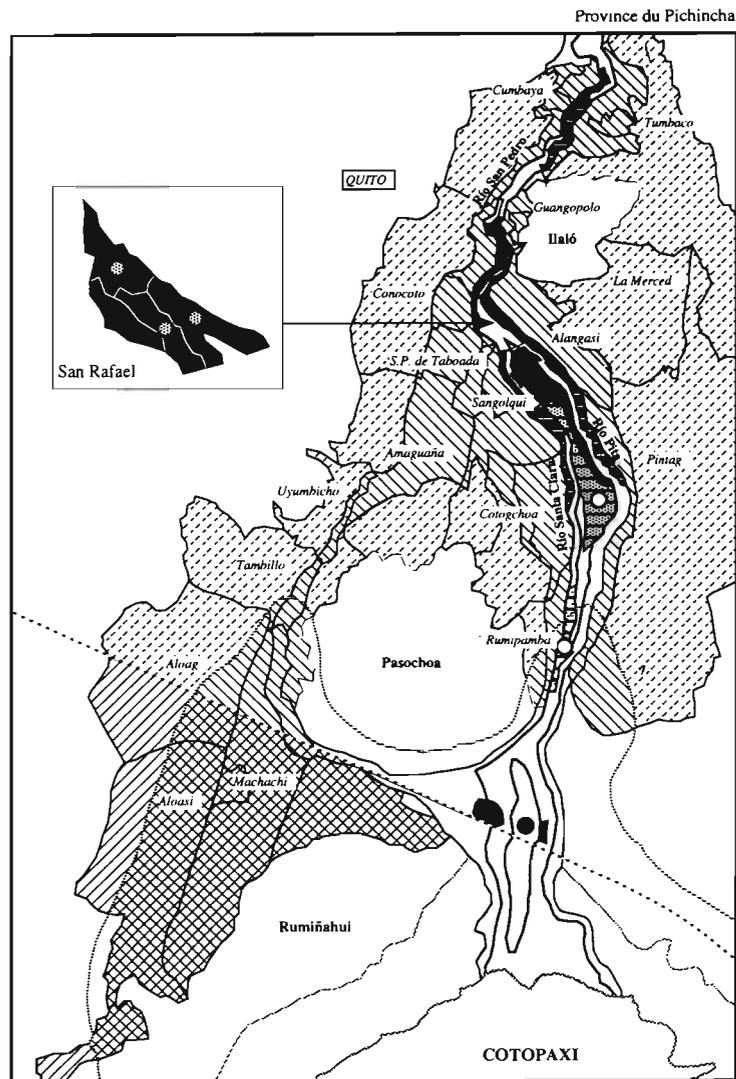


Fig. 10 - Carte d'orientation pour des actions de préparation de la population menacée par le volcan Cotopaxi.

Légende de la carte d'orientation

Régions à très faible risque

1  Secteurs qui seront faiblement affectés par les chutes de cendres. Il est utile de préparer des plans d'information de la population à ne mettre en application qu'en cas de réveil du volcan. Son contenu concernera la protection contre les nuisances causées par les cendres et visera à rassurer une population qui peut se croire plus menacée qu'elle n'est en réalité, afin d'éviter des mouvements de panique, des déplacements inutiles et des erreurs graves comme le fait de se rendre en des lieux beaucoup plus dangereux.

Régions à risque faible ou modéré

2  Secteurs qui seront affectés par d'importantes chutes de cendres dans l'hypothèse d'une éruption du type de celle du 26 juin 1877. Les habitants devront être préparés à affronter ce type de problème. Cependant, en raison d'un risque relativement faible pour les vies humaines, cette préparation ne sera pas nécessairement très poussée avant le réveil du volcan, sauf pour les éleveurs des importantes zones laitières de la région qui auront à protéger, voire à évacuer tout ou partie de leur bétail.

3  Secteurs qui pourraient être affectés dans l'hypothèse d'une activité plus explosive que celle de 1877 (connue par la Cotopaxi avant la période historique). Malgré une faible probabilité d'occurrence, une telle hypothèse ne doit pas être rejetée en raison de l'importance de la population installée dans ces secteurs. Des campagnes préalables de sensibilisation générale peuvent suffire pour la population. En revanche, les autorités locales devront disposer d'informations beaucoup plus précises et des plans d'information et d'actions d'urgence destinés au public devront être prêts à appliquer si, en cas de manifestation du volcan, les experts envisageaient des dynamismes éruptifs très violents.

4  Secteurs qui regroupent les caractéristiques des deux catégories précédentes (2 et 3) et dans lesquels il s'agit de combiner les deux types d'actions de préparation correspondants.

Régions à risque élevé à très élevé

5a  Secteurs situés en zone de risque majeur de lahars dans lesquels la population, en majorité, est consciente des risques et connaît des moyens appropriés de protection. De plus, cette population est globalement disposée à collaborer aussi bien dans l'hypothèse d'un ordre d'évacuation que dans le cadre d'activités préventives. La phase de sensibilisation peut être réduite et des exercices de simulation du type de ceux réalisés à Latacunga et Sangolqui ne devraient pas poser de problèmes. La relative simplicité des moyens de protection des deux secteurs concernés ne rend pas nécessaire une préparation très personnalisée.

5b  Un seul secteur rentre dans cette catégorie, celui de Rumipamba situé en zone de risque majeur de lahars, qui présente des caractéristiques comparables aux secteurs précédents en ce qui concerne la perception du risque et la connaissance des moyens de protection. En revanche, en raison d'un faible niveau socio-économique et d'une confiance très limitée vis-à-vis de l'extérieur, il faut s'attendre à des difficultés, aussi bien en cas de situation réelle que dans la perspective d'actions de préparation. Une campagne générale d'information menée à l'improviste n'aurait guère d'effet si ce n'est d'alarmer inutilement une population déjà consciente des risques. Il est nécessaire de travailler préalablement avec les organisations, responsables et leaders locaux avec lesquels il sera possible d'établir les liens utiles avec la population, de rendre acceptable et d'engager des actions de préparation.

Seul le secteur de la communauté d'Ashigua, situé en marge de la zone de risque majeur de lahars mais dans une zone à intensité de risque élevé, entre dans cette catégorie. La population est consciente des risques et paraît globalement en mesure d'affronter une éruption du type de celle de 1877, mais serait désespérée face à une éruption plus violente, car elle se trouverait directement menacée par les lahars et les écoulements pyroclastiques. Elle paraît néanmoins disposée à collaborer avec les autorités extérieures si une évacuation était nécessaire. Elle devra être préparée pour une éruption du type 1877 qui la soumettrait à d'importantes retombées de cendres, mais également à une éruption plus violente dont la prévision rendrait nécessaire une évacuation préventive.

6a  Ces secteurs sont également situés hors de la zone de risque majeur de lahars. Ils seraient isolés par les lahars dans l'hypothèse d'une éruption du type de celle de 1877, mais pourraient, comme dans le cas du secteur d'Ashigua, être sérieusement affectés si l'éruption était plus violente. La principale différence tient à une collaboration incertaine de leur population en cas de nécessité d'évacuer. Des actions de préparation menées à l'improviste ne seront pas plus facilement acceptées. Il s'agira d'oeuvrer comme dans le cas de Rumipamba (5b) en s'appuyant sur de solides bases locales. Le contenu de la préparation est comparable à celui du type précédent (6a).

7a  Dans ces secteurs situés en zone de risque majeur de lahars, la perception du risque est plutôt élevée et la population devrait assez facilement collaborer en cas d'évacuation. Le principal problème est l'ignorance des lieux de refuge et des routes pour y parvenir. Des exercices d'évacuation du type de ceux de Latacunga et Sangolqui, précédés d'une phase de sensibilisation axée surtout sur les moyens de protection, devraient pouvoir être réalisés dans de bonnes conditions.

7b  Les secteurs de cette catégorie possèdent des caractéristiques comparables à celles des secteurs précédents (7a) sauf quant à la collaboration de leur population. Dans la mesure où la conscience du risque est élevée, la préparation sera également axée sur les moyens de protection et l'approche de la population devra être envisagée de la même manière que pour Rumipamba.

8a  Secteurs situés en zone de risque majeur de lahars dont la vulnérabilité de la population se caractérise par une faible perception du risque et l'ignorance des moyens de protection. Il s'agit de populations de niveau socio-économique plutôt élevé, dans l'ensemble confiantes vis-à-vis de l'extérieur et prêtes à collaborer. Contrairement à tous les cas précédents (forte perception du risque), il est utile ici d'engager les actions de préparation par des campagnes locales de sensibilisation et d'information, afin de développer la conscience du risque qui fait défaut. C'est seulement dans un deuxième temps que des exercices de simulation pourront être réalisés.

8b  Les caractéristiques de ces secteurs sont comparables à celles des secteurs précédents (8a), sauf pour ce qui concerne le comportement de la population, source de problèmes en cas d'évacuation et dans le cadre d'actions préventives et ce, d'autant plus que la perception du risque est faible. Même approche donc que dans le cas de Rumipamba (5b), mais qui nécessitera vraisemblablement encore plus de patience et de doigté. Le contenu de la préparation est le même que dans le cas précédent (8a).

○ Secteurs dans lesquels une attention particulière doit être donnée aux systèmes d'alerte en raison de l'accessibilité difficile de leur population.

● Secteurs dans lesquels l'accent doit être placé sur la résolution des problèmes logistiques qui ne manqueront pas de se poser, si une évacuation était nécessaire. En raison de lieux de refuge et de routes d'accès non évidents, dépendants de la localisation précise de chacun, une préparation personnalisée au niveau des quartiers, des hameaux ou des familles doit être envisagée.

● Secteurs dans lesquels une attention particulière devra se porter à la fois sur les systèmes d'alerte et sur la résolution des problèmes logistiques.

carte d'orientation n'est en fait qu'un document découlant du précédent, plus lisible et fournissant des pistes d'actions pour les gestionnaires du risque susceptibles de l'utiliser.

Il s'agit ici d'un simple jalon méthodologique et de nombreuses améliorations sont à apporter tant sur le plan de la technique que sur celui du contenu. De plus, ce travail s'appuie sur une base physique (la carte des menaces potentielles) dont le fondement n'est pas discuté. Cette base est vraisemblablement criticable et pourrait être améliorée suivant l'évolution des connaissances.

Cette recherche présente un caractère à la fois fondamental et appliqué. C'est pourquoi il nous a paru nécessaire d'engager, en guise de conclusion, une réflexion sur l'usage de tels types de cartes. En théorie ces documents devraient pouvoir constituer des bases de réflexion pour les décideurs. Les unités territoriales retenues dans la carte intégrée ou la carte d'orientation devraient constituer autant d'unités préventives dans le cadre d'une planification préventive et d'actions locales. Cependant, l'expérience montre clairement que le passage de la phase de recherche, débouchant sur de tels documents (13) à la phase d'application, est particulièrement difficile et conduit très souvent les responsables politiques et administratifs à ne pas les utiliser, ou à les sous-utiliser en dépit de la satisfaction qu'ils éprouvent à les posséder.

Au moment où nous avons engagé ces travaux de recherche en Équateur, nous étions persuadé que cet état de fait était à attribuer en partie au contexte économique et politico-administratif, mais surtout à l'incapacité fréquente des responsables à interpréter à des fins pratiques les données de la recherche fondamentale. Même si notre avis sur la question est aujourd'hui plus nuancé, nous restons convaincu qu'un effort très important est à accomplir sur le plan de la communication entre les chercheurs et les décideurs. Nous pensons qu'il est nécessaire de réfléchir sur les techniques permettant de mieux faire saisir les enjeux, de mieux montrer les faits, de mieux orienter, faute de quoi, la recherche sur les risques naturels peut s'éloigner de l'un de ses principaux objectifs qui est la sauvegarde des vies humaines et des biens. Ceci dit, cette démarche, aussi nécessaire soit-elle, s'avère insuffisante si l'on ne connaît pas les processus de décision des décideurs, les rouages des systèmes de gestion des risques et la cause des obstacles fréquents, caractéristiques notamment des pays en développement. Il s'agit là d'un axe de recherche important dans un domaine que l'on nomme vulnérabilité institutionnelle (14).

Ce double effort, complémentaire, doit aider à mieux cerner les besoins et les contraintes et permettre à la recherche sur les risques naturels, notamment celle qui débouche sur des réalisations cartographiques, d'être plus opérationnelle.

(13) Ceux que nous proposons, mais aussi, de manière générale, tous les documents traitant de risques, à commencer par les cartes de menaces potentielles.

(14) D'Ercole (1994b); Thouret & D'Ercole (1996). Voir également dans ce numéro l'article de Claude de Miras qui développe cette question.

Références citées

- BURTON, I., KATES, R.W. & WHITE G.F., 1978 - *The environment as hazard*, 240p., New-York : Oxford University Press.
- CHARDON, A.C., 1994 - Étude intégrée de la vulnérabilité de la ville de Manizales (Colombie) aux risques naturels. *Revue de Géographie Alpine "Croissance urbaine et risques naturels dans les montagnes des pays en développement"*, T LXXXII, 4 : 97-111.
- D'ERCOLE, R., 1989 - La catástrofe del Nevado del Ruiz, ¿Una enseñanza para el Ecuador? El caso del Cotopaxi. *Estudios de Geografía. "Riesgos naturales en Quito: lahares, aluviones y derrumbes del Pichincha y del Cotopaxi"*, vol. 2: 5-32 ; Quito : Colegio de Geógrafos del Ecuador, Corporación Editora Nacional.
- D'ERCOLE, R., 1990 - *Investigación geo-sociológica para la preparación de la población frente al peligro volcánico. El caso del volcán Cotopaxi y su incidencia regional*, 60p., Quito : Defensa Civil del Ecuador-Instituto Francés de Estudios Andinos.
- D'ERCOLE, R., 1991 - Vulnérabilité des populations face au risque volcanique. Le cas de la région du volcan Cotopaxi (Équateur). Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble, 460p.
- D'ERCOLE, R., 1992 - *La population de la province du Pichincha face au volcan Cotopaxi. Aléas, risque et vulnérabilité*. Planche 06 de l'Atlas Infographique de Quito, IGM, IPGH, ORSTOM.
- D'ERCOLE, R., 1993 - Gestion des risques naturels et réalités sociales. Vers une recherche opérationnelle. *Pangea*, 20 : 5-14, CIFEG.
- D'ERCOLE, R., 1994a - Mesurer le risque. Le volcan Cotopaxi et les populations proches. in: *Enseigner les risques naturels. Pour une géographie physique revisitée* : 111-150, Paris : Anthropos/GIP Reclus.
- D'ERCOLE, R., 1994b - Les vulnérabilités des sociétés et des espaces urbanisés : concepts, typologie, modes d'analyse. *Revue de Géographie Alpine : "Croissance urbaine et risques naturels dans les montagnes des pays en développement"*, Tome LXXXII, 4 : 87-96.
- D'ERCOLE, R. & MONCAYO, J.F., 1991 - "Influents locaux" face à une situation d'urgence : une analyse selon l'hypothèse d'une éruption du volcan Cotopaxi (Équateur). *Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines*, 20(1) : 181-220.
- HALL, M.L. & Von HILLEBRANDT, C.G., 1988 - *Mapa de los peligros volcánicos potenciales asociados con el volcán Cotopaxi, zona Norte y zona Sur, 1/50 000*. Proyecto UNDRO-USAID-EPN, Quito, Ecuador : Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional.
- KATES, R.W., 1970 - Natural hazard in human ecological perspective: hypotheses and models, *Natural Hazard Research Working Paper*, 14, 32p., Department of Geography, University of Toronto.
- MILLER, C.D., MULLINEAUX, D.R. & HALL, M.L., 1978 - *Reconnaissance map of potential volcanic hazards from Cotopaxi volcano, Ecuador, 1/100 000*. U.S. Geological Survey Miscellaneous, Investigations Series Map. I-1072.
- PELTRE, P. & D'ERCOLE, R., 1992 - La ville et le volcan. Quito, entre Pichincha et Cotopaxi (Équateur). *Cahier des Sciences Humaines*, 28(3) : 439-459, ORSTOM.
- PERRY, R.W., 1983 - *Comprehensive emergency management evacuating threatened populations*, 180p., Washington : Battelle Human Affairs Research Centers.
- THOURET, J.-C. & D'ERCOLE, R., 1996 - Vulnérabilité aux risques naturels en milieu urbain : effets, facteurs et réponses sociales. *Cahiers des Sciences Humaines de l'ORSTOM*, 2 : 407-422.
- UNDRO, 1987 - *Prévention et atténuation des catastrophes*, Vol. 12 : Aspects sociaux et sociologiques, 56p., Genève : Nations Unies.
- VOIGHT, B., 1990 - The Nevado del Ruiz volcano catastrophe : anatomy and retrospection. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 44 : 349-386.
- WARRICK, R.A., 1979 - Volcanoes as hazard: an overview. in : *Volcanic activity and human ecology* (Sheets P.D. & Grayson D.K., eds.) : 161-194; New York : Academic Press, Inc.

GUAYAQUIL AU TEMPS DU CHOLÉRA

Anne Collin Delavaud*

Résumé

L'épidémie de choléra survenue en 1991 en Équateur a frappé certaines villes et régions plus que d'autres sur la Côte. Guayaquil, la première ville du pays par le nombre de ses habitants (1 600 000 habitants), a connu le record de cas. L'analyse de la répartition des malades hospitalisés dans la ville montre que les quartiers pauvres, récents et, de surcroît, bâtis sur les eaux polluées du delta ne sont pas les plus frappés alors que la zone centrale taudifiée a concentré un nombre de cas élevé. Les pratiques sociales sont-elles davantage responsables de cette situation que les facteurs pourtant très contraignants ici de l'environnement ?

Mots-clés : *Épidémie, choléra, Guayaquil, Équateur, environnement, pratiques sociales, taudification, quartiers populaires.*

GUAYAQUIL EN LOS TIEMPOS DEL CÓLERA

Resumen

La epidemia del cólera, ocurrida en 1991 en Ecuador, ha golpeado mucho más algunas ciudades y regiones de la Costa. Guayaquil, la primera ciudad del país con 1 600 000 habitantes, ha conocido un número de casos record. El análisis de la distribución de los enfermos hospitalizados en la ciudad revela que los barrios pobres, recientes y además contruidos sobre las aguas contaminadas del delta no son los más afectados por esta epidemia en relación con la parte central taturizada. Las prácticas sociales tal vez tienen más responsabilidad en esta situación que las condiciones particularmente difíciles del medio ambiente.

Palabras claves: *Epidemia, cólera, Guayaquil, Ecuador, medio ambiente, prácticas sociales, tugurios, barrios populares.*

GUAYAQUIL DURING THE CHOLERA

Abstract

The cholera epidemic, which occurred in 1991, impacted some cities and regions of the coast much more than others. Guayaquil, inhabitants Ecuador's largest city with a population of some 1,600 000 inhabitants, experienced a record number of cases. An analysis of the sick hospitalized in this city reveals that the poor urban sections, which were built recently and moreover were constructed upon the contaminated waters of the delta, were not the most affected by this epidemic, particularly when compared to the congested central part of the city. This suggests that social practices were more responsible for this situation than especially difficult environmental conditions.

Key words: *Epidemix, cholera, Guayaquil, slums, central sector, environment, social practices.*

* Professeur à l'Université de Paris III - Institut des Hautes Études de l'Amérique Latine, CREDAL- CNRS : 28, rue Saint-Guillaume, 75007 Paris.

L'épidémie de choléra, survenue en Équateur, le 28 février 1991, en provenance du Pérou, s'est diffusée très rapidement dans tout le pays avant de poursuivre sa progression vers le nord. Le nombre de cas enregistrés pour cette première année 1991 atteint 46 320 personnes qui se répartissent très inégalement dans le pays. En effet, toutes les régions n'ont pas été touchées de la même façon puisque la Côte a enregistré 24 480 cas et la Sierra 9 609 au cours de cette première attaque (1). À l'intérieur de ces deux grands ensembles régionaux, il existe des différences importantes entre les provinces, entre les villes et les campagnes et entre les groupes humains.

Cette épidémie était fortement redoutée et, à juste raison, dans la zone côtière chaude, étant donné les conditions géographiques particulièrement favorables au développement du vibron cholérique(2) et la présence d'une forte population jusque-là exempte de choléra et particulièrement sensible. De ce fait, le plus grand nombre de cas en 1991 a été recensé dans la province du Guayas : 11 585 malades soit un quart des cas du pays, mais seulement 18% des morts (104) (3) entre le 28 février 1991 et le 3 août 1991. Cette province, la plus riche de l'Équateur, grâce à ses activités agricoles et industrielles, est également la plus peuplée avec près d'un tiers de la population nationale soit plus de 3 millions d'habitants. Cependant, elle arrive en quatrième position parmi les cinq provinces côtières pour son taux d'incidence (nombre de cas sur 100 000 habitants) de 470 contre 1 307 en Esmeraldas. La capitale du Guayas, Guayaquil, première ville du pays avec plus d'un million et demi d'habitants, a été la plus touchée dans son espace urbain, avec un nombre de cas plus élevé que partout ailleurs : 5 861 victimes du 28 février au 10 août 1991.

De nombreuses questions se posent sur ce nombre élevé de cas en ville alors que les campagnes offrent un risque sanitaire plus élevé par manque d'équipement ?. Pourquoi la létalité est-elle moins élevée ici que dans d'autres régions (4) ? Il est vrai qu'elle est toujours plus forte dans les zones rurales éloignées des centres de santé. Certains secteurs de la ville ont-ils été frappés plus que d'autres, en particulier les quartiers palafittes sur l'eau du delta ?

En se diffusant partout, le choléra a, semble-t-il, élargi la vulnérabilité des quartiers à risque "traditionnel" évident à l'ensemble de l'espace urbain et de sa population, offrant ainsi une dynamique de vulnérabilité collective. L'objectif de cette recherche(5) est de mettre en évidence la part de relation entre l'environnement urbain et l'épidémie à partir de la localisation des cas dans la ville (6).

(1) L'étude porte sur la période de majeure attaque entre le 28 février et le 10-20 août 1991. Le nombre de cas diminuera en 1992 à 28 752. Les données sur l'Amazonie et les Galapagos ne sont pas assez fiables pour être retenues ici.

(2) Le choléra ne s'était plus manifesté en Amérique latine depuis 1895. La bactérie isolée au Pérou et en Équateur en 1991 est le biotype El Tor.

(3) Le taux d'incidence de la côte équatorienne est de 516 cas pour 100 000 h, contre 223 en Sierra (du 28 février au 3 août 1991).

(4) Les morts ont été plus nombreux en altitude avec 313 morts dans la Sierra contre 250 seulement sur la Côte.

(5) Cette recherche (mission CREDAL- UMR 212 du CNRS, Institut des Hautes Études de l'Amérique Latine) a profité de la mission de coopération française (août 1991) des docteurs P. Berche (hôpital Necker-Enfants Malades), O. Weil (DAI- AP), B. Ivanoff (OMS). L'étude des cas de l'*Hospital d'Infectología de Guayaquil* a été décidée par eux.

(6) L'autre objectif concerne l'étude épidémiologique elle-même qui fera l'objet d'une autre publication avec les docteurs F. Gay et M. Rosenheim (épidémiologues de l'hôpital La Pitit-Salpétrière) à partir du traitement des statistiques relevées à l'*Hospital de Infectología de Guayaquil*.

1. L'ÉPIDÉMIE DU CHOLÉRA À GUAYAQUIL EN 1991

La situation observée à Guayaquil confirme les spécificités de l'épidémie en Amérique latine : la progression explosive du choléra depuis la frontière méridionale à travers tout le pays n'a pas épargné la métropole côtière. Elle l'a même frappée fortement puisque son taux d'attaque est relativement fort avec 0,39 % de la population touchée pour les 6 premiers mois contre 0,48 % pour l'ensemble du pays (rural et urbain) mais sur toute l'année 1991. Au Pérou, le taux d'attaque fut beaucoup plus élevé avec 1,5 % de la population concernée en 1991. Par comparaison, il n'est que de 0,05 % de la population en Afrique, mais la létalité y est plus forte (Félix, 1991).

L'épidémie se caractérise également par la rapidité de sa diffusion dans la province du Guayas. Le premier pic est atteint, comme dans le reste du pays, en 4 semaines avec un pic de 1 200 cas nouveaux par semaine. Cette même cinétique fut observée au Pérou, en Équateur et à Panama (7). Après la période des 16^{ème}-21^{ème} semaines épidémiologiques de 1991 (Weil & Berche, 1992), le choléra régressa. Une reprise légère se fera sentir dans le Guayas à partir de la 48^{ème} semaine.

Si l'attaque est forte, le taux de mortalité, de l'ordre de 1,50% en 1991 (0,64 en 1992) en Équateur, est considéré comme faible par les experts de l'OMS. Il est de 0,9% au Pérou et de 1,7% en Colombie lors de la première année. Par comparaison, la moyenne africaine en 1970 était de 14%. L'accès aux soins liés à la forte urbanisation de l'Amérique latine est sans doute une explication de cette disparité entre le continent africain et le continent sud-américain.

En Équateur, l'épidémie fera 697 morts en 1991 (185 en 1992) mais les différences de létalité sont grandes entre les régions : 0,9 mort pour 100 cas sur la Côte contre 2,69 en Sierra. Les deux tiers des morts recensés n'avaient pu être traité en milieu hospitalier. Il y eut 119 morts au cours de l'année 1991 dans la province du Guayas.

Si la transmission hydrique est connue comme une grande responsable de l'épidémie, elle suppose une ingestion de fortes concentrations de vibrions. La transmission interhumaine directe, en particulier par la sueur ou par l'intermédiaire d'aliments contaminés fait l'objet de travaux depuis 1970 (Dodin, 1981 ; 1992). Evidemment, l'eau de boisson est incriminée mais aussi la nourriture, non seulement les fruits de mer mais aussi les aliments tels que le riz ou les légumes, vendus par les vendeurs ambulants dans la rue et en particulier près des marchés. Dans les chenaux et dans l'estuaire grâce au mélange de l'eau douce et de l'eau salée les conditions de développement du vibron sont très favorables. La mauvaise hygiène individuelle renforce l'action indirecte des personnes en bonne santé mais porteuses du vibron (porteurs asymptomatiques). La transmission par contacts interhumains a été une fois de plus primordiale (Vagnet, 1985).

2. DIFFICULTÉS ET RÉSULTATS GÉNÉRAUX

À Guayaquil, il n'est pas si simple de relier le nombre de cas de choléra à un espace et même à un nombre d'habitants. Les bases statistiques indispensables pour aborder l'épidémie dans une ville sont difficiles à obtenir. En premier lieu, les unités administratives sont de taille très inégale : très petites dans le centre parce qu'anciennes, elles sont littéralement

(7) Berche & Weil (1993) distinguent deux types d'évolution : l'une explosive dans les trois pays cités et une évolution rapide survenant après une longue phase de latence de plusieurs mois où seulement des cas sporadiques surviennent sans démarrage réel de l'épidémie (cas de la plupart des autres pays latino-américains).

gigantesques dans le reste de la ville édifée depuis quarante ans. En effet, le découpage en paroisses de taille homogène d'environ 30 000 h (dans le centre) semble s'être arrêté en 1950 lorsque la ville a gagné tout l'ouest : le *suburbio*, qui correspond à la paroisse Febres Cordero d'environ 350 000 h (Fig. 1).

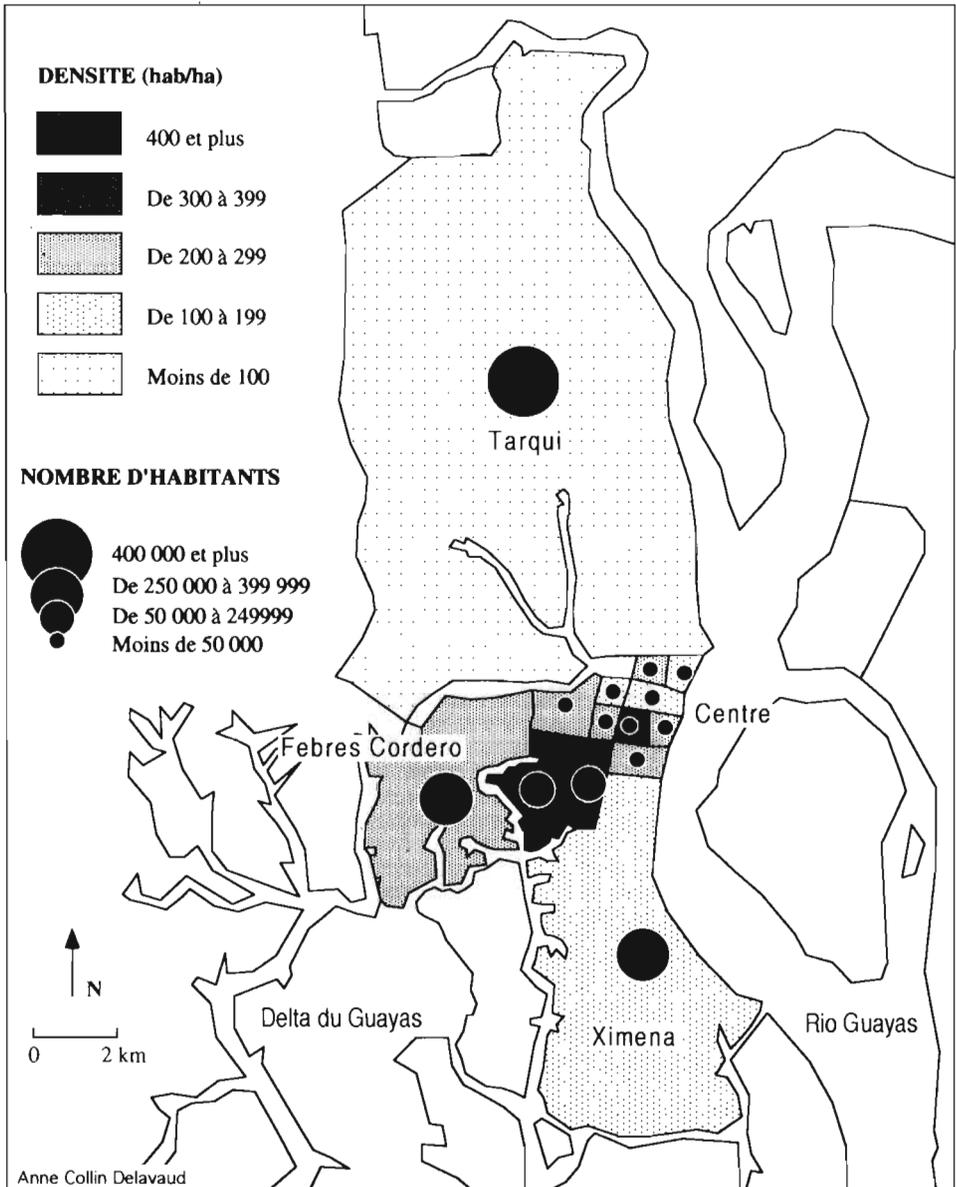


Fig. 1 - Population et densité à Guayaquil par paroisse (1990) (Source : Recensement de population 1990, INEC).

Dans la décennie 70, la ville s'est étendue jusqu' au port avec, de nouveau, 400 000 h pour une seule unité administrative : la paroisse de Ximena dont fait partie le Guasmo. Enfin, l'extension vers le nord, qui n'est pas terminée, porte le nom de la paroisse de *Tarqui* et regroupe plus de 400 000 h. Chacune de ces paroisses abrite des quartiers de nature très différente selon leur ancienneté, leur type d'habitat, leur relation avec l'environnement et leur composition sociale. La densité (tableau 1) la plus forte se situe dans la zone péricentrale et occidentale de la ville ainsi que dans certaines paroisses du centre-ville.

Tableau 1 - Répartition des cas de choléra par paroisse dans Guayaquil.

Paroisse	Population	Densité h/ha	Nbre de cas	Taux d'incid ‰
Centre :				
9 de Octubre	10 844	167	31	2,8
Ayacucho	16 209	202	63	3,9
Bolívar	12 672	317	107	8,4
Carbo	8 196	120	43	5,2
García Moreno	64 655	317	205	3,2
Olmedo	14 394	228	83	5,7
Roca	10 333	240	27	2,6
Rocafuerte	13 030	178	78	6
Sucre	20 308	276	148	7,3
Urdaneta	30 796	252	97	3,1
Letamendi	106 453	520	528	5
Febres Cordero	340 626	233	1 943	5,7
Ximena	397 922	134	1 336	3,3
Tarqui	432 117	43	908	2,1
SD			264	
Total	1 508 444		5 861	3,9

Sources : Recensement de population 1990 (INEC-Guayaquil) ; *Dirección Provincial de Salud*. MSP. Élaboration Anne Collin Delavaud.

Si connaître le nombre d'habitants et le nombre de cas par unité administrative n'est pas aisé, il reste une autre incertitude sur la localisation d'un grand nombre de quartiers, d'*urbanizaciones*, de coopératives ou de «citadelles». Certains noms se répètent mais peuvent manquer à l'appel sur les cartes officielles. Dans le sud de *Ximena*, tout le *Guasmo* est sorti de terre ou de l'eau en moins de dix ans. Les noms des rues font défaut soit dans la réalité soit sur les plans. Les "gens" ont l'habitude de dire *Guasmo Norte*, *Guasmo Sur*, *Guasmo Centro* mais la précision s'arrête là.

Néanmoins, l'habitude équatorienne de donner son adresse en commençant par la rue où se trouve la maison et la rue perpendiculaire la plus proche facilitera la tâche de localisation bien mieux qu'avec un numéro. Bien sûr, lorsqu'il s'agit de la *primera* et la *C*, ou de la *segunda* et la *M*, l'enquête devient plus difficile surtout lorsque plusieurs lotissements ont choisi les lettres de l'alphabet ou les chiffres. Il faut toute l'autorité d'une chargée d'administration locale pour trancher.

La notification des cas (confirmés ou non par laboratoire) se faisait auprès des services de la Direction Provinciale de Santé dont dispose chacune des provinces de l'Équateur et qui

dépend du Ministère de la Santé qui centralisait les informations au niveau national. Cette Direction recense les cas selon un découpage propre à son administration qui ne se superpose pas avec celles du recensement. La toponymie ne concorde pas toujours.

Cette approche générale (Fig. 2 et 3) propose une répartition de l'épidémie à partir de statistiques par paroisse. Leur traitement cartographique (nombre de cas et taux d'incidence) met en évidence la dispersion dans toute la ville avec une relative concentration dans le centre et dans l'ouest. Dans ses débuts, les deux premiers mois (du 3 mars au 4 mai), l'épidémie semble avoir été plus importante dans la périphérie.

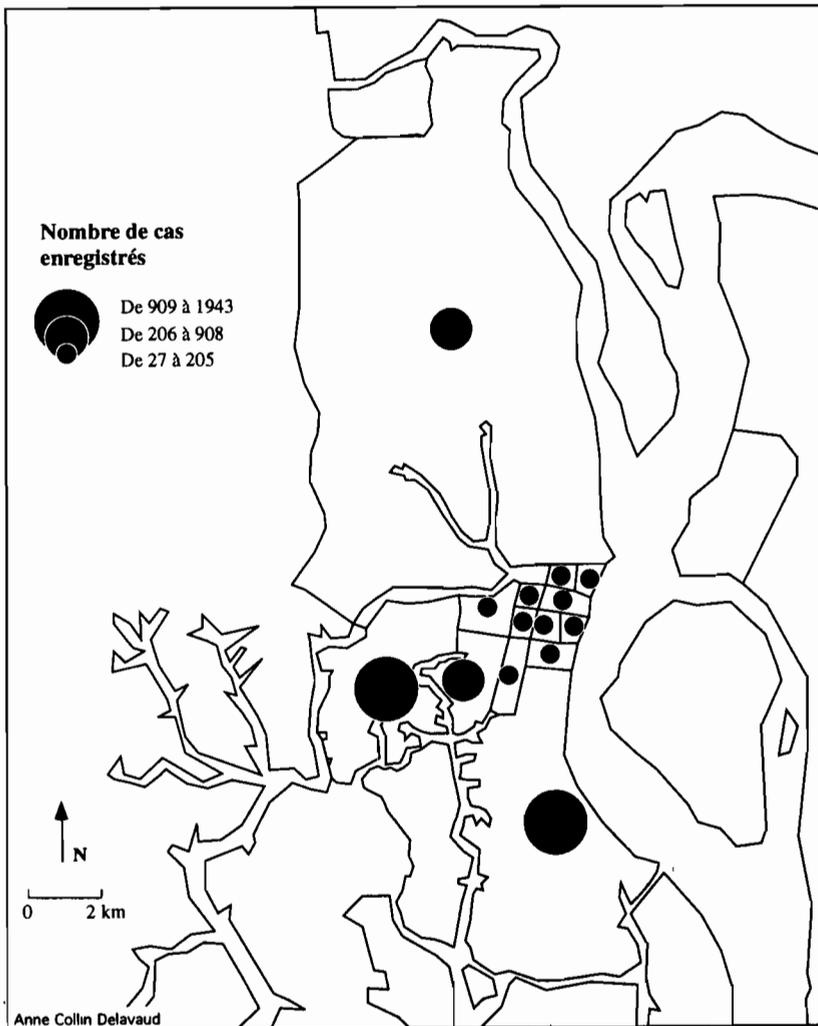


Fig. 2 - Le choléra à Guayaquil. Nombre de cas enregistrés par la Direction Provinciale de Santé du 3 mars au 10 août 1991 par paroisse (M.S.P.).

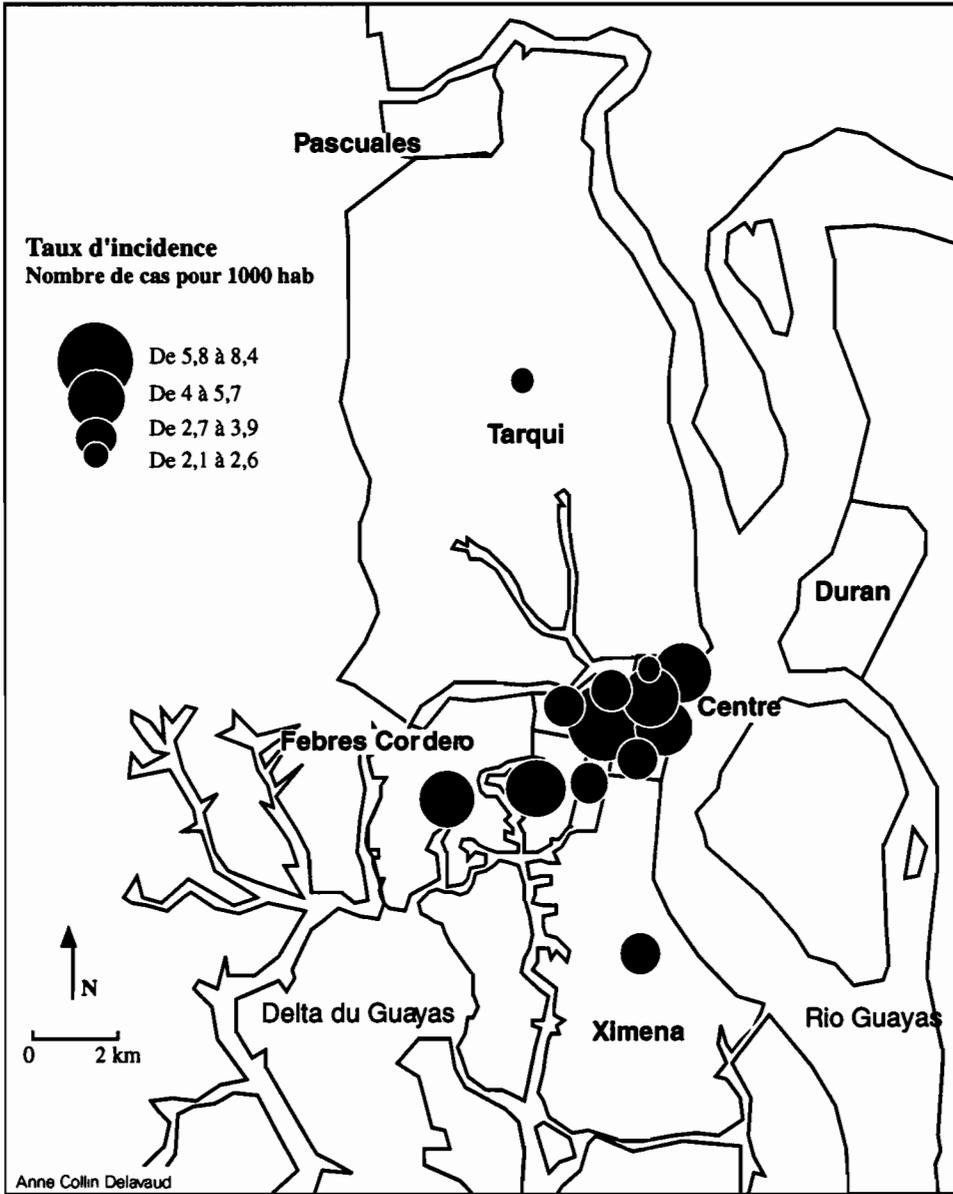


Fig. 3 - Le choléra à Guayaquil du 3 mars au 10 août 1991 : taux d'incidence (Source : Direction Provinciale de Santé).

3. L'ENQUÊTE AUPRÈS DE L'HOSPITAL DE INFECTOLOGÍA JUAN RODRIGUEZ DE GUAYAQUIL

Pour localiser des malades dans la ville, il a été choisi de consulter les registres de l'*Hospital de Infectología Juan Rodríguez M.* de Guayaquil qui, par sa spécialisation, fut pendant le premier mois l'unique centre d'accueil des cholériques avant que, submergé par l'affluence,

le directeur (8) ne fasse appel à tous les autres centres hospitaliers. Il est localisé dans le centre de la ville et plus particulièrement dans la zone des hôpitaux et des laboratoires mis en place au début du siècle dernier au pied du *Cerro Santa Ana*. De petite dimension, sa capacité d'accueil est de 85 lits. Un centre pour la lèpre lui est adjoint. Du jour au lendemain, cet hôpital dut accueillir les cas toujours plus nombreux, les soigner et les garder pendant 2 à 3 jours maximum. On récupère très vite, une fois la réhydratation commencée. Il n'y eut aucun mort dans cet hôpital qui accueillit 93 cas en mars, puis 445 en avril (avec un maximum de 24 malades dans la journée du 23 avril), 227 en mai, 182 en juin puis 85 en juillet. À ces chiffres d'entrées en hospitalisation, il faut ajouter un nombre très élevé de consultations externes.

Grâce aux registres d'entrées, on dénombre environ 1 200 cas hospitalisés dans cet hôpital entre le 3 mars et le 15 août 1991. 1 068 cas ont été retenus (information complète). La moitié des hospitalisés provenait de la ville même de Guayaquil soit 600 personnes environ, dont 560 adresses ont été portées sur une carte de Guayaquil. La localisation (9) pour certains se fait sous le nom du quartier (Fig. 4). Il faut tenir compte dans cette recherche que l'hôpital choisi est public et qu'il accueille les populations les plus pauvres. Les patients aisés ont recours aux cliniques du secteur privé (Fernández, 1994).

L'analyse des registres montre bien l'arrivée de l'épidémie à Guayaquil seulement quelques jours après son entrée dans le pays par la province d'El Oro, limitrophe du Pérou et de la province de Guayaquil à 4 heures d'autocar. Cependant, les premiers cas enregistrés à Guayaquil venaient de Pedro Carbo situé à la limite de la province du Manabí située à 100 km au nord-ouest du Guayas. La première adresse localisée dans la ville se trouve dans la paroisse de Tarqui au nord de la ville.

La moitié des cas enregistrés à l'hôpital comme résidant hors de la ville proviennent en majorité du Guayas, puis des autres provinces côtières et quelques-uns de la Sierra. Il est possible d'établir le rôle de Guayaquil comme noyau permanent de relation pour des populations très mobiles frappées par le choléra lors de leur présence dans la ville. L'attraction de ses équipements hospitaliers n'est valable que pour ceux en état de se déplacer rapidement.

Grâce à cette approche originale des adresses des cas d'un hôpital, il est possible de confirmer deux aspects observés précédemment :

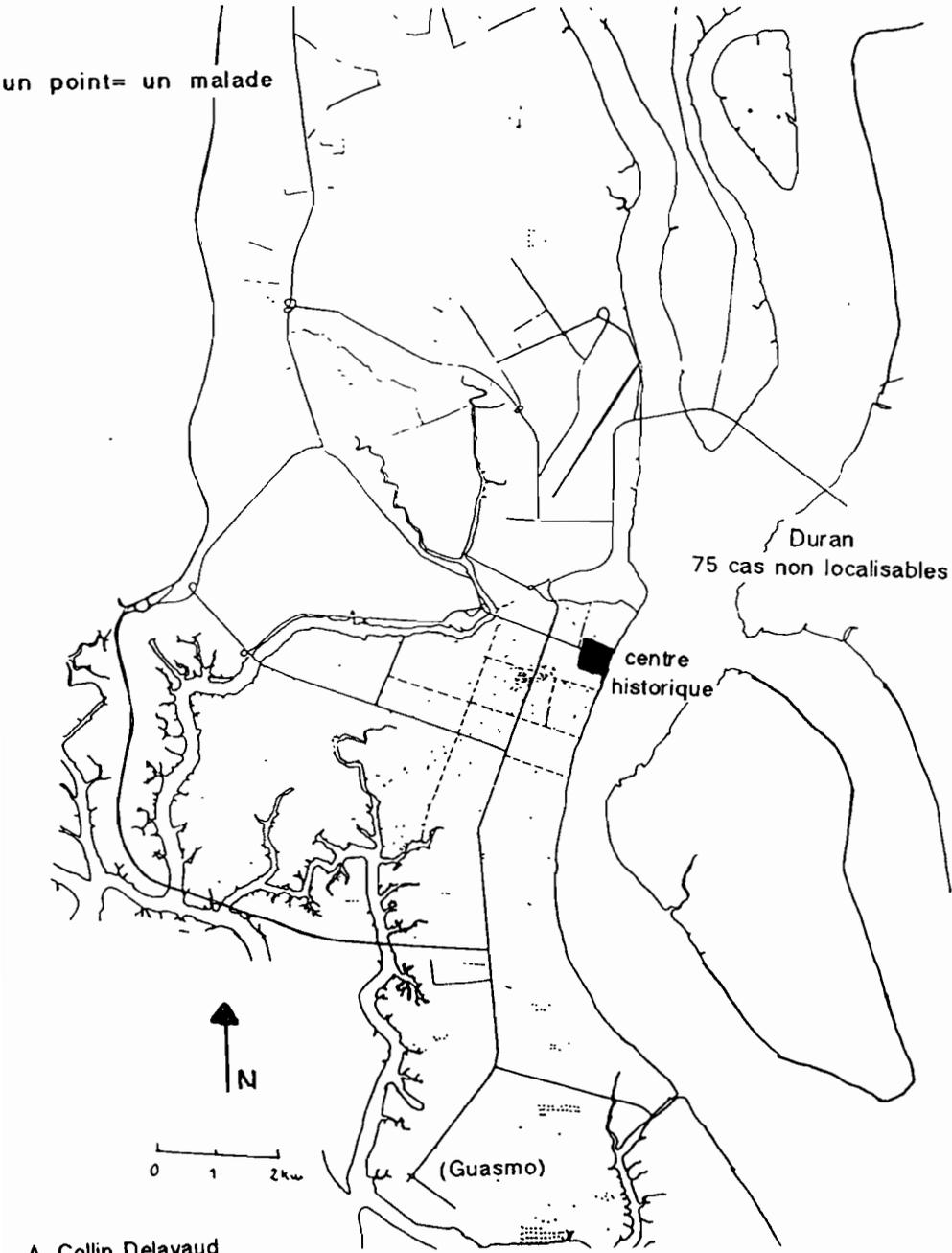
- la dispersion dans la ville, quel que soit le type de quartier, est particulièrement visible. Il n'existe aucun regroupement de cas significatif. Ainsi, des milieux urbains (zones des chenaux du delta, îlots mal remblayés, habitat populaire très pauvre) ou des catégories de population n'ont pas favorisé l'essor de l'épidémie. À peine trois ou quatre cas sont regroupés. Cette observation va à l'encontre de ce qui fut observé dans le milieu rural notamment lors de manifestations communautaires.

- le nombre important de cas dans les paroisses péricentrales et occidentales sans regroupement.

- la concentration dans le centre offre, de façon évidente, une localisation plus précise, avec la mise en valeur d'un secteur particulièrement touché : la zone péricentrale au sud-

(8) Cette étude a pu se faire grâce à l'accueil du directeur de l'hôpital, le docteur Telmo Eduardo Fernández Ronquillo qui nous facilita l'accès au registre de l'hôpital. Le docteur Carmen Pesantes nous a également aidé.

(9) Un grand merci à l'étudiante en médecine qui nous a aidé à localiser tous ces noms de rue sur un plan de Guayaquil et à la responsable des registres.



A Collin Delavaud

Fig. 4 - Répartition dans la ville des adresses des cholériques enregistrés à l'hospital de Infectología de Guayaquil (3 mars-1 août 1991).

ouest du centre historique correspondant à une partie des paroisses de Sucre, Bolivar, Rocafuerte et 9 de Octubre.

4. L'IMPORTANCE DES FACTEURS GÉOGRAPHIQUES

Cette enquête a permis de découvrir les différentes facettes de la situation, notamment la dispersion des cas dans toute la ville, dans les quartiers anciens ou récents, riches ou pauvres. Les conditions géographiques sont particulièrement rudes ici. Les conditions de ce monde tropical chaud et humide (10) et la présence d'eau de mer et d'eau mi-douce, mi-salée sont favorables à une probable endémicité de l'épidémie. Située au bord de l'estuaire du Guayas à l'apex d'un vaste delta, la ville de Guayaquil s'est développée depuis le XVIème siècle sur des sols marécageux remblayés peu à peu. Mais la croissance rapide des quatre dernières décennies s'est faite en majorité dans les îles du delta au bord des chenaux sur la mangrove même (Fig. 5).

Dans l'ensemble, si les quartiers résidentiels très aisés (Urdesa, Centenario, la Puntilla) semblent avoir été épargnés (11), ce ne sont pas pour autant les quartiers les plus pauvres en apparence et les plus récents, les quartiers palafittes sur la mangrove, qui ont été atteints. La maison de bambou au toit de palmes ou de tôles ondulées posée sur pilotis est l'habitat traditionnel sur la Côte équatorienne. Implanté ici sur des marécages, parfois avec des pieux de 3 mètres de haut, avec au-dessous un va-et-vient de l'eau en fonction de la marée, cet habitat adapté au climat est devenu insalubre en ville du fait de la trop grande proximité des maisons.

Cependant, la faible contamination observée dans les zones palafittes situées au bord des chenaux du delta pose la question suivante : vivre sur l'eau n'a pas amené plus de risques mais par contre vivre dans des quartiers en cours de remblaiement paraît en présenter plus. À un ou deux kilomètres d'un chenal, on trouve des cas de choléra également dispersés. L'explication pourrait être que la plus grande partie de ces quartiers du *suburbio* (Febres Cordero) s'est construite sur l'eau, il y a vingt cinq ans, et que le sol actuel est un remblai. Souvent mal fait, ce remblai n'est pas généralisé partout, en particulier dans les bordures des quartiers palafittes où l'habitat avance grâce à des passerelles et des pilotis de plus en plus hauts vers le centre du chenal. Enfin, la pratique municipale de ne remblayer, pour des raisons économiques, que les rues et non pas les centres des îlots (*manzanas*) laisse ainsi de vastes zones indéfinissables puisqu'il s'agit de trous d'eau sale (*aguas negras*) envahis par les déchets de plastique. Les maisons sont désormais posées sur la "terre ferme" côté rue mais pas du côté intérieur de l'îlot. Tout ceci est bien visible dans certains quartiers de Letamendi ou Febres Cordero. Ces quartiers, déjà relativement anciens, pour cette ville de croissance rapide, se sont taudifiés à leur façon avant même d'avoir achevé leur "urbanisation".

Dans l'immense paroisse du Sud, Ximena, les quartiers populaires autoconstruits du Guasmo (nord, sud, centre) ont été plus atteints que les lotissements de type classe moyenne situés de part et d'autre de l'axe qui mène au port et édifiés en zone plus stable. Dans le nord de la ville, où les terrains bâtis sont tous sur la terre ferme, ce sont les zones d'invasion et les quartiers populaires très récents le long de la route vers Daule qui enregistrent le plus de cas.

(10) La bactérie survit 10 à 13 jours dans l'eau de mer à 30-32°.

(11) Les statistiques sont marquées par le biais de la sélection des patients dans cet hôpital public.

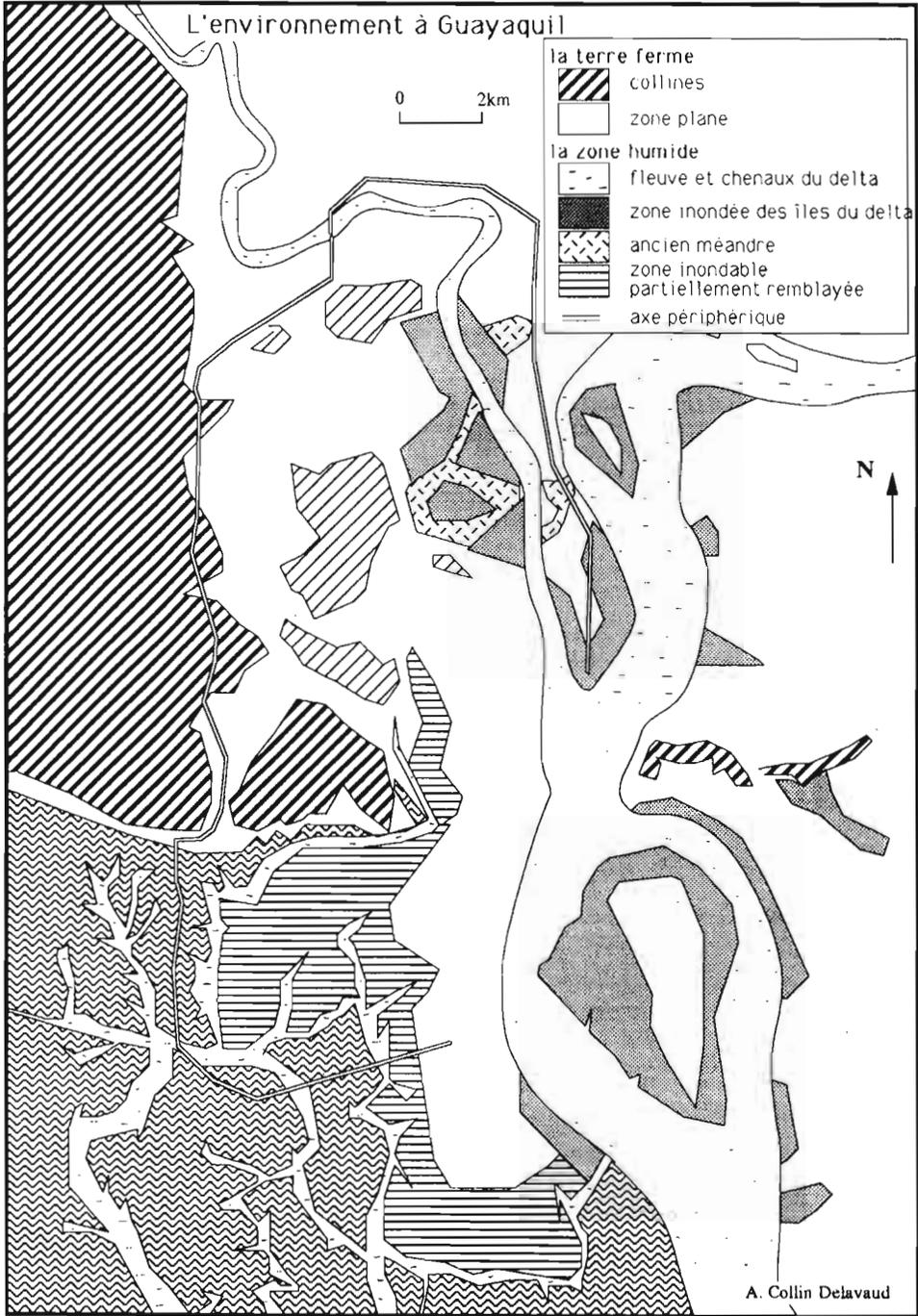


Fig. 5 - L'environnement à Guayaquil.

Il n'a pas été possible de mettre en relation la variation climatique et l'épidémie par manque de recul. L'attaque a eu lieu au cours de la saison des pluies sur la côte équatorienne mais n'avait-elle pas franchi des milliers de kilomètres de désert aride côtier péruvien ! En 1992, la recrudescence de l'épidémie est apparue au début de la saison des pluies alors que l'immunité acquise avec la première période de 1991 était estimée à six mois. Or, la saison des pluies a commencé en retard en 1992 en raison du courant chaud d'El Niño qui a repoussé les eaux froides du courant de Humboldt provoquant des pluies violentes anormales qui reviennent une fois tous les 8 à 10 ans. Les pluies se sont abattues en avril, donc tardivement, un peu après la reprise épidémique provoquant des inondations dramatiques dans tout le Guayas. En fait, le facteur le plus redoutable est peut-être la désorganisation que représentent les pluies et les inondations. Les rues non asphaltées de Guayaquil deviennent impraticables. Les camions citernes ne peuvent plus approcher des quartiers populaires. Les eaux usées mal drainées en temps normal se répandent partout.

5. LE RÔLE MAJEUR DE LA TAUDIFICATION EN CENTRE-VILLE

La localisation des cas dans le centre de la ville, issu du premier noyau historique, révèle une situation inattendue dans des quartiers populaires consolidés depuis 40 ans et plus. En effet, la surprise la plus grande vient du grand nombre de cas dans la zone centrale et plus précisément en bordure de la zone du quartier d'affaires à cinq ou six *cuadras* de la place de la cathédrale et de la zone bancaire et hôtelière (Fig. 6).

Cette situation s'explique par la composition urbaine du centre de Guayaquil. Le centre historique transformé ces dernières décennies en centre d'affaires avec des tours et des immeubles de luxe, possède encore sur son pourtour un grand nombre de maisons individuelles (12) ou de petits immeubles locatifs où s'entassent des familles en quête de logement bon marché. Il s'agit de quartiers anciens des premières décennies (1930-1960). Les rares maisons anciennes construites en bois ont disparu sous l'action du feu, des termites et des spéculateurs. Sans cesse remanié, ce secteur a des maisons d'un à trois étages composées de bois, de ciment ou de briques. Artisans et commerçants occupent les rez-de-chaussée. Des familles nombreuses se partagent les étages et les cours. Dans cette zone péricentrale, on trouve les plus fortes densités de Guayaquil.

La concentration d'un peu plus d'une centaine de cas de choléra, dans le sud-ouest de la zone péricentrale, prolongeant le quartier d'affaires, suppose des conditions différentes du reste de la ville où les cas se dispersent relativement bien quels que soient les milieux géographiques.

De fait, ce quartier, considéré comme équipé sur le plan des services publics depuis le début du siècle, présente des déficiences liées à la densité élevée, à la dégradation par manque de réparation, à la vétusté des installations. La pression manque au robinet, les coupures d'eau sont nombreuses. Les collecteurs d'égout fonctionnent plus ou moins..., les ordures connaissent des ramassages très irréguliers.

Pire, on découvre la présence de quatre marchés situés à 400 ou 500 mètres les uns des autres. Juan Mascotte, Mercado Central, Mercado Oeste et Santa Rosa sont des marchés de

(12) Il s'agit ici de maisons et de petits immeubles des années 50 qui ont remplacé peu à peu les vieilles maisons de bois du début du siècle dont il ne reste plus qu'une vingtaine.

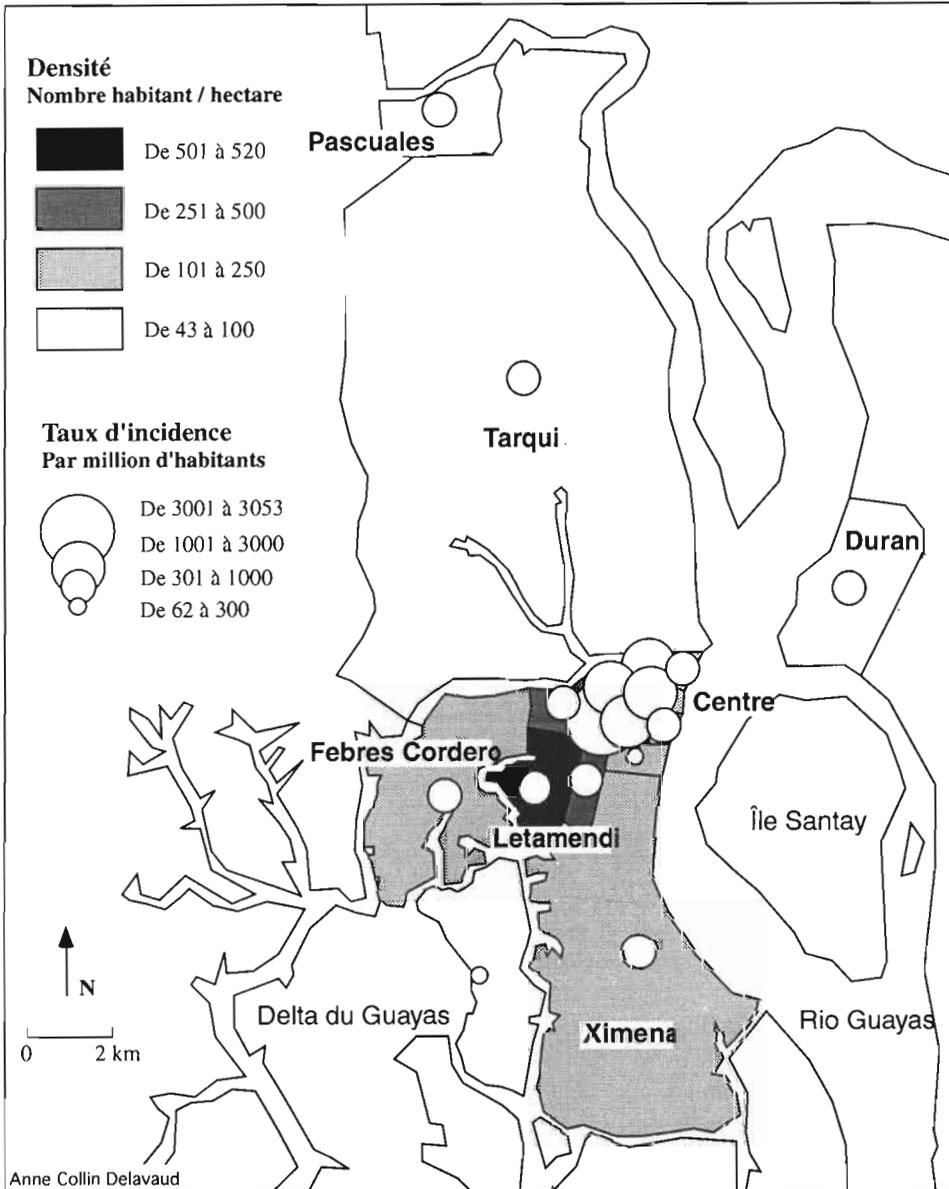


Fig. 6 - Le choléra à Guayaquil (3 mars-10 août 1991). Densité de population et taux d'incidence (Source : Étude épidémiologique [F. Gay, M. Rosenheim, A. Collin Delavaud], *Hospital de Infectología de Guayaquil*).

gros et de détail fonctionnant chaque jour pour approvisionner toute la ville. La circulation avec les rues envahies de véhicules et de vendeurs est pratiquement interrompue près des marchés. Parmi les commerçants, de nombreux indigènes d'origine rurale de la Cordillère des Andes. Les femmes sont là, encore en costume, malgré la chaleur, derrière les étalages. Parfois les produits sont sur le sol. Les hommes chargent et déchargent les camions provenant de tout le pays. Des restaurants ont dressé des tables sur les trottoirs. Des vendeurs ambulants offrent de la nourriture (13).

Tout autour des marchés Juan Mascotte et Santa Rosa, on trouve un habitat classique de la zone péricentrale de Guayaquil. En fait, il cache une densité de population très forte, la plus forte de la ville et une population en majorité indigène. Promiscuité et pratiques culturelles ont facilité ici la diffusion du choléra. Cette zone est le point d'arrivée des migrants accompagnant les camions de production vendue dans les marchés. Avant que l'on ne construise le terminal terrestre au nord de la ville, il y a moins de 10 ans, les autocars en partance pour tout le pays stationnaient dans toutes les rues voisines entre ces marchés et le centre d'affaires. Cette zone déjà peuplée et animée par ses nombreuses activités artisanales et commerciales, s'est donc taudifiée depuis plusieurs décennies avec des équipements non adaptés à la demande croissante. Les infrastructures collectives (égout, eau potable et ramassage d'ordures) sont à l'image du reste de la ville mais la réalité est ici amplifiée par la densité de population résidente ou présente chaque jour et par l'accumulation massive des déchets.

6. LA DRAMATIQUE SITUATION SANITAIRE DE LA VILLE

Dans ces contextes géographiques particuliers de développement sur des remblais et de concentration de population en secteurs centraux, il faut ajouter les risques liés au sous-équipement sanitaire par manque d'infrastructures ou par leur vieillissement dans des secteurs centraux très peuplés (Collin Delavaud, A., 1989).

En fait, cette épidémie est révélatrice, une fois de plus, d'un mauvais fonctionnement général de la ville. On sait qu'à Guayaquil tout va mal depuis longtemps. La ville n'est-elle pas régulièrement déclarée en état d'urgence sanitaire comme en avril 1992 ? Le choléra s'y installe de manière endémique et ne fait que s'ajouter à de nombreuses autres maladies et épidémies qui resurgissent ou surviennent pour la première fois (la dengue) (Collectif, 1990).

Couverture des services à Guayaquil

	1985	1991
Eau potable		
Population totale	1450 000	1700 000
Population servie en eau	943 000	1 139 000
Couverture en %	65	67
Demande en m ³ /jour	478 000	610 000

(13) Guayaquil en 1991 ne disposait toujours pas pour 1 600 000 habitants de marché de gros édifié avec des bâtiments fonctionnels. Quito dispose depuis plus de 10 ans de cet équipement de base.

Production en m ³ /jour	320 000	420 000
eau perdue (1988)	189 000	
Égout	63 % de la surface	2/3 de la population connectée
Ordures	ramassage sur 20 % de la surface 44 % du volume des ordures ramassé 750 000 h desservis = plus 800 000 non desservis	
Remblaiement	sans données	
Contamination des chenaux du delta		situation très grave
Contamination de l'air	situation	grave dans certains secteur
Bruit		situation alarmante
Absence d'eau potable dans le logement	40%	
Absence de latrine dans le logement	50 %	
Toit de zinc % des logements	60 %	
Plancher de bois	40 %	
Autoconstruction	60 %	

Conclusions : 40 à 50 % des logements dans une situation insatisfaisante pour une vie décente.

Sources : EMAP-G, EPAG-G- BEDE - CERG- presse -

Les difficultés de gestion, voire même l'absence de gestion, expliquent une grande partie de la situation sanitaire de la ville qui a dû faire face à une croissance exceptionnelle :

- la croissance démographique très forte de plus de 6% à 8% par an. La ville est passée de 510 000 habitants en 1962 à 1 600 000 en 1990. Cet accroissement spectaculaire dépasse celui des grandes villes latino-américaines du fait de la croissance générale de la population côtière, terre pionnière qui, par sa mise en valeur à partir des années 50, a attiré une partie de la population serranaise. Guayaquil a constitué un foyer d'accueil pour toutes les populations rurales en quête de migration vers la ville.

- la croissance des activités de Guayaquil a facilité la venue de tous ceux en quête d'emplois. Réforme agraire, crise de la banane, industrialisation, équipements ont favorisé l'attraction urbaine.

- la croissance spatiale de la ville s'est faite dans le plus grand désordre. Les autorités ont volontairement laissé tous les migrants s'installer dans les terres marécageuses des îles du delta par invasion. L'habitat palafitte était la seule solution. Les zones de terre ferme n'ont

été mises sur le marché qu'à partir des années 80 dans le cadre de programmes de logements pour les classes moyennes. La ville est passée de 2 200 hectares en 1962 à 19 000 hectares en 1990 !

Croissance très forte, corruption et absence de gestion municipale jusqu'en 1992 expliquent, en grande partie, les conditions favorables au développement de l'épidémie. Dans un tel chaos urbain il aurait fallu des pratiques sociales adaptées à ce milieu chaud et humide. Comment cette société urbaine composée en majorité d'éléments déracinés pouvait-elle réagir à cette épidémie ?

7. LA PART DES PRATIQUES SOCIALES

Étant donné les conditions sanitaires présentes, il faudrait une discipline rigoureuse, à la fois individuelle et collective, pour échapper aux risques épidémiologiques. L'homme est le principal réservoir de vibrions cholériques. C'est lui qui contamine directement son environnement : l'eau et la nourriture.

Ici, dans une ville où la pauvreté domine, les mauvaises pratiques d'hygiène cohabitent avec les facteurs favorables de survie du vibron. Environnement aquatique semi-marin mais aussi manque d'habitudes des pratiques rigoureuses qu'impose l'hygiène en milieu tropical. Les habitants sont originaires de toutes les régions du pays dont certaines en altitude. Déracinés, ils sont souvent depuis moins d'une génération en ville et doivent faire face non seulement à des modes de vie différents mais aussi à des risques nouveaux. L'impact de la campagne officielle lors de la première attaque de l'épidémie a joué un rôle efficace pour la prévention dans les milieux urbains, mais peut-être pas sur toutes les catégories sociales. Les messages n'ont peut-être pas été compris par certains habitants parce que trop éloignés de leur réalité conceptuelle (Cifuentes & Sola, 1992). Les serranais récemment arrivés en ville, regroupés dans les taudis centraux ou temporairement présents n'ont pu bénéficier de cette campagne (14). Il faut noter aussi la désinformation favorisée par l'émergence de positions racistes, où le choléra n'est plus considéré comme une maladie de la pauvreté mais comme une manifestation "propre" des indigènes et de leurs habitudes. Accusation que supportera également la communauté noire.

Les pratiques sociales ont joué un grand rôle dans la diffusion du choléra notamment la mobilité et la concentration de population issue de cette mobilité à certains moments. L'extension de l'épidémie s'est faite très rapidement en raison de cette mobilité très forte entre les différentes régions de la Côte et entre celle-ci et la Sierra. En quelques jours, la maladie a quitté le Sud pour gagner l'extrême Nord du pays. Toutes les catégories sociales se déplacent, même les plus pauvres provenant de zones rurales très isolées (migration de travail saisonnier dans les plantations côtières). Les populations dispersées à travers le pays pour des raisons d'emploi regagnent leur famille pour les fêtes. Ces retours ont facilité la diffusion du choléra par les porteurs sains comme par les cholériques qui en quelques heures de car se retrouvaient dans des provinces extrêmes et dans des localités parfois très éloignées des centres importants.

(14) Les paysannes de la Sierra parlent la langue indigène quichua. Un grand nombre d'entre elles sont analphabètes.

Moments privilégiés de rencontre entre les populations (porteurs sains et les autres), certains jours de l'année ont été marqués par des catastrophes : les dimanches et les fêtes. Il est facile de constater le plus grand nombre de cas enregistrés le lundi et au moment des grandes fêtes nationales : la Semaine Sainte (début mars 1991), la fête des mères, la fête du Corpus Christi, se voient sur les courbes épidémiologiques. Dans la panique, des fêtes votives de quartier ont été supprimées ou très écourtées.

Il reste étonnant que les marchés, lieux de rassemblements quotidiens et lieux d'échange, n'aient pas été présentés comme foyers de contamination et n'aient pas fait l'objet de mesures restrictives. Leur fonction vitale l'est ici à double titre.

Les pratiques funéraires ont été vite repérées étant donné l'importance spectaculaire des cas déclarés à la suite d'un enterrement. À Guayaquil, en raison de la chaleur, on ne tarde pas à enterrer le mort. L'origine serranaise d'une partie de la population cherche néanmoins à conserver le mort selon les habitudes de la communauté andine. En cordillère, il faut une veillée de trois jours et trois nuits pour que le mort soit dignement honoré par les siens. Familles et voisins se réunissent dans la maison mortuaire. Cette coutume ancestrale de fêter le départ dans un autre monde au cours d'une fête d'adieu, est aussi l'occasion pour la communauté de se retrouver unie et solidaire du mort (Sampertegui *et al.*, 1991). On appelle par radio tous les parents dispersés dans le pays. Nourriture et boisson sont offertes par la famille. Promiscuité, alcool et manque d'hygiène feront que certaines veillées (*velorio*) aboutiront à plusieurs dizaines de cas par contact direct avec un cholérique (soit le mort soit un "porteur") ou avec la nourriture contaminée. Très vite, le temps de veillée s'est raccourci de lui-même par peur mais, une fois l'alerte passée, les habitudes sont revenues.

8. UNE VULNÉRABILITÉ FORCÉE LIMITÉE PAR LE FAIT DES MÉDIAS ET DU SYSTÈME HOSPITALIER

Si les victimes n'ont pas été plus nombreuses, c'est bien parce que les médias ont alerté pendant plusieurs semaines les populations, en donnant à longueur d'émission des conseils d'hygiène élémentaire dont celui de se rendre très vite à l'hôpital dès les premiers symptômes. Cette campagne avait commencé d'ailleurs avant l'arrivée de l'épidémie en Équateur, aussitôt l'alerte donnée par le Pérou près d'un mois auparavant. Pour la première fois, une prévention massive a pu être proposée par des messages simples, faciles à percevoir car ils touchaient la vie de tous les jours : se laver les mains, faire bouillir l'eau, ne pas acheter de la nourriture dans la rue... Faciles à comprendre, ils n'étaient pas pour autant aisés à réaliser étant donné les difficultés sanitaires, le coût de l'eau bouillie, l'absence de sanitaire dans une grande partie des maisons. Presse, radio, télévision et affichage y compris en quichua ont quadrillé le pays en offrant à la fois des conseils et des menaces. Les descriptions de la maladie, utiles dans un pays où la diarrhée est fréquente, de l'urgence d'une réhydratation et de la nécessité de gagner au plus vite un dispensaire ou un hôpital, ont fait gagner beaucoup de vies à cette population en état de risque.

Le système hospitalier a pu de son côté répondre à l'afflux des malades. La réhydratation n'est pas un soin difficile et les stocks de médicaments étaient suffisants. L'analyse des cas enregistrés à l'hôpital J.R.M. révèle que plus de la moitié des cas ne résidait pas à Guayaquil. Ceci traduit à la fois une confiance dans la grande ville et une accessibilité parfois plus grande que vers l'hôpital du canton le plus proche. 30 % des cas viennent de la campagne

proprement dite. Néanmoins, ce choix est aussi dicté par la concentration qualitative et quantitative des services médicaux dans les villes et en particulier dans la capitale régionale.

9. CONCLUSIONS

Cette épidémie en frappant si fortement la ville la plus importante du pays a servi de révélateur d'une situation sanitaire désastreuse. Ce fut l'occasion d'une redécouverte des conditions de vie de près de la moitié de la population et des déficiences des services publics que chacun connaissait mais avec lesquelles on s'habitua à vivre. L'état d'urgence sanitaire régulièrement décrété par les autorités est à chaque fois un appel au secours pour alerter l'opinion publique sur cette vulnérabilité permanente des lieux rendue encore plus effrayante par la pauvreté qui frappe une partie de ses habitants. En réalité, cette maladie de la misère a touché en plus grand nombre les secteurs aux populations parmi les plus démunies de la ville, ceux des quartiers taudifiés et ceux des quartiers périphériques anciens mal remblayés et densifiés. La géographie du choléra n'est pas aussi irrémédiablement inféodée à la géographie de la pauvreté puisque tous les quartiers pauvres, récents et moins denses, ont été moins atteints.

Le choléra est apparu inadmissible dans le cadre d'une métropole nationale aux affaires économiques de premier plan dans le pays. Ville de contrastes où misère et richesse se côtoient en permanence dans le centre-ville, Guayaquil a déjà une triste réputation sur le plan non seulement sanitaire mais aussi sur celui de sa gestion municipale, particulièrement déficiente depuis plusieurs décennies. Cette situation de risque urbain permanent était, au début des années 90, à son comble avec un manque d'eau qui frappait la totalité de la ville y compris les quartiers riches et les tours du quartier d'affaires. En 1992, il y eut un grand nettoyage de la ville par l'Armée, on essaya de réoxygéner les eaux mortes du chenal principal, l'Estero Salado, on dragua l'estuaire du Guayas pour remblayer massivement des quartiers entiers et même le plus récemment habité, l'île Trinitaria. Ces énormes efforts doivent se poursuivre avec la même intensité et être accompagnés de la diffusion de conseils d'hygiène (alimentaire et sanitaire). Si les années qui suivirent cette attaque ont enregistré une diminution des cas, il n'en demeure pas moins qu'une recrudescence menace toujours dès que se fera ressentir le moindre relâchement des habitudes individuelles et collectives. Il reste difficile d'analyser l'évolution des dernières années car l'enregistrement des statistiques n'est plus aussi bien assuré par les services de santé comme ils avaient réussi à le faire en plein démarrage de l'épidémie. Ce n'est pas demain que la ville de Guayaquil offrira les conditions de sécurité sanitaire à sa population mais néanmoins une nouvelle forme de "conscience urbaine" peut peut-être sortir de cet aspect sanitaire d'une crise vécue depuis plusieurs décennies par chaque fois plus d'habitants.

Références citées

- BERCHE, P. & WEIL, O., 1993 - L'épidémie de choléra en Amérique Latine. *Médecine et Maladie Infectieuse*, 23 : 85- 98.
- CIFUENTES, M & SOLA, J.H., 1992 - *El cólera, una respuesta desde la comunidad andina*, 206p., Quito : Caap Cello.
- COLLECTIF, 1990 - *Guayaquil: realidades y desafíos*, 376p., Quito : Cordes.
- COLLINDELAUVAUD, A., 1989 - Vivre à Guayaquil, c'est vivre sur l'eau et manquer d'eau. in : *Documents de recherche du CREDAL-CNRS-Paris III* : 16P., Colloque Ciudadagua, Cités-Unies, Montevideo, 1988.
- DODIN, A., 1981 - Épidémiologie mondiale du choléra. Évolution entre 1970 et 1980. *Bulletin de la Société de Pathologie Exotique*, 74.
- DODIN, A., 1992 - L'eau et le choléra. in : *Sciences et changements planétaires/Sécheresse* : 251-259, vol. III, n°4.
- FÉLIX H., 1991 - La pandémie cholérique en 1991. *Cahiers d'études et de recherches francophones Santé*, vol. I, n°3 : 241-251.
- FERNÁNDEZ RONQUILLO, T., 1994 - La epidemiología del cólera, 18p., Guayaquil : Memorias del Hospital de Infectología R.M.
- SEMPERTEGUI, R., MORETA, E & NARVAEZ, A., 1991 - Brote de cólera de fuente común en la provincia de Tungurahua. *Boletín Epidemiológico MSP*, n° 31 : 1-5 ; Quito.
- VAGUET, A., 1985 - *Eau, ville et maladie, le choléra dans une métropole indienne : Hyderabad*, 45p., Montpellier : Atelier de Géographie de la Santé, GEOS.
- WEIL, O. & BERCHE, P., 1992 - The cholera epidemic in Ecuador towards and endemic in Latin America. *Revue d'Épidémiologie et de Santé Publique*, n° 40 : 145-155.

**LA GESTION DES RISQUES, SES
OUTILS, SES PROBLÈMES**

**LA GESTIÓN DE LOS RIESGOS, SUS
HERRAMIENTAS, SUS PROBLEMAS**

GESTION DE L'ENVIRONNEMENT URBAIN ET RISQUES "NATURELS" LA PROBLÉMATIQUE DES QUEBRADAS À QUITO (ÉQUATEUR)

Pascale Metzger, Pierre Peltre***

Résumé

Les nombreuses *quebradas*, ravins à écoulement sporadique qui traversent le site de Quito, ont été systématiquement remblayées lors de l'urbanisation, pour servir notamment de zones de décharge plus ou moins contrôlée pour les déchets solides. À partir d'une cartographie diachronique, l'historique de ce remblaiement du réseau hydrographique est décrit, et les risques de nature morphoclimatique induits par ces profondes transformations, étudiés par ailleurs, sont brièvement évoqués. Ces zones spécifiques d'un site urbain de montagne relèvent d'un statut juridique de protection propre au réseau hydrographique en ville, lequel est profondément modifié dans la pratique après remblaiement, voire simplement oublié.

Tout se passe comme si le remblaiement et l'urbanisation du réseau hydrographique faisait l'objet d'un large consensus social, pour gagner de l'espace, donner une solution intra-urbaine à l'évacuation des déchets, et éradiquer des zones socialement incontrôlées. Les représentations sociales qui induisent une politique non explicite de gestion du site, sont analysées et discutées, au moment où les gestionnaires de la ville s'interrogent quant au bien-fondé de la poursuite du processus, alors que ce dernier se poursuit activement pour cacher la forte pollution du rio Machangara, principal émissaire du bassin.

Mots-clés : *Équateur, Quito, environnement urbain, hydrographie urbaine, représentations sociales, risques naturels.*

MANEJO DEL MEDIO AMBIENTE Y RIESGOS "NATURALES". LA PROBLEMÁTICA DE LAS QUEBRADAS EN QUITO (ECUADOR)

Resumen

Las numerosas quebradas que atraviesan la ciudad de Quito fueron constantemente rellenadas durante el proceso de urbanización, sirviendo de basurero controlado o no. Se describe la historia del relleno de la red hidrográfica mediante su cartografía en el tiempo, y los riesgos de tipo morfoclimático producidos por esas transformaciones, que fueron investigados anteriormente, son resumidos. Las zonas de quebradas, específicas de un sitio urbano montañoso, tienen un estatuto jurídico propio de protección de la red hidrográfica, la cual se encuentra fuertemente modificada luego del relleno, hasta ser simplemente olvidada.

* ORSTOM, mission en Équateur - Apartado 17.11.6596 - Quito - Équateur. Téléphone : (593-2) 543 211 ; Fax : (593-2) 448 699. E-Mail : metzger@orstom.ecx.ec

** ORSTOM, Laboratoire de Cartographie Appliquée, 32 av. Henri Varagnat (ex 72 route d'Aulnay) 93143 Bondy Cedex. Téléphone : (1) 48 02 45 08 ; Fax : (1) 48 47 30 88. E-Mail : peltre@bondy.orstom.fr.

Se puede analizar el proceso de relleno y de urbanización de la hidrografía como si fuera resultante de un amplio consenso social para ampliar el espacio urbano, facilitar la evacuación intra-urbana de los desechos, y borrar zonas socialmente incontroladas. Se analizan las representaciones mentales colectivas que fundan una política de relleno de la red hidrográfica, la que prosigue actualmente muy activa en el río Machangara, principal río de la cuenca con mucha contaminación, y a pesar del debate que se desarrolla en cuanto a la necesidad de los rellenos.

Palabras claves: Ecuador, medio ambiente urbano, hidrografía urbana, representaciones sociales, riesgos naturales.

URBAN ENVIRONMENT MANAGEMENT AND "NATURALS" HAZARDS. THE QUEBRADAS PROBLEMATIC IN QUITO (ECUADOR)

Abstract

The natural drainage network of the city of Quito was filled in during the urban growth, and a large number of the *quebradas* (ravines with a wadi regime) were used as dumps to handle urban rubbish. The history of this fill in process is described, based on a diachronic cartography, and the morphoclimatic hazards induced by these important transformations, previously studied, are briefly summarized. The juridic protection statute of the hydrographic network appears as deeply modified by the fill in of the ravines, and is frequently forgotten.

The hydrographic network fill in during urbanization can be analyzed as if it were the result of a broad social consensus, to gain space, give an easy solution to the intra-urban evacuation of rubbish, and eradicate social out of control zones. An analysis is offered of the collective mental representations that underlie the infilling policy of the hydrological network; this policy is currently being actively pursued in the Rio Machangara, the highly polluted main river in this drainage.

Key words: Ecuador, Quito, Urban environment, Urban hydrography, Social representations, Natural hazards.

Y a-t-il de réelles contraintes de site au développement d'une ville andine ? Les études menées sur la capitale de l'Équateur (1), tendraient à montrer qu'il n'y en a guère : la ville reconstruit son site et en assume les contraintes résultantes, notamment en termes de risques morphoclimatiques. Dès le XVI^e siècle, les rapports au Roi d'Espagne s'interrogeaient sur le choix d'un site aussi peu adapté pour cette ville (Ponce, 1992), au pied d'un volcan, serré entre les *quebradas*, ravins qui traversent et encadrent la ville coloniale.

L'origine du mot *quebrada* est "quebrar", qui signifie "casser" en espagnol. Le terme "quebrada" fait avant tout référence à un ravin, une morphologie spécifique de cassures dans le paysage, dues à de profondes incisions linéaires dans les épaisses cendres volcaniques. Mais la *quebrada* est en même temps un torrent, élément d'un système hydrographique de montagne très contrasté, qui ne fonctionne le plus souvent qu'en cas de grosse pluie. À Quito, les nombreuses *quebradas* du site ont été systématiquement remblayées au point de presque disparaître à la vue, et font l'objet d'un traitement social très particulier.

La problématique des *quebradas* de Quito touche à la fois aux risques dits "naturels" et à la gestion du site urbain. Parce que le réseau de drainage naturel est aujourd'hui largement remblayé et transformé en système urbain d'écoulement des eaux pluviales et

(1) Quito est située à 0°10' de latitude Sud, à environ 2 800 mètres d'altitude, au pied du volcan Pichuncho (4 794m). La ville s'étend sur une quarantaine de kilomètres dans le sens Nord-Sud et sur 5 à 8 kilomètres dans le sens Est-Ouest. Elle comptait selon le recensement de 1990, 1 093 000 habitants.

usées, les *quebradas* sont des lieux à risques : inondations, crues boueuses, effondrements de chaussée, largement dus aux déficiences du réseau d'égouts et aggravés par l'augmentation de la population et des biens dans les zones riveraines. Remblayées ou ouvertes, les *quebradas* subissent un processus historique de banalisation, d'urbanisation.

Ce problème spécifique, sporadiquement aigu pour les gestionnaires de la ville, intrigue les chercheurs depuis plusieurs années ; il a donné lieu à des travaux portant sur cette question de l'articulation entre la gestion du site urbain et la problématique des risques collectifs (2). La compréhension du phénomène d'urbanisation de ces ravins renvoie aux champs politique et économique, mais aussi aux représentations sociales attachées aux *quebradas* comme lieux physiques et symboliques.

L'objectif de ce texte est d'exposer les mécanismes qui transforment ces espaces particuliers en sol urbain ordinaire. Le processus qui banalise les *quebradas* comporte différents éléments, qui interviennent de façon non nécessairement chronologique : l'effacement physique, l'impuissance du statut juridique spécifique, voire sa disparition pure et simple, et la normalisation de l'occupation du sol. La compréhension du processus touche aux caractéristiques physiques et à l'histoire du remblaiement des *quebradas*, à la législation qui les régit, aux usages qu'elles connaissent, et aux politiques dont elles font l'objet.

1. UN RÉSEAU HYDROGRAPHIQUE EN VOIE DE DISPARITION

Sans aucun doute, les *quebradas* sont des espaces physiques d'envergure très particuliers : ces ravines coupent la ville de Quito sur une largeur qui peut aller de 5 à 30, voire 100 mètres pour une profondeur de 5 à 70 mètres, avec une bonne fréquence entre 15 et 20 mètres.

Les plus grandes atteignent 5 à 8 kilomètres de long pour une superficie de bassin-versant de l'ordre d'une dizaine de kilomètres carrés ; ce sont par exemple les *quebradas* Rumiurcu, San Antonio, et Rumipamba, qui prennent leur source au-dessus de 3 800 mètres d'altitude. Un second type de *quebradas*, plus courtes, de 0,3 à 4,9 km, ont des bassins-versants de 3 km² au plus : la Léa, San Isidro, Miraflores, Bellavista entre autres. La troisième forme identifiée est celle des *quebradas* "ouvertes", larges, faisant plus de 10 km², et situées en dessous de la cote des 3 400 mètres, type rio Grande au sud de la ville (Janeau, 1994).

Le nombre des *quebradas* est difficile à chiffrer, variant selon l'altitude à laquelle on les compte, plus nombreuses sur les pentes du Volcan Pichincha que dans la gouttière de Quito où elles se rassemblent. Si l'on effectue le comptage dans la tache urbaine de la capitale équatorienne, on en compte 69 (38 à l'ouest, 31 à l'est). Certaines études font état de 32 *quebradas* sur les flancs du Pichincha (Krochin & Carcelen, 1989 : 1). L'EMAAP-Q (3) en identifie 52 au total. Le travail effectué précédemment sur l'ancien réseau de drainage naturel de la zone de Quito en dénombre 85 (Peltre, 1989 : 91).

Le rio Machangara, drain majeur qui coule en direction du nord-est au pied des collines orientales de la ville, est constitué du rassemblement de toutes les grandes *quebradas*

(2) Cf. Peltre, 1989 ; Peltre, 1991 ; Peltre, 1992 ; De Noru *et al.*, 1986 ; Krochin & Carcelen, 1989 ; Novoa *et al.*, 1987 ; Gomez, 1984 ; Rider, 1984 ; Winckell, 1984 ; Municipio Metropolitano de Quito, 1995.

(3) Empresa Municipal de Alcantarillado y Agua Potable de Quito, l'entreprise municipale chargée de l'assainissement et de l'approvisionnement en eau potable de Quito.

du Sud. Il reçoit directement une partie de celles du Pichincha. Une autre série de *quebradas* du Pichincha se jette dans la *quebrada* Batán Grande qui rejoint le Machangara en sortie de ville. Un dernier ensemble de *quebradas* du Pichincha débouche dans la grande *quebrada* Carcelén, au nord de la ville. Il n'y n'a donc que deux évacuations (4) pour l'ensemble du système hydrographique qui draine l'espace urbain de Quito. Le rio Machangara reçoit à lui seul 70% des écoulements de la ville, les 30% restants allant à la *quebrada* Carcelén ou rio Monjas qui se jette dans le rio Guayllabamba (cf. Fig. 1).

Il est en soi intéressant de relever qu'il n'y a pas consensus sur le nombre de *quebradas*, pas plus que sur leur nom d'ailleurs : selon les époques, selon les cartes ou plans, les *quebradas* changent de nom ou sont appelées "río". La confusion subsiste encore actuellement et concerne même de grandes *quebradas* : c'est ainsi que la Pulida Grande s'appelle aussi San Carlos, la *quebrada* Carcelén est aussi El Colegio et peut même porter le nom de rio Monjas, la *quebrada* Rumipamba est parfois nommée rio Ingapirca. Le cours d'eau qui traverse le sud de la ville est appelé tantôt *quebrada* Río Grande tantôt le Río Grande. Cette multiplicité des noms (5) est issue d'une stratification historique liée à un mode de dénomination très local qui fait qu'un cours d'eau change jusqu'à trois ou quatre fois de nom dans la partie amont de son cours. Il est ainsi courant de rencontrer d'amont en aval un nom quichua, puis un ou plusieurs noms chrétiens selon les anciennes haciendas traversées, sans rapport hiérarchisé clair avec les confluences, et dans certains cas jusqu'à trois noms différents selon la carte que l'on consulte. D'une façon générale, l'analyse diachronique des cartes et plans successifs ne permet de déceler aucune logique toponymique, et un certain désordre cartographique règne dans les dénomination de *quebradas*, qui sont parfois même topologiquement confondues entre elles d'une carte à l'autre. Enfin on note une sérieuse perte de la mémoire collective des noms de *quebradas*, probablement liée au brassage récent des populations riveraines par l'urbanisation.

La grande majorité des *quebradas* de Quito sont des cours d'eau intermittents, ne fonctionnant qu'en période de grosses pluies. C'est d'ailleurs ce qui, selon les hydrologues, différencierait une "quebrada" d'un "río" dont le débit peut être très irrégulier mais reste permanent. Cela dit, dans un site urbain comme celui de Quito, sujet à de nombreuses modifications dans l'usage du sol, ce qui autrefois était "río" selon cette définition pourrait éventuellement aussi bien être devenu "quebrada", ou inversement, encore que l'urbanisation ne semble guère avoir touché la toponymie du réseau hydrographique. D'ailleurs, certaines *quebradas* sont dites "secas", parce qu'elles ne fonctionnent pas (ou plus ?) comme réseau d'écoulement des eaux de pluie, même en cas de grosse averse.

Le processus de remblaiement qui vise à transformer en sol urbain la *quebrada*, perçue d'abord comme une rupture indésirable dans la ville, commence dès la Colonie ; on peut voir en effet sur les cartes du XVII^e siècle plusieurs tronçons de *quebradas* remblayées dès cette époque. L'analyse diachronique des remblaiements montre qu'ils accompagnent la croissance spatiale de la ville, soit par anticipation de son développement, soit après coup, pour homogénéiser l'espace et supprimer les discontinuités dans le territoire ; ces dernières sont non seulement physiques, mais correspondent aussi à des représentations mentales de lieux

(4) Ou trois selon la manière de compter.

(5) Voir le tableau élaboré par P. Peltre reconstituant les noms donnés aux *quebradas* selon quelques plans ou cartes successifs (in : Peltre, 1989 : 90-92).

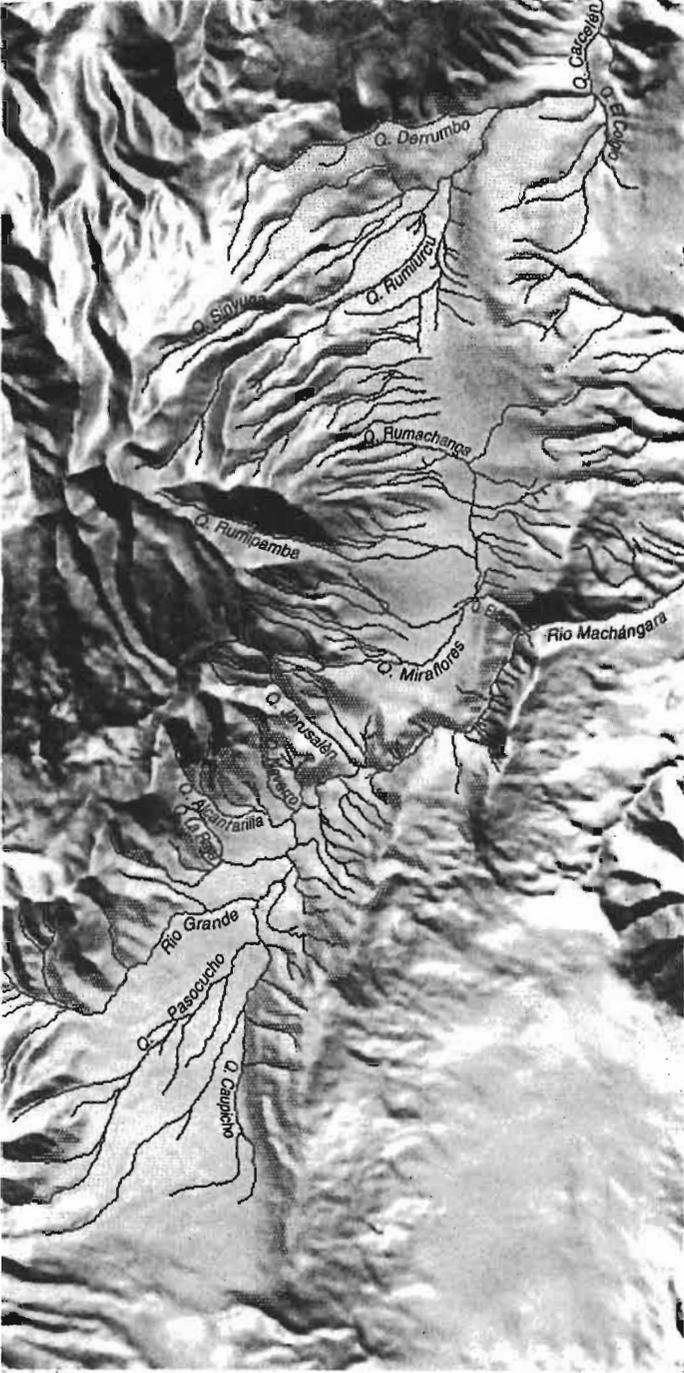


Fig. 1 - Les quebradas de Quito.

socialement incontrôlés, qu'il est bon d'éliminer, de combler, d'effacer. Le remblaiement des *quebradas* permet donc de suivre l'évolution de la croissance de la ville et de sa modernité, puisque d'une certaine façon, le remplissage d'une *quebrada* renvoie à une domestication de la nature, laquelle se venge de temps à autre...

En 1903, la ville se limitait à ce qu'on appelle aujourd'hui le Centre Historique. Les premiers remplissages concernent les cours inférieurs des *quebradas* Manosalvas (calle Sucre) (Fernández, 1990 : 15), Jerusalem (Avenida 24 de Mayo), la Marin (cf. Fig. 2) (6). En 1922, on

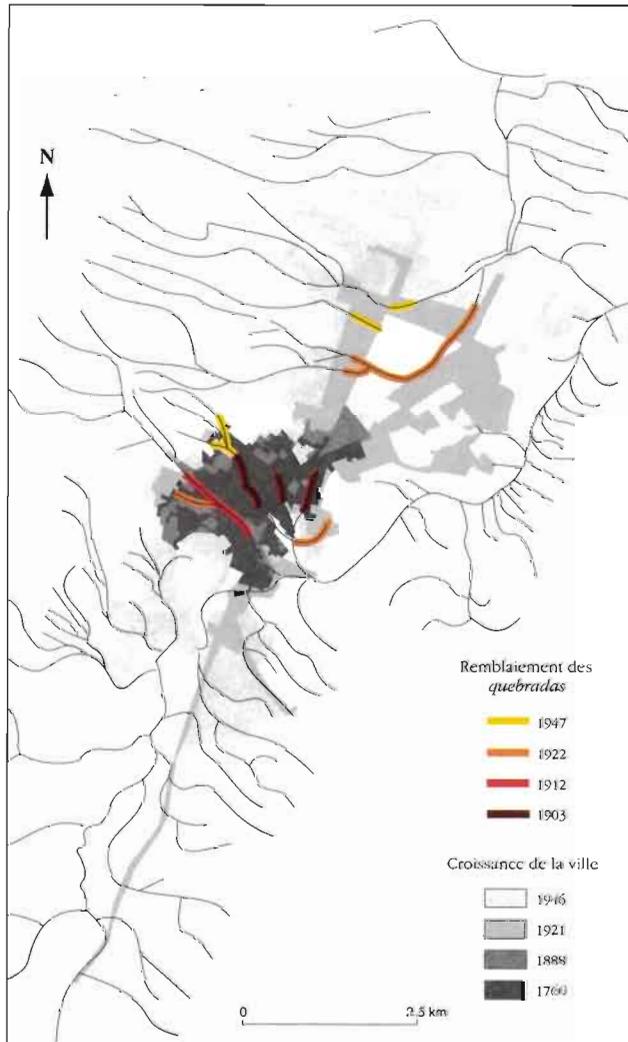


Fig. 2 - Croissance de Quito et remblaiement des *quebradas* entre 1760 et 1947.

(6) Pour la localisation des *quebradas* citées dans l'analyse qui suit, cf. Peltre, 1989.

note une progression importante vers le Nord aussi bien de la tache urbaine que des remplissages de *quebradas* avec le bouchage de la partie basse des *quebradas* Miraflores et Armero, qui, grosso modo, correspond aujourd'hui à l'avenida Seis de Diciembre au sud de l'Avenue Colón.

L'étape qui s'achève en 1947 montre une progression de la ville vers le Nord mais aussi une extension non négligeable vers le Sud, compacte jusqu'à la naissance de l'actuelle Avenida Teniente Hugo Ortiz et linéaire le long de la Vicente Maldonado. Par contre, le remplissage de *quebradas* est limité au Nord sur cette période : on peut noter la disparition de la partie basse occidentale de la *quebrada* Vásconez, entre l'avenida América et la Diez de Agosto, et d'un tronçon de la *quebrada* Pambachupa, à l'est de la Diez de Agosto. Après 1945, le remblaiement des *quebradas* s'intensifie, accompagnant l'accélération de la croissance spatiale de la ville, notable à partir de cette date (Fig. 3).

La période suivante, de 1946 à 1960, met en évidence une poussée brutale de la ville presque uniquement en direction du Nord, accusant l'impact décisif de la construction de l'aéroport. Dans la partie nord-occidentale de la ville, les *quebradas* du Pichincha qui passaient dans la zone de l'aéroport disparaissent dans leur partie la plus basse (7). Celles qui au Nord traversaient la zone urbaine dans toute sa largeur, d'Ouest en Est, sont supprimées à l'exception de la Rumipamba, dont le cours au niveau du Parc de la Carolina ne disparaîtra que dans la période suivante. Dans la partie orientale, on peut observer le prolongement du remplissage de ce qui est aujourd'hui la Seis de Diciembre et le début des travaux de comblement des *quebradas* qui descendent des collines du Batán. Dans le sud de la ville, le remplissage des *quebradas* affecte essentiellement deux groupes situés près du Panecillo : une patte d'oie de *quebradas* sans nom et la partie basse d'un ensemble qui descend des collines sud-orientales (Boca del Lobo) pour se jeter dans le Machangara.

La phase ultérieure entre 1960 et 1975 atteste une nette recrudescence du remplissage des *quebradas* au Sud, avec la disparition de grands ensembles hydrographiques comme le cours inférieur de la Quebrada Navarro, la série comprise entre les *quebradas* Alcantarilla et Calvario, le prolongement des travaux de comblement de la période antérieure des ravins du côté oriental, la disparition des *quebradas* San Bartolo et Chiriaco nettement plus au Sud. Sur cette même période, l'extension de la ville reste relativement compacte, s'étendant autour de la tache urbaine existante. On peut constater que quasiment toutes les *quebradas* qui coupent la ville (délimitée en 1971) sont remplies en 1975.

La phase suivante qui s'achève en 1983 (8), témoigne d'une brusque fracture dans le processus urbain de Quito, caractérisée par l'apparition d'une différenciation nette entre la dynamique spatiale du nord et celle du sud de la ville. Alors qu'au Nord la croissance de Quito s'est opérée de façon spatialement groupée sur la tache urbanisée de la période précédente, celle du Sud au contraire s'étend démesurément, en laissant de grands espaces vides dans la ville. Le processus s'opère par progression du remplissage de nombreux petits tronçons au nord-ouest de la ville, qui correspondent à la construction de l'Avenida Oriental, le comblement d'une très grosse portion de la *quebrada* Rumiurcu, tout à fait au Nord, et la

(7) À noter que leur tracé est absent des cartes de 1932 (les *Planchetas*), ce qui signifie que leur cours était insuffisamment incisé pour apparaître au 1/25 000ème. Ceci marque une dynamique d'épandage en cône de déjection, encore identifiable par le léger dos d'âne qui affecte la piste d'atterrissage.

(8) Les données étant de même date pour la croissance spatiale de la ville et le remplissage des *quebradas*.

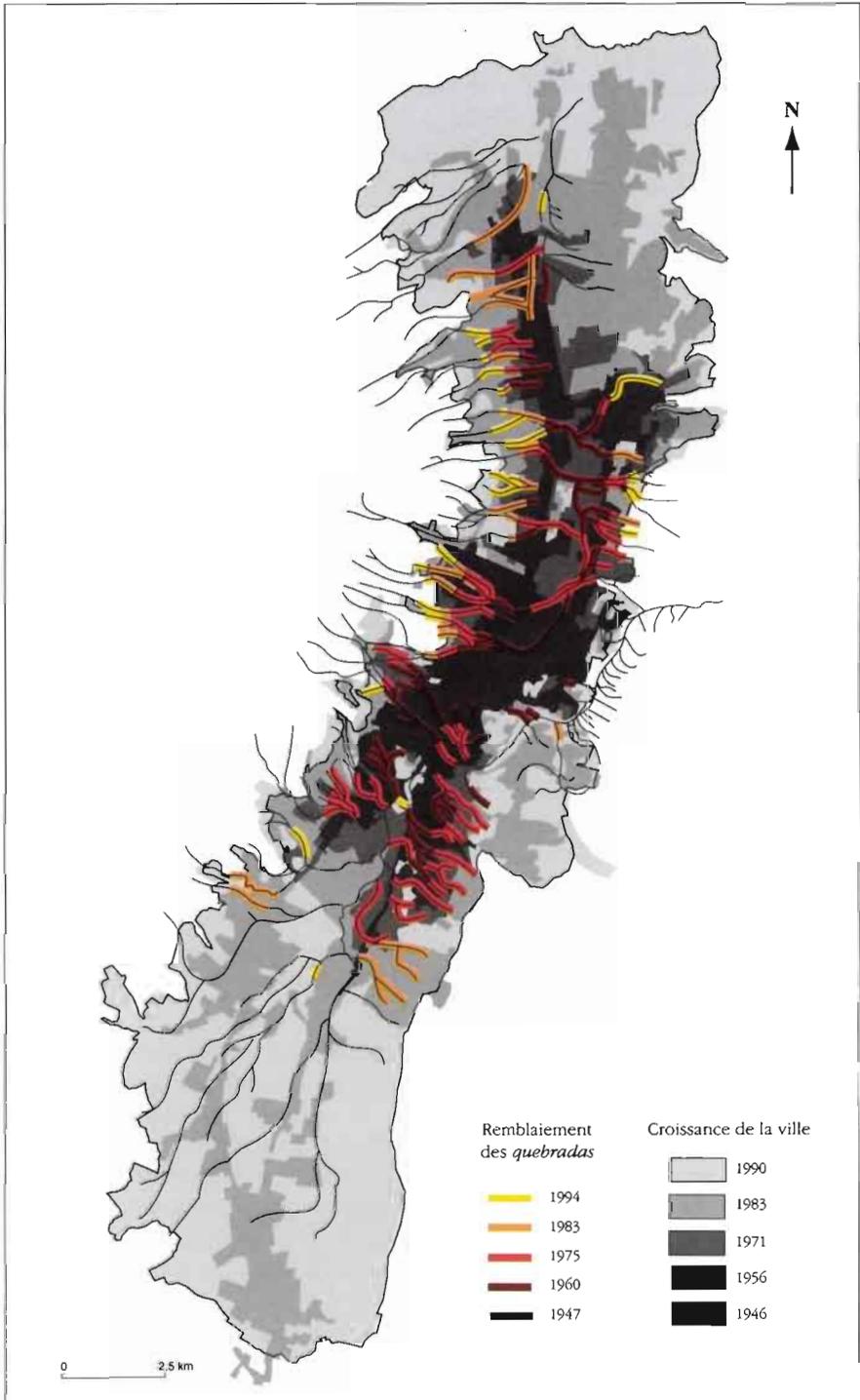


Fig. 3 - Croissance de Quito et remblaiement des quebradas de 1947 à 1994.

continuation plus en amont de l'effacement du réseau de drainage aussi bien sur les pentes du Pichincha que sur les collines d'Ichimbia et du Batán. Très au Sud, on peut noter du côté occidental le remblaiement de la Chauarpata et de la Rinconada et du côté oriental la progression vers l'amont du remplissage de la San Bartolo et la disparition de sa voisine méridionale (sans nom).

La dynamique de remplissage ralentit nettement dans la période la plus récente, marquée essentiellement par la progression vers l'amont du colmatage des *quebradas* du Pichincha dans la zone nord de la ville. Il s'agit de toutes celles que coupe la nouvelle Avenida Oriental, amorce d'une autoroute urbaine périphérique (9). Dans la partie nord-orientale, la Quebrada Tsiniyacu qui traverse la zone industrielle "El Inca" disparaît, ainsi que quelques petits segments dans la partie haute de la colline du Batán ; il s'agit des *quebradas* Rosario, Guabo, et Funerala. Dans le Sud, le remblaiement est quasiment inexistant sur la période 1975-1983, et ne concerne en fait que deux tronçons : la Quebrada La Raya et un petit bout de la Quebrada Shanchayacu, un peu en amont de sa jonction avec le rio Machangara. Par contre, on peut voir que pendant cette période de 10 ans, la ville s'est considérablement étendue, notamment dans le Sud, en comblant en partie les vides laissés par la morphologie urbaine de la période antérieure.

Dans la partie nord de Quito, toutes les *quebradas* ont disparu en-dessous de 2 900 à 3 000 mètres d'altitude. L'espace urbain ainsi produit, à défaut d'être plan, a au moins l'avantage d'être homogène et débarrassé de ces fractures incontrôlées que constituaient les *quebradas*. Seule subsiste la Quebrada Carcelén, essentielle pour l'évacuation de près d'un tiers des eaux usées et pluviales de la ville.

La zone où les *quebradas* ont disparu dans la moitié Sud est limitée à la partie la plus proche du Panecillo. Le "Grand Sud" de la ville, urbanisé récemment, est au contraire encore largement traversé par une série de *quebradas*. Tout comme le processus urbain lui-même, qui s'est opéré sur les territoires élevés et de forte pente, les segments de *quebradas* qui ont été remplis l'ont été plutôt en amont, dans des zones relativement hautes, qu'il s'agisse des *quebradas* du Pichincha (les *quebradas* La Raya, Riconá, Chauarpata) ou de celles qui descendent des collines orientales d'Ichimbia et de Penguasi (comme les *quebradas* Clemencia, Rucanaba, Boca del Lobo).

Mais le remblaiement répond aussi — et peut-être surtout — à une autre fonction, à plus court terme, que l'aménagement du sol urbain : celle de décharge à ordures *intra muros*, selon le principe du remblaiement "sanitaire". Ceci signifie que l'on alterne couches de déchets et couches de terre, compactées au fur et à mesure des dépôts. Cela signifie aussi que la responsabilité des remblaiements est partagée entre la Direction du *Saneamiento ambiental*, service chargé de la collecte des ordures et de la gestion des décharges, et l'EMAAP, chargée de la gestion des égouts ; la première demande l'ouverture d'une nouvelle décharge alors que la seconde effectue le choix du site et contrôle la construction du nouveau collecteur. Simple en apparence, le mécanisme est en fait beaucoup plus complexe, suffisamment pour qu'il soit facile d'identifier de véritables circuits de décision et d'échapper à la description au cas par cas.

(9) Pour ne citer que les plus importantes du Sud vers le Nord : les *quebradas* Armero, Vasconez, Pambachupa, Rumipamba, Chimichampa, Mirador, Caicedo, la Concepción, las Delicias, Pulida Grande, Rumiurcu, qui ont toutes subi des étapes antérieures de remplissage en aval.

Avec près d'une centaine de kilomètres de *quebradas* remblayées en quatre siècles et demi d'urbanisation, le site urbain de Quito est véritablement un construit social, une matérialisation du temps dans l'espace, une production de l'espace urbain. Encore que fréquente bien que de moindre ampleur dans de nombreuses grandes villes d'Europe ou du tiers monde, cette matérialisation exprime un rapport historique de production de l'urbain qui implique une profonde transformation des éléments naturels du site ; il s'agit d'une démarche politique et économique inscrite dans le long terme, établie sur des représentations mentales communes à tous, qui vise avec constance à construire un paysage urbain débarrassé de ces espaces socialement incontrôlés. La morphologie construite du site urbain présente aujourd'hui une physionomie très contrastée entre le nord et le sud de la ville, à l'image des caractéristiques socio-économiques et spatiales de la ville. Il est intéressant à ce sujet de noter que certains habitants du Sud demandent que soit entrepris le remblaiement d'une *quebrada* voisine, sans doute considéré comme une marque de modernité et de stabilisation urbaine.

2. LES RISQUES DU REMBLAIEMENT

Le remblaiement continu du réseau hydrographique se paie d'un grand nombre d'accidents de nature morphoclimatique : inondations, crues boueuses et effondrements de voirie. Une étude historique de ces événements a permis d'en établir la fréquence, largement méconnue et sous-évaluée, et d'identifier les zones sensibles de la ville (10).

Les inondations traduisent directement l'insuffisance chronique du réseau de drainage lors des fortes précipitations. Les averses étant d'autant plus localisées qu'elles sont intenses, ces inondations n'ont habituellement qu'une extension limitée dans l'espace et ne durent guère plus de deux à quatre heures. 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, 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 sont très fréquentes avec 226 événements relevés sur l'ensemble de la période, et sont en général liées au tracé des anciennes *quebradas*. Elles ne provoquent ordinairement que des dégâts relativement peu importants : rez-de-chaussées 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 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, voire 4 kilomètres sur 100 à 400 mètres de largeur (11) ; outre la boue déposée sur 30 à 60 cm d'épaisseur, des pierres, blocs et troncs d'arbres sont également entraînés par le flux dans les cas les plus graves. Ce

(10) 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. Ce dernier a ensuite permis la cartographie de leur extension, 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 (cf. Peltre, 1989).

(11) Pour une description détaillée d'une crue boueuse et de ses effets, cf. De Noni, Fernández, Peltre, 1988.

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 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, dus à la rupture d'égouts défectueux dans le matériau de remblaiement des anciennes *quebradas*, sont des accidents plus rares (36 depuis 1900), mais spectaculaires, qui 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 ses 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 poursuit un lent travail d'évacuation des sables et limons (processus de suffosion) 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 lorsque la cavité s'est suffisamment agrandie, ouvrant dans les avenues des ravins spectaculaires qui peuvent atteindre 20 mètres de profondeur et autant de largeur sur 150 mètres de long.

L'analyse et la cartographie dans le temps des accidents 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 1900-1947 et qu'ils constituent le maximum dans celle la plus récemment urbanisée (cf. Peltre, 1989).

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 sont souvent imprécis, sous-estimant sans doute parfois le nombre des victimes, qui ne devrait cependant pas dépasser 250 depuis le début du siècle.

Il est surprenant de constater à quel point les séries d'accidents sont vite oubliées : si l'hiver 1982-1983, exceptionnellement pluvieux parce que lié au dernier *El Niño* sur la côte Pacifique, a laissé un très vif souvenir cinq ans plus tard, des années noires comme 1950, 1958 ou 1961 qui connurent presque autant d'accidents semblent avoir disparu de la mémoire collective et il faut les exhumer des archives de presse pour en mesurer l'ampleur.

D'une façon générale le réseau d'égouts est largement sous-dimensionné en regard des crues, puisque construit jusque très récemment pour absorber celles de période de retour de 5 ans. Du 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. Des solutions techniques ont été tentées pour maîtriser ces accidents par l'amont, ou tout au moins en diminuer la fréquence : l'EMAAP-Q a réalisé des retenues-tampon, permettant d'écarter les crues, ou la dérivation d'une *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 le degré

de protection recherché, et le coût — financier et social — des dégâts provoqués par les accidents. 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.

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 des 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.

3. UN STATUT JURIDIQUE PARTICULIER... PEU EFFICACE

Les *quebradas* font l'objet de statuts juridiques spécifiques, aussi bien pour le droit national que dans la législation locale, en tant qu'éléments du réseau hydrographique, géré en fonction du droit concernant l'eau. Si objectivement ce statut particulier de la *quebrada* lui permet de conserver une originalité dans les catégories de sol urbain, puisqu'il implique une protection des drains, ce statut protégé participe paradoxalement à son processus de transformation en sol urbain ordinaire.

En effet une disposition du Code de la Santé (12) protège les *quebradas* en y interdisant explicitement les rejets d'eaux usées non traitées dans ces termes :

"les excréments, eaux usées, résidus industriels ne pourront être déversés directement ou indirectement dans les *quebradas*, ríos (...) à moins que déchets et eaux usées ne soient préalablement traités par des méthodes qui les rendent inoffensives pour la santé" (art 25).

Contradictoirement ce même code préconise clairement leur disparition en milieu urbain :

" les cours d'eaux qui croisent des centres peuplés seront canalisés par les municipalités dans des égouts " (art 26) (Terán, 1989 : 202).

Par ailleurs, toujours dans la législation nationale, la Loi des Eaux, suivant en cela le Code Civil (art 631), régit la propriété et les droits d'usage de l'eau en Équateur depuis 1972 (13). La propriété de l'espace des *quebradas* y a fait l'objet d'un traitement spécial. La loi stipule dans son article 4 que les *quebradas*, entendues comme le lit et le sous-sol des torrents (au sens de l'emprise entre bords du ravin), sont des "biens nationaux d'usage public", au même titre que l'eau. Ce caractère de *res publica* a deux conséquences importantes : premièrement, il renvoie à un usage de ce bien par tous les habitants de la nation quels qu'ils soient ; deuxièmement, il n'y a pas de responsable ni de sa préservation ni du contrôle de son usage, la responsabilité étant partagée entre tous les usagers (Terán, 1989 : 27-28).

Cependant, dès 1971, la promulgation de la loi qui régleme le fonctionnement municipal en Équateur (14), donnait la propriété de ces espaces aux *municipios* dans le but de

(12) *Código de Salud*, Registro Oficial n° 158 du 8 février 1971.

(13) *Ley de Aguas*, Registro Oficial n° 69 du 30 juin 1972.

(14) *Ley de Régimen Municipal*, Decreto Supremo n° 952 du 28 juin 1971.

les protéger. La Loi des Eaux n'a donc fait que porter au niveau national un principe juridique déjà en vigueur au niveau municipal, sur l'ensemble du territoire national.

La municipalité de Quito, comme tous les *municipios* équatoriens, est donc propriétaire des zones de *quebradas* depuis 1971, en fonction de l'article 263 de la Loi de Régime Municipal qui stipule :

" Les biens d'usage public sont constitués... d) des *quebradas* et de leurs talus, des rivières et de leur lit dans la partie qui passe dans les zones urbaines ou leurs réserves... e) des superficies obtenues par remblaiement des *quebradas*..." (15).

On peut ajouter ici que le passage des *quebradas* dans le domaine public ne s'est accompagné d'aucune indemnisation des propriétaires affectés par la nouvelle loi.

Beaucoup plus récemment (1993), l'ordonnance municipale n° 3050 (16), qui établit les règles d'occupation du sol dans le District Métropolitain de Quito depuis 1994, considère également les *quebradas* de manière spécifique. Ce règlement urbain de Quito fait en effet état d'une catégorie spécifique appelée "usage de protection environnementale et écologique" destinée à la "conservation et à la protection de l'environnement" ; c'est dans cette catégorie qu'apparaît l'usage de "protection des fleuves et des *quebradas*" dont l'objectif est de préserver et protéger les bassins hydrographiques (17). Cependant, ces terrains n'apparaissent qu'au niveau des textes réglementaires et ne sont pas cartographiés comme zones particulières dans les documents d'urbanisme. D'où la difficulté de les repérer et de faire respecter les contraintes et les servitudes qui pèsent réglementairement sur ces zones, et ce d'autant plus que nombre de *quebradas* ne sont plus aujourd'hui perceptibles sur le terrain. Les plans existants à la Direction Générale de Planification du District Métropolitain de Quito ne font état, dans le secteur urbain, que de zones de protection écologique très partielles par rapport à la zone théorique de protection des *quebradas* (cf. Fig. 4).

Légalement cependant, cette zone de protection établit l'interdiction de construire dans une bande de 10 mètres à partir du bord supérieur de la *quebrada*. Ce retrait obligatoire correspond à une frange d'usage public, destinée à permettre l'accès des services municipaux pour l'entretien et à une précaution en termes de stabilité du sol. Dans ces espaces de "protection environnementale", les usages agricoles, forestiers, de loisirs, ou touristiques sont autorisés. Les *quebradas*, propriété publique, et la zone de 10 mètres qui les borde, propriété privée, sont donc des zones de "protection écologique", "non constructibles, destinées à la sauvegarde (défense) et au contrôle environnemental urbain et suburbain" (18) ; autrement dit, l'usage y est restreint par l'interdiction de construire.

Pour les rivières (*rio*), la zone de protection réglementaire est de 50 m de large (19). D'où l'enjeu que peut représenter la définition de *rio* ou de *quebrada* d'un cours d'eau. Le problème réside dès lors dans la définition juridique de la *quebrada*. Étant donné les pratiques de remblaiement, que devient l'espace de *quebrada* une fois qu'il n'est plus apparent dans la ville ? Quel est son statut juridique ? Garde-t-il droit à la zone de protection ? Comment différencier *rio* et *quebrada* ?

(15) Art. 263 de la *Ley de Régimen Municipal*, traduction libre.

(16) *Ordenanza de Reglamentación Metropolitana de Quito*, du 5 décembre 1993.

(17) Art. 18 de l'ordonnance 3050.

(18) Art. 109 de l'*Ordenanza de Reglamentación Metropolitana de Quito* (5/12/1993).

(19) Art. 41 de l'*Ordenanza de Reglamentación Metropolitana de Quito* (5/12/1993).

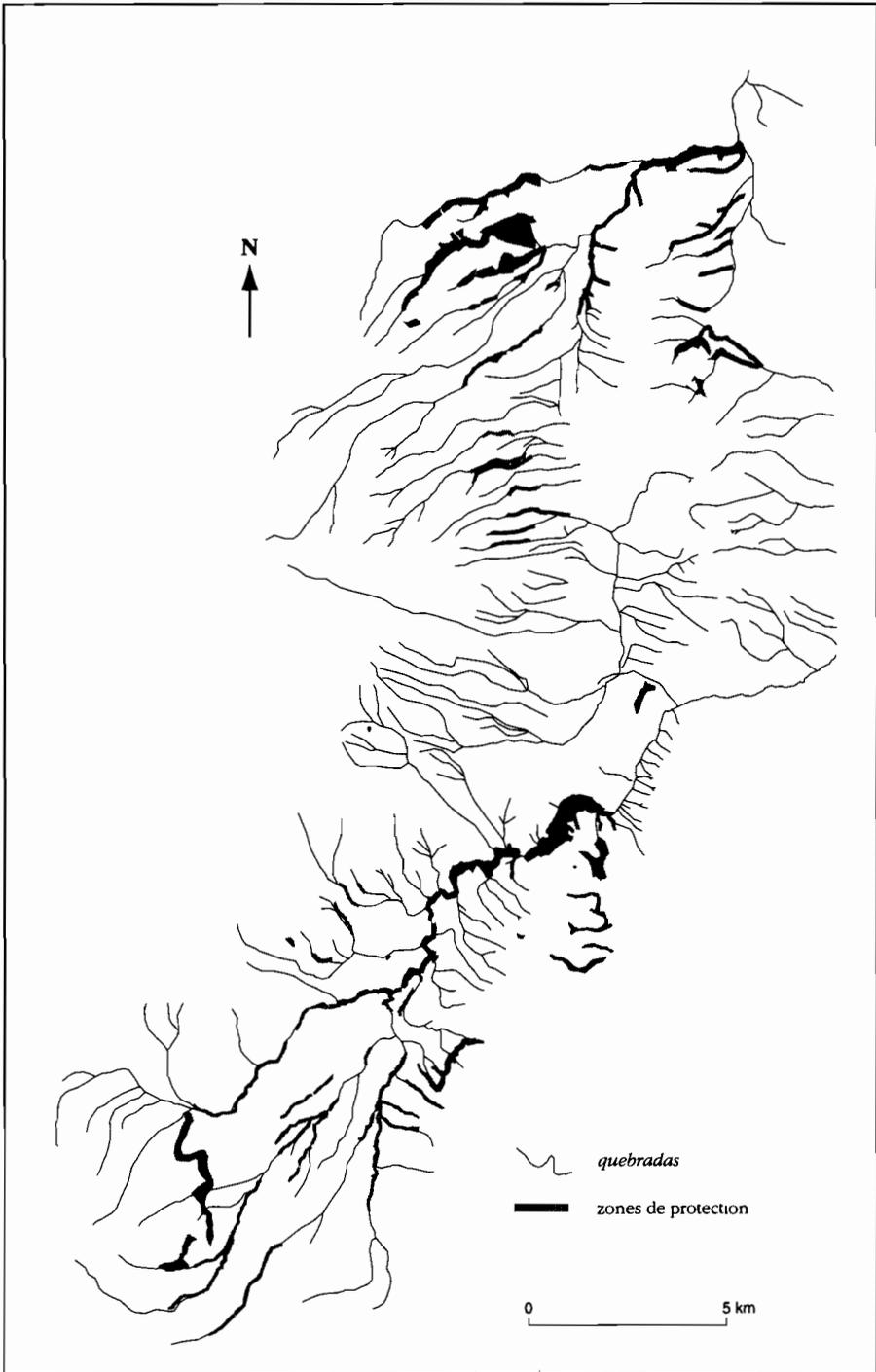


Fig. 4 - Zones de protection des quebradas de Quito.

Le statut juridique des *rellenos*, c'est-à-dire des terrains produits par le remblaiement des *quebradas* est celui de propriété municipale, au même titre que l'ancienne *quebrada* elle-même. Théoriquement, depuis plus de 20 ans maintenant, le propriétaire d'un terrain sur lequel passe une *quebrada* ne peut plus la combler sans premièrement acheter le terrain, deuxièmement obtenir l'autorisation des autorités municipales compétentes, en l'occurrence l'entreprise municipale d'assainissement et d'eau potable. Auparavant, il était pleinement maître de cet espace et pouvait en faire ce que bon lui semblait. Dans la pratique les remplissages se font fréquemment sans respect des procédures d'autorisation.

La disparition physique des *quebradas* s'accompagne le plus souvent, dans les faits, d'une perte du statut juridique de protection et d'une banalisation de la zone concernée. En effet, habituellement, lorsqu'il y a remblaiement d'une *quebrada*, la municipalité utilise ces espaces pour construire des voies, des parcs, des aires de récréation. Mais il reste souvent une frange de terrain inutilisable, ou il peut s'agir d'un secteur pour lequel l'autorité municipale n'a pas de projet parce qu'il existe déjà des rues et des espaces verts à proximité de la *quebrada*. En règle générale, ces franges de terres urbaines nouvellement créées par remplissage sont revendues aux propriétaires mitoyens, par une procédure juridique appelée *remate forzoso* (20), qui les oblige à acheter les terres municipales ainsi mises en vente. Ces sols, considérés comme instables, sont inconstructibles, donc en dessous du prix du marché du sol urbain. Comme il s'agit d'une adjudication "forcée", les services municipaux prennent en compte, pour établir le prix du mètre carré, la situation économique du propriétaire concerné et établissent des facilités de paiement si nécessaire. Ceci dit, il existe de très nombreux cas de constructions sur ces zones, et quelques cas de constructions à étages. Il s'agit en particulier des *quebradas* San Vicente et La Concepción, qui délimitaient ce qui est aujourd'hui le centre commercial El Bosque. Échangées contre des terres situées plus haut, puis remblayées, elles supportent aujourd'hui des édifices de plusieurs étages dans l'un des quartiers les plus chics de la ville.

On peut voir que le statut juridique de la *quebrada* et du *relleno* sont empreints de certaines contradictions : si le passage dans le domaine municipal en 1971 s'inscrit dans un principe de protection de ces espaces et de lutte contre le risque, en revanche la pratique du remblaiement et ses conséquences foncières, c'est-à-dire la perte du statut de domaine public, accroît nécessairement le nombre des constructions illégales, banalise l'espace remblayé et aggrave les risques encourus par les gens et les biens. De plus, le passage dans le domaine public de la *quebrada* intervient au moment où nombre de ces ravines ont déjà disparu.

En fait l'apparition du statut de protection des *quebradas* en 1971 peut paraître fort ambigu : on protège des espaces naturels dans le même temps qu'on les fait activement disparaître. Sans doute faut-il comprendre que ces espaces doivent être protégés lorsqu'ils ont vocation à rester ouverts, mais que la consolidation de l'urbanisation légitime leur abolition dès lors qu'ils sont considérés comme trop pollués pour conserver ces caractères naturels. Tout laisse à penser que le statut juridique porte sur des espaces naturels atteints par un processus historique d'urbanisation, cette protection intervenant alors que la *quebrada* est déjà devenue un espace marginal en ville, en voie de disparition.

(20) Art. 295 de la *Ley de Régimen Municipal* (28/6/1971).

Qu'il soit remblayé ou non, le sol des *quebradas* présente des utilisations concrètes très diversifiées, qui relèvent en fait de l'ensemble des usages possibles du règlement urbanistique de Quito, aussi bien urbain que rural. La protection légale dont il est l'objet n'a apparemment pas limité la nature et le nombre d'usages qu'il supporte. Les types d'occupation du sol dans les *quebradas* ouvertes, ou sur les *quebradas* remblayées sont les suivants :

- sol urbain construit : dans le lit des *quebradas*, remblayées ou non, on peut trouver des habitations, qui en font simplement des zones urbaines de logements pas nécessairement populaires, mais dont le type et la qualité sont fonction du quartier dans lequel elles se situent.

- réserve foncière : quand l'espace des *quebradas* ou leur zone de protection ne sont pas construits, on peut alors considérer que ces superficies constituent objectivement une réserve foncière, un sol urbain potentiel.

- zone agricole marginale (culture, pâturage) : on peut également observer que les *quebradas* ouvertes, plutôt dans le Sud puisque la partie nord de la ville n'en a quasiment plus, sont aussi des espaces à vocation agricole marginale ou résiduelle : on trouve sur les pentes des *quebradas* de petits champs de maïs ; ils peuvent aussi, souvent, servir de pâturage communal, pour une vache ou quelques cochons...

- écoulement des eaux pluviales : la fonction naturelle des *quebradas* est l'écoulement des eaux pluviales ; ce rôle essentiel est respecté sans faille dans toutes les parties amont, ouvertes, qui n'ont pas subi de modification ; les secteurs canalisés par contre assurent moins bien cette fonction.

- évacuation des eaux usées : plus bas sur les pentes, les *quebradas* sont pour la plupart canalisées et remblayées ; la fonction principale d'écoulement des eaux pluviales devient partielle, artificialisée, et se mêle avec l'évacuation des eaux usées, fonction totalement technique et urbaine.

- décharge des ordures : les *quebradas* jouent un rôle invariable, depuis l'origine de la ville, celui de décharge des ordures ménagères et autres. Il y a actuellement à Quito deux méthodes : l'une populaire, qui consiste à vider les poubelles dans les *quebradas*, usage considéré comme "anti-technique" et réprouvé par les tenants de la décharge "contrôlée" ; l'autre technico-politique, qui fait des *quebradas* la meilleure alternative pour se débarrasser des déchets produits par la ville tout en produisant de l'espace urbain, à condition que le processus soit techniquement contrôlé (*relleno sanitario*, alternant couches de déchets et couches de terre).

- construction d'infrastructures et d'équipements publics : les *quebradas* remblayées ont donné lieu à la création d'espaces publics semblables aux autres ; elles ont à ces endroits-là perdu leurs caractéristiques physiques et sociales ; même la mémoire de ces espaces en tant que *quebrada* s'est perdue ; ils ne sont plus que des lieux ordinaires dans la ville, terrain de sport, rue, stationnement, voire même la gare routière de Quito, construite sur le remblaiement de la *quebrada* Jerusalem...

- espace artisanal et/ou industriel : historiquement, les lits des *quebradas* sont des zones dans lesquelles on trouve des activités économiques, et ce dès la colonie. Les moulins par exemple étaient nombreux dans le Machangara. On trouve aujourd'hui d'autres activités, installées sur le lieu d'extraction de la matière première. Il s'agit par exemple de briqueteries,

de carrières. Mais on y découvre aussi, notamment sur les *quebradas* disparues depuis longtemps, des banques, des industries diverses, des stations services, comme s'il s'agissait de n'importe quelle zone de la ville.

- zone de protection écologique : enfin, conformément à la loi, les *quebradas* sont aussi des zones protégées, dernier refuge urbain de la diversité biologique de la faune et de la flore natives. Les emprises des *quebradas* sur les flancs du Pichincha sont notamment les seuls endroits qui ont échappé à la domination de l'eucalyptus, conservant la végétation arbustive naturelle.

À titre expérimental, la base de données urbaines construite à Quito (21) sous le Système d'Information Géographique Savane (Souris *et al.*, 1994) nous a permis d'estimer la population résidant sur une ancienne *quebrada*, dans une *quebrada* ou dans sa zone de protection (22), et son évolution entre les deux derniers recensements. Le chiffre total estimé (23) en 1982 serait de 39 764 habitants. En 1990, on peut dénombrer dans cette même zone de 10 mètres de large de part et d'autre des *quebradas* 47 713 habitants. La population y a donc crû dans cette période intercensitaire de près de 20 %, taux comparable à celui concernant l'ensemble de Quito (26%). La localisation des accroissements et baisses de population dans la même zone, cartographiée grâce au SIG, est en revanche peu significative au plan spatial ; si un sens peut être attribué à ces variations de population, c'est sans doute à un niveau beaucoup plus local qu'il faut le rechercher.

4. REMBLAYER OU NON ?

4. 1. Remplir !

Pour les gestionnaires de la ville, les *quebradas* canalisées ont constitué la meilleure option possible pour la gestion des déchets solides de la ville. On considère qu'il y a environ 25 ans que cette forme de décharge contrôlée est utilisée rationnellement par le remblaiement des dépressions naturelles qui "abondent dans la ville" (EMASEO, 1994 : 5). C'est en effet en 1969 que la *quebrada* "Boca del Lobo" est transformée en première décharge contrôlée de la ville ; auparavant, les déchets étaient simplement rejetés dans le Machangara sans aucun contrôle, à l'endroit appelé "El Censo", ou dans les diverses *quebradas* de la ville. À la fin des années soixante-dix par exemple, trois *quebradas* se partageaient l'honneur de servir de décharge : la *quebrada* Rumichaca, dans l'urbanisation Altamira, recevait 50 % environ des ordures produites par Quito et les *quebradas* Choclo et Cumanda se partageaient le reste.

À l'heure actuelle, la *quebrada* Zambiza, qui occupe une faille géologique active au nord de la ville selon les géologues, reçoit la quasi totalité des déchets collectés par l'entreprise municipale de propreté, EMASEO. Environ 950 tonnes de déchets et 400 tonnes de matériel de couverture, c'est-à-dire de terre et de gravats, sont déposés chaque jour dans les *quebradas*. Cette pratique a "ostensiblement bénéficié à la ville de Quito si on considère qu'en même temps on a résolu le problème des déchets et qu'on a fait disparaître les dangereuses *quebradas*, les espaces remplis se transformant en biens de la communauté,

(21) SUIM, Dirección de planificación.

(22) Dans une zone de 15 mètres à partir du fond de la *quebrada* si on considère que 10 mètres est une largeur moyenne, ce qui est un peu arbitraire dans la mesure où il n'y a pas d'information sur la largeur des *quebradas*.

(23) On a calculé cette population en fonction du pourcentage de surface dans la zone de protection de chaque îlot, unité géographique de base pour les données du recensement.

terrains de sport, espaces verts, parcs de loisirs pour les enfants, stationnements etc.." (EMASEO, 1994 : 5).

On voit bien que le comblement des *quebradas* est une pratique qui a contenté tout le monde. Il faut dire qu'une *quebrada* ouverte pose, en ville, un certain nombre de problèmes qui peuvent justifier le désir de la remplir :

1/ Au premier chef un problème de continuité spatiale urbaine : une *quebrada* ouverte signifie une segmentation de l'espace, une coupure qui fait obstacle à la continuité urbaine. Ces ravins impliquent, en conséquence, une entrave à la circulation, un barrage à la mobilité, élément fondamental de l'urbain. Physiquement, les bords souvent abrupts de la *quebrada* représentent aussi un risque, pour les enfants notamment, d'autant plus que la stabilité des talus est toute relative.

2/ Un problème sanitaire rapidement aigu : une *quebrada* non remplie en milieu urbain se transforme inmanquablement en égout à l'air libre. Aux eaux de pluie qu'elle charrie s'ajoutent les eaux usées, dominantes en étiage ; la *quebrada* devient une décharge publique d'autant plus facilement que le service de ramassage des ordures est inexistant ou irrégulier. Les déchets solides qui sont jetés dans les *quebradas* posent des problèmes sanitaires graves. De plus y prolifèrent nécessairement les rats, ce qui multiplie les risques sanitaires. On peut souligner ici que les représentations sociales qui mettent les gens à distance de la zone de *quebrada* ne sont objectivement pas sans fondements.

3/ Au plan socio-ethnologique les *quebradas* font l'objet de représentations mentales spécifiques : ce sont des espaces socialement non contrôlés, qui donnent donc lieu à toutes sortes de croyances et de légendes (Rubio, 1994). Dans les représentations sociales populaires, les *quebradas* sont des lieux inquiétants. La mémoire collective quiténienne abonde en histoires de loups-garous et de sorcières, dont le théâtre est une *quebrada* : territoire d'esprits malins dans la cosmogonie *quichua*, elles sont également des lieux de profanation religieuse, ou encore rendues responsables des maladies qui affectent les habitants des alentours. Elles constituent des refuges pour les voleurs et délinquants de toutes sortes, donc des endroits dangereux qu'il faut éviter : on s'y fait attaquer, on y consomme de la drogue... Tous les fantasmes du Mal se retrouvent dans les *quebradas*. Dans ces conditions, leur remblaiement peut sans doute être considéré comme une exigence sociale dont l'importance demanderait à être précisée.

4/ Enfin se pose une question politico-spatiale non négligeable : dans la mesure où presque toutes les *quebradas* du Nord ont été remplies, les habitants du Sud se demandent pourquoi cette tradition serait maintenant réprouvée, alors que la pratique du remblaiement des *quebradas* du Nord a été perçue comme un signe de développement et de progrès, et a permis la construction d'infrastructures et d'équipements publics profitables à tous. On note donc une certaine demande pour un traitement identique dans le sud de la ville.

4. 2. Ne pas remplir !

Le discours en faveur du remplissage des *quebradas* est aujourd'hui visiblement plus nuancé. Les travaux scientifiques sur les risques entraînés par cette pratique de gestion ont manifestement contribué à une prise de conscience du danger réel ainsi généré en cas d'événement pluviométrique de fréquence rare, ainsi que des problèmes répétés induits

dans l'entretien du réseau d'assainissement. En effet, le lit des *quebradas* supporte actuellement un quart des collecteurs principaux d'égouts de Quito, soit plus de 100 kilomètres de *quebradas* canalisées. Ces collecteurs constituent le principal point faible du réseau d'évacuation des eaux dans la ville pour quatre raisons essentielles.

1/ La première réside dans la nature même des *quebradas*, qui constituent un réseau hydrographique naturel de montagne. Cela signifie, dans ces conditions climatiques et topographiques, d'importantes variations de débit, un écoulement turbulent et rapide dû aux pentes fortes, des processus d'érosion actifs qui sont propres à toute zone montagneuse et induisent une forte charge en sédiments. Le réseau d'assainissement de la ville est donc soumis à des contraintes considérables de mise en charge des collecteurs (24) lors des précipitations importantes, et subit une sédimentation constante qui impose un nettoyage régulier. Comme les canalisations ont souvent été posées au fond de la *quebrada*, il arrive que les tuyaux à entretenir se trouvent à plus de 25 mètres de profondeur, ce qui complique singulièrement la maintenance du réseau.

2/ La capacité d'évacuation des collecteurs est dans presque tous les cas largement inférieure aux débits de crue mesurés ou estimés des différentes *quebradas*. C'est le cas des très grandes *quebradas* comme les *quebradas* Rumipamba et Rumiurcu, dont les débits de crue décennale estimés sont plus de 3 fois supérieurs à ce que peut évacuer la canalisation (Camp Dresser, 1977 ; Peltre, 1989). Les collecteurs principaux sont donc incapables d'évacuer des débits supplémentaires, ce qui signifie que l'amélioration du réseau ou son extension passera nécessairement par la construction de nouveaux collecteurs principaux.

3/ Une troisième raison, essentielle : les points d'entrée des eaux pluviales dans le réseau sont fréquemment obstrués par des ordures de toutes sortes provenant aussi bien des habitants des quartiers voisins que d'industriels peu scrupuleux qui y déversent des camions entiers d'ordures ou de gravats. La capacité d'intervention des services d'entretien étant en général insuffisante pour assurer un nettoyage régulier et préventif du lit des torrents, il faut alors régulièrement curer — en souterrain — les déchets accumulés dans les collecteurs tout comme les sédiments évoqués plus haut ; trop souvent l'intervention doit être faite en urgence sur une canalisation bouchée, signalée par un débordement provoqué par une pluie très moyenne.

4/ L'étude historique des accidents morphoclimatiques enfin, évoquée plus haut, fait apparaître une moyenne de 3,6 accidents par an strictement dus au remblaiement du réseau hydrographique, dont un peu moins d'un accident grave par an. Ce risque peut être partiellement réduit par un meilleur aménagement du réseau des collecteurs, mais ne peut être totalement éliminé pour les événements climatiques les plus exceptionnels. Il faudrait pour ce faire envisager la réouverture (25) des drains majeurs du réseau, pour un coût éventuellement sans rapport raisonnable au coût social et financier du risque à réduire. On aborde là le domaine des choix politiques et non plus techniques en matière d'évaluation des coûts pour une amélioration de fonctionnement du site.

(24) La pression dans une canalisation augmente de 1 kg/cm² pour 10 m de dénivelée ; elle atteint donc fréquemment plus de 10 kg/cm² dans certains collecteurs, qui ne sont pas réellement conçus pour supporter de telles pressions et se rompent parfois. Dans ce cas, l'érosion souterraine résultante entraîne des affaissements, voire des effondrements de chaussée.

(25) Politiquement impensable par le bouleversement du tissu urbain qu'elle entraînerait, et pratiquement impossible du fait de la non-séparation des réseaux eaux-vannes / eaux pluviales.

5. CONCLUSION

Comme on l'a vu, les arguments qui plaident en faveur du remblaiement des *quebradas* sont largement dominants sur le long terme pour diminuer la segmentation de l'espace, éradiquer des lieux incontrôlés et faciliter la gestion des déchets. Ils sont maintenant contestés depuis quelques années — minoritairement semble-t-il — pour réduire les dysfonctionnements du réseau de drainage, les problèmes d'entretien et de réparation du réseau et les risques encourus. Tout se passe comme si l'on avait arbitré collectivement en faveur du remblaiement ; le risque généré aurait été soit ignoré dans ses relations de causalité, soit somme toute considéré comme "supportable", dans une vision appuyée sur un positivisme confiant qui croit en l'amélioration des conditions de drainage et d'assainissement grâce aux techniques modernes.

La discussion sur le thème "faut-il boucher ou non les *quebradas* ?" est aujourd'hui caduque en quelque sorte, puisque dans les faits il n'y a plus de *quebradas* dans une bonne partie de la ville. Cependant, il est intéressant de se pencher sur l'incompréhension fondamentale qui existe entre les Quiténiens, gestionnaires de la ville et habitants réunis dans un même consensus pour, malgré les discours de prudence et les dénégations, continuer à remblayer les *quebradas*, et les géomorphologues et autres experts spontanément hostiles à ce type de pratiques, parce que conscients de leurs inconvénients. Sur quoi repose ce désaccord ?

Principalement sans doute sur des visions très différentes, du fait même des cultures et préoccupations respectives des uns et des autres, des conséquences des options de gestion du site qui sont à l'oeuvre : une distance certaine dans la connaissance des phénomènes physiques et morphoclimatiques d'abord, qui implique une conscience variable du risque ; ensuite des conceptions opposées de la nature et de l'espace, qui conduisent les uns à privilégier le bon fonctionnement naturel d'un site auquel la ville devrait s'adapter, et les autres à assigner à l'urbanisation un rôle de construction et de gestion qui implique d'évacuer, de reconstruire pour la maîtriser, cette nature et les risques qu'elle représente.

Une représentation sociale de l'espace différente donc, mais aussi des pratiques, des logiques, des références divergentes : sur le principe, quand un géomorphologue ou un hydrologue pense *quebrada*, c'est la logique de drainage qui l'emporte : une rivière, un torrent, doit par principe être d'abord apte à écouler les flux de crues, même (surtout ?) en ville ; si l'eau est sale et qu'il y ait des ordures, cette gestion relève d'une autre profession. Pour les gestionnaires de la ville au contraire, la crue est l'événement exceptionnel qui échappe au contrôle ; on sait que le dimensionnement des réseaux est insuffisant et amène donc inéluctablement l'accident, en quelque sorte provisoirement assumé jusqu'à ce que l'amélioration des moyens permette de mieux stabiliser le fonctionnement du drainage. Par ailleurs les éléments de la question ne se posent pas dans la même logique de temps. Si les accidents morphoclimatiques arrivent de temps en temps, les problèmes de gestion que posent les *quebradas* ouvertes sont vécus au quotidien : elles segmentent l'espace, constituent des égouts à ciel ouvert qui polluent l'environnement immédiat et font peur dans l'imaginaire collectif ; et comme leur remblaiement fournit une solution simple au problème des déchets solides, la question a longtemps été entendue pour presque tout le monde.

Actuellement, sous la pression d'inconvénients plus mal vécus qu'autrefois — peut-être parce que mieux connus ? — les gestionnaires de la ville annoncent une approche plus

prudente, et le remplissage des *quebradas* n'est plus à l'ordre du jour tout au moins dans le discours, puisque le remblaiement du rio Machangara se poursuit activement. Par ailleurs, les canalisations du réseau unitaire sont maintenant construites non pas au fond des *quebradas* mais sur le côté de façon à avoir accès aux collecteurs. Par contre le conseil de construire des réseaux séparatifs dans les nouveaux quartiers à équiper, qui permettrait d'envisager à l'avenir le traitement partiel des eaux usées, ne semble pas rencontrer d'audience.

Les géomorphologues ont également fait évoluer leur point de vue en acceptant l'idée que l'on puisse remplir les *quebradas*, à condition de ne combler que les petites et de proscrire définitivement ce processus pour les grandes *quebradas*. Par ailleurs, la canalisation doit être construite dans de meilleures conditions, en posant des sections de collecteur plus grandes, et capables de résister aux mises en charge. Ils considèrent que dans tous les cas, la prudence minimale imposerait de garder à ciel ouvert le rio Machangara et la *quebrada* Carcelén pour garantir l'évacuation des plus grosses crues aux seules portes de sortie des eaux de la ville ; mais le remblaiement du Machangara qui se poursuit activement par tronçons au sud de la ville, et celui de la *quebrada* Carcelén qui gagne régulièrement vers l'aval, montrent bien le poids des habitudes de pensée en matière d'aménagement des collecteurs principaux. Il est vrai qu'en réseau unitaire, le choix ne peut être que de cacher des eaux brunes au prix d'un risque assez grave, mais rare, ou d'assumer un risque considéré comme acceptable pour ne pas voir la ville traversée par un collecteur principal à ciel ouvert. L'alternative serait de s'engager vers la séparation des réseaux, qui permettrait à l'avenir d'envisager le traitement des eaux usées et un écoulement à ciel ouvert des eaux pluviales ; mais ce serait une solution de très long terme, et d'un coût mal évalué, peut-être prohibitif.

Un certain rapprochement des points de vue se dessine, et permettra peut-être la mise en oeuvre de solutions techniques, mais aussi politiques et sociales, débouchant sur la diminution pour des coûts acceptables des risques liés au comblement des *quebradas*. La mise en place de mesures sérieuses semble aujourd'hui indispensable, du fait que la croissance spatiale de la ville conduit à la saturation du réseau d'assainissement. En effet, la conséquence de l'imperméabilisation des sols est d'augmenter les débits de crues et les vitesses d'écoulement du ruissellement pluvial de façon plus que proportionnelle aux surfaces construites (Desbordes, 1992 : 49). Objectivement, les risques d'accidents devraient donc augmenter tout comme les débits des eaux usées à évacuer, qui ne font qu'exporter les déchets liquides de la ville dans la vallée du rio Gayllabamba.

Références citées

- CAMP DRESSER, 1977 - Planes maestros y estudios de factibilidad de los sistemas de agua potable y alcantarillado, 500p., multigr.
- DE NONI, B., DE NONI, G., FERNÁNDEZ, M. A. & PELTRE, P., 1986 - Accidentes climáticos y gestión de las quebradas de Quito. *Paisajes Geográficos*, n° 18 : 25-45, Quito : Cepeige.
- DENONI, B., FERNÁNDEZ, M. A. & PELTRE, P., 1988 - Drainage urbain et accidents climatiques à Quito : analyse d'un cas récent de crue boueuse. *Cahiers des Sciences Humaines*, vol. 24, N°2 : 225-249, Paris : ORSTOM.
- DESBORDES, M., 1992 - Le contrôle des flux en milieu urbain. in : *La gestion de l'eau, Problèmes Politiques et Sociaux* (Barraqué B.) n° 686, La Documentation Française.
- FERNÁNDEZ, M.A., 1990 - El medio físico de Quito. in : *Estudios de geografía*, volumen 3: 5-20.
- GOMEZ, N., 1984 - La Mena II, Un barrio de Quito con una lesión congénita. in : *Documentos de Investigación* n° 5: 75-81, Quito : CEDIG.
- JANEAU, J. L., 1994 - Sistema de pronóstico hidrológico de las Laderas del Pichincha y áreas metropolitanas de Quito (SISHILAD), 10p., multigr.
- KROCHIN, S. & CARCELEN, J, 1989 - Proyecto Quebradas del Pichincha, 95p., Informe Final, Quito, multigr.
- MUNICIPIO METROPOLITANO DE QUITO, 1995 - Programa emergente de diagnóstico, prevención y mitigación de movimientos de terrenos superficiales en la ciudad de Quito, 62p., Informe elaborado por J. Zea y M. Rivera, multigr.
- 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.
- PELTRE, P., 1989 - Quebradas y riesgos naturales en Quito, período 1900-1988. in : *Riesgos naturales en Quito* : 45-91 ; *Estudios de Geografía* n° 2, Quito : Corporación Editora Nacional. *Paisajes Geográficos*, N° 18: 5-27, Quito: Cepeige.
- 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* : 291-318 ; coll. "Colloques et Séminaires", Paris : Orstom.
- PELTRE, P., 1992 - Risque morphoclimatique urbain à Quito (Équateur). Période 1900-1988. in : *L'Espace Géographique* 2 -1992 : 123 - 136, Paris : Doin-Reclus.
- PELTRE, P. & D'ERCOLE, R., 1992 - La ville et le volcan. Quito, entre Pichincha et Cotopaxi (Équateur). *Cahiers des Sciences Humaines* 23(3) : 439-459, 3 fig., Paris : Orstom.
- PONCE, L. P., 1992 - *Relaciones historico-geográficas de la Audiencia de Quito. XVI°-XIX° siglos*, 666p., Estudio y transcripción por Pilar Ponce Leiva, Quito : Ed Abya-Yala.
- RIDER, R., 1984 - Segundo informe Técnico, "La Mena II". in : *Documentos de Investigación* n° 5: 84-87, Quito : CEDIG.
- RUBIO, E. F., 1994 - *Quito, tradiciones, leyendas y memoria*, 334p., Quito : Libresa.
- SOURIS, M., LEPAGE, M. & PELLETIER, F., 1984-1994 - Le système d'information géographique, 263p., logiciel ORSTOM.
- TERÁN, O. A., 1989 - *Derecho Ecológico Ecuatoriano*, 295p., Quito : Corporacion Editora Nacional.
- WINCKELL, A., 1984 - Primer Informe Técnico, "La Mena II", in : *Documentos de Investigación* n° 5: 82-83, Quito : CEDIG.

PROJET PILOTE DE SCÉNARIO SISMIQUE À QUITO (ÉQUATEUR) : MÉTHODE ET RÉSULTATS

*Jean-Luc Chatelain * , ** , Bertrand Guillier * , ** , Hugo Yepes ** , Jeanette Fernandez ** ,
Jorge Valverde ** , Brian Tucker *** , Geoffroy Hoeffler *** , Fumio Kaneko **** , Marc
Souris * , **** , Éric Dupérier * , **** , Toshiro Yamada **** , Gonzalo Bustamante **** ,
Arturo Eguez ** , Alexandra Alvarado ** , Galo Plaza ** , Carlos Villacis *****

Résumé

Un projet pilote de scénario sismique a été réalisé à Quito, pour évaluer les conséquences de séismes destructeurs sur la ville. Après avoir choisi, sur des bases historiques et sismotectoniques, des séismes pouvant affecter la ville, les intensités sismiques produites par ces événements ont été calculées afin d'estimer les dégâts sur les bâtiments et les réseaux. L'étude technique a été complétée par des entretiens avec les responsables des principaux services de la ville, afin de produire un récit des événements pendant et, à diverses échelles de temps, après un des séismes choisis. Enfin, une série de recommandations a été élaborée, devant permettre de réduire la vulnérabilité sismique de Quito. Ce scénario doit être considéré comme une étude préliminaire dont le but est, avant tout, de sensibiliser les responsables et la population aux risques sismiques.

Mots-clés : *Scénario sismique, séisme, prévention des risques, analyse de vulnérabilité, Quito, Équateur.*

PROYECTO PILOTO DE RIESGO SÍSMICO EN QUITO (ECUADOR): MÉTODO Y RESULTADOS

Resumen

Se realizó un proyecto piloto de riesgo sísmico en Quito, el mismo que consistió en evaluar las consecuencias de sismos destructores en la ciudad. Una vez escogidos, sobre bases históricas y sismotectónicas, sismos que la pueden afectar, se calcularon las intensidades sísmicas producidas por tales eventos con el fin de estimar los daños que sufrirían las edificaciones y redes. El estudio técnico fue complementado mediante entrevistas con los responsables de los principales servicios de la ciudad, para elaborar un relato de los eventos durante y, a diversas escalas de tiempo, después de uno de los sismos

* ORSTOM, Apartado 17-11-6596, Quito, Équateur.

** Escuela Politécnica Nacional, Apartado 17-01-2759, Quito, Équateur.

*** GeoHazards International, Stanford University, Stanford CA 94305-2215, USA.

**** Oyo Corporation, 2-2-19 Daitakubo, Urawa, Saitama 336, Japon.

***** Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, Dirección General de Planificación, Apartado 17-García Moreno 1130, Quito, Équateur.

escogidos. Finalmente, se plantearon una serie de recomendaciones que deberían permitir reducir la vulnerabilidad sísmica de Quito. Este proyecto de riesgo sísmico debe considerarse como un estudio preliminar cuyo objetivo es, ante todo, sensibilizar a los responsables y a la población ante los riesgos sísmicos.

Palabras claves: *Riesgo sísmico, sismo, prevención de los riesgos, análisis de vulnerabilidad, Quito, Ecuador.*

A PILOT SEISMIC SCENARIO IN QUITO (ECUADOR): METHODS AND RESULTS

Abstract

A pilot seismic scenario project has been carried out in Quito, consisting in the analysis of the consequences of a damaging earthquake in the city. After selecting, on historical and seismotectonic basis, earthquakes that can affect the city, seismic intensities were calculated to estimate damages to buildings and to the city's infrastructures. The technical study has been complemented by interviews of officials of the main city services, in order to write a scenario of the events that could happen during and at various times after one of the selected earthquakes. Finally, recommendations were formulated to reduce Quito's earthquake vulnerability. This scenario should be considered as a preliminary study, whose goal is primarily to raise awareness of earthquake risk among government officials, business leaders, and the public in general.

Key words: *Seismic scenario, earthquake, risk mitigation, vulnerability analysis, Quito, Ecuador.*

INTRODUCTION

Quito, la capitale de l'Équateur, a été affectée par un séisme le 6 mars 1987 ($M_w = 6.9$, 80 km au nord-est de la ville). Alors que ce séisme produisit environ 4 000 morts et disparus et 700 millions de dollars de pertes en dehors de Quito, les dégâts et les conséquences humaines dans la ville furent mineurs. C'est toutefois le séisme le plus fort que les habitants actuels de Quito aient connu. Cependant, depuis la Conquête espagnole, 23 séismes d'intensité supérieure à VI ont été ressentis à Quito, dont 8 d'une intensité supérieure à VII (Del Pino & Yepes, 1990). À Quito, la période de récurrence moyenne des séismes ressentis avec une intensité de VIII ou plus est de 115 ans. Celle des séismes ressentis avec une intensité supérieure à VII est de 65 ans, et celle des séismes ressentis avec une intensité supérieure à VI est de 20 ans. Le dernier séisme ayant affecté la ville de Quito avec une intensité supérieure à VII s'est produit en 1868. À cette date, Quito comptait environ 45 000 habitants répartis sur 4 km². De nos jours, l'agglomération, peuplée par plus de 1 300 000 habitants, occupe une superficie environ cent fois plus grande, entre 0° 5' et 0° 20' de latitude sud, et 78° 27' et 78° 35' de longitude ouest, limitée par la cordillère occidentale des Andes à l'Ouest et par une série de collines à l'Est (Fig. 1). Cette forte croissance démographique et spatiale (Fig. 2 et 3) a eu pour conséquences, entre autres, la construction d'immeubles élevés dans la partie basse de la ville, et la multiplication d'habitations ne suivant aucune règle de construction à la périphérie, le plus souvent dans des zones très vulnérables telles que les flancs de montagne (jusque vers 3 300 mètres d'altitude) et ravines comblées (terre, ordures, décombres). Les données historiques ne peuvent donc à elles seules suffire à l'évaluation de la vulnérabilité sismique de Quito.

Afin que les pouvoirs publics, les responsables du secteur économique et les habitants soient conscients du risque sismique, les scientifiques doivent leur faire admettre une image la plus réaliste possible des effets d'un séisme sur la ville et les aider à déterminer les actions préventives qui répondent le mieux aux problèmes rencontrés. L'élaboration d'un scénario

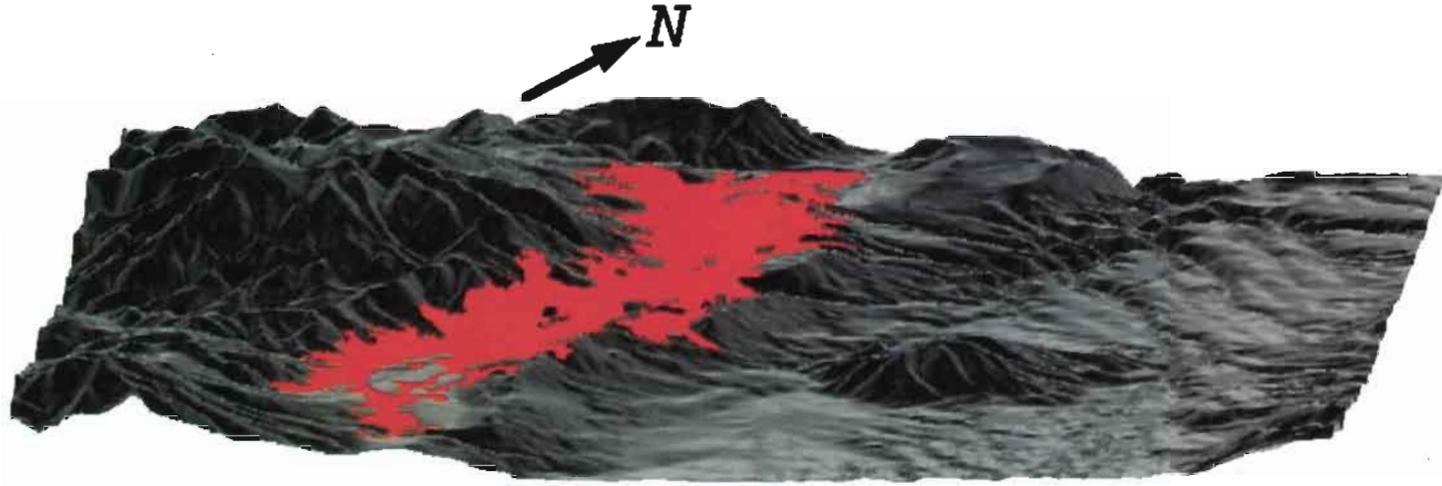


Fig. 1 - Modèle numérique de terrain de Quito et ses environs. La zone en rouge représente l'étendue de la tache urbaine (Source SUIM).

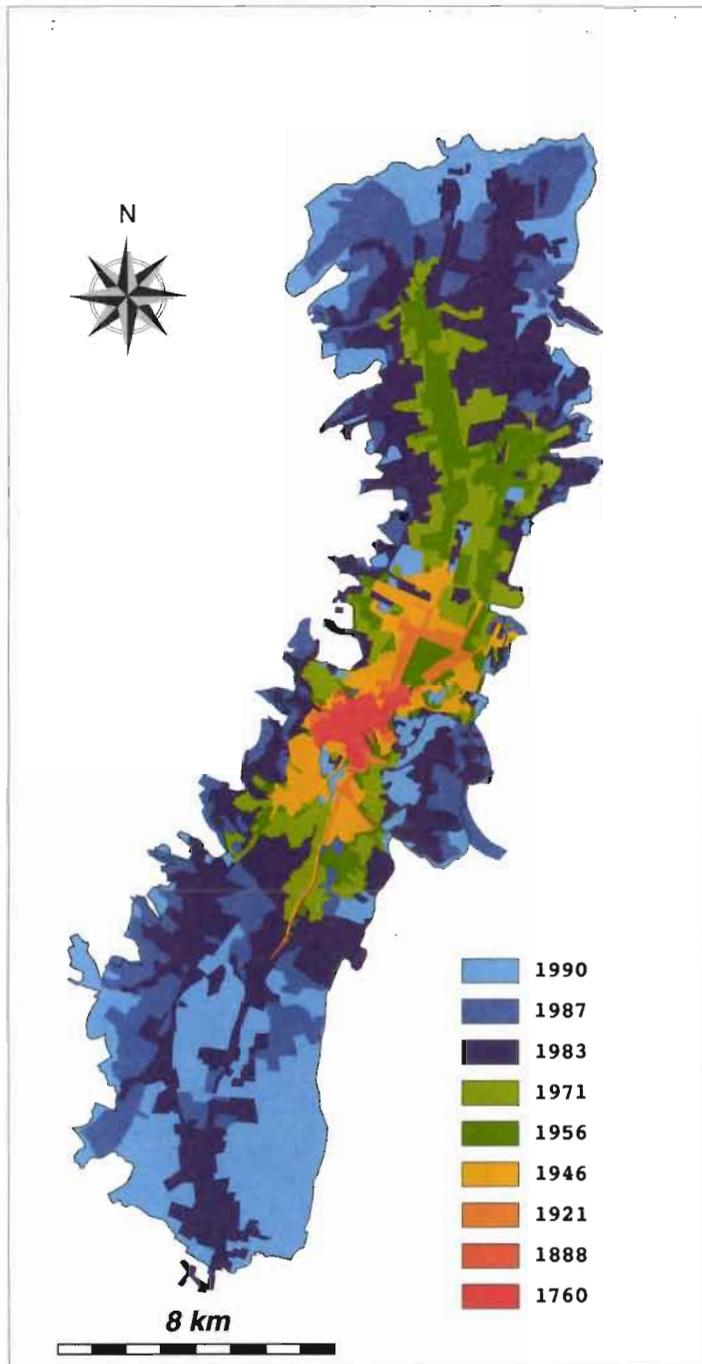


Fig. 2 - Croissance de la ville de Quito de 1760 à 1990 (Source : SUIM) .

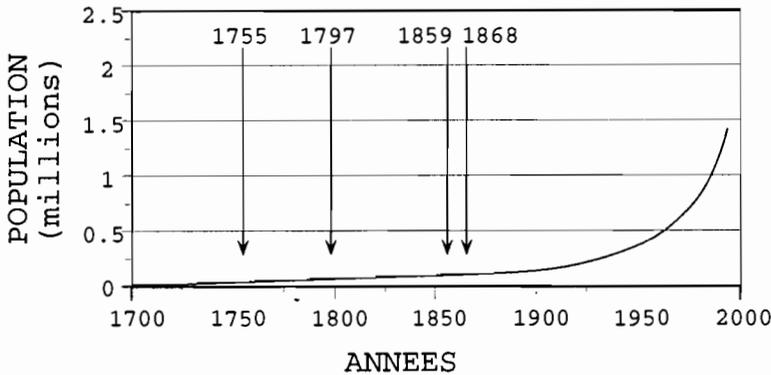


Fig. 3 - Évolution de la population de Quito de 1700 à 1990, avec les dates des principaux séismes destructeurs ayant affecté la ville.

sismique a été la voie choisie pour tenter d'atteindre ces objectifs. Il s'agit de définir les caractéristiques d'un séisme possible (à partir de la sismicité historique et du contexte tectonique régional), d'estimer la distribution des intensités qu'il produit (en fonction des conditions de propagation des ondes sismiques et des caractéristiques physiques du site : topographie, géologie de surface et mécanique des sols). Parallèlement, sont réunies un ensemble de données caractérisant l'habitat, la société et les infrastructures urbaines. L'application de matrices standard permet alors d'obtenir une estimation des dommages et de leur distribution dans l'espace. Enfin, ces résultats sont utilisés avec d'autres études pour établir une série de recommandations pratiques devant permettre de limiter les conséquences des séismes destructeurs.

Pour assurer la crédibilité de cette étude, les résultats techniques ont été périodiquement évalués par un comité international de scientifiques, qui a également endossé les résultats finals de l'étude technique. Les recommandations basées sur les résultats techniques ont elles aussi été soumises à un groupe d'experts internationaux et nationaux représentant les diverses branches d'activités des utilisateurs potentiels du scénario (banques, assurances, santé, etc...) afin de garantir leur faisabilité.

Ce programme a été réalisé entre septembre 1992 et mars 1994 (Escuela Politécnica Nacional *et al.*, 1994a, 1994b, 1996 ; Chatelain *et al.*, 1994 ; Chatelain *et al.*, 1995).

Dans cet article, nous décrivons les méthodes utilisées dans les diverses branches impliquées dans la réalisation du scénario, puis les résultats obtenus et les premières conséquences de la présentation de ces résultats aux autorités.

1. DESCRIPTION SUCCINCTE DU CONTEXTE SISMO-TECTONIQUE DE L'ÉQUATEUR

L'Équateur est situé sur la plaque sud-américaine, près de la frontière entre cette plaque et la plaque Nazca (Fig. 4), cette dernière subductant sous la plaque sud-américaine. Cette subduction est relativement bien décrite (Stauder, 1975 ; Barazangi & Isacks, 1976 ; Lonsdale, 1978 ; Pennington, 1981 ; Hanus *et al.*, 1987). Bien que l'histoire sismo-tectonique

de la région ne soit pas connue en détail, les caractéristiques principales de cette subduction font apparaître :

- une convergence oblique, avec une orientation proche de N80°E à la vitesse de 78 mm/an (Pardo-Casas & Molnar, 1987 ; Daly, 1989) ;
- des variations du pendage de la plaque plongeante : au nord de 2,5° S la plaque de Nazca plonge avec un angle d'environ 25°, tandis qu'au Sud elle plonge avec un angle d'environ 15° jusque vers 100 km, profondeur à laquelle la plaque subductée devient sub-horizontale (Winter, 1990) ;
- l'incorporation de la ride de Carnegie dans le processus de subduction.

La sismicité de l'Équateur a été peu étudiée. La plupart des études sismologiques reposent sur l'utilisation des séismes localisés par le réseau mondial (Kelleher, 1972 ; Kanamori & Mc Nally, 1982 ; Mendoza & Dewey, 1984 ; Pennington, 1981 ; Robalino, 1975 ; Suarez *et al.*, 1983 ; Vasek & Hanus, 1988). Quelques études de microsismicité ont été menées, utilisant peu de stations d'enregistrement et ne donnant que des résultats marginaux

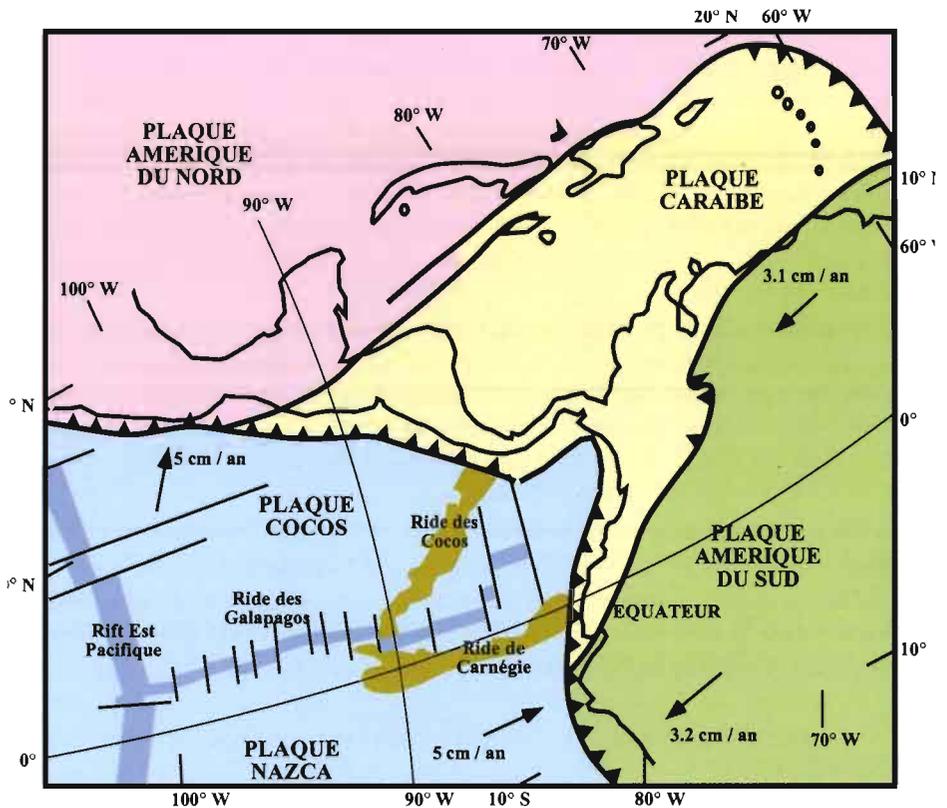


Fig. 4 - Cadre sismo-tectonique de l'Équateur. La plaque océanique Nazca ainsi que la ride de Carnegie s'enfoncent sous la plaque continentale sud-américaine sur laquelle est situé l'Équateur. Les flèches représentent les vitesses de convergence des plaques (D'après Bourgois *et al.*, 1985).

(Hall & Ramon, 1978 ; Hall *et al.*, 1980 ; Yepes, 1982). Le niveau de l'activité sismique en Équateur est toutefois relativement élevé : les séismes de magnitude supérieure à 5 sont fréquents, occasionnant souvent des pertes en vies humaines et des dégâts importants car ils se produisent en majorité sur le continent (Fig. 5). Dix-sept tremblements de terre de magnitude supérieure ou égale à 7,0 ont été recensés dans ce pays au cours du seul vingtième siècle (Table 1).

Table 1 - Liste des séismes de magnitude ≥ 7 depuis 1900.

Date	Latitude	Longitude	Profondeur (km)	Magnitude
07 / 01 / 1901	-2,0	-82,0	25	7,8
31 / 01 / 1906	1,0	-81,3	25	8,6
28 / 09 / 1906	-2,0	-79,0	150	7,5
24 / 07 / 1912	-5,0	-80,0	30	7,0
14 / 05 / 1928	-5,0	-78,0	0	7,3
18 / 07 / 1928	-5,0	-79,5	0	7,0
19 / 07 / 1937	-1,5	-76,5	190	7,1
14 / 05 / 1942	-0,01	-81,12	20	7,9
12 / 12 / 1953	-4,0	-81,0	0	7,8
16 / 01 / 1956	-0,5	-80,2	0	7,3
19 / 01 / 1958	1,22	-79,37	40	7,8
07 / 07 / 1959	-3,7	-81,71	0	7,4
31 / 07 / 1970	-1,46	-72,56 (?)	653 (?)	7,0
10 / 12 / 1970	-3,97	-80,66	15	7,6
11 / 07 / 1971	-4,4	-79,95	100	7,1
27 / 07 / 1971	-2,79	-77,35	88	7,5
12 / 12 / 1979	1,60	-79,36	24	7,7

Depuis 1985 l'*Instituto Geofísico de l'Escuela Politécnica Nacional* (EPN) de Quito a mis progressivement en place un réseau sismologique qui comprend à l'heure actuelle 29 stations, auxquelles il faut ajouter 4 stations de l'Université de Cuenca qui ont été connectées au réseau de l'EPN. Les stations sont équipées de sismomètres verticaux, les signaux étant télétransmis par UHF au laboratoire de l'EPN à Quito. Grâce à ce système, il est maintenant possible de détecter et de localiser les séismes à partir d'une magnitude de 2,9.

Le réseau sera complété ponctuellement par un réseau de stations autonomes portables, pour des études précises de la sismicité. Grâce à ce dispositif il sera possible d'étudier plus en détail le contexte sismo-tectonique de l'Équateur. Finalement, les structures profondes vont être étudiées avec les données collectées à l'aide du réseau LITHOSCOPE, déployé de décembre 1994 à mai 1995, avec lequel 2 profils est-ouest et 3 profils nord-sud ont été réalisés en collaboration entre l'EPN, l'ORSTOM et le LGIT de Grenoble.

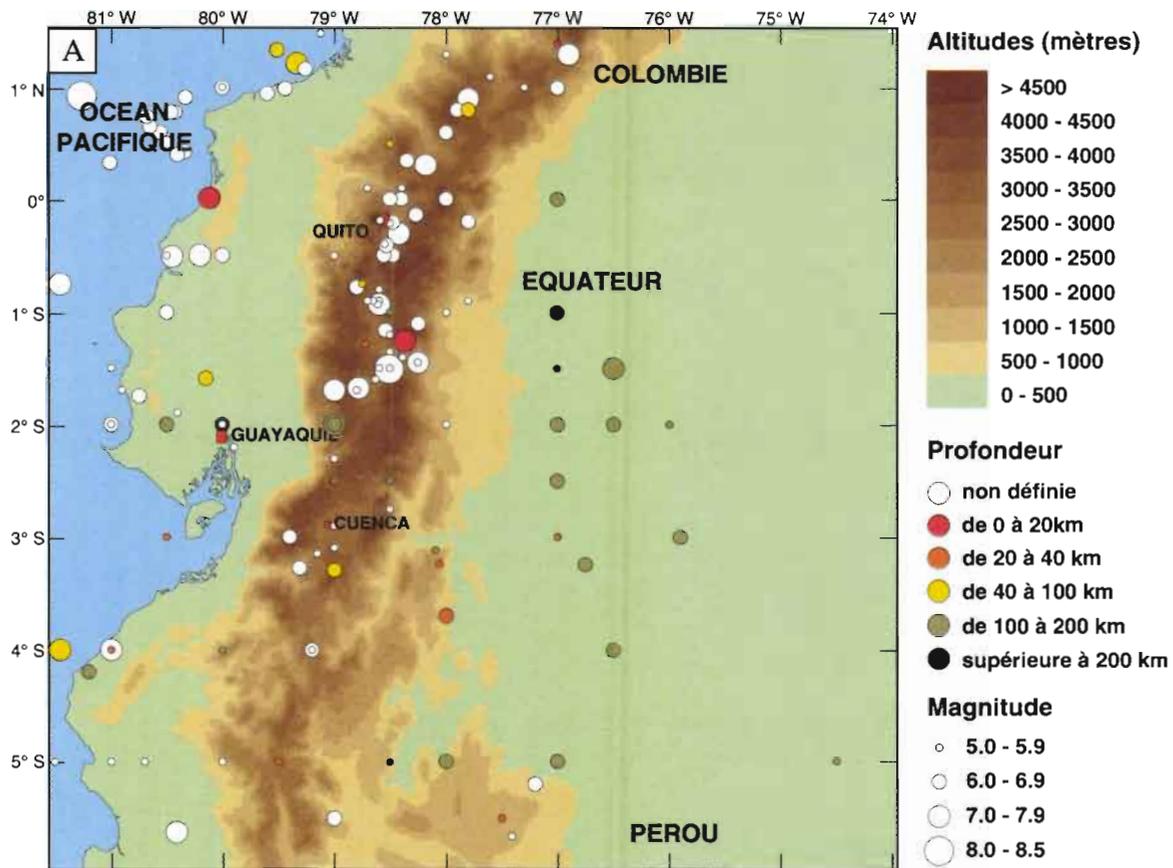


Fig. 5a - Carte montrant la localisation des séismes de magnitude supérieure ou égale à 5,0. : sismicité historique (1545 - 1960),

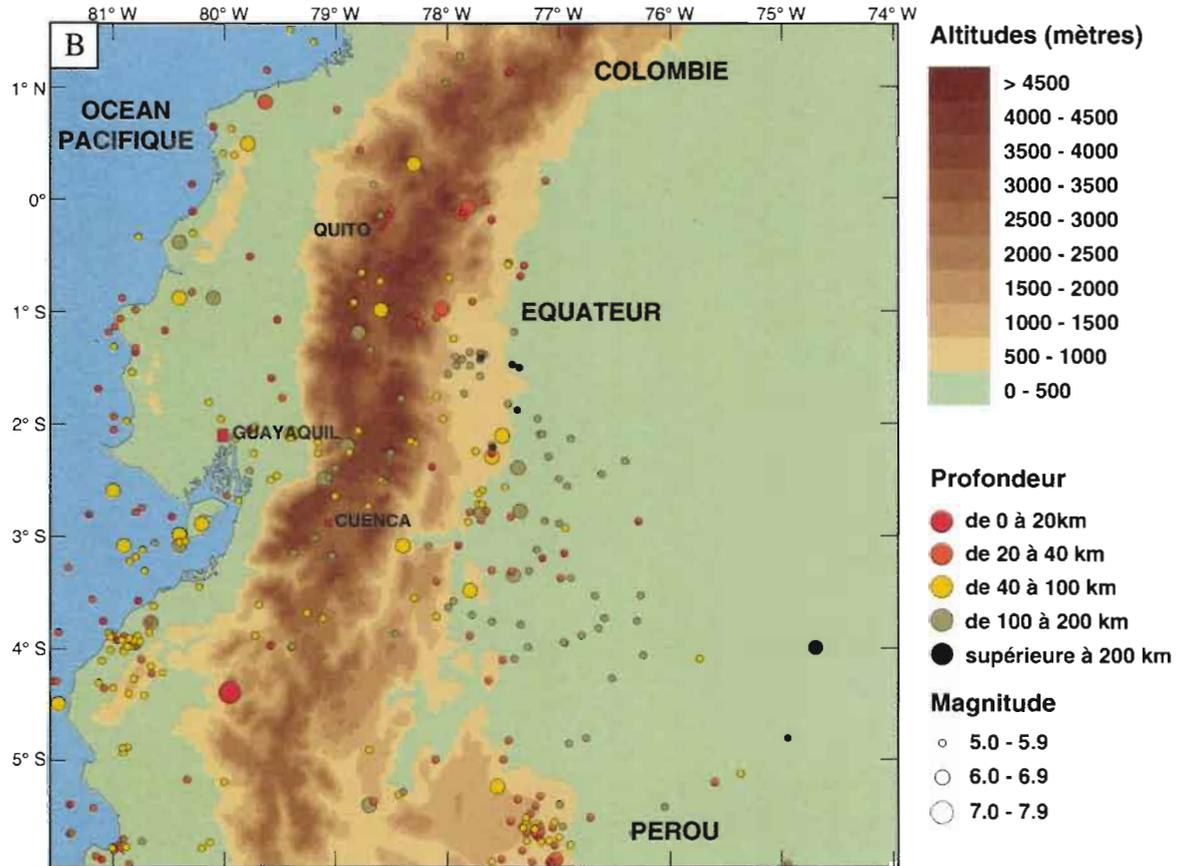


Fig. 5b - Carte montrant la localisation des séismes de magnitude supérieure ou égale à 5,0. : sismicité instrumentale (1961 - 1993).

2. SÉLECTION DE SÉISMES PROBABLES POUVANT AFFECTER LA VILLE

La définition des caractéristiques d'un séisme probable repose sur les données de la sismicité historique et du contexte tectonique régional. L'Équateur est sous l'influence de deux sources principales de séismes. La première est la zone de contact entre les plaques Nazca et Sud-Américaine, à l'ouest de la côte Pacifique du pays, qui produit les séismes les plus forts, tel le séisme d'Esmeraldas de 1906 (Mw 8,6). La seconde source sismogénique est située sur la plaque Sud-Américaine, principalement sous les zones andine et sub-andine, où peuvent se produire des séismes tel que celui de 1987 et où la période de récurrence des séismes de magnitude 6,8 - 7,0 a été estimée à 30 - 60 ans (Lomnitz *et al.*, 1987).

Une présélection de 10 séismes a été établie, parmi lesquels trois séismes ont été sélectionnés pour être étudiés dans le scénario (Fig. 6) :

- un séisme côtier, de magnitude 8,4, localisé à 200 km à l'ouest de Quito ;
- un séisme continental de magnitude 7,3, localisé à 80 km à l'est de Quito ;
- un séisme local de magnitude 6,5, localisé à 25 km au nord de Quito.

Ces séismes sont représentatifs de trois degrés d'éloignement de la ville de Quito et des trois régimes sismogéniques d'Équateur (subduction, région sub-andine et cordillère des Andes, respectivement).

3. CALCUL DE L'ATTÉNUATION DES ONDES SISMIQUES

La loi d'atténuation des ondes sismiques a été obtenue à l'aide des données d'intensités (MSK) disponibles sur les séismes historiques, les seules existantes en Équateur. Sur plus de 2 500 séismes répertoriés dans le catalogue sismique équatorien (*Observatorio Astronómico de Quito*, 1959), 23 séismes ont été sélectionnés (Fig. 6) à l'aide des critères suivants : (1) magnitude $\geq 5,0$, (2) profondeur du foyer ≤ 100 km, et (3) nombre d'observations d'intensités ≥ 7 .

Les observations des séismes sélectionnés couvrent un éventail de magnitudes de 5,0 à 8,6 et de distances observation-épicentre de 0 à plus de 1 000 kilomètres, avec toutefois une distribution assez inégale, comme cela est généralement observé (par exemple Katayama, 1982 ; Tong & Katayama, 1988 ; Fukushima *et al.*, 1988).

Après élimination des données s'écartant de la moyenne par plus d'un écart-type dans la distribution distance-intensité et des observations d'intensités distantes de plus de 500 kilomètres de l'épicentre, puis correction des effets magnitude-distance en utilisant les méthodes proposées par Joyner & Boore (1981) et Tong & Katayama (1988), un échantillon de 1 080 observations a été conservé pour l'analyse.

Les observations ont ensuite été divisées en deux groupes, selon qu'elles provenaient de séismes de subduction ou de séismes de la plaque supérieure, donnant pour l'Équateur les relations suivantes (où δ représente la distance épacentrale) :

séismes de la plaque supérieure : $I = 1.55M - 3.72\log(\delta) + 1.79$

séismes de subduction : $I = 1.70M - 4.82\log(\delta) + 3.97$

Ces expressions moyennes ont ensuite été adaptées à Quito en corrigeant les résultats obtenus avec les formules précédentes à l'aide des observations d'intensités détaillées observées dans la ville pour 4 séismes de subduction (1906, 1942, 1956 et 1958) et 2 séismes

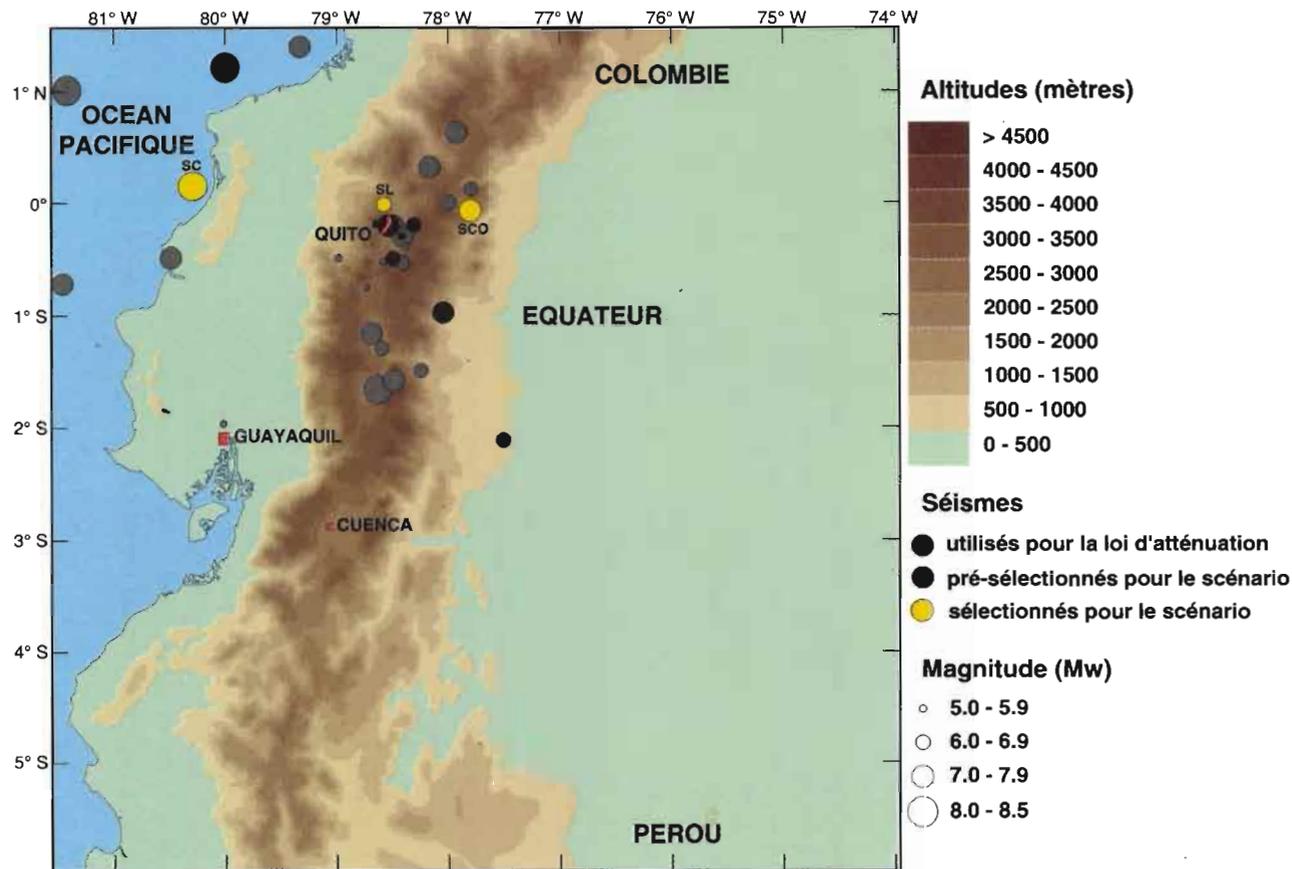


Fig. 6 - Carte montrant la localisation des 10 séismes les plus probables pouvant affecter la ville de Quito (ronds noirs et jaunes) et les 23 séismes utilisés pour établir la loi d'atténuation des ondes sismiques (ronds grisés). Les 3 séismes retenus pour cette étude sont représentés par les ronds jaunes (SL : séisme local, magnitude 6.5 ; SC : séisme côtier magnitude 8.4 ; SCO : séisme continental magnitude 7.3).

de la plaque supérieure (1987 et 1990). Les formules d'atténuation ainsi obtenues pour la ville de Quito sont les suivantes (où Δ représente la distance épacentrale) :

séismes de la plaque supérieure : $I = 1,55M - 3,72\log(\Delta) + 2,39$

séismes de subduction : $I = 1,70M - 4,82\log(\Delta) + 2,97$

Les intensités sont ensuite converties en accélérations en utilisant la formule de Neumann (1954) :

$\log(a) = 0,308I - 0,041$, où a représente l'accélération (en cm/s^2) et I l'intensité.

Nous obtenons ainsi pour un séisme donné l'accélération maximale en surface, moyennée sur toute la ville. Afin d'obtenir une distribution plus précise des accélérations il faut ensuite effectuer un zonage de la ville. Puis l'accélération moyenne produite au niveau du socle est obtenue en déconvoluant l'accélération moyenne en surface. Enfin, l'accélération produite à la surface de chaque zone est obtenue en reconvoluant l'accélération moyenne produite au niveau du socle en fonction de la colonne caractéristique du sol de chacune des zones.

Il faut rappeler ici que le but de ce travail est avant tout d'obtenir des résultats plausibles à présenter aux responsables économiques et politiques ainsi qu'à la population. C'est pourquoi, bien que le cheminement choisi pour obtenir la distribution des intensités soit bien sûr entaché de nombreuses incertitudes et que le choix des formules empiriques tirées de la littérature puisse être sujet à contestation, nous ne présentons pas de discussions détaillées sur les unes comme sur les autres. Les résultats sont les meilleurs que nous puissions obtenir en n'utilisant que les données existantes.

4. ZONAGE DE LA VILLE DE QUITO

Le zonage de la ville de Quito a été obtenu en deux étapes. Tout d'abord, quatre grandes zones ont été déterminées en fonction de la topographie, de la géologie de surface et de la distribution des ravines (*quebradas*). Celles-ci ont ensuite été subdivisées en 20 zones, en se basant sur les caractéristiques du sol.

4. 1. Topographie et géologie de surface

Quito est situé dans une dépression bordée à l'ouest par les flancs du volcan Pichincha et à l'est par une série de collines (Fig. 1). De ce fait, trois grandes zones ont été déterminées : les flancs du Pichincha, la basse terre et les collines orientales ; plus une quatrième zone : le Panecillo, petite formation de cangahua séparant les parties nord et sud des basses terres. Les limites de ces zones ont été affinées en utilisant 4 coupes de géologie de surface (Fig. 7), 6 coupes lithologiques du service des eaux, ainsi que la distribution des ravines (Fig. 8), pour la plupart remplies de terre, détritiques, etc ... par les habitants.

4. 2. Caractéristiques du sol

Les zones reconnues précédemment ont été subdivisées à l'aide de 11 profils de sol allant de 5 à 30 mètres de profondeur (Fig. 9), obtenus à partir des données de plus de 2 600 forages répartis sur toute la ville.

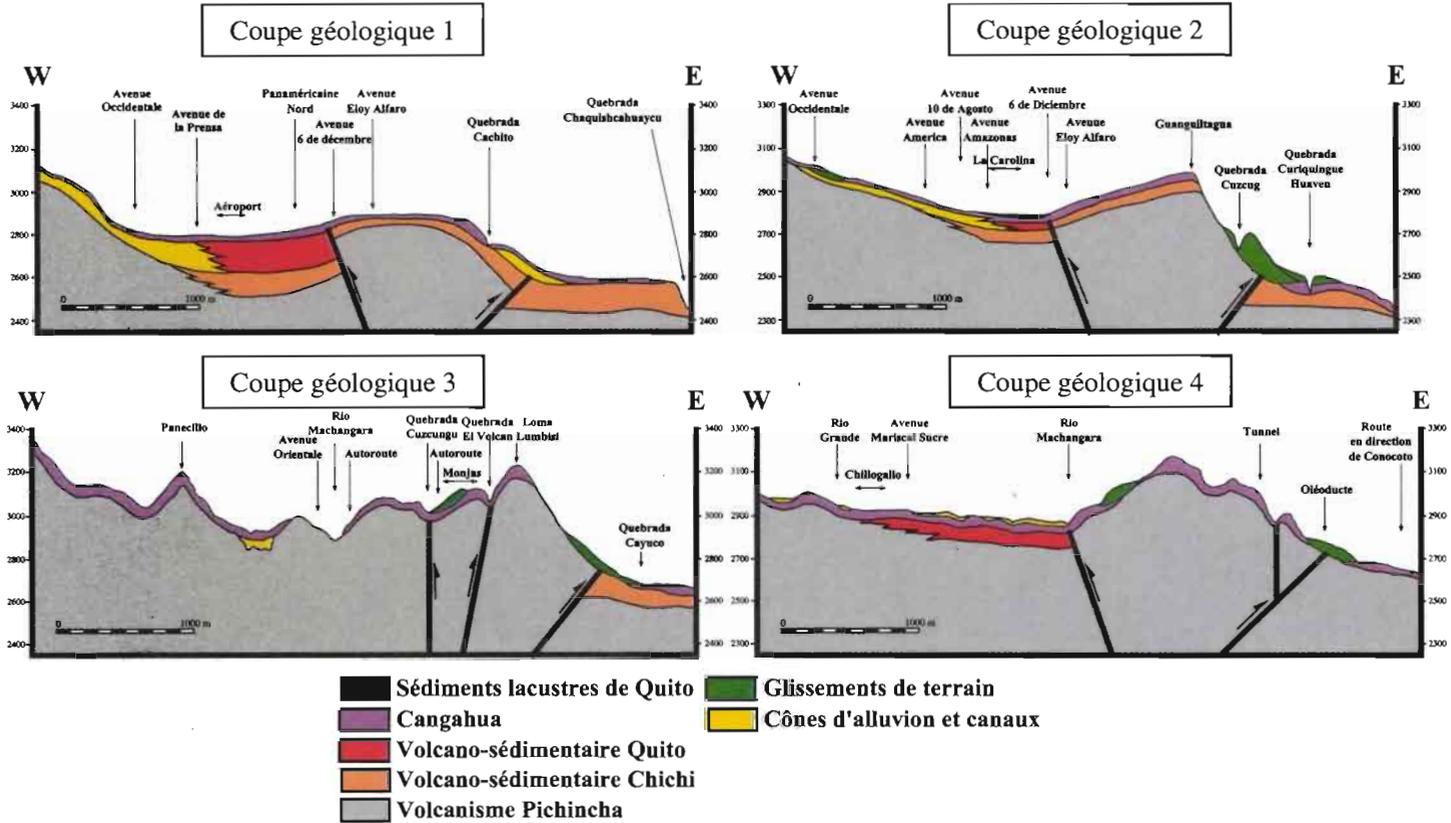


Fig. 7 - Les 4 coupes géologiques disponibles utilisées pour le zonage de la ville (la localisation des coupes est indiquée sur la figure 12).

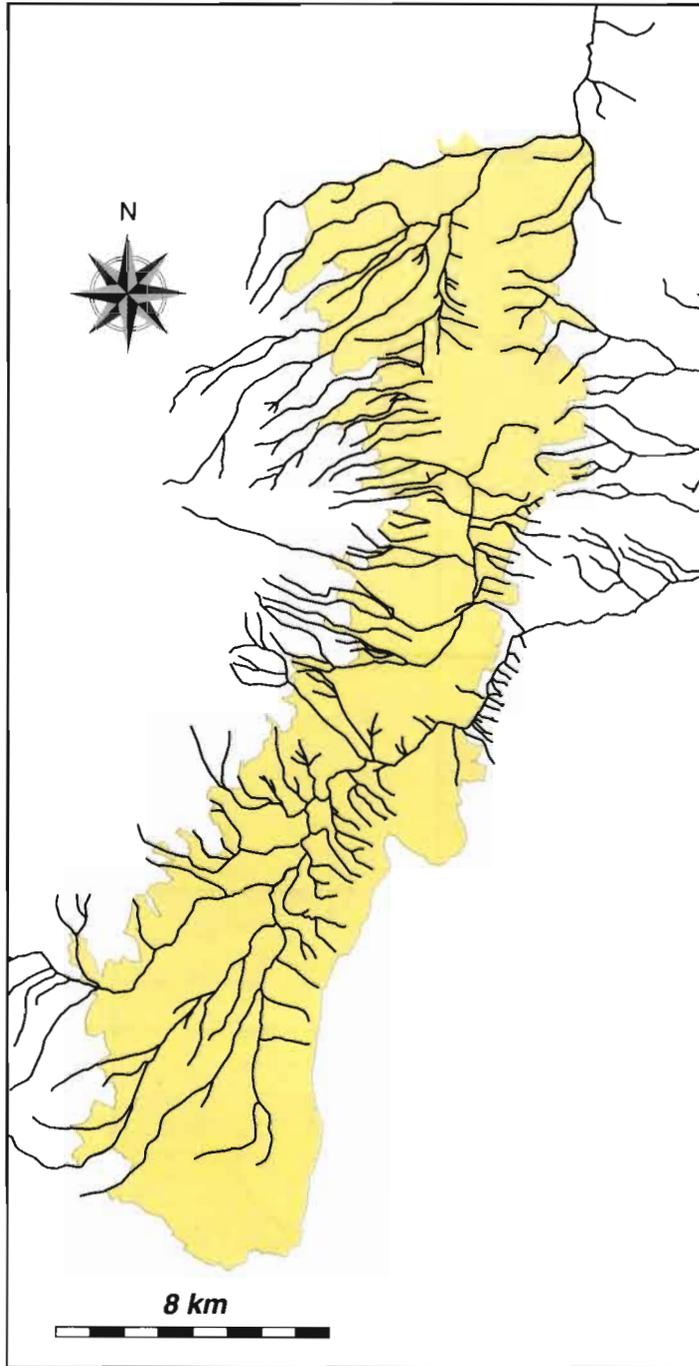


Fig. 8 - Carte montrant la répartition des ravines (*quebradas*) dans la ville de Quito.

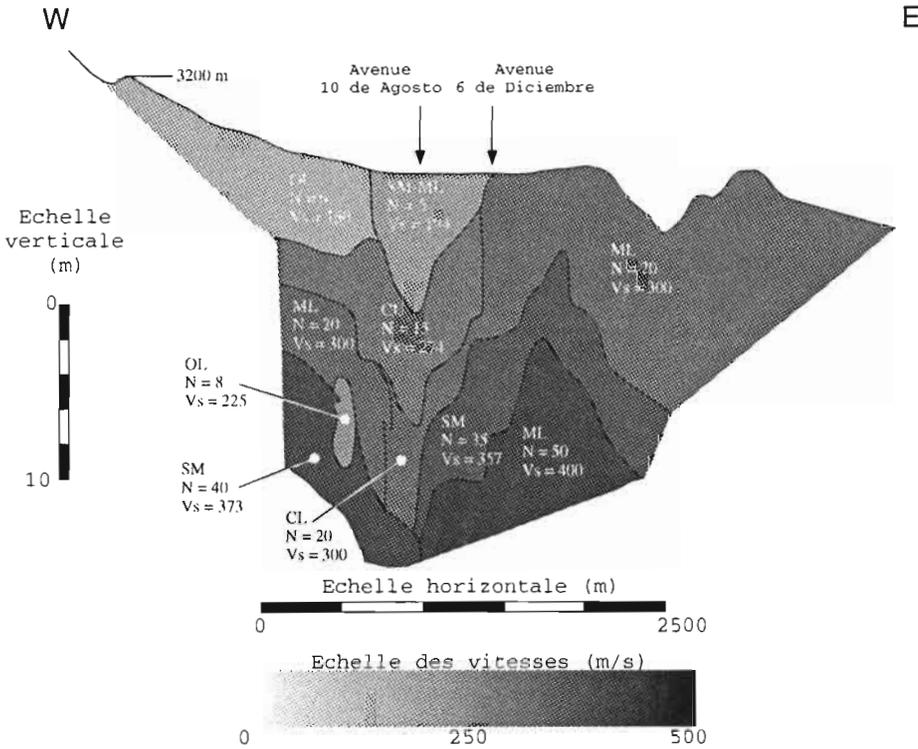


Fig. 9 - Exemple de profil de sol pour une zone de Quito ; SM-CL-ML-OL : types de sol du Système Unifié de Classification des Sols ; N : nombre de chocs lors des Tests Standard de Pénétration.

Ensuite, les colonnes caractéristiques de sub-surface de chaque zone ont été déterminées. Les caractéristiques des structures situées en dessous des profils précédents ont été obtenues à l'aide des 4 coupes géologiques, des 6 coupes lithologiques, complétées par des données de sismique réfraction et de sondages électriques. Ces données étaient toutefois insuffisantes pour connaître la profondeur à laquelle se trouve le socle.

Celle-ci a été estimée en utilisant le programme SHAKE (Schnabel *et al.*, 1972) et un programme japonais similaire (NAMAZU ; Oyo Corp., communication personnelle). L'amplification des mouvements du sol produits par plusieurs séismes de référence a été calculée itérativement, en faisant varier l'épaisseur de la couche la plus profonde, pour une vitesse Vs donnée, jusqu'à ce qu'elle ne varie plus (l'amplification est mesurée par le rapport de l'accélération maximale à la surface, obtenue à l'aide des programmes, sur l'accélération maximale du signal sismique incident au sommet du socle). La localisation du socle est alors obtenue comme la profondeur minimale à partir de laquelle l'amplification ne varie plus pour tous les séismes de référence. Une fois la profondeur du socle estimée, une vitesse des ondes sismiques de cisaillement de 1 000 m/s dans le socle a été ensuite obtenue en utilisant la même méthode.

Nous avons pu ainsi obtenir la colonne de sub-surface caractéristique de chaque zone (Fig. 10).

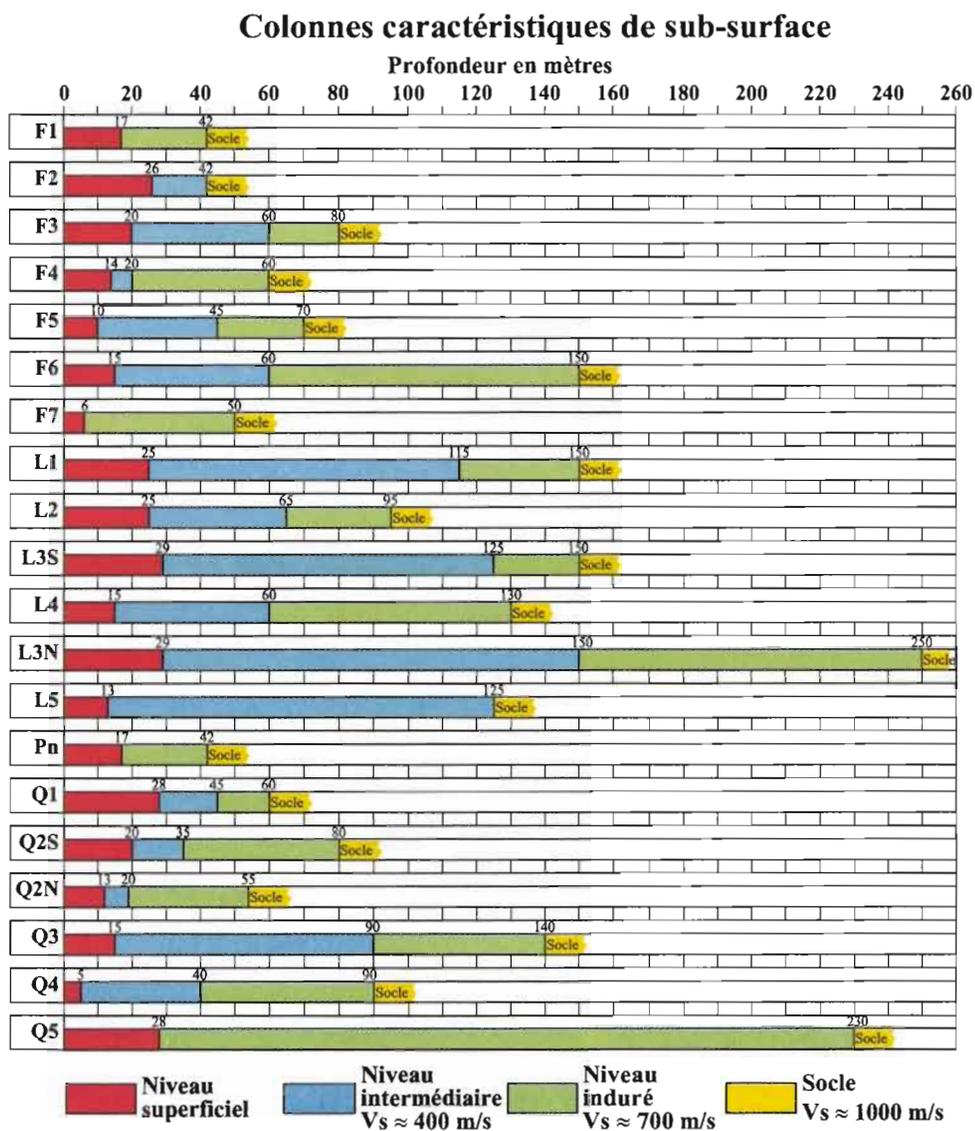


Fig. 10 - Colonnes de sub-surface caractéristiques des zones de la ville de Quito.

4. 3. Ajustement des limites des zones

L'accélération maximale à la surface produite par le séisme de 1987 dans chaque zone a été calculée en utilisant sa colonne de sol caractéristique, à l'aide des programmes SHAKE (Schnabel *et al.*, 1972) et NAMAZU (Oyo Corp., communication personnelle), à partir de l'accélérogramme obtenu sur le site de l'EPN (Fig. 11a), en utilisant comme loi de non-linéarité pour les différents matériaux constitutifs, une loi adaptée de celle de Seed & Idriss (1970). Les accélérations ont ensuite été transformées en intensités à l'aide de la formule de Neumann (1954). Puis, les intensités calculées ont été comparées aux intensités observées, afin d'ajuster les limites des zones pour limiter les disparités entre intensités calculées et intensités observées.

4. 4. Résultat du zonage

Vingt zones ont ainsi été identifiées dans la ville de Quito (Fig. 12). Les trois grands ensembles définis au début de l'étude (flancs du Pichincha, basses terres, et flancs des collines orientales) en fonction de la topographie, de la géologie de surface et de la distribution des ravines, ont été divisés respectivement en 7, 6, et 6 zones en fonction des caractéristiques du sol, le Panecillo n'étant pas subdivisé.

5. ÉTABLISSEMENT DES CARTES DE DISTRIBUTION DES INTENSITÉS SISMQUES

Le processus de calcul des intensités est le suivant :

(1) la loi d'atténuation des ondes sismiques permet d'obtenir l'accélération maximale à la surface d'une zone (q2s, pour laquelle 2 accélérogrammes sont disponibles) ;

(2) le signal sismique produisant l'accélération maximale ainsi obtenue est synthétisé à partir du signal d'un événement comparable ayant produit une accélération connue à la surface cette zone ;

(3) le signal sismique ainsi obtenu est ensuite déconvolué par rapport à la colonne caractéristique du sol de cette zone, afin d'obtenir le signal au sommet du socle ;

(4) à partir du signal sismique obtenu au sommet du socle, l'accélération à la surface est ensuite calculée pour chaque zone, en fonction de sa colonne caractéristique de sol ;

(5) finalement, l'intensité est déduite de l'accélération en utilisant la formule de Neumann (1954).

L'étape (2) a été traitée de différentes façons suivant les séismes :

- séisme continental : nous avons utilisé l'accélérogramme produit par le séisme de 1987 sur le site de l'EPN, dans la zone q2s (Fig. 11a), dont l'épicentre est proche de celui du séisme choisi pour le scénario ;

- séisme côtier : aucun accélérogramme n'a été enregistré à Quito pour un séisme similaire. Nous avons utilisé l'accélérogramme produit par le séisme de 1985 à Mexico (Fig. 11b), dans une zone similaire à la zone q2s de Quito, à une distance épacentrale comparable ;

- séisme local : le signal de ce séisme a été obtenu à l'aide de la méthode de synthétisation de signaux forts à partir de signaux faibles, développée par Irikura (1983) ;

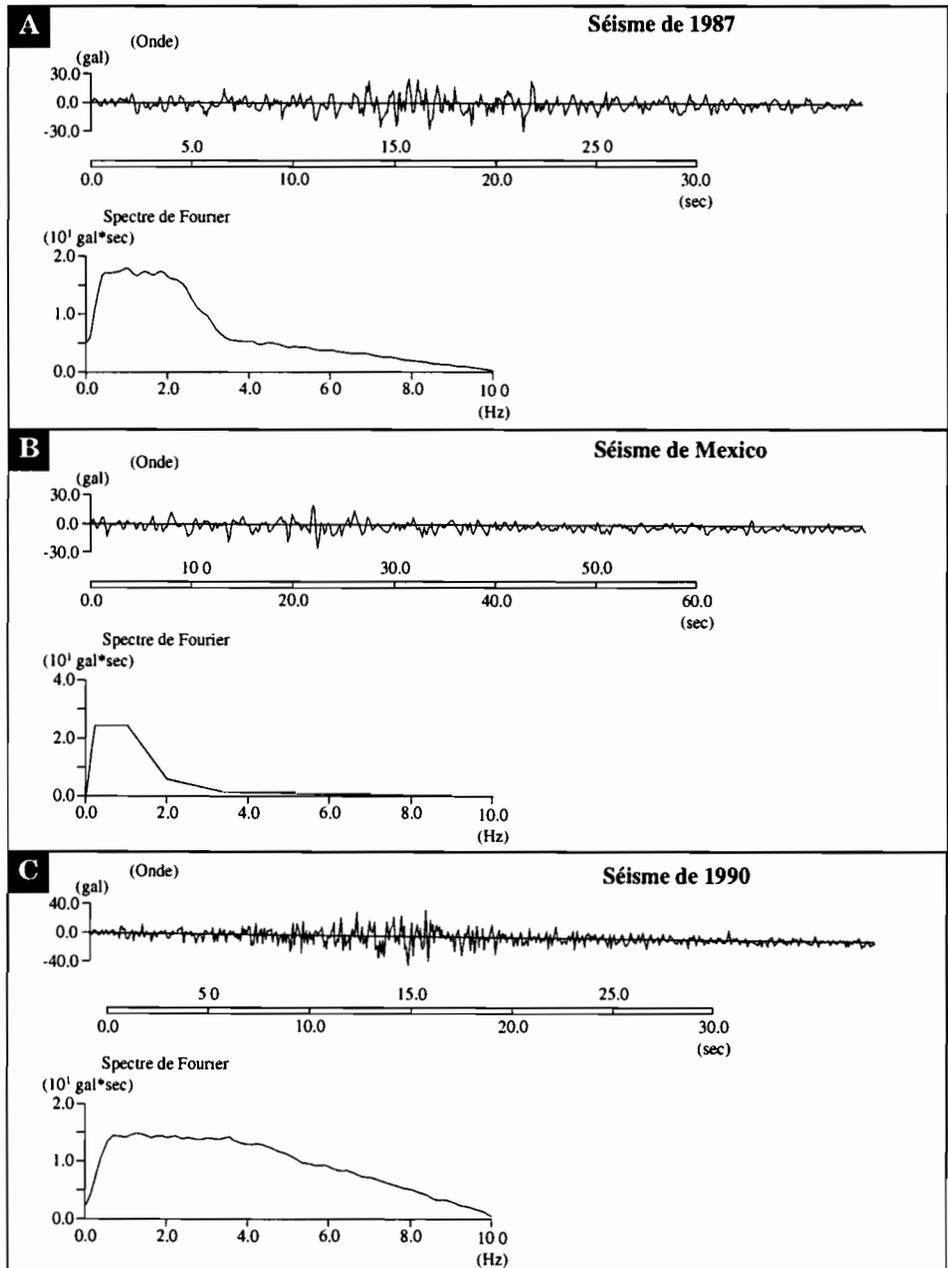


Fig. 11 - Accélérogrammes et spectres de Fourier utilisés pour l'étude de la réponse du sol et le calcul des intensités : (a) séisme de 1987, (b) séisme de Mexico, et (c) séisme de 1990.

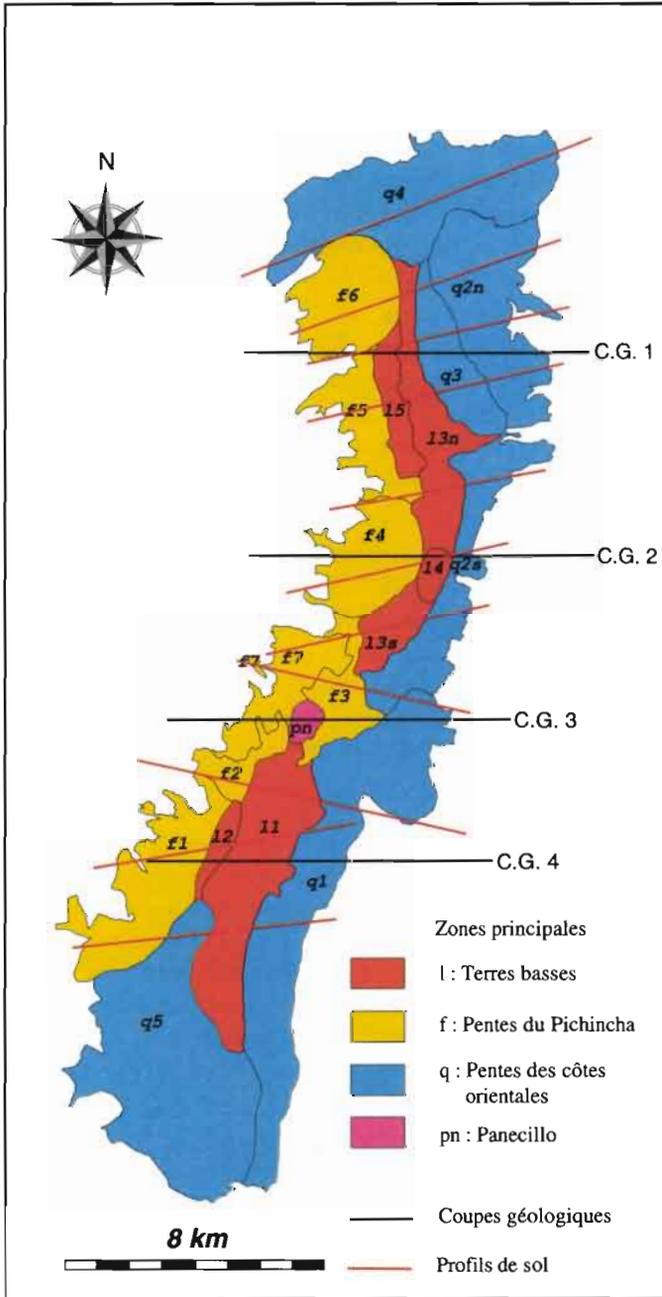


Fig. 12 - Zonage de la ville de Quito : (f) flancs du volcan Pichincha, (l) basses terres, (q) flancs des collines orientales et (Pn) Panecillo. Les lignes noires représentent la localisation des 4 coupes géologiques, les lignes rouges la localisation des 11 profils de sol utilisés pour le zonage.

1986), surtout utilisée en champ proche (par exemple, Tanaka *et al.*, 1982 ; Iwata & Irikura, 1988). Pour ce faire, nous avons utilisé l'accélérogramme du séisme de 1990 (Fig. 11c) enregistré à l'EPN, dans la zone q2s. L'épicentre de ce séisme est très proche de celui du séisme local, et sa magnitude (4.4) est assez faible en comparaison de celle de ce dernier (6.4).

Avant d'être appliquée aux séismes choisis pour cette étude, la méthode a été d'abord testée sur le séisme de 1987. Les intensités calculées correspondant de façon satisfaisante aux intensités observées, la méthode a été appliquée aux trois séismes du scénario. Nous avons ainsi obtenu une carte de distribution des intensités pour chaque séisme (Fig. 13). Ces données servent ensuite à l'évaluation des dégâts produits par chacun des séismes choisis pour cette étude, en les croisant avec les données de distribution du type de bâti et des réseaux vitaux de la ville.

Afin de ne pas affoler les gens et éviter des conséquences sociales (migration de population, par exemple) et économiques (hausse ou baisse des prix des terrains et des habitations, par exemple) incontrôlables, il a été décidé, d'un commun accord entre les membres du groupe de travail et des deux comités d'experts, de ne pas divulguer l'évaluation de la distribution des morts et blessés et de ne pas présenter l'évaluation des dégâts à l'échelle précise obtenue avec le SIG.

6. CARACTÉRISATION ET DISTRIBUTION DU TYPE DE BÂTI ET DES RÉSEAUX

Le type de bâti dominant par îlot a été déterminé en utilisant les informations de deux sources principales : (a) un inventaire détaillé des bâtiments dans les 7 secteurs les plus peuplés de la ville, et (b) les données du recensement de 1990, contenues dans la base de données du SIG de la municipalité. Ces données ont permis d'identifier 15 types de constructions, depuis les bâtiments en *adobe* jusqu'aux édifices en béton armé (Fig. 14). Ces nouvelles données ont été introduites dans le SIG de la municipalité, afin d'obtenir la carte de distribution du bâti et, par la suite, la carte de distribution de l'estimation des dégâts. Les structures les plus courantes sont de béton armé, principalement dans la partie nord de la ville, et une ceinture dense de structures de maçonnerie non renforcée et auto construites sur la périphérie de la ville (Fig. 14). On observe également une concentration très forte de constructions en *adobe* dans le centre historique (Fig. 14). Des bâtiments en béton armé et en *adobe*, jugés représentatifs de ces deux types de construction, ont été inspectés sur la base des recommandations ATC-21 (1988) et ATC-22 (1989). Il ressort que les bâtiments en béton armé ne satisfont pas aux recommandations et que les bâtiments en *adobe* souffriraient d'importants dégâts, voire une destruction totale, en cas d'intensité supérieure ou égale à VII.

L'étude a été complétée par l'inspection détaillée de l'aéroport international Mariscal Sucre de Quito, du terminal des oléoducs « El Beaterio », ainsi que des 9 hôpitaux les plus importants, 56 écoles et 52 bâtiments industriels. L'aéroport international ne devrait souffrir des dégâts significatifs qu'en cas de séisme très fort. Le terminal des oléoducs devrait pouvoir supporter les effets d'un séisme fort. Ce diagnostic n'est cependant valable qu'à court terme, car les parties métalliques ne sont pas entretenues de façon adéquate. Bien que les réservoirs puissent ne pas souffrir de dégâts structureux sérieux, les possibilités d'incendies sont réelles qui, liées à la proximité de zones habitées denses, peuvent être la source de problèmes sérieux. Les hôpitaux sont en général construits en béton armé, sauf le plus ancien (construit en 1946), avec parfois des dépendances en maçonnerie simple. La conception des hôpitaux

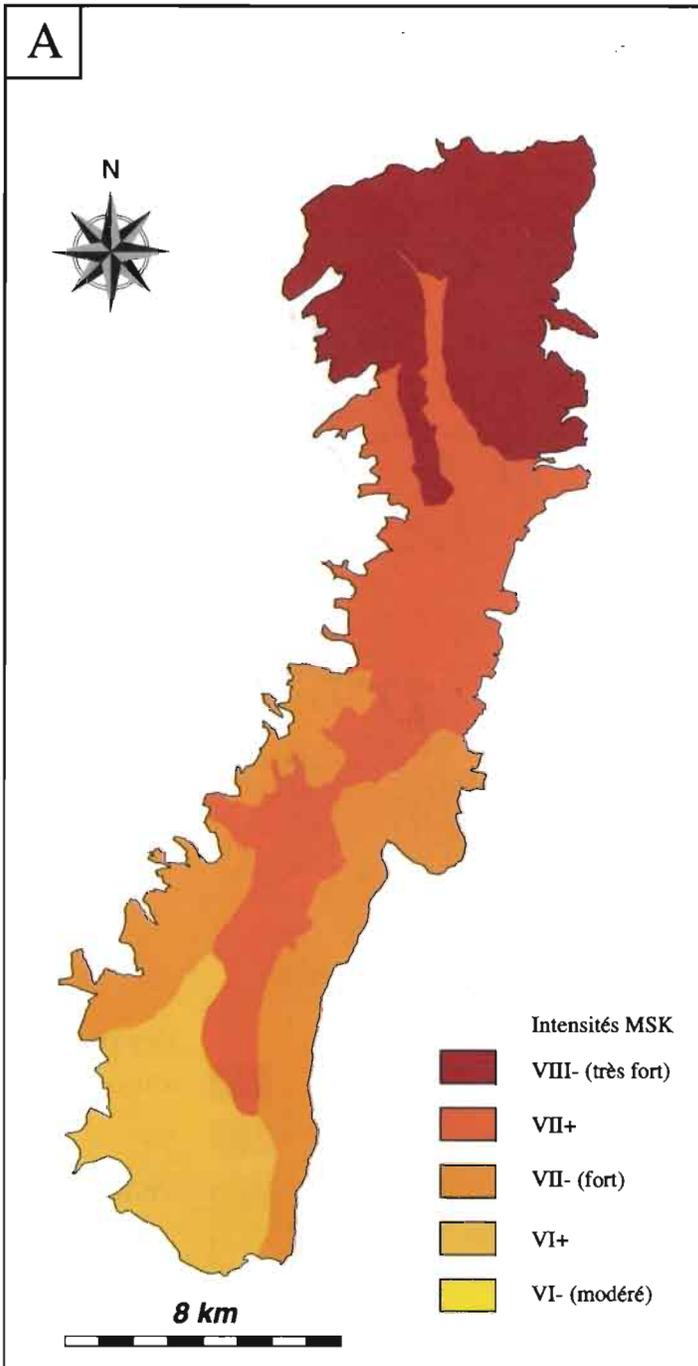


Fig. 13a - Carte de distribution des intensités produites par le séisme local.

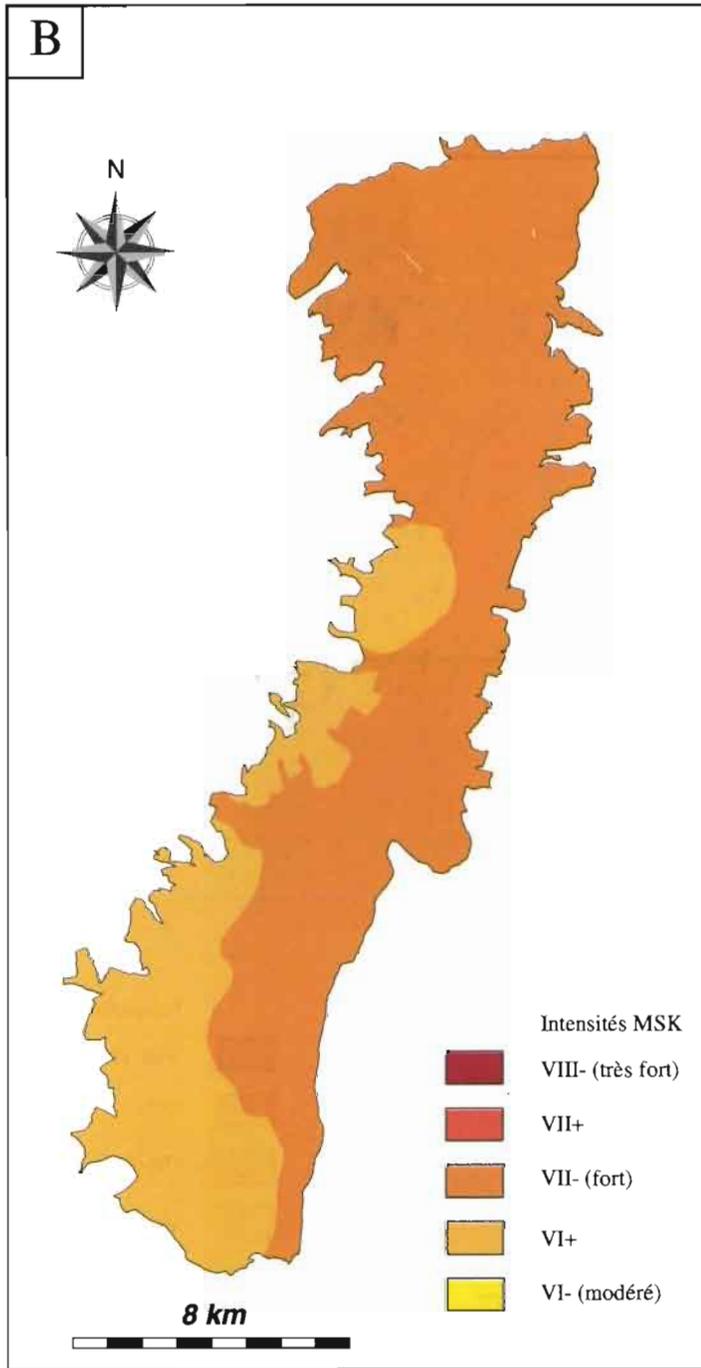


Fig. 13b - Carte de distribution des intensités produites par le séisme continental.

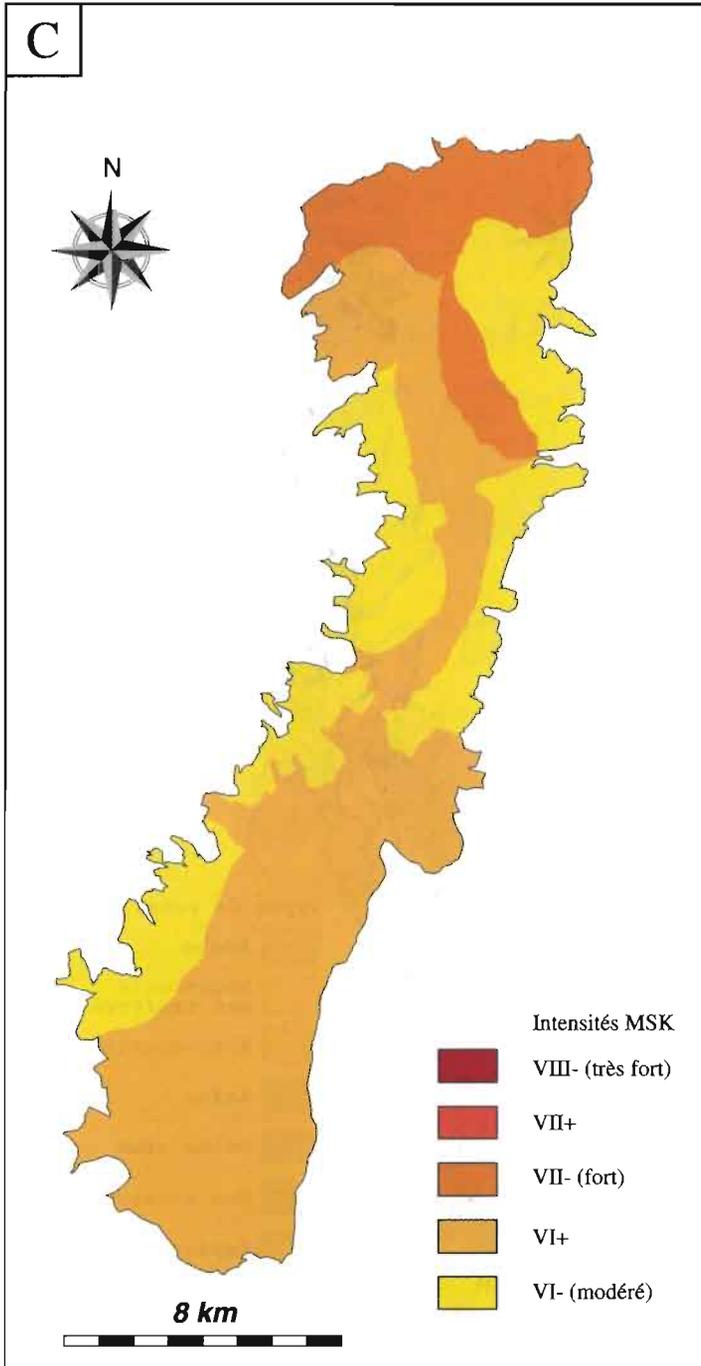


Fig. 13c - Carte de distribution des intensités produites par le séisme côtier .

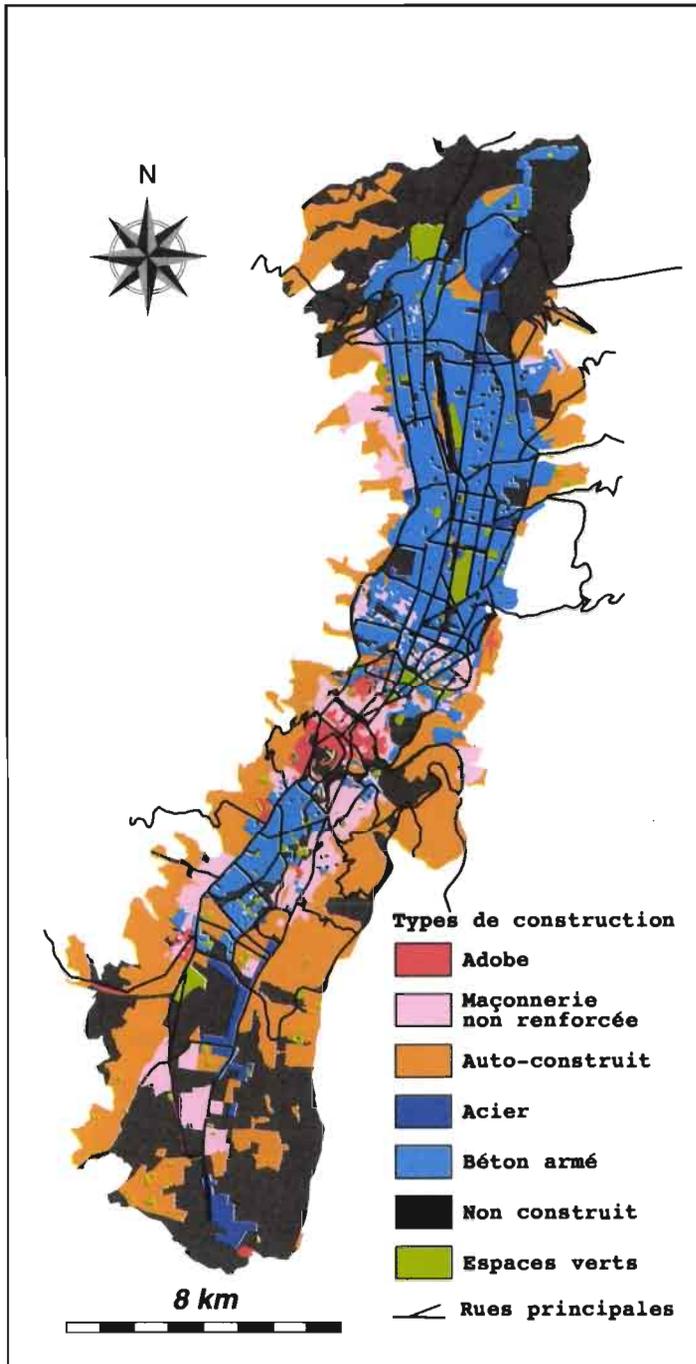


Fig. 14 - Carte de distribution des types de construction par îlot dans la ville de Quito.

est généralement bonne, et ils ne devraient pas souffrir de dégâts importants, même lors d'un séisme fort, sauf en ce qui concerne les parties en maçonnerie ainsi que les hôpitaux les plus anciens en béton armé, qui sont mal entretenus. Les installations et les voies d'accès peuvent, par contre, souffrir énormément même en cas d'un séisme modéré. Les écoles devraient bien se comporter en cas de séisme modéré, bien que la forte densité de colonnes courtes puissent être la source de gros problèmes. La majeure partie des bâtiments industriels sont concentrés dans deux zones au nord et au sud de Quito, la plupart étant des structures en acier. Seules 12% de ces constructions ne présentent pratiquement aucun risque, tandis que 23% présentent un risque mineur contre 40% un risque moyen et 25% un risque élevé.

Pour les divers réseaux urbains (égouts, eau, téléphone, électricité, voirie) nous avons utilisé les données existantes du SIG, auxquelles ont été adjointes les données communiquées par les différents services, elles-mêmes introduites dans le SIG. Une investigation plus détaillée a été effectuée pour le réseau des égouts et pour les ponts.

7. ESTIMATION DES DÉGÂTS

Grâce au SIG, une intensité sismique a été attribuée à chaque îlot afin d'évaluer les dégâts dans chacun d'eux, en croisant les données d'intensité sismique avec celles concernant le type de bâti dominant, en utilisant des matrices de dégâts extraites du document ATC-13 (1985) établi pour la Californie, qui donnent la relation entre les intensités et les dégâts pour divers types de constructions. Elles ont été pondérées pour être mieux adaptées au cas de Quito à partir d'observations historiques d'Amérique du Sud et Centrale, ainsi qu'à l'aide des courbes intensités-dégâts établies par Sauter & Shah (1978), Sauter (1979) et Whitman (1973). Dans notre approche, le pourcentage de dégâts s'entend comme le rapport du coût de remise en état d'un bâtiment sur le coût de sa reconstruction en entier. La méthode a d'abord été testée en comparant les dégâts calculés aux dégâts observés pour le séisme de 1987, puis appliquée aux trois séismes retenus pour cette étude.

Les dommages subis par les réseaux techniques (téléphone, eau potable, électricité, voirie, égouts) ont été calculés dans chaque zone d'intensité sismique homogène (nombre de ruptures par kilomètre) à partir des matrices du document ATC-25 (1991), calibrées pour leur application à Quito en fonction des dégâts observés lors des séismes de 1987 et 1990.

Nous obtenons ainsi des cartes de distribution des dégâts infligés aux bâtiments (Fig. 15) et aux réseaux (Fig. 16). Puis, à partir de l'estimation des dégâts, le temps de récupération de chaque réseau a été estimé grâce à un second type de matrices, elles aussi adaptées au cas de Quito à partir des matrices californiennes.

8. PHÉNOMÈNES INDUITS PAR LES SÉISMES

Cette étude a été complétée par une évaluation rapide des glissements de terrain et de la liquéfaction en cas de séisme.

8. 1. Glissements de terrain

Les possibilités de glissements de terrain ont été estimées en réalisant tout d'abord une carte de susceptibilité de la zone ne tenant pas compte des séismes, puis un inventaire

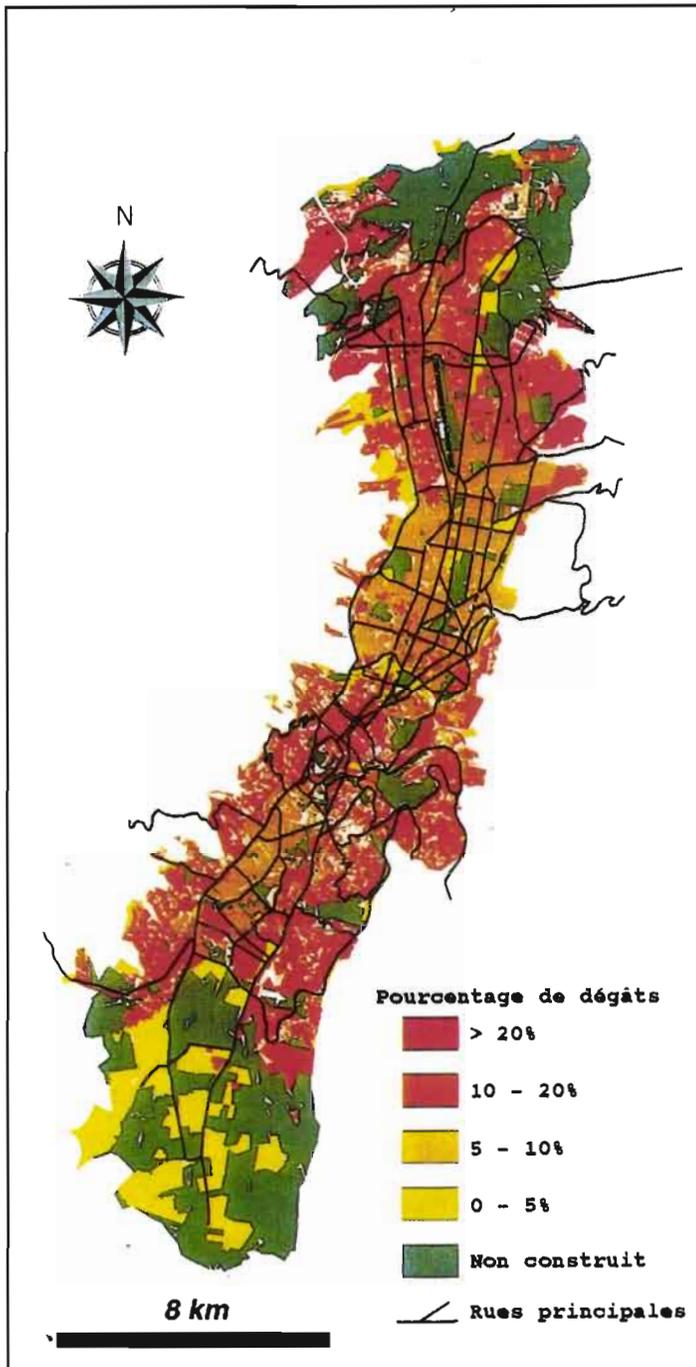


Fig. 15 - Carte de l'estimation des dégâts provoqués par le séisme local sur les bâtiments de Quito.

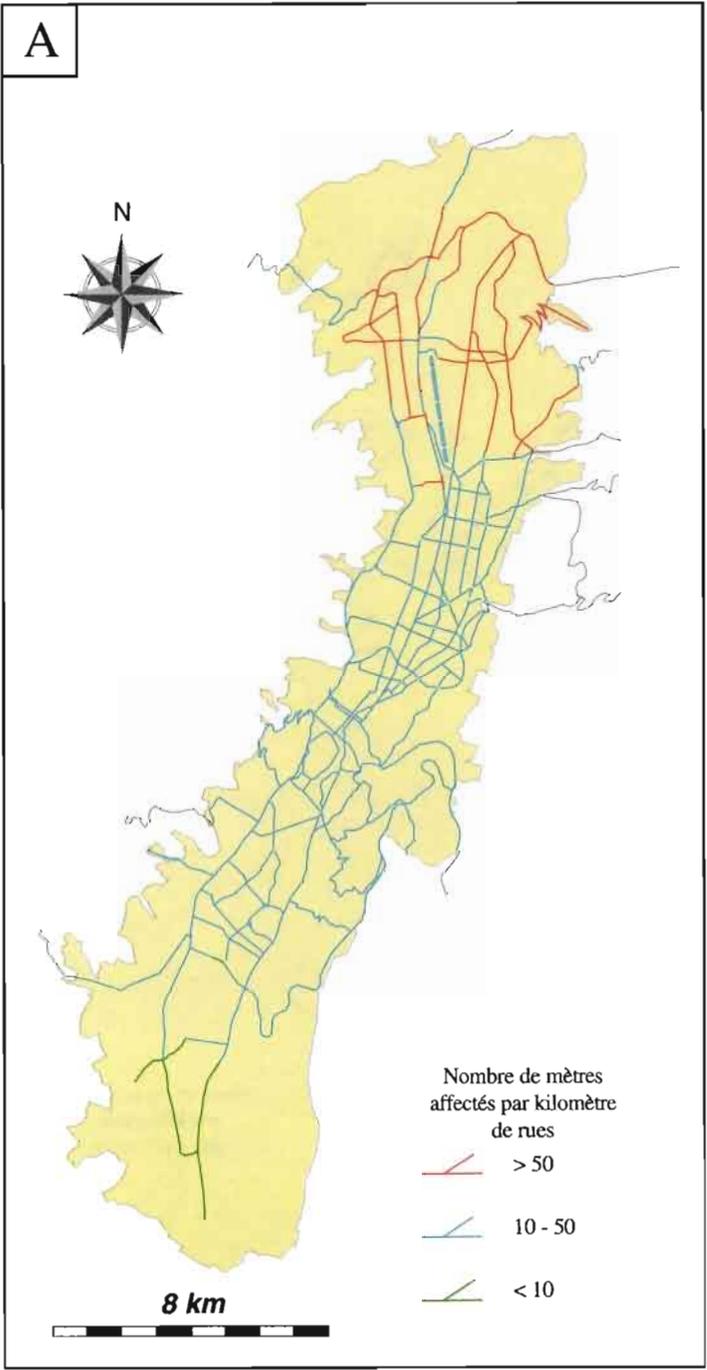


Fig. 16a - Carte de l'estimation des dégâts provoqués par le séisme local sur les réseaux principaux de voirie.

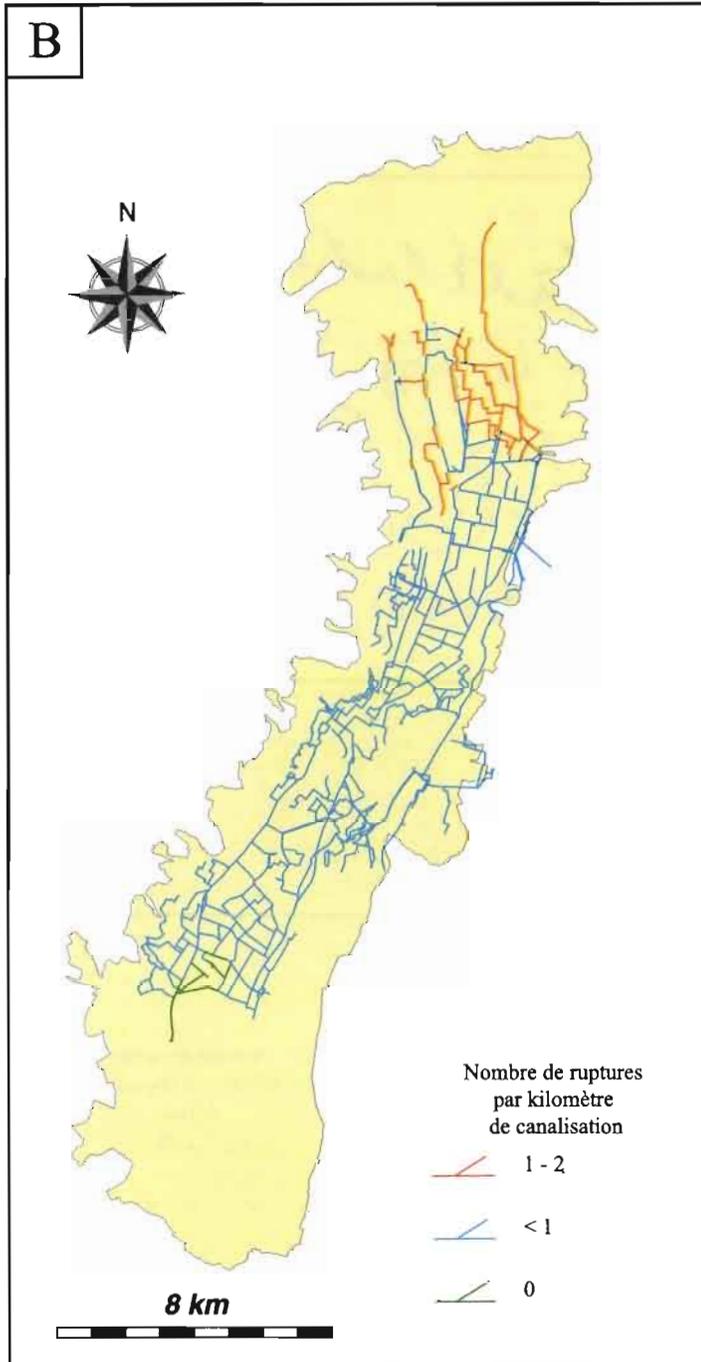


Fig. 16b - Carte de l'estimation des dégâts provoqués par le séisme local sur les réseaux de distribution d'eau.

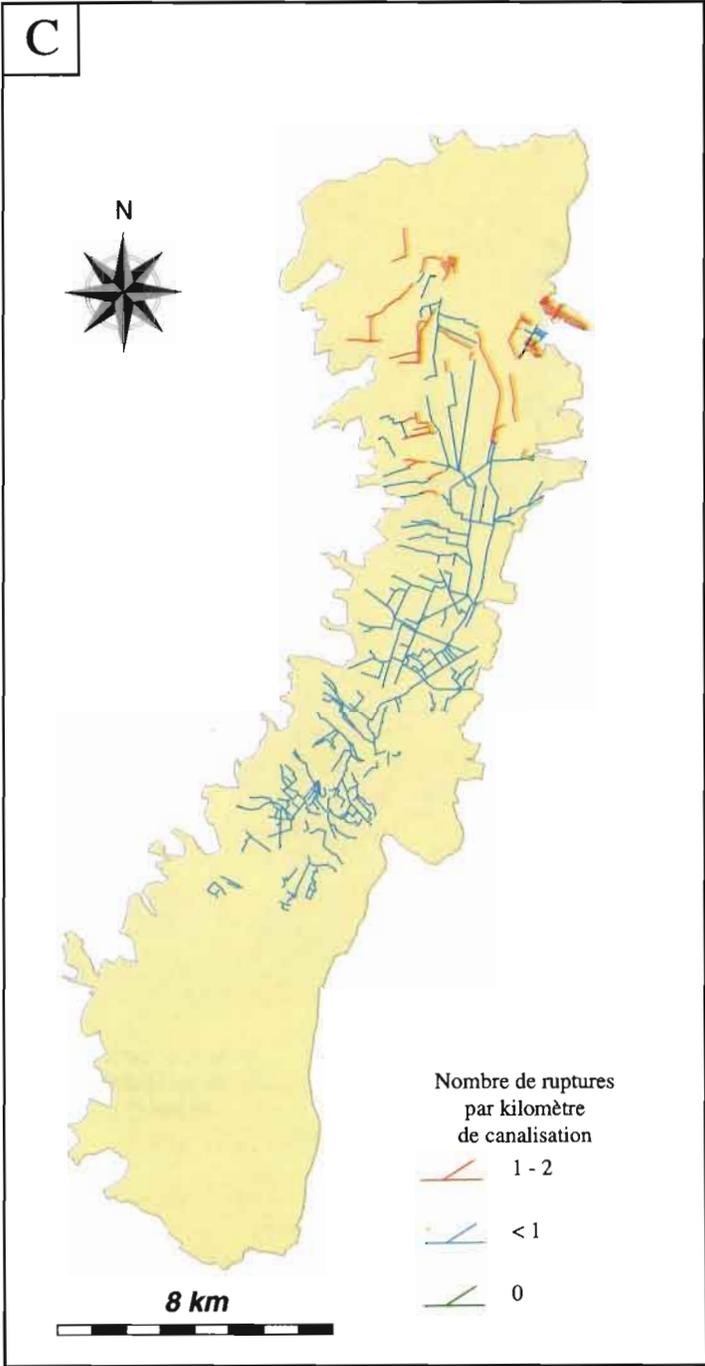


Fig. 16c - Carte de l'estimation des dégâts provoqués par le séisme local sur les réseaux principaux d'égouts.

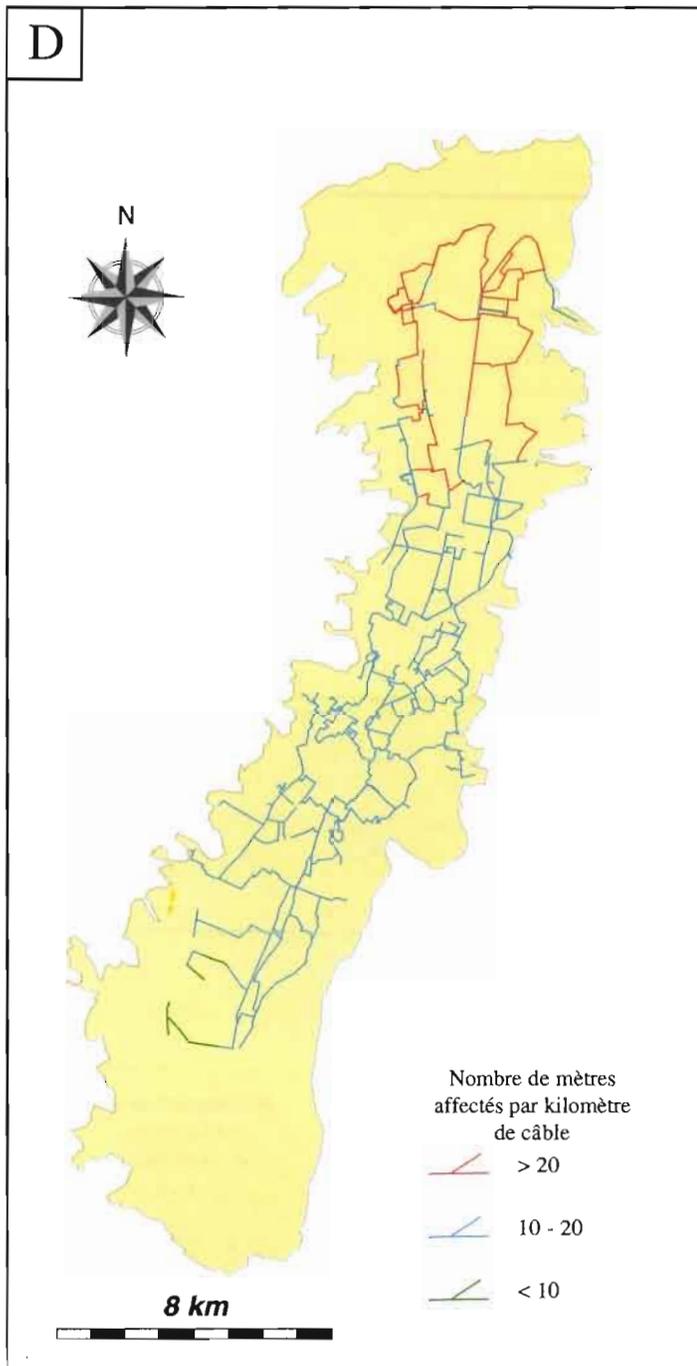


Fig. 16d - Carte de l'estimation des dégâts provoqués par le séisme local sur les réseaux principaux d'électricité.

des versants et des talus et une estimation de leur comportement suivant le degré d'intensité sismique et finalement la recherche de relations entre les deux.

La carte fait ressortir cinq degrés de susceptibilité (Fig. 17). Elle a été établie à l'aide de la méthode de Brabb *et al.* (1972), en prenant en compte trois aspects : la lithologie, les pentes et les glissements de terrain fossiles, à partir de photo-interprétation et de reconnaissances de terrain légères. L'inventaire des versants et des talus est basé sur l'observation sur le terrain de 100 sites.

La combinaison de la carte avec les caractéristiques observées pour les versants et talus inspectés fait ressortir qu'environ 40% des sites présentent une forte probabilité de rupture pour des intensités supérieures ou égales à VI. Sur les autres sites, la probabilité est très élevée pour une intensité supérieure ou égale à X, moyenne pour des intensités de VIII ou IX, et très faible pour des intensités inférieures ou égales à VII.

Une étude plus détaillée de quelques éléments du système de transmission radio de divers services de la ville, du système de voirie périphérique, des stations de pompage de l'eau potable et de sous-stations électriques a été réalisée. Elle montre que pour des intensités comprises entre VI et VIII, même si les glissements de terrain ne sont pas vraiment très importants, ils engendreront des perturbations supplémentaires non négligeables dans les divers services de la ville.

8. 2. Liquéfaction

L'étude des potentialités de liquéfaction, basée essentiellement sur des observations de paléo-liquéfaction, a été exposée par Hibsich *et al.* (1994). Elle montre que ce phénomène s'est produit au moins à partir de l'an 400, principalement dans les terres basses. À l'heure actuelle, les conditions ne semblent plus être réunies pour que les séismes provoquent de la liquéfaction. Toutefois, depuis l'abandon du pompage de l'eau de la nappe phréatique, le niveau de celle-ci s'est considérablement élevé, ce qui pourrait, si le pompage n'est pas repris, recréer des conditions favorables à la liquéfaction des sols, notamment dans la partie septentrionale des terres basses.

9. UTILISATION DES RÉSULTATS

Cette étude n'aurait pas eu de sens si elle s'était limitée à la production de documents scientifiques ou techniques. Les résultats ont été discutés lors d'entretiens séparés avec les responsables des différents services de la ville, ce qui a permis :

(a) d'estimer plus finement les dégâts en fonction des problèmes rencontrés en temps normal et de données ponctuelles impossibles à traiter automatiquement ;

(b) d'estimer les capacités réelles de récupération des réseaux techniques ;

(c) de trouver des solutions de rechange pour pallier temporairement la déficience des réseaux (utilisation de puits désaffectés, câblage secondaire, générateurs électriques locaux, etc...);

(d) la prise de conscience par les responsables :

- de la vulnérabilité des réseaux, toujours sous-estimée (par exemple, aucun plan d'urgence spécifique au risque sismique n'existe dans les différents services consultés) ;

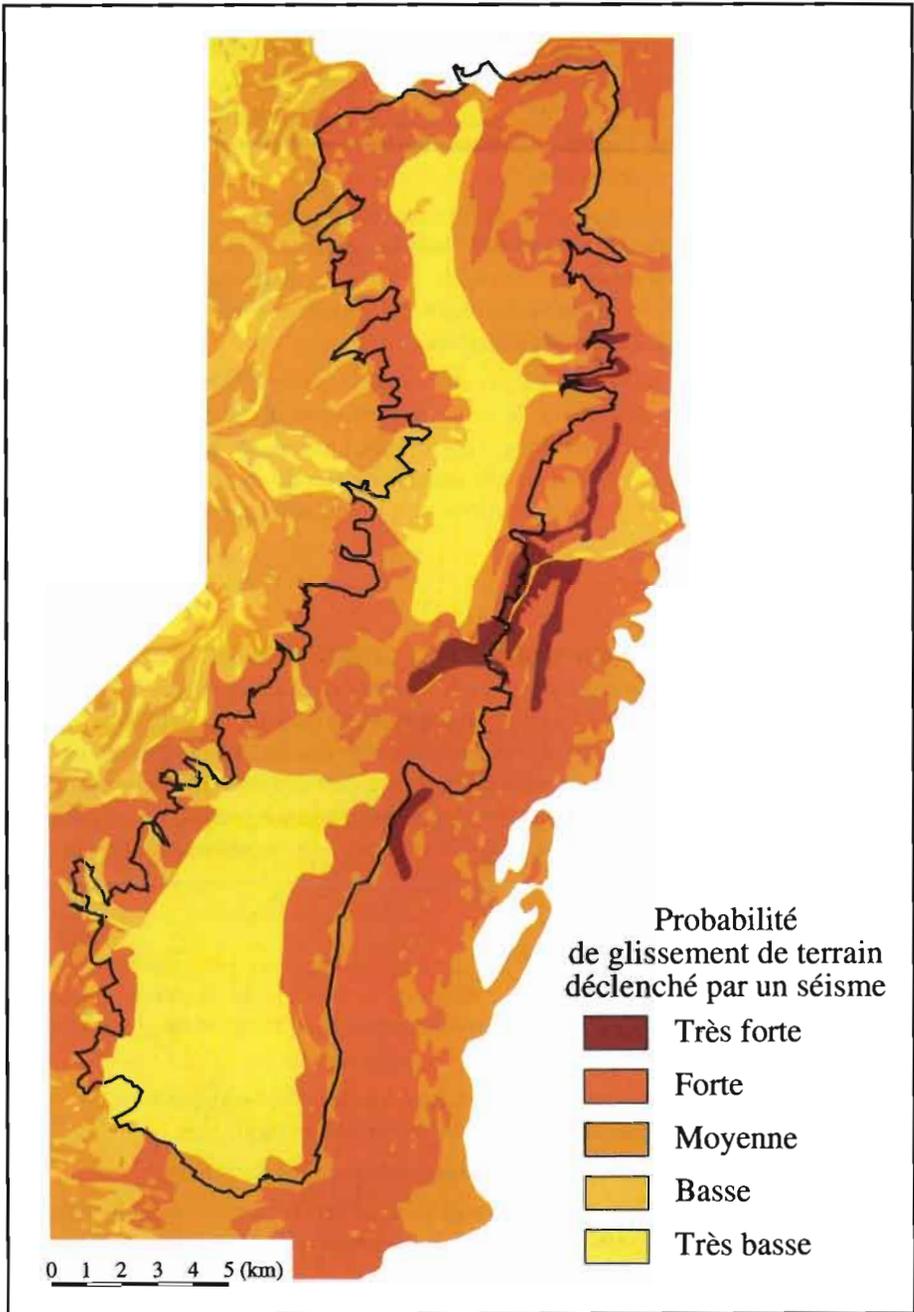


Fig. 17 - Carte de susceptibilité de glissements de terrain pour Quito et ses environs (les contours de la ville de Quito sont représentés en trait noir épais).

- de la dépendance de leur service vis-à-vis d'autres services, par exemple le réseau de voirie (problèmes de circulation, d'accès aux hôpitaux ...);
- du facteur humain : abandons de postes, décimation de personnel (morts, blessés graves), impossibilité de se déplacer.

Ces entretiens et les résultats techniques ont ensuite été utilisés pour l'élaboration d'un récit décrivant à la fois les conséquences d'un des séismes sélectionnés (le séisme local) et la description de la situation dans la ville après ce séisme à diverses échelles de temps : une heure, un jour, deux jours, une semaine, un mois.

Au terme de ce travail, tous les participants, c'est-à-dire les scientifiques, les groupes d'experts, les responsables des services privés (banques, assurances, etc...) et publics, se sont réunis pour élaborer une série de recommandations devant permettre de réduire la vulnérabilité sismique de la ville de Quito, dont les principales sont les suivantes :

- création d'un comité sismique consultatif auprès de la municipalité de Quito ;
- étudier plus en détail la vulnérabilité des bâtiments, des infrastructures, ainsi que des équipements et services de secours ;
- développer des guides pour la construction de bâtiments sûrs ;
- améliorer les plans d'urgence et préparer des plans de réhabilitation ;
- développer les études scientifiques et techniques permettant une évaluation plus détaillée du risque sismique à Quito.

Un inventaire beaucoup plus détaillé des recommandations est rapporté dans *Escuela Politécnica Nacional et al.* (1994a, 1994b, 1996).

10. CONCLUSION

Ce projet a démontré qu'il est possible d'obtenir des résultats tangibles dans un temps relativement bref (un an et demi environ) en utilisant essentiellement les données existantes. De plus, l'élaboration du scénario sismique sur la ville de Quito a permis d'évaluer l'état des connaissances scientifiques et de faire un diagnostic de la capacité de réponse à un séisme des divers groupes responsables du fonctionnement de la ville. Les réunions avec les principaux décideurs et gestionnaires urbains ont abouti à la prise de conscience de la vulnérabilité de la ville face aux séismes.

Ce scénario doit être considéré comme une étude préliminaire. Par exemple, nous n'avons pas pu étudier, faute de données, la réponse et le comportement des bâtiments en fonction de la fréquence des ondes sismiques. Il sera aussi nécessaire dans le futur d'élaborer des scénarios pour d'autres sources sismiques, notamment au sud de la ville, et d'étendre l'étude au district métropolitain. Des mises à jour régulières des scénarios devront être effectuées afin de tenir compte de l'évolution de la ville et des nouvelles données scientifiques qui pourront être acquises. Une étude sur l'impact des publications destinées à la population et aux pouvoirs publics issues de cette étude, ainsi que sur les possibilités et les volontés réelles d'implantation des recommandations proposées pour limiter les conséquences d'un séisme sur la ville, doit aussi être entreprise.

Finalement, les évaluations préliminaires des bâtiments publics ayant montré que certaines structures (*adobe* ou maçonnerie) auraient des problèmes de comportement lors

d'un séisme, un projet comportant une étude technique plus détaillée et une évaluation des remèdes à apporter, pour les écoles et les hôpitaux, est en train de se mettre en place, sous l'égide de l'*Escuela Politécnica Nacional de Quito* et de *GeoHazards International*.

Remerciements

Nous remercions les équipes de *GeoHazards International*, *Oyo Corporation*, de la *Municipalidad de Quito*, des services de l'*Escuela Politécnica Nacional de Quito* et de l'*IFEA* pour leur participation à la réalisation du scénario, ainsi que B. Lortic, J. Tupiza et V. Tupiza et J. Vega pour l'aide apportée à la réalisation des cartes. Cette étude n'aurait pas été possible sans les idées, le soutien, et la générosité du Dr. Kunio Suyama, président de *Oyo Corporation*, décédé avant qu'elle ait été menée à son terme.

Références citées

- APPLIED TECHNOLOGY COUNCIL (ATC-13), 1985 - Earthquake Damage Evaluation Data for California, Report ATC-13, 492p., Redwood City, California: Federal Emergency Management Agency.
- APPLIED TECHNOLOGY COUNCIL (ATC-21), 1988 - Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazard : A Handbook, Report ATC-21, 185p., Redwood City, California: Federal Emergency Management Agency.
- APPLIED TECHNOLOGY COUNCIL (ATC-22), 1989 - A Handbook for Seismic Evaluation of Existing Buildings (Preliminary), Report ATC-22, 169p., Redwood City, California: Federal Emergency Management Agency.
- APPLIED TECHNOLOGY COUNCIL (ATC-25), 1991 - Seismic Vulnerability and Impact of Disruption of Lifelines in the Conterminous United States, Report ATC-25, 440p., Redwood City, California: Federal Emergency Management Agency.
- BARAZANGI, M. & ISACKS, B.L., 1976 - Spatial Distribution of Earthquakes and Subduction of the Nazca Plate beneath South America. *Geology*, 4: 686 - 692.
- BOURGOIS, J., TOUSSAINT, J.-F., GONZÁLES, H., ORREGO, A., AZEMA, J., CALLE, B., DESMET, A., MURCIA, A., PARRA, E. & TOURNON, J., 1985 - Les Ophiolites des Andes de Colombie : Évolution Structurale et Signification Géodynamique. in : *Made, A., Géodynamique des Caraïbes* : 475 - 493, Paris : Technip.
- BRABB, E.E., PAMPEYAN, E.H. & BONILLA, M.G., 1972 - Landslide Susceptibility in San Mateo County, California, *Unated States Geological Survey Miscelaneous Field Studies Map MF-360*.
- CHATELAIN, J.-L., YEPES, H., GUILLIER, B., FERNÁNDEZ, J., VALVERDE, J., KANEKO, F., SOURIS, M., DUPÉRIER, E., HOEFER, G., YAMADA, T., BUSTAMANTE, G., TUCKER, B. & VILLACIS, C., 1994 - Les Scénarios Sismiques comme Outils d'Aide à la Décision pour la Réduction des Risques : Projet Pilote à Quito, Équateur. *Revue de Géographie Alpine*, LXXXII, n° 4 : 131 - 150.
- CHATELAIN, J.-L., GUILLIER, B., SOURIS, M., DUPÉRIER, E. & YEPES, H., 1995 - SIG et Évaluation des Risques Naturels : Application aux Risques Sismiques de Quito. *Mappemonde*, 3 : 17-22.
- DALY, M.C., 1989 - Correlations Between Nazca/Farallon Plate Kinematics and Forearc Basin Evolution in Ecuador. *Tectonics*, 8, 4 : 769 - 790.
- DEL PINO, I. & YEPES, H., 1990 - *Apuntes para una historia sísmica de Quito. Centro Histórico de Quito. Problemática y perspectivas*: 67-100, Ecuador: Dirección de planificación, Ilustre Municipio de Quito.
- ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL, GEOHAZARDS INTERNATIONAL, ILUSTRE MUNICIPIO DE QUITO, ORSTOM, OYO CORP., 1994a - *The Quito, Ecuador, Earthquake Risk Management Project: An Overview*, 34p., San Fransisco, USA: *GeoHazards International Publication*.

- ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL, GEOHAZARDS INTERNATIONAL, ILUSTRE MUNICIPIO DE QUITO, ORSTOM, OYO CORP., 1994b - *The Quito, Ecuador, Earthquake Risk Management Project: A Compilation of Methods, Data, and Findings*, 283p., Japon: Oyo Corporation Publication.
- ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL, GEOHAZARDS INTERNATIONAL, ILUSTRE MUNICIPIO DE QUITO, ORSTOM, OYO CORP., 1996 - *Proyecto para el Manejo del Riesgo Sísmico de Quito : Síntesis*, 34p., Quito, Ecuador: ORSTOM - IMQ Publicacion.
- FUKUSHIMA, Y., TANAKA, T. & KATAOKA, S., 1988 - A new Attenuation Relationship for Peak Ground Acceleration Derived from Strong-Motion Acceleration. in : *Proceeding of the 9th World Conference on Earthquake Engineering, Vol. II: 343-348*, Tokyo-Kyoto, Japan.
- HALL, M.L. & RAMON, P., 1978 - *Estudio Microsísmico del Valle Interandino entre Lacatunga y Guayllabamba*, 29p., Quito: Dirección Nacional de Defensa Civil.
- HALL, M.L., BASABE, P. & YEPES, H., 1980 - Estudio de las Fallas Tectónicas y la Actividad Microsísmica del Valle Interandino entre Pastocalle y Ambato. *Politécnica. Monografía de Geología*, V, 2 : 57 - 78.
- HIBSCH, C., YEPES, H., ALVARADO, A., PEREZ, V.H. & SÉBRIER, M., 1994 - Holocene Liquefaction in Quito (Ecuador) : A Paleoseismic Record. in : *Proceedings of the Workshop on Paleoseismology, USGS Open-file Report 94-568: 84-85*, Menlo Park, California.
- HANUS, V., VANEK, J. & SANDOVAL, G., 1987 - Zonas Falladas Sísmicamente Activas y la Distribución de la Fuentes Termales en el Ecuador. *Politécnica, Monografía de Geología*, XII, 5: 7 - 24.
- IRIKURA, K., 1983 - Semi-Empirical Estimation of Strong Ground Motions during Large Earthquakes, *Bulletin of the Disaster Prevention Institute*, 33: 63-104, Kyoto University.
- IRIKURA, K., 1986 - Prediction of Strong Acceleration Motions Using Empirical Green's Function. in : *Proceeding of the 7th Japan Earthquake Engineering Symposium: 151-156*.
- IWATA, T. & IRIKURA, K., 1988 - Prediction of High-Frequency Strong Motions Based on Heterogeneous Faulting Model. in : *Proceeding of the 9th WCEE, II: 715-720*, Tokyo - Kyoto.
- JOYNER, W.K. & BOORE, D.M., 1981 - Peak Horizontal Acceleration and Velocity from Strong-Motion Records including Records from 1979 Imperial Valley, California, Earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 71: 2011-2038.
- KANAMORI, H. & MC NALLY, K.C., 1982 - Variable Rupture Mode of the Subduction Zone along the Ecuador - Colombia Coast. *Journal of Geophysical Research*, 72, 4: 1241-1253.
- KATAYAMA, T., 1982 - An Engineering Prediction Model of Acceleration Response and its Application to Seismic Hazard Mapping. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 10: 149-163.
- KELLEHER, J.A., 1972 - Rupture Zones of Large South American Earthquakes and Some Predictions. *Journal of Geophysical Research*, 77, 11: 2087-2103.
- LOMNITZ, C., EGRED, J., GARCIA, M., HALL, M., PLAZA, G., RIOS, R., TORREALVA, D. & YEPES, H., 1987 - *The Earthquake of the Central-Northeastern Zone of Ecuador - March 5, 1987*, Lima: CERESIS/UNESCO Editions.
- LONSDALE, P., 1978 - Ecuadorian Subduction System, *AAPG Bulletin*, 62, 12: 2454-2477.
- MENDOZA, C. & DEWEY, J.W., 1984 - Seismicity Associated with the Great Colombia - Ecuador Earthquakes of 1942, 1958, and 1979: Implications for Barriers Models of Earthquake Rupture. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 74, 2: 577-593.
- NEUMANN, F., 1954 - *Earthquake Intensity and Related Ground Motion*, 127p., Seattle, Washington: Univ. Press.
- PARDO-CASAS, F. & MOLNAR, P., 1987 - Relative Motion of the Nazca (Farallon), and South America Plates since Late Cretaceous Time. *Tectonics*, 6: 233-248.
- PENNINGTON, W.P., 1981 - Subduction of the Eastern Panama Basin and Seismotectonics of Northwestern South America. *Journal of Geophysical Research*, 86, 11: 10,753-10,770.
- ROBALINO, F., 1975 - Espesor de la Corteza en Quito Mediante el Análisis del Espectro de las Ondas Longitudinales P de Periodo Largo. *Revista Geofísica IPGH, Separata n° 3: 67-133*, Quito.
- SAUTER, F., 1979 - Damage Prediction for Earthquake Insurance. in : *Proceedings of the Second U.S. Conference on Earthquake Engineering: 89-93*, Stanford, California.
- SAUTER, F. & SHAH, H.C., 1988 - Studies on Earthquake Insurance. in : *Proceedings of the Central American Conference on Earthquake Engineering Vol. II: 78-83*, San Salvador, El Salvador.
- SCHNABEL, P.B., LYSMER, J. & SEED, H.B., 1972 - SHAKE - A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites, Report EERC 72-12, 88p., University of California, Berkeley.
- SEED, H. B. & IDRIS, I.M., 1970 - Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analysis, Report EERC 70-10, 41p., University of California, Berkeley, USA.

- STAUDER, W., 1975 - Subduction of the Nazca Plate under Peru as Evidence by Focal Mechanisms and by Seismicity. *Journal of Geophysical Research*, **80**, 8: 1053-1064.
- SUAREZ, G., MOLNAR, P. & BURCHFIELD, B.C., 1983 - Seismicity, Fault Plane Solutions, Depth of Faulting, and Active Tectonics of the Andes of Peru, Ecuador, and Southern Colombia, *Journal of Geophysical Research*, **88**, 12: 10,403-10,428.
- TANAKA, T., YOSHIZAWA, S., SAKAUE, M. & OSAWA, Y., 1982 - Estimation of Acceleration Characteristics of Strong Ground Motion by Synthesis of Accelerogram Obtained during a Small Earthquake. *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, **57**: 561-580, Tokyo University, (en japonais).
- TONG, H. & KATAYAMA, T., 1988 - Peak Acceleration Attenuation by Eliminating the Ill-Effect of Correlation between Magnitude and Epicentral Distance. in: *Proceedings of the 9th World Conference on Earthquake Engineering, Vol. II*: 349-360, Tokyo-Kyoto, Japan.
- VANEK, J. & HANUS, V., 1988 - Historical Disastrous Earthquakes and Deep Fracture Zones in Ecuador. in: *Historical Seismograms and Earthquakes of the World*: 362-369, Academic Press.
- WHITMAN, R.V., 1973 - Damage Probability Matrices for Prototype Buildings, Massachusetts Institute of Technology Department of Civil Engineering Research Report R73-57, Cambridge, Massachusetts.
- WINTER, T., 1990 - Mécanismes des Déformations Récentes dans les Andes Équatoriennes, Thèse, Université d'Orsay, 205p.
- YEPES, H., 1982 - Estudio de la Actividad Microsísmica en el Valle Interandino Entre las Latitudes 0° y 1° Sur. Tesis, Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Geología, Minas y Petróleo, Quito, 100p.

LES DIMENSIONS POLITIQUES D'UN PROJET SCIENTIFIQUE : LE SCÉNARIO SISMIQUE DE QUITO

*Pascale Metzger **, *Jean-Luc Chatelain ***, *Bertrand Guillier ****

Résumé

Le scénario sismique de Quito a été élaboré dans des circonstances particulières qui ont généré un certain nombre de contradictions ; celles-ci ne sont pas sans conséquence sur le déroulement et les suites du projet. L'analyse de la façon dont a été conçu et organisé ce scénario, la manière dont s'est déroulée la recherche, et sa diffusion, fait apparaître très clairement que le projet s'inscrit en même temps dans trois contradictions : un antagonisme Nord-Sud, une opposition scientifique-politique, et une dissension entre science orthodoxe et science impliquée. Ces éléments constitutifs du scénario sismique de Quito peuvent expliquer le contraste entre, d'une part, sa réussite scientifique objective, matérialisée par la production d'un scénario sismique qui apporte une nouvelle connaissance sur la ville et sa vulnérabilité en cas de tremblement de terre et, d'autre part, la lenteur et la difficulté de la mise en oeuvre d'une politique de prévention des risques basée sur ses résultats.

Mots-clés : *Scénario sismique, risques, prévention, politique, science, coopération.*

LAS DIMENSIONES POLÍTICAS DE UN PROYECTO CIENTÍFICO: EL MANEJO SÍSMICO DE QUITO

Resumen

El proyecto de l manejo sísmico de Quito se elaboró en circunstancias particulares que generaron ciertas contradicciones; éstas no dejan de repercutir en el desarrollo y las aplicaciones del proyecto. El análisis de la forma en que se concibió y organizó este proyecto, de la manera en que se desarrolló la investigación y se realizó su difusión, revela claramente que el proyecto se inscribe paralelamente dentro de tres contradicciones: un antagonismo Norte-Sur, una oposición ciencia-política y una disensión entre ciencia ortodoxa y ciencia implicada. Estos elementos constitutivos del proyecto sísmico de Quito pueden explicar el contraste entre, por una parte, su éxito científico objetivo, concretado en la elaboración de un proyecto del manejo sísmico que aporta un nuevo conocimiento sobre la ciudad y su vulnerabilidad en caso de terremoto y, por otra, la lentitud y la dificultad en la aplicación de una política de mitigación de riesgos basada en sus resultados.

Palabras claves: *Riesgo sísmico, riesgos, mitigación, política, ciencia, cooperación.*

* Géographe, ORSTOM, Apartado 17 11 06596, Quito - Équateur.

** Géophysicien, ORSTOM, Quito.

*** Géologue, ORSTOM, Quito.

THE POLITICAL DIMENSIONS OF A SCIENTIFIC PROJECT: THE QUITO SEISMIC SCENARIO

Abstract

The Quito seismic scenario was carried out in unusual circumstances, which have produced various contradictions that are not without consequences on the project itself and its subsequent products. An analysis of the way this scenario has been conceived and organized, the manner that the research was conducted, and its dissemination clearly show that the project contains three contradictions: a North-South antagonism, a scientific-political opposition, and dissension between orthodox and applied science. These constitutional elements of the Quito seismic scenario exemplify the contrast between its real scientific success, proved by the development of a seismic scenario that offers a new knowledge on the city and its vulnerability on one hand, and, on the other hand, the slowness and difficulties to create and implement an hazard mitigation policy based on its results.

Key words: *Seismic scenario, risks, mitigation, politics, science, cooperation.*

INTRODUCTION

L'élaboration d'un scénario sismique est une démarche, sinon habituelle, pour le moins usitée dans les régions développées à risques que sont le Japon et la Californie (*cf. Davis et al., 1982 ; Reichle et al., 1990 ; Steinbrugge et al., 1987 ; Topozada et al., 1988*). Cependant, bien que nombre de pays en développement soient aussi soumis à des risques sismiques importants, ce type de démarche de prévention est relativement limitée et la méthode scénario n'a encore jamais été utilisée. Il est surprenant qu'il ait fallu attendre les années quatre-vingt-dix pour voir se concrétiser ce type d'expérience dans un pays en développement, alors que le nombre de victimes et les dégâts occasionnés par les séismes s'amplifient, du fait de l'augmentation de la population et de sa concentration croissante.

De plus, les catastrophes naturelles sont des facteurs de sous-développement par les ponctions qu'elles opèrent sur les budgets publics et les revenus des ménages déjà insuffisants.

À eux seuls, ces quelques éléments justifient largement le développement d'une méthode capable de contribuer à la diminution de la vulnérabilité des villes des pays en développement.

Le scénario sismique de Quito (1) est un produit scientifique particulier, pour plusieurs raisons. Résultat d'un concours de circonstances, il fait intervenir une centaine de chercheurs et experts de différents pays, principalement équatoriens, nord-américains, français et japonais. Spéculatif, il a une ambition à laquelle la science ne prétend pas souvent: s'immiscer dans la sphère du politique. Il s'agit en effet, d'une part de faire prendre conscience du risque et d'autre part de susciter la mise en place de dispositifs de prévention qui soient fondés sur une connaissance scientifique du risque encouru et une estimation de la vulnérabilité de la ville. Juxtaposés, ces deux traits marquants de l'élaboration du scénario sismique ont déterminé, pour une part non négligeable, ses conditions d'acceptation dans la société locale.

L'élaboration du scénario sismique de Quito est le produit d'une histoire qui n'est pas sans conséquence sur son impact réel dans la société quiténienne. Conçu pour alerter les autorités sur la nécessité de mettre en place une politique de prévention, il n'a pour le

(1) Le scénario sismique de Quito a fait l'objet de plusieurs publications, voir entre autres *Escuela Politécnica Nacional et al., 1994 ; Chatelain et al.* dans ce même numéro, *Chatelain et al., 1994 ; 1995a ; 1995b.*

moment eu que peu d'écho dans les milieux politiques et administratifs de la ville. On s'aperçoit, en retraçant son histoire, qu'il s'inscrit dans un contexte particulier et comporte un certain nombre de contradictions qu'il est difficile de dépasser.

1. BREF HISTORIQUE DU SCÉNARIO SISMIQUE DE QUITO

À l'origine, le concept d'un scénario sismique à Quito provient de la rencontre d'une volonté de faire un scénario pilote dans un pays en développement, qui puisse servir d'exemple pour les pays du Sud, et de la présence de conditions matérielles et scientifiques adéquates sur le site de Quito.

Le personnage clef qui a permis sa réalisation est le Docteur Kunio Suyama, Président de Oyo Corporation, une société japonaise spécialisée, entre autres, dans l'étude du risque sismique. Sa détermination personnelle à participer à des entreprises socialement utiles est essentielle pour comprendre l'engagement d'Oyo Corporation dans ce processus.

Après une série de contacts personnels, les premières rencontres concrètes entre les différents protagonistes du projet ont lieu à Madrid en juillet 1992, à l'occasion du X^e Congrès International d'Ingénierie Sismique (2). Dès le mois d'août de la même année, le maire de Quito, approuve le projet et lui donne son soutien formel.

Le projet est entièrement financé par Oyo Corporation (3), à travers Oyo Pacific, filiale créée spécifiquement dans le but d'élaborer un scénario sismique dans un pays en développement. Pour diverses raisons légales, GeoHazard International, association américaine à but non lucratif, remplace Oyo Pacific qui disparaît ; son objectif est le même : promouvoir des scénarios sismiques dans les pays en développement.

Concrètement, pour l'élaboration du scénario de Quito, il est constitué différents groupes dont les rôles sont clairement identifiés :

- un comité de direction (CD), composé des promoteurs du projet, dont le but est de coordonner les différentes activités ;
- un groupe de travail international (GT), rassemblant, produisant et traitant les données, composé de chercheurs qui sont dirigés par un coordinateur scientifique japonais ; à Quito, ceux-ci sont pilotés par un coordinateur équatorien ;
- un comité scientifique et technique (TAC), composé d'experts internationaux dont le rôle est de réviser et valider les résultats obtenus par le groupe de travail ;
- un comité social et économique (CASE) rassemble utilisateurs potentiels du scénario de Quito et experts internationaux (de l'assurance, la finance, la planification urbaine etc.), et participe à l'orientation des recherches par l'expression des demandes venant des acteurs politiques, sociaux et économiques de la ville.

Les premiers résultats, présentés sous la forme de distributions spatiales de dégâts dans la ville (4), sont commentés et discutés avec les différents services urbains concernés (5).

(2) Tenth World Conference on Earthquake Engineering, Madrid, 22-25 juillet 1992.

(3) Le scénario a également obtenu l'appui notable du Centre International pour la Formation et les Échanges Géologiques (CIFEG) d'Orléans.

(4) Voir l'article détaillant le contenu du scénario sismique dans ce même numéro. On peut aussi se rapporter à Chatelain *et al.*, 1994 ; 1995a ; 1995b.

(5) Les principaux réseaux urbains, c'est-à-dire la voirie, l'eau potable, les égouts, le téléphone et l'électricité.

L'objectif est d'identifier leurs capacités d'intervention et d'évaluer leurs temps de réaction, informations nécessaires à l'élaboration du scénario proprement dit, c'est-à-dire à la description de la situation vécue par la ville lors de différentes phases temporelles suivant la catastrophe (6).

L'analyse globale et les discussions avec les autorités et services permettent ensuite de dresser un certain nombre de recommandations produites consensuellement, à l'occasion de deux journées de réunions (juillet 1993). Ces propositions d'actions sont destinées à limiter au maximum les dommages subis par la ville en cas de séisme et à améliorer la préparation des différents services à ce type de catastrophe, afin de diminuer les délais d'intervention et d'augmenter les capacités de réaction.

Plus d'un an après la fin de l'élaboration du projet toutes les recommandations n'ont pas eu de suite concrète, mais un certain nombre d'entre elles ont déjà été suivies d'action ou sont en voie de l'être. Néanmoins, on peut ressentir une certaine disproportion entre les résultats objectifs remarquables en terme de qualité de travail et de délai de production du scénario sismique et ses conséquences politiques aujourd'hui relativement limitées. Comment l'expliquer ?

Le projet s'est en fait inscrit dans une triple opposition, qui n'est pas sans conséquence sur le déroulement et les suites du projet. L'analyse, rapide, de la façon dont a été conçu et organisé le scénario sismique de Quito, la manière dont s'est déroulée la recherche elle-même, et sa diffusion, font apparaître très clairement que le projet s'inscrit en même temps dans trois contradictions : un antagonisme Nord-Sud, une opposition scientifique-politique et une dissension entre science orthodoxe et science impliquée.

Ces éléments antinomiques constitutifs du scénario sismique de Quito peuvent expliquer le contraste entre, d'une part, la réussite scientifique objective du projet matérialisée par la production d'un scénario sismique qui apporte une nouvelle connaissance sur la ville et sa vulnérabilité en cas de tremblement de terre et, d'autre part, son apparente inefficacité opérationnelle perceptible dans la lenteur et la difficulté de la mise en oeuvre d'une politique de prévention des risques.

2. UNE OPPOSITION NORD-SUD

Différentes circonstances montrent qu'une certaine opposition de type Nord-Sud a marqué le scénario sismique de Quito dès son origine et laissé une empreinte dans son développement ultérieur.

2. 1. L'absence de demande locale formelle

Le scénario sismique recèle un fait primordial de la contradiction Nord-Sud : il n'a fait l'objet d'aucune demande locale formelle. Il n'est pas parti d'un souci local explicite des pouvoirs publics visant à connaître l'importance du risque sismique et la vulnérabilité de la capitale de l'Équateur face à ce risque. Il y avait bien une préoccupation concernant le risque sismique, notamment chez les scientifiques équatoriens, mais ceux-ci ne savaient pas comment la formuler, et ce d'autant plus que la méthode du scénario n'était pas connue.

(6) Une heure après la catastrophe, un jour après, deux jours après, une semaine après, un mois après sont les étapes décrites dans le scénario.

Le scénario sismique est en effet une idée qui émane de pays développés, principalement des États-Unis et du Japon. Le projet d'élaborer un scénario sismique dans un pays du Tiers Monde est, dès le départ, totalement porté par un Nord-Américain qui avait participé à l'élaboration de scénarios en Californie et cherchait à élaborer un scénario pilote dans un pays en développement, pour en démontrer l'intérêt scientifique et social, ainsi que sa faisabilité en peu de temps.

Le projet se structure autour de Quito du fait de contingences particulières qui le rendaient réalisable rapidement dans la capitale équatorienne. Ces circonstances sont, d'une part, l'existence de contacts personnels entre le porteur d'un projet de scénario sismique, en l'occurrence Brian Tucker, et Jean-Luc Chatelain, de l'Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération (ORSTOM), qui a établi le lien avec les compétences scientifiques nationales et internationales implantées localement, c'est-à-dire l'Escuela Politécnica Nacional (EPN) et l'ORSTOM. D'autre part l'existence à Quito d'un Système d'Information Géographique (SIG) opérationnel (SAVANE ; Souris *et al.*, 1984-1994), et d'une base de données urbaines très riche, implantés à la Direction Générale de Planification de la municipalité de la ville de Quito, assuraient la possibilité de produire des résultats rapidement.

2. 2. Le financement

Le scénario sismique de Quito a donc vu le jour grâce au financement de Oyo Corporation à travers sa filiale Oyo Pacific, devenu GeoHazard International. Les organismes impliqués localement se sont limités presque exclusivement à la fourniture des données, de la matière grise et du savoir-faire (autrement dit de temps-chercheurs). Aucun accord spécifique n'a été signé concernant l'élaboration d'un scénario sismique. De ce fait, l'enveloppe globale attribuée au projet et les conditions dans lesquelles le budget pouvait être utilisé n'étaient pas explicites, d'où des tensions entre lointains pourvoyeurs de fonds et équipes locales de travail.

2. 3. La production scientifique

Par ailleurs, un certain nombre de données collectées (souvent pendant plusieurs années) ou constituées localement ont été traitées au Japon ou aux États-Unis, donnant ainsi le sentiment aux chercheurs locaux qu'une partie de la technique et du savoir-faire nécessaire à l'élaboration du scénario sismique leur échappait. Le transit des données par les pays du Nord a ressemblé à un passage dans une "boîte noire" (7). La validité du transfert de technologie qu'est sensée produire la coopération internationale est, du coup, remise en question. Cette étape a nécessairement créé un sentiment de frustration d'autant plus important que la majeure partie du travail a été réalisée à Quito même, par les équipes de chercheurs locaux et de l'ORSTOM.

Par ailleurs, les rythmes de travail, la force coercitive des échéances et des chronogrammes sont différents entre pays du Nord et pays du Sud, ce qui est une source de friction supplémentaire. C'est ainsi que les retards pris à Quito ont pu énerver les acteurs du

(7) Il s'agit essentiellement de l'utilisation de programmes informatiques non disponibles sur place.

Nord, notamment américains et japonais, pour lesquels les délais de réalisation du scénario font partie de la démonstration.

Dans le cadre de la production scientifique, l'ORSTOM se situe à la fois au Nord et au Sud. Au Nord, parce que cet institut français dispose des moyens financiers, mais aussi des connaissances, des savoir-faire et des méthodes des pays riches — il n'a donc pas ressenti, par exemple, la nécessité de faire réaliser sur place tous les traitements, ni souffert des incertitudes budgétaires —. Au Sud, parce qu'il travaille au quotidien avec des chercheurs des pays du Sud et adopte en conséquence les contraintes et modes de travail des pays en développement.

2. 4. Le bilan du projet

Un autre aspect important de la contradiction Nord-Sud portée par le scénario sismique de Quito tient au sentiment de satisfaction non partagé des pays du Nord. En effet, les chercheurs des pays du Nord qui ont participé au projet sont enchantés du résultat, non sans raison d'ailleurs : en très peu de temps, un scénario sismique très solide a été réalisé dans un pays en développement. Le fait que des chercheurs de pays développés aient été impliqués dans ce projet a certainement contribué à la crédibilité et à la rapidité des travaux.

Cependant, le scénario n'a réellement de sens que s'il est évolutif, autrement dit, si l'on peut faire varier les résultats en fonction de nouvelles données (dynamique de ville, implantation de mesures de prévention, etc.), de façon à estimer l'efficacité des mesures de diminution de la vulnérabilité mises en place suite au premier scénario. Or, l'existence de la "boîte noire" rend très difficile la prise en charge par les chercheurs équatoriens de la suite logique du scénario, c'est-à-dire le suivi de la vulnérabilité de la ville.

Par ailleurs, tant que les recommandations élaborées à la fin du document final ne sont pas toutes mises en oeuvre, la raison même d'être du scénario sismique est mise à mal. Les instances politiques arguent de différentes circonstances ponctuelles pour expliquer l'absence de suites données au scénario, en même temps qu'elles se déchargent sur la partie scientifique en invoquant un manque de précision des informations et de recommandations concrètes pour pouvoir mettre en place une politique efficace. Il est vrai que les recommandations sont d'ordre institutionnel, le développement d'opérations de prévention concrètes passant nécessairement par la création de structures institutionnelles et la mise en place d'une politique globale sur le risque. Sur ce point, on touche aussi à la deuxième contradiction du projet : l'opposition science-politique.

2. 5. La diffusion des résultats

Pour matérialiser et couronner l'ampleur de la contradiction Nord-Sud dans le scénario sismique de Quito, il faut enfin insister sur le fait que c'est seulement deux ans après sa parution en anglais que le produit final de ce travail a été diffusé en espagnol (Escuela Politécnica Nacional *et al.*, 1996). Cela signifie que la municipalité de Quito n'a pas imposé la publication des résultats dans la langue du pays, lors de son acceptation de la réalisation d'un scénario sismique à Quito.

Cette incongruité tient à la concurrence entre logiques contenues dans le scénario, du fait que celui-ci joue en même temps un rôle local et international : le scénario pilote de Quito doit, d'un côté, alerter les autorités locales sur le risque sismique concret encouru par la ville,

et, de l'autre, asseoir et promouvoir GeoHazard International, en démontrant la possibilité de produire rapidement un scénario sismique dans un pays en développement en s'appuyant principalement sur les données existantes. La publication s'opérant en fin de recherche, et donc en fin de budget, il a été jugé préférable de choisir l'anglais afin que le scénario puisse être diffusé dans le monde entier. La logique de promotion de GeoHazard International l'a donc emporté sur celle de l'efficacité locale.

3. UNE OPPOSITION SCIENTIFIQUE-POLITIQUE

L'opposition entre science et politique est apparue à différents niveaux.

3. 1. L'obstacle de la représentation sociale locale du risque

Dès l'origine du projet, l'acceptation sociale du scénario sismique est relativement amorphe : si l'idée est plutôt favorablement accueillie, c'est dans le sens où elle ne rencontre pas vraiment d'opposition et suscite même un certain intérêt. Mais la participation des différents secteurs institutionnels et de la société civile est inconsistante, sans formulation d'attentes spécifiques. D'où un impact politique limité : concrètement, les recommandations sur lesquelles débouche le scénario sismique de Quito n'ont pour le moment que partiellement été mises en oeuvre, et les quelques actions ponctuelles qui se déroulent ont été financées par l'extérieur.

Il faut, pour expliquer la faiblesse de la perception du risque sismique, donner un certain nombre d'éléments. Tout d'abord, le dernier séisme destructeur ayant affecté la ville datant de 1868, il n'existe plus aujourd'hui aucun témoin direct du danger réel que peut constituer un tremblement de terre. Ensuite, le séisme de 1987, qui est aujourd'hui la référence quiténienne en matière de séisme, a fortement contribué à mésestimer le risque sismique à Quito. Dans la mesure où la ville n'a que très peu souffert de celui-ci, les acteurs locaux sont persuadés que le risque sismique à Quito n'est pas préoccupant (8). Par ailleurs, la présence de nombreux bâtiments de l'époque coloniale dans le Centre Historique laisse à penser qu'ils n'ont jamais été détruits, donc qu'il n'y a pas de risque véritable, ce qui est faux (Del Pino & Yepes, 1990).

La représentation sociale du risque à Quito est largement constituée de ces idées, et le premier rôle du scénario sismique de Quito a été de démontrer que les dégâts occasionnés en 1987 sont loin d'être les pires qui puissent arriver ; il faut donc penser à préparer la ville à une catastrophe d'une autre ampleur, scientifiquement probable à moyen terme.

C'est le manque de conscience de la réalité du risque sismique à Quito qui explique en bonne part le défaut de préoccupation locale à ce propos. L'absence de sollicitation locale s'inscrit donc bien également dans la contradiction essentielle qui a marqué l'élaboration du scénario sismique : la contradiction science-politique.

Il a été souligné qu'il n'y avait pas de demande locale d'un scénario sismique à Quito. D'une certaine façon, cette affirmation n'est pas tout à fait exacte, car s'il n'existait pas de demande de la part des autorités publiques locales, la communauté scientifique de Quito,

(8) Cette affirmation est basée sur les commentaires et les réflexions concernant le séisme de 1987, entendus au cours des discussions avec les acteurs locaux.

elle, était consciente de la nécessité de faire comprendre et admettre aux responsables politiques la réalité du risque sismique et la vulnérabilité de la capitale équatorienne aux tremblements de terre.

3. 2. Des préoccupations divergentes

Dès l'origine, l'équipe scientifique locale s'est sentie très concernée par l'élaboration d'un scénario sismique, à la fois pour son intérêt scientifique et sa signification sociale et politique. Du point de vue scientifique, le scénario a signifié un apport de connaissances et de méthodologies, de multiples contacts avec des chercheurs de différents pays, et la valorisation de la recherche équatorienne. Sur le plan social et politique, le scénario a apporté une réponse à une véritable interrogation latente concernant la réduction des conséquences d'une catastrophe sismique sur la ville de Quito. Ce travail répond bien au sentiment de responsabilité des chercheurs locaux face au risque sismique, bien conscients qu'un séisme produisant des intensités supérieures à celui de 1987 est probable à court ou moyen terme. D'où une implication réelle des scientifiques dans le projet, à la différence de l'engagement modéré des autorités politiques.

Par contre, l'ensemble des secteurs public et privé sollicités ont rassemblé et fourni les données actualisées qu'ils détenaient. D'un point de vue pratique, la participation des services directs et indirects de la municipalité a été évidente et très positive. D'autre part, l'appui technique et humain offert par la Direction Générale de Planification, l'utilisation du logiciel SAVANE et de la base de données urbaines que ce service développe, ont été essentiels pour le bon déroulement du projet. Sans la participation de la Direction Générale de Planification de Quito, il eût été impossible d'obtenir des traitements et une cartographie aussi performants. Il faut souligner que la Direction Générale de Planification est ressortie largement valorisée de cette expérience : sa participation au scénario sismique lui a permis d'enrichir et d'actualiser de façon rapide et efficace la base de données urbaines, en même temps qu'elle entrainait dans le travail de planification qui lui incombe.

L'opposition entre le scientifique et le politique a également été patente à travers la faiblesse du soutien politique au programme. Le problème ne s'est en général pas posé lorsqu'il s'agissait, par exemple, de convoquer les différents secteurs de la société quiténienne à participer au projet, mobiliser les divers services municipaux, ou rassembler les informations nécessaires. Par contre, lors de la publicité officielle faite à ce travail, la réticence, voire l'opposition du monde politique, a été clairement lisible et s'est traduite par l'organisation d'une manifestation confidentielle au moment de la remise des conclusions.

3. 3. Une conception scientifico-technicienne

L'organisation concrète du travail d'élaboration du scénario a opéré une distinction, voire une division, entre la gestion politique et la conduite scientifique et technique du projet. Ce mode de fonctionnement a provoqué des hiatus importants et des dysfonctionnements, en plus de tensions relativement importantes entre les deux dimensions du projet.

Au cours de son élaboration, les problèmes de communication entre la sphère politique et le pôle scientifique et technique sont allés grandissant. L'opposition entre la science et le politique se fonde notamment sur des divergences d'intérêts.

Cet antagonisme a été structuré dans l'organisation même du travail : la répartition des tâches établies par le comité de direction a dissocié la coordination technique de la coordination politique du projet au niveau local. La séparation qui s'est installée entre les deux domaines a contribué d'une certaine façon à affaiblir la portée du projet, dans la mesure où la connaissance scientifique sur la vulnérabilité de la ville pouvait avancer dans l'indifférence totale de la sphère politique, complètement déconnectée des implications politiques et sociales suggérées par la méthodologie et les conclusions du scénario.

Il est évident que le scénario sismique de Quito est un document de production et d'usage difficile. Il peut devenir un enjeu politique déterminant, dans la mesure où la connaissance scientifiquement établie de la vulnérabilité de la ville face à un séisme considéré comme hautement probable appelle inéluctablement la mise en place d'une politique de prévention. Le scénario sismique, livré tel quel, peut provoquer un certain affolement, voire la panique dans la ville, d'où la prudence des autorités au moment de la présentation finale du document. Et ce d'autant plus que la probabilité à moyen terme d'occurrence d'un séisme destructeur constitue une contrainte politique de peu de poids face à des échéances électorales de quatre ans.

3. 4. Un projet ambivalent

Un autre aspect de la contradiction science-politique repose sur l'ambiguïté même du scénario, dont le rôle est avant tout d'alerter les autorités politiques et qui légitime cette intervention par une connaissance scientifique. Alors que la connaissance est l'argument du scénario, il se situe objectivement dans le champ du politique. C'est ce qui explique, par exemple, que le scénario ne fasse pas état d'un nombre de victimes, et que les dégâts probables soient cartographiés à une échelle relativement petite, ceci pour éviter des impacts économiques et sociaux susceptibles de bouleverser la ville (migrations, spéculation...).

La méthodologie même du scénario fait de son élaboration un instrument de prise de conscience au moins aussi efficace que le produit fini. On aborde ici la troisième contradiction portée par le scénario sismique de Quito.

4. SCIENCE ORTHODOXE VERSUS SCIENCE IMPLIQUÉE

Un certain nombre de faits marquants qui entourent l'élaboration du scénario s'inscrivent dans un paradoxe d'un autre type, interne au monde scientifique.

4. 1. Un projet qui ne fait pas l'unanimité

En effet, d'un côté le projet rencontre un intérêt scientifique indéniable : dans le monde scientifique international, il s'exprime par des invitations à colloques et à publier des articles dans des revues (9). Il faut noter que cet intérêt émane surtout des sciences sociales, notamment des géographes. Du point de vue de la production de connaissance, le projet pilote d'élaboration d'un scénario sismique à Quito en seize mois, essentiellement à partir du traitement des données existant localement, peut être considéré comme un réel succès.

(9) À l'heure actuelle (juillet 1995), le scénario sismique de Quito a fait l'objet de 6 articles, de 7 communications à des congrès, de 9 participations à des séminaires ; 4 nouvelles publications sont encore à paraître.

Mais d'un autre côté, on découvre une insertion scientifique interne discutée : sur le plan institutionnel, au niveau des autorités scientifiques, aussi bien l'organisme équatorien concerné (l'EPN) que l'ORSTOM ont considéré le projet d'un oeil dubitatif.

4. 2. Un déroulement informel

C'est probablement une des raisons qui explique l'ampleur de l'informalité dans laquelle s'est élaboré le scénario sismique de Quito, informalité qui a touché toutes les institutions impliquées localement : aussi bien l'EPN et l'ORSTOM que le service de planification de la municipalité ont travaillé sur le scénario en marge de leurs activités normales.

L'essentiel des travaux s'est donc déroulé en dehors de la programmation scientifique officielle, grâce à la bonne volonté et à l'intérêt social et scientifique des chercheurs impliqués. Étant donné ces circonstances, le soutien du Chef de la mission ORSTOM en Équateur s'est également avéré déterminant pour son bon déroulement.

La non-intégration formelle du projet dans la programmation des différents organismes scientifiques concernés renvoie à une remise en question de l'objet scientifiquement "mou" que représente le scénario pour les tenants de la pensée officielle, de la géophysique et de la géologie notamment, qui se veulent des "sciences dures".

Cet état de fait n'est pas indépendant de l'importance qu'ont eue les relations personnelles dans la mise en oeuvre concrète du projet : l'ensemble des contacts et des propositions de collaboration ont été possibles grâce à des relations personnelles préexistantes entre les principaux protagonistes du projet. L'absence de sciences sociales dans l'élaboration du scénario est d'une certaine manière une conséquence de cette informalité, les véritables porteurs du projet se situant dans la sphère de la géologie-géophysique et ne disposant que peu de contact dans le monde des sciences sociales. Mais celles-ci ont été appelées à participer au projet et n'ont pas répondu, pour des raisons circonstancielles de disponibilité au moment du lancement du projet.

4. 3. Une autre conception de la science

À l'intérieur du champ scientifique, le scénario démontre une opposition entre une science que l'on peut qualifier "d'orthodoxe" et une science "socialement impliquée", pour parler rapidement.

En effet, pour les autorités scientifiques, le scénario sismique met les limites de la science en jeu, d'où le développement du projet en marge des activités scientifiques programmées. La remise en question ne porte pas sur l'intérêt du projet en lui-même, mais sur la place des chercheurs en géophysique et géologie dans ce type de programme, considéré trop en aval de la "vraie" production scientifique.

La science "orthodoxe" est une science dont les objets sont historiquement identifiés, les méthodes éprouvées, les conclusions corroborées et la reconnaissance codée. Elle est fondée sur la validité et l'universalité des connaissances produites. La science orthodoxe gravite sur elle-même, dans le sens où sa production est diffusée de façon restreinte, dans des revues spécialisées destinées aux seuls scientifiques du domaine, sans se préoccuper des implications ou applications dans la société qui pourtant les finance. La conception qui la porte repose sur l'idéologie de l'absolue neutralité et objectivité du savoir. Ce consensus dogmatique anime la sphère de la production scientifique officielle.

Il faut dire que c'est sur ces mêmes bases épistémologiques que la science a pu, depuis l'Antiquité et le Siècle des Lumières, se développer de manière autonome par rapport aux champs social, politique et religieux. Cette autonomisation du champ scientifique a eu pour conséquence logique un refus de prendre parti dans les débats sociaux ou éthiques que la production scientifique peut provoquer. Cette conception scrupuleuse de la science lui permet d'identifier et d'admettre ses propres limites.

La science impliquée est une nouvelle sorte de science, directement orientée vers la prise de décisions ; c'est la production d'un savoir qui se préoccupe des retombées (retours ?) de sa production dans la société, et qui se veut accessible à tous ; une science qui recherche de nouveaux objets ; une science qui considère la pluridisciplinarité comme nécessaire. Cette science différente assume l'approximation de ses méthodes et l'incertitude de ses conclusions comme préférable à l'absence de production de connaissances socialement utiles. C'est une science où l'exactitude, la vérité ne sont ni infaillibles, ni assurées d'être le "bien". Cette conception moderne, voire post-normale de la science (Ravetz, 1992), suppose une mutation des objets et des méthodes vers des champs relevant moins de la "science dure", moins rassurants, où l'ignorance et l'incertitude ne sont pas rejetées hors de la connaissance scientifique mais sont intégrées.

Le scénario sismique est exemplaire de l'opposition entre ces deux types de sciences. Il a souvent dressé les tenants des objets traditionnels de chaque science contre les promoteurs d'une discipline un peu moins fermée, tournée vers des implications sociales et politiques. Ces derniers se réfèrent explicitement à la responsabilité éthique de la science vis-à-vis de la société.

Cette contradiction entre science orthodoxe et science impliquée est en quelque sorte constitutive de l'ORSTOM, dont les missions peuvent ainsi entrer en contradiction, puisque l'on veut y faire à la fois de la recherche scientifique, le plus souvent entendue au sens de la "science orthodoxe", et en même temps de la recherche pour le développement en coopération, conçue plutôt comme de la "science impliquée". Le champ scientifique étant dominé par la science officielle, les travaux relevant de la science impliquée ne sont pas reconnus comme production scientifique, tout au moins dans les sciences dites "dures". Il faut dire que l'ORSTOM se situe dans un champ d'action — la production de connaissance dans les pays en développement — qui le met directement en concurrence avec les ONG et bureaux d'études ; en même temps, cet institut revendique une légitimité sur le plan strictement scientifique, officialisée par son statut d'EPST (10) qui l'oblige à une production scientifique de même niveau que celle du CNRS (11).

5. LES SUITES DONNÉES AU SCÉNARIO SISMIQUE

Si, un an après la publication du document final (en anglais), les suites données aux recommandations étaient quasiment inexistantes, il y a actuellement, au moment où nous écrivons ce texte, une nette évolution dans l'attitude des autorités locales par une véritable prise en compte progressive des conclusions du scénario.

(10) Établissement Public à caractère Scientifique et Technique, statut recouvrant tous les organismes publics de recherche français.

(11) Centre National de la Recherche Scientifique.

La succession rapprochée de quatre événements : un article dans un quotidien exposant le scénario, une petite secousse bien ressentie dans la ville de Quito, plusieurs tremblements de terre en Colombie et la catastrophe de Kobe semblent en effet faire évoluer le regard porté sur le scénario. Les médias ont commencé à se pencher de près sur les conséquences d'un séisme à Quito et s'interrogent sur le degré de préparation de la ville face à une telle crise.

Une série d'articles ont paru dans la presse (12), des programmes de télévision et de radio ont eu lieu sur ce thème, avec des chercheurs ayant participé au scénario. Cette diffusion a été suivie d'une réelle demande, venant de divers secteurs de la société civile, d'information sur le risque sismique et sur la conduite à suivre en cas de tremblement de terre.

Ces différents éléments ont entraîné un engagement plus net des autorités dans la démarche de prévention envisageable à partir des conclusions du scénario. Cet engagement s'est traduit par la création d'un comité d'urgence et d'une unité de prévention des risques à la Direction Générale de Planification du District Métropolitain de Quito. Un projet d'amélioration des structures des écoles est en cours à l'EPN. Les assurances et les banques ont, de leur côté, mis en place un système pour répondre à l'urgence que provoquerait un fort séisme sur la ville.

Une autre conséquence tangible du scénario sismique de Quito est la prise en compte par l'INEC, l'institut national de la statistique équatorien, de la nécessité d'intégrer au questionnaire du recensement un item concernant l'état des constructions et les matériaux utilisés (13). En effet, les données sur le bâti du recensement de 1990 n'étaient pas utilisables ; il a fallu que les chercheurs en génie civil effectuent une enquête, unique exception au principe de ne travailler qu'avec les données existantes.

Au niveau politique, on commence donc seulement maintenant, plus d'un an après la parution des résultats, à s'inquiéter de la responsabilité que fait porter à la municipalité la simple existence du scénario. L'approche des élections n'est pas pour rien dans la "prise de conscience" des autorités politiques face à une catastrophe sismique. D'un autre côté, il faut bien dire que la sphère du politique, dont les échéances se réduisent à quatre ans, a du mal à considérer la nécessité d'agir pour la prévention d'un risque sismique qui s'inscrit dans une échelle de temps très différente.

On peut donc penser que les suites du scénario sont encore à venir. Malgré les contradictions qu'il a comportées, le scénario sismique de Quito est un produit scientifique qui démontre la capacité de la production scientifique à participer à l'évolution de l'attitude du champ politique face au risque sismique.

À l'intérieur du champ scientifique, on peut aussi noter une certaine progression de l'intérêt pour les travaux de "science impliquée". La publication du document final du scénario sismique à Quito en espagnol est enfin prête, grâce à la contribution financière de la Municipalité de Quito et de l'ORSTOM. Finalement, la rédaction d'une brochure pour le grand public est en cours, grâce au financement du CIFEG, complété par l'ORSTOM et la municipalité de Quito.

(12) Voir notamment le supplément dominical du quotidien *Hoy* du 8 janvier 1995.

(13) Les questions sur le bâti qui existaient dans le recensement concernaient l'architecture ; l'INEC va maintenant introduire des questions portant sur la structure du bâti.

Ces faits sont la manifestation d'un intérêt grandissant pour le scénario, aussi bien au niveau des autorités politiques locales que dans la sphère des institutions scientifiques. Ils justifient la visée politique du scénario sismique, c'est-à-dire son intrusion dans la sphère politique et sociale pour une meilleure connaissance du risque débouchant sur une politique globale de prévention.

Références citées

- CHATELAIN, J.-L., YEPES, H., GUILLIER, B., FERNÁNDEZ, J., VALVERDE, J., KANEKO, F., SOURIS, M., DUPÉRIER, E., HOEFFER, G., YAMADA, T., BUSTAMENTE, G., TUCKER, B. & VILLACIS, C., 1994 - Les scénarios sismiques comme outils d'aide à la décision pour la réduction des risques : projet pilote à Quito - Équateur. *Revue de Géographie Alpine*, 4 : 131-150.
- CHATELAIN, J.-L., GUILLIER, B., SOURIS, M., DUPÉRIER, E. & YEPES, H., 1995a - SIG et évaluation des risques naturels : Application aux Risques sismiques de Quito. *Mappemonde*, 3 : 17-21.
- CHATELAIN, J.-L., GUILLIER, B., YEPES, H., FERNÁNDEZ, J., VALVERDE, J., SOURIS, M., DUPÉRIER, E., TUCKER, B., HOEFER, G., KANEKO, F., YAMADA, T., BUSTAMENTE, G. & VILLACIS, C., 1995b - Un scénario sismique pour la ville de Quito. *ORSTOM Actualités*, 47 : 8-14.
- DAVIS, J.F., BENETT, J.H., BORCHARDT, G., KAHLE, J.E., RICE, S.J. & SILVA, M.A., 1982 - *Earthquake planning scenario for a magnitude 8.3 earthquake on the San Andreas fault in the San Francisco Bay area*, 160p., California Division of Mines and Geology, Special Publication 61.
- DEL PINO, I., YEPES, H., 1990 - Apuntes para una historia sísmica de Quito. in: *Centro Histórico de Quito*: 67-100, Ecuador: Ilustre Municipio de Quito, Dirección de Planificación.
- ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL, GEOHAZARD INTERNATIONAL, ILUSTRE MUNICIPIO DE QUITO, ORSTOM, OYO CORPORATION, 1994 - *The Quito, Ecuador, Earthquake risk management project: An Overview*, 40p., San Francisco, USA : Geohazard International Publications.
- ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL, GEOHAZARD INTERNATIONAL, MUNICIPIO DEL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO, ORSTOM, OYO CORPORATION, 1996 - *Proyecto para el manejo sísmico de Quito: Síntesis*, 33p., Quito, Ecuador : Publicación MDMQ - ORSTOM.
- RAVETZ, J., 1992 - Connaissance utile, ignorance utile ? in : *La terre outragée* (J. Theys & B. Kalaora dir.): 87-102, Paris : Autrement.
- REICHLE, M.S., KAHLE, J.E., ATKINSON, T.G., JOHNSON, E.H., OLSON, R.A., LAGORIO, H.J., STEINBRUGGE, K.V., CLUFF, L.S., HANEY, T.P. & POWERS, J.E., 1990 - *Planning scenario for a major earthquake, San Diego-Tijuana metropolitan area*, 182p., Division of Mines and Geology, Special Publication 100.
- SOURIS, M., LEPAGE, M. & PELLETIER, F., 1984-1994 - *Le système d'information géographique Savane*, Logiciel ORSTOM.
- STEINBRUGGE, K.V., BENETT, J.H., BORCHARDT, G., TOPPOZADA, T.R., DEGENKOLB, H.J., LAVERTY, G.L. & MAC CARTHY, J.E., 1987 - *Earthquake planning scenario for a magnitude 7.5 earthquake on the Hayward fault in the San Francisco Bay area*, 243p., California Division of Mines and Geology, Special Publication 78.
- TOPPOZADA, T.R., BENNETT, J.H., BORCHARDT, G., SAUL, R., DAVIS, J.F., JOHNSON, C.B., LAGORIO, H.J. & STEINBRUGGE, K., 1988 - *Planning scenario for a major earthquake on the Newport-Inglewood fault zone*, 207p., Division of Mines and Geology, Special Publication 29.

RISQUES NATURELS : DE LA GÉOPHYSIQUE À L'APPROCHE INSTITUTIONNELLE

*Claude de Miras **

Résumé

Les limites de l'approche physique des risques naturels ont conduit à une collaboration novatrice des sciences sociales, particulièrement en matière de prévention et de gestion des risques. Mais dans l'approche physique, la prise en compte indispensable des comportements humains face aux risques, ne revient-elle pas à juxtaposer une Population plus ou moins sensible aux dangers encourus et une Administration plus ou moins efficace ? Une approche institutionnelle devrait pleinement prendre en compte le facteur spécifique que constitue les pouvoirs publics pour définir une politique de prévention qui soit en phase, non pas avec un idéal technique inaccessible en particulier dans les sociétés en développement, mais avec un optimum social.

Mots-clés : Risques naturels, Équateur, État, pouvoirs publics, prévention.

RIESGOS NATURALES: ENTRE LA GEOFÍSICA Y LA APROXIMACIÓN INSTITUCIONAL

Resumen

Las limitaciones de la perspectiva física de los riesgos naturales han implicado una colaboración novedosa de las ciencias sociales en particular a nivel de la prevención y del manejo público de los riesgos. Sin embargo, en la perspectiva física, ¿la incorporación de los comportamientos humanos frente a los riesgos no consiste en una yuxtaposición de una Población más o menos sensible a los peligros y una Administración más o menos eficiente? Una aproximación institucional debería considerar totalmente el factor específico que representan los poderes públicos para definir una política de prevención que sea compatible, no con un ideal técnico inalcanzable en particular en las sociedades en desarrollo, sino con un óptimo social.

Palabras claves: Riesgos naturales, Ecuador, Estado, poderes públicos, prevención.

NATURAL HAZARDS: BETWEEN THE GEOPHYSICS AND THE INSTITUTIONAL APPROACH

Abstract

The limitations of the physical perspective on natural hazards have required the contribution of the social sciences, especially for the mitigation and the management of risks. But in the physical approach, the analysis of human behavior in the event of natural hazards, seems to be limited to the addition of a population more or less sensitive to the risks, and represent administration more or less

efficient? The institutional approach should examine completely the specific force that the authorities in order to define a mitigation policy, that would be in accordance not with a perfect project out of reach especially for the developing nations, but rather with optimal local social capability.

Key words: *Natural hazards, Ecuador, Authorities, mitigation.*

Nous avons eu à engager en 1994 une réflexion sur la question des risques naturels au niveau des grands programmes de recherche de la Mission ORSTOM en Équateur (de Miras, 1994). Nous avons été ainsi conduit à aborder un thème scientifique nouveau pour nous ; mais, chemin faisant, nous allions découvrir que celui-ci n'était pas sans lien avec des problématiques auxquelles nous étions confronté dans des secteurs de la réalité économique et sociale apparemment fort éloignés. Plutôt orienté vers l'économie informelle urbaine ou régionale, nous ne pensions pas trouver dans la question des risques naturels, un prolongement aux réflexions que nous développions par ailleurs et dans lesquelles l'État jouait aussi un rôle prépondérant (1).

La lecture de divers documents techniques ou scientifiques traitant des risques naturels a mis en évidence certaines régularités. Une première constante paraissait être la limitation dont ces études souffraient pour épuiser à elles seules la question de la vulnérabilité, imposant un recours aux sciences sociales. Un schéma très répandu proposait ainsi l'élargissement de la thématique des risques naturels aux sciences sociales afin d'aborder et de dominer la double complexité naturelle et humaine qu'impose cette thématique.

Mais nous voudrions montrer que si la collaboration des sciences sociales, attendue par les géologues, géophysiciens ou hydrologues, est indispensable, ces dernières matières ne fonctionnent cependant pas comme une "boîte noire" un peu magique dont le concours donnerait immanquablement toutes les clés de la logique sociale.

Les sciences sociales peuvent pourtant notablement enrichir la description et l'analyse de la vulnérabilité. Elles vont ainsi permettre de mieux préciser les comportements humains face aux risques (localisation, conscience, résistance, stratégie, etc.). Mais la dimension sociale ne reste-t-elle pas alors circonscrite à la Population comme somme d'individus cohabitant avec une Administration plus ou moins efficace ? Dans cette perspective, les rapports de la société et du politique sont assez largement occultés ; de même, le fonctionnement de l'État — pourtant perçu comme un noeud essentiel pour la mise en oeuvre d'une politique des risques — est passé par pertes et profits.

La faiblesse de la capacité de gestion du risque par l'État est-elle seulement une contingence ? Les pouvoirs publics ont-ils négligé jusqu'ici l'exposition aux catastrophes naturelles faute d'avoir été correctement informés de leur occurrence et de leur importance ? Une sensibilisation, fondée sur des travaux rigoureux de mesures du risque et de la vulnérabilité, est-elle à même de redonner à l'État toute sa responsabilité, conscience publique nationale et appuis financiers internationaux se conjuguant ensuite pour fonder une politique efficace de prévention et de gestion des risques ?

(1) Au niveau de la définition, de la mesure statistique et de la promotion du "secteur informel".

Même si, avec le renfort des sciences sociales, la sensibilisation des agents publics et privés à l'impact des phénomènes naturels est une dimension incontournable de toute politique de gestion du risque, elle n'exclut pas une réflexion sur les limites de cette approche quand on observe comment, même à forte dose allopathique, elle reste finalement sans effet structurel sur le comportement de l'État dans ce domaine.

Au-delà de la qualité, de l'intensité et de la diffusion de l'information fournie par les spécialistes des sciences physiques et sociales, on peut formuler l'hypothèse qu'un faible retour, en termes de politique de gestion du risque, devra être expliqué autrement que par leur insuffisante capacité à convaincre.

Nous considérons que l'intervention des sciences sociales sur le thème des risques naturels doit aussi se situer à un niveau critique : les résultats très mitigés des essais de promotion des politiques relatives aux risques naturels viennent non pas de la présence ou non des sciences sociales dans ces projets ou d'un message insuffisant à destination des pouvoirs publics. C'est peut-être un défaut de problématique générale qui ne permet pas de comprendre l'origine du rapport insatisfaisant entre recherche scientifique et promotion de la prévention des risques. Sans affirmer que telle perspective est plus pertinente que telle autre, nous voudrions distinguer deux approches : d'une part, l'approche physique du risque et d'autre part, celle que nous appellerons institutionnelle. La seconde approche devrait permettre de mettre en évidence les insuffisances de la première puis de la compléter.

1. L'APPROCHE PHYSIQUE DES RISQUES NATURELS

Nous définirons l'approche physique comme celle qui privilégie nettement la description des phénomènes naturels porteurs de risques, l'analyse de la vulnérabilité se maintenant dans une perspective descriptive des biens et des populations face aux risques.

On peut caractériser cette approche par un enchaînement logique : une situation naturelle donnée est une cause potentielle de pertes en vies humaines et en capital économique. Si l'on considère les risques sismiques ou volcaniques (2), il y a lieu de développer les études géophysiques qui serviront de fondement à l'appréhension des risques virtuels, eux-mêmes déterminants de la vulnérabilité des sites et des communautés humaines.

"L'Équateur, situé au niveau d'une marge active en subduction, est à la fois soumis à une forte activité volcanique (environ quarante volcans majeurs dont une douzaine sont actifs) et une importante activité sismique. Les séismes de magnitude 5 sont fréquents ; ils occasionnent très souvent des dégâts importants et des pertes de vies humaines car ils se produisent en grande partie sur le continent. L'Équateur, du fait de ces éléments, est sous la menace constante d'une catastrophe naturelle. C'est pourquoi l'étude du risque sismique par l'identification des systèmes de faille active et l'étude des risques volcaniques sont deux priorités pour la prévention contre les risques naturels et la protection des populations." (Égo, 1993 : 16) (...)

"On mesure alors tous les enjeux d'une telle recherche en Équateur. L'objectif (...) est (...) de déterminer avec précision les zones à risque sismique, la magnitude

(2) Mais il existe aussi des risques d'ordre climatique (inondations, sécheresse, tornade, etc..).

des séismes pouvant les affecter et leur récurrence dans le temps. Ainsi une politique de prévention et une sensibilisation de l'opinion publique pourra prendre réellement naissance." (Égo, 1993 : 21)

Ainsi, en paraphrasant René Marocco (Marocco, 1992), géologue de l'ORSTOM, l'interface que représente le concept de risques naturels suppose en amont un phénomène géophysique, source de menace (caractéristiques, intensité, probabilité d'événements) et en aval, une situation de vulnérabilité des éléments implantés (populations, ouvrage d'art, activités économiques, infrastructures, etc.).

La notion de risque implique donc la combinaison d'une sismicité ou d'un volcanisme actif et d'une implantation humaine exposée à l'impact de ces phénomènes.

Le facteur humain, que ce soient les populations elles-mêmes ou les infrastructures qui leur sont liées, est donc primordial dans l'attribution de qualificatif risque à l'étude considérée (Marocco, 1992).

Cette combinaison est donc source de vulnérabilité pour les sociétés humaines en générant un coût en termes de vies humaines et de dégâts matériels. Compte tenu de sa densité, le milieu urbain est ou sera particulièrement affecté par cette combinaison.

"Pour des raisons géographiques et économiques, la plupart des grandes villes sont situées près des frontières entre plaques (3). Il en résulte qu'en l'an 2000, sur environ 500 millions de personnes regroupées dans les 50 plus grandes villes, 235 millions vivront dans 23 de ces villes, localisées à moins de 200 km de l'épicentre d'un séisme potentiel de magnitude ≥ 7 . Sur ces 27 (sic) villes, 24 seront situées dans des pays en développement.

Les séismes ont causé des dégâts et des pertes en vies humaines considérables. Par exemple, en Amérique du Sud et Centrale seulement, de 1846 à 1978, 34 séismes ont causé la mort d'environ 1 200 000 personnes. De plus, la majeure partie des catastrophes qui produisent des dégâts d'un montant supérieur à 1% du PNB du pays concerné sont des séismes. Dans ce contexte, les grandes agglomérations font face à des risques élevés, de par leur population importante et le montant des investissements, tant privés que publics, qui y sont concentrés." (Chatelain, 1993)

On retrouve une argumentation très semblable dans d'autres documents destinés à sensibiliser bailleurs de fonds ou autorités, autant en ce qui concerne les pertes en vies humaines que celles relatives à l'impact économique :

"By the year 2000, approximately 3 billion people —nearly one-half of the world's population— will live in urban areas. Of the fifty largest cities, half will have populations over 10 million, and half will lie within 200 kilometers of faults known to produce earthquakes of magnitude 7 or greater. Death tolls from recent urban earthquakes have been large: the 1976 Tangshan earthquake in China reportedly killed 250,000 people; the 1990 earthquake in Tabas, Iran killed 40,000, the 1991 earthquake in Spitak, Armenia killed 20,000. The rapid growth of the world's cities will make such disasters more deadly and more frequent." (Tucker *et al.*, sd)

(3) L'auteur ne précise pas quelles raisons pourraient expliquer ce curieux tropisme.

ou encore

“(En Équateur), le séisme de 1987 a provoqué la mort d'environ 1000 personnes, 4000 autres étant portées disparues. Bien qu'ayant frappé une zone peu peuplée, ce séisme a eu des conséquences très importantes sur l'économie du pays. En plus de destructions importantes, le fonctionnement de l'oléoduc, source de plus de 50% des revenus en devises du pays a été interrompu pendant 6 mois. Les pertes subies ont été estimées à plus d'un milliard de \$US, soit plus du tiers du budget de l'État. Ce séisme est un très bon exemple de catastrophe naturelle comme facteur de sous-développement.” (Chatelain & Marocco, sd)

Une fois caractérisés les phénomènes naturels et leur impact sur le milieu humain, vient ensuite la protection des populations et des biens à travers toute une série de moyens réglementaires, institutionnels et de supports culturels. Pour les géophysiciens, commence alors la difficulté à concevoir une politique d'ensemble de prévention et de gestion des risques puisqu'il convient d'appréhender **les caractères socioculturels des populations concernées et qu'il faut informer et éduquer les populations et les responsables**. Ils attendent l'intervention **des spécialistes en sociologie et en communication écrite et audiovisuelle** (Marocco, 1989) pour aborder et gérer cet aspect de la question.

On note, sur ce registre, une tendance à l'essoufflement des analyses lorsqu'on entre dans le champ social. Une cause évidente tient sans doute à la nature des disciplines physiques (géologue, sismologue, géophysicien, etc.) qui initient ces projets et qui ne sont pas, par définition, en mesure d'aller au-delà du repérage de complémentarités relevant d'autres champs disciplinaires, ressortissant aux sciences sociales. Mais une raison plus fondamentale est le butoir, l'écheveau complexe que constitue l'intrication du fonctionnement social et politique des sociétés concernées et du milieu naturel. Cette opacité débouche le plus souvent sur des généralités en forme de recommandations.

Le relais des sciences sociales — particulièrement de la géographie — est venu compléter de façon innovante l'approche physique des risques naturels. Un de ces apports majeurs se situe au niveau de la vulnérabilité : R. D'Ercole distingue “l'approche quantitative et qualitative de la vulnérabilité” (D'Ercole *et al.*, 1991).

L'approche quantitative, la plus courante, s'attache à traiter :

- la répartition spatiale de la population menacée ;
- l'évaluation de la population exposée selon le type de menace et l'intensité du risque associé ;
- la mesure de l'évolution de la population, dans l'espace et dans le temps, notamment dans les secteurs où les risques sont les plus élevés (D'Ercole *et al.*, 1991).

L'approche qualitative s'attache à introduire le comportement des populations comme facteur d'accroissement du risque.

Sur la base des données de recensement disponibles, la population est stratifiée selon les critères socio-économiques (âge, sexe, revenu, instruction, catégorie socioprofessionnelle, etc.). De même, elle est décomposée par zones géographiques, secteurs et quartiers afin de disposer d'un croisement précis de la dimension sociale et spatiale pour localiser la vulnérabilité et la perception du risque par un groupe social donné. Sur la base de cette

différenciation sociologique et géographique, peuvent ensuite venir se caler des modalités de prévention spécifiques du point de vue des comportements à induire, de la forme des messages à concevoir et diffuser, de l'intensité et de la diffusion de l'information à transmettre.

L'introduction de cette nouvelle dimension dans les études de risques naturels a eu un double mérite : sur le plan de la multidisciplinarité, elle a engagé un processus de collaboration entre sciences physiques et sciences sociales maintenant irréversible. Sur le plan des résultats, elle a contribué à charpenter et évaluer l'impact du risque sur la société, en passant d'une mesure globale et physique de la vulnérabilité à une appréhension sociale. Mais pour prolonger cet apport, il est peut-être intéressant de s'engager dans une nouvelle lecture de cette approche physique pour relever un certain nombre de points qu'elle laisse dans l'ombre. Ces creux descriptifs ou analytiques ne sont sans doute pas contingents ; mis en perspective, ils peuvent laisser entrevoir que la théorie sociale, reliée à l'étude physique des risques naturels, paraît seulement ébauchée. L'approche institutionnelle, à cet égard, peut offrir quelques hypothèses de travail complémentaires.

2. L'APPROCHE INSTITUTIONNELLE DES RISQUES NATURELS

On aura relevé deux absences de taille dans l'approche physique : les pouvoirs publics, d'une part ; la société civile, d'autre part.

1) En ce qui concerne l'État et la dimension institutionnelle, on peut formuler deux hypothèses principales pour tenter de comprendre cette non prise en compte explicite.

- Une première hypothèse pourrait affirmer une incorporation progressive des pouvoirs publics comme paramètre de l'analyse. Dans ce cas de figure, l'absence de référence à l'État tiendrait au fait que l'initiative de recherche sur le thème des risques naturels est venue de disciplines scientifiques qui n'étaient pas par nature outillées pour traiter cet aspect de la question. Ou encore, on peut considérer que cette thématique des risques étant relativement récente, sa maturation s'opère progressivement en intégrant peu à peu toutes les dimensions sociales et institutionnelles que comporte la question des risques naturels.

- Une seconde hypothèse que nous émettons affirme à l'inverse la non-intégration délibérée du facteur "État" dans la problématique des risques naturels. Même si l'État est une variable stratégique pour l'élaboration et la mise en oeuvre d'une politique de gestion des risques (4), cette perspective prudente peut renvoyer à un postulat qui soutiendrait que les études multidisciplinaires sur les risques naturels n'ont pas à considérer l'État comme un objet de recherche.

Trois raisons peuvent fonder cette position.

a) Le refus d'entrer dans un questionnement délicat car par nature éminemment politique. Il peut être en effet légitime de penser que la coopération internationale s'arrête là où commence la souveraineté nationale, la première se limitant à mettre au service de la seconde les diagnostics scientifiques et techniques indispensables.

(4) On observe que la conception implicite d'une politique de prévention ou de gestion des risques semble renvoyer à une centralisation autour de l'Administration. Nous n'avons pas relevé d'éventuelles possibilités alternatives à travers des associations, des organisations de quartiers, des ONG même si elles ont très probablement été prises en compte.

b) Un postulat qui considère que l'entité étatique dispose partout fondamentalement des mêmes prérogatives régaliennes et de capacités de coercition et d'arbitrage identiques ; des moyens techniques et économiques limités vont suffire à expliquer les difficultés des administrations des pays en développement à mettre en oeuvre une politique efficace de prévention.

c) Enfin, dans le cadre d'une politique de coopération technique sur le thème des risques, l'État peut être vu seulement comme l'interlocuteur institutionnel. Dans ce cas, l'État en développement est alors sujet de ces recherches, au même titre que les experts étrangers, et en aucun cas objet.

En partant de ces trois positions, c'est seulement par leur qualité et leurs vertus pédagogiques que ces études doivent être en mesure d'amener l'État à intégrer cette nouvelle dimension de la chose publique.

"An international effort to educate the public and the leaders of the earthquake-threatened cities in developing countries of the increasing risk of these cities and their diminishing prospects for foreign aid might, eventually, generate the needed support." (Tucker *et al.*, sd)

Autrement dit, on percevrait clairement le rôle essentiel — politique au sens premier — qu'aurait à jouer l'État dans cette question de la prévention et de la gestion des risques, mais on s'interdirait implicitement de pénétrer le domaine de l'intégrité et de la gestion de la chose publique. Les spécialistes des sciences de la terre et des sciences sociales fourniraient à l'État toute l'information scientifique et technique — mais seulement cette information-là — nécessaire pour concevoir une politique de traitement des risques. Ils feraient aussi l'hypothèse que la pertinence de cette information et son caractère didactique doivent conduire à une sensibilisation de l'opinion publique et des autorités. C'est à cet objectif que concourent les scénarios relatifs aux risques sismiques.

Un tel présupposé, centré sur l'éducation et la sensibilisation, expliquerait le faible développement d'une réflexion explicite sur le rôle de l'État — y compris et peut-être surtout dans les travaux de sciences sociales consacrés aux risques naturels — et inspirerait des réflexions telles que :

"(À Armero, Colombie) Impréparation 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". (...)

"Cependant, pas plus qu'en Colombie, il n'existe encore (en Équateur), 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." (Peltre & D'Ercole, 1992 : 455)

Elles ne vont pas au-delà d'un constat de lourdes carences publiques. Ou encore elles vont même jusqu'à annoncer le passage par l'institutionnel — limité ici à l'éducation — comme un paradoxe quand il s'agit de traiter de l'environnement (le même raisonnement s'appliquant aux risques) :

“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.” (Peltre & D’Ercole, 1992 : 459)

Dans cette hypothèse, la participation active et efficace de l’État dans la problématique des risques naturels finirait néanmoins par s’affirmer peu à peu sous l’effet d’une sensibilisation externe. Ce serait donc bien l’État qui serait conduit **a posteriori** à s’approprier l’idée de gestion et de prévention des risques et non pas l’étude des risques qui questionnerait **a priori** les capacités politiques et institutionnelles de l’État.

Mais on peut s’étonner que cette hypothèse de sensibilisation par l’information n’ait pas été davantage vérifiée à travers des évaluations rétrospectives mettant en corrélation, par exemple dans la zone andine ou plus généralement en Amérique latine, les apports scientifico-techniques des études de risques et les éventuels développements de politiques de prévention et de gestion des risques dans cette région du monde. À cet égard, il semble cependant que des conclusions puissent être ébauchées et qu’elles ne soient guère satisfaisantes (5).

Si ces études d’impact (des études “risques” sur l’attitude des pouvoirs publics face aux catastrophes naturelles) restent très timides, c’est aussi que chaque nouveau projet d’étude engagé avec telle municipalité ou tel organisme de défense civile se développe comme s’il parlait de rien ou de façon étanche par rapport à ce qui a pu se faire dans le passé et ailleurs sur le thème. Ce processus d’itération conduit peut-être, dans des contextes ou des moments différents, à la répétition selon les mêmes présupposés, des mêmes méthodes et des mêmes incantations qui vont finalement rester le plus souvent lettres mortes, une fois remise entre les mains des pouvoirs publics.

Il existe en outre un mécanisme puissant enclenché par les états et les institutions administratives des pays en développement qui peut laisser croire que la thèse de la fonction d’abord pédagogique des études de risques n’est pas sans fondement et sans portée. Il faut sur ce point ne pas confondre l’intérêt formel que nos partenaires peuvent affirmer et les prémices d’une véritable politique de gestion des risques.

L’activisme circonstanciel dont peuvent faire preuve certains interlocuteurs nationaux ne va peut-être pas au-delà d’une recherche de légitimation institutionnelle. Amélioration de l’image de l’administration concernée, perspective de financements internationaux supplémentaires, caution apportée par une collaboration scientifique et technique étrangère, sont autant de précieux atouts que peuvent fournir ces projets à des ministères ou des organismes nationaux en charge de la question des risques pour masquer un fonctionnement bureaucratique notoirement inefficace. Dans ces conditions, c’est un processus de réappropriation et de légitimation institutionnelle qui se développe sous couvert d’une promotion de l’idée de gestion des risques. Non seulement la sensibilisation recherchée au travers de ces études n’opère pas, mais ces dernières, malgré elles, contribuent indirectement à entretenir des structures peu portées à gérer efficacement les risques.

(5) “(...) le bilan en matière de mitigation des catastrophes naturelles dans la région (andine) est bien décevant” (Revue PANGAEA, 1987 : 32).

Sur cette même thématique de l'état des pays en développement et de sa position ambivalente vis-à-vis du risque, on constate que les contraintes économiques et financières qui pèsent sur ces états ne sont pas mentionnées.

Sur ce plan, il serait réaliste de prendre en compte les arbitrages que les pouvoirs publics des pays en développement ont aussi à formuler sur d'autres thématiques stratégiques situées elles aussi à l'interface société/nature et qui traitent de l'environnement. À cet égard, on a un peu le sentiment que ces thématiques du risque et de l'environnement, avec leur kyrielle d'institutions spécialisées et d'experts, s'ignorent superbement quand elles ne sont pas en concurrence, alors que des priorités et des complémentarités pourraient sûrement être trouvées. De même, le contexte actuel d'ajustement structurel de toutes les économies latino-américaines et la montée parallèle des principes libéraux ne représentent pas l'environnement le plus propice pour l'émergence d'un État économiquement et idéologiquement capable de conduire des politiques actives de maîtrise du rapport entre société et milieu naturel.

Dans un ordre d'idée macro-économique, on peut aussi observer que la vulnérabilité se contente de chiffrer — en général assez grossièrement — les pertes en vies humaines ou en biens matériels. Malgré certaines difficultés méthodologiques, il serait néanmoins indispensable de tenter d'évaluer parallèlement les coûts d'une politique de prévention et de préciser l'origine de son financement (6). Par l'analyse coûts-bénéfices, on saisirait sans doute plus exactement les implications économiques de ces politiques, en termes de gains nets positifs ou négatifs.

2) Les pratiques de la société civile sont le plus souvent — en Amérique latine en tout cas — de puissants facteurs d'amplification du risque et de la vulnérabilité. Que ce soit au niveau des procédés techniques de construction du bâti, des zones d'occupation de l'espace urbain ou des attitudes plus ou moins civiques face à des impératifs de sécurité collective, il est évident que l'organisation et la structuration de la société civile — dans ou hors de l'injonction publique — sont des paramètres décisifs pour une mobilisation des populations sur le thème des risques. On est surpris d'observer que la vulnérabilité, telle qu'elle est généralement étudiée, si elle fait état des attitudes privées, individuelles ou collectives contribuant à créer des situations de vulnérabilité aggravée (7), ne relie pas ces pratiques à des modes politiques de gestion sociale qui vont les tolérer, voire les impulser. Ces comportements à risques de la population sont vus comme des dysfonctionnements à corriger alors qu'ils sont l'expression du fonctionnement d'une société dont l'équilibre général, politique et social, passe par ces pratiques. Le clientélisme politique pousse aux invasions populaires de zones périurbaines exposées ou tolère la non-application des normes de construction au profit immédiat des classes aisées. Le poids de la paupérisation des milieux populaires comme celui des classes moyennes va combiner passe-droits et corruption. La fuite généralisée devant la fiscalité directe affaiblit la capacité d'intervention de l'État. Ce sont là des logiques historiquement et intrinsèquement rivées à ces sociétés (8).

(6) Alors qu'une politique préventive reste largement à la charge de l'économie nationale, les coûts directs immédiats d'une crise sismique ou volcanique sont largement soutenus par la communauté internationale.

(7) Sans les développer, on pense ici entre autres choses à la déforestation, au creusement inconsidéré de carrières périurbaines, aux invasions collectives ou individuelles de terrains exposés, à l'absence assez systématique de permis de construire et de respect de normes préventives de construction malgré l'intervention d'un architecte patenté et le recours au financement bancaire.

(8) Sur le plan de la société, il serait intéressant d'aborder aussi la dimension culturelle du risque et donc de la mort. Quelle importance les sociétés latino-américaines accordent-elles à la vie individuelle ou collective ? Thème très tangible mais difficile et philosophique mais qui est sans doute à la racine d'attitudes notoirement "catastrophiques".

Certes, elles vont fluctuer selon les contextes politiques ou économiques mais elles restent structurellement à l'oeuvre. Dans ces conditions, il paraît un peu vain de regretter l'application timide ou incorrecte de certaines règles minimales de prévention.

Cette approche que nous qualifions d'institutionnelle peut prolonger l'approche physique dont nous avons discuté certains aspects. Ce prolongement conduit à construire une problématique générale relative aux risques naturels. Une telle systématisation devra expliquer à la fois comment les phénomènes naturels vont affecter les populations mais aussi comment les sociétés aggravent leur vulnérabilité, et pourquoi leur capacité à gérer les occurrences de risque *ex ante* et *ex post* est différente et sûrement plus faible que celle des états développés.

Dans cette perspective et en intégrant les diverses pistes d'étude que nous avons précédemment ébauchées, il nous semble qu'un questionnement fondamental doit être ouvert à propos de la capacité politique — au sens le plus large — des états en développement à s'approprier les conclusions des études de risques. Sur ce thème, on doit analyser de façon spécifique la capacité institutionnelle et politique des nations en développement.

Nous avons perçu comment l'approche physique livre "brut de décoffrage" ses conclusions sur le risque, la vulnérabilité et les recommandations trop souvent en forme de vœux pieux à des pouvoirs publics plus ou moins désarmés face à l'ampleur de la tâche. Concrètement, la démarche de type physique (par opposition à l'institutionnel) revient à profiler une étude de risques naturels dans les mêmes termes au Japon, aux États-Unis ou en Amérique latine. Si bien entendu l'approche strictement scientifique, géophysique par exemple, est et doit être identique, par contre la vulnérabilité, la capacité de gestion publique institutionnelle du risque, les comportements sociaux concrets ou culturels ne sont pas identiques.

L'approche institutionnelle devrait pouvoir expliciter davantage les facteurs structurels limitants (faible capacité de financement, clientélisme, contrôle déficient, objectifs publics parfois ambigus ou contradictoires, etc....), qui expliquent comment certains phénomènes de risques naturels ne sont pas — et même ne peuvent pas être — pris en compte, soit pour des raisons de capacité économique soit de représentations mentales. Mais parallèlement, on peut observer comment certaines actions de régulation du milieu naturel semblent néanmoins opérer car il serait erroné d'affirmer qu'en matière de prévention des risques rien ne se fait dans les pays en développement.

La perspective institutionnelle conduit à ne plus considérer l'État ou les collectivités locales comme une boîte noire (on ignore alors leurs logiques et leur fonctionnement interne) ou comme une entité universellement étalonnée (ils sont alors dotés implicitement de pouvoirs, de compétences et de moyens de nature identique quel que soit le lieu). Mais il faut comprendre leur capacité effective de régulation pour appuyer leurs efforts de prévision et de réduction des risques (et de dégradation du milieu en matière d'environnement). Il ne s'agit donc pas d'étudier les pouvoirs publics pour eux-mêmes mais en tant qu'acteur central d'une politique de gestion des risques et de l'environnement pour apprécier leur capacité réelle d'intervention sur ce segment du développement.

Il existe à travers le monde, développé et sous-développé, un continuum de situations concrètes qui vont théoriquement de l'exposition absolue et de l'impréparation totale face à une catastrophe naturelle à une anticipation programmée et une gestion rigoureuse des

risques virtuels. Il existe aussi sans doute une typologie implicite des politiques nationales de gestion du risque en fonction de la nature de ces risques, des niveaux de développement, des cultures concernées.

Dans cette perspective, n'y a-t-il pas lieu de distinguer l'approche physique du risque de celle de la capacité institutionnelle afin d'optimiser l'effort de prévention en tenant pleinement compte de l'élasticité que laissent les grands paramètres anthropologiques (culturel, politique, social). Il ne s'agit donc pas, c'est évident, de concevoir une prévention au rabais mais plutôt de se demander ce qu'il advient de recommandations inaccessibles pour nos interlocuteurs institutionnels. Concrètement, la prévention ne devrait-elle pas se fixer des objectifs en phase avec cette capacité institutionnelle — effective et virtuelle — des États ? Le coût et les contraintes drastiques imposées par une préparation efficace pour affronter par exemple un séisme de 7 ou 8 sur l'échelle de Mercalli sont à l'évidence hors de portée d'une économie en développement. N'y a-t-il pas lieu de rechercher l'optimisation de l'effort et des formes de prévention à des niveaux compatibles avec le potentiel économique et administrative de ces sociétés et de leur État (9) ?

Entre d'une part, une hypothèse maximaliste qui considère implicitement que les états en développement doivent pouvoir se plier aux contraintes d'une prévention totale et d'autre part, l'absence absolue de toute anticipation sur des catastrophes virtuelles, il y a place pour des initiatives utiles et adaptées de gestion du risque. Plutôt que de délivrer un message techniquement parfait mais socialement — au sens large — inapproprié, on devrait pouvoir avancer encore davantage dans le sens d'une meilleure articulation entre recherche scientifique et actions en faveur du développement en combinant aide internationale, collaboration du secteur non gouvernemental, bilan des expériences probantes qui ont été effectivement réalisées ici ou là dans les pays du Sud en se situant au niveau de ce qui est socialement possible.

Références citées

- CHATELAIN, J.-L., 1993 - Scénario sur les Conséquences d'un Séisme Destructeur dans la Ville de Quito. Note ORSTOM, Quito, mai.
- CHATELAIN, J.-L., MAROCCO, R., sans date - Projet GRADES. Groupe de Recherche et d'Aide au Développement en Sismologie. Proposition d'étude des risques géodynamiques en Équateur, Quito : ORSTOM.
- D'ERCOLE, R., CHATELAIN, J.-L., MAROCCO, R., SÉBRIER, M., 1991 - Étude du Risque Sismique en Équateur, 56p. + cartes et graphiques, Rapport ORSTOM-IFEA-CIFEG.
- ÉGO, F., 1993 - Risques Sismiques et Néotectonique en Équateur. *PANGEA*, mars : 16-21.
- MAROCCO, R., 1989 - Les Risques Naturels dans les Andes, 9p., Projet de création à l'ORSTOM d'une équipe pluridisciplinaire d'étude de ces risques ; Rapport interne.
- MAROCCO, R., 1992 - Les Risques Naturels, une voie de recherche pour l'ORSTOM, 4p., Deuxième étape de réflexion. Conseil Scientifique, note, avril.
- de MIRAS, C., 1994 - Pour une problématique transversale des programmes de la Mission ORSTOM en Équateur sur le thème des risques naturels et de l'environnement, 8p., Avant-projet. Mission ORSTOM en Équateur, Janvier.

(9) La question se pose d'ailleurs de la même façon pour les économies développées : jusqu'à quel niveau de magnitude d'un séisme, considèrent-elles qu'une politique de prévention est économiquement et politiquement concevable ?

-
- PELTRE, P. & D'ERCOLE, R., 1992 - La ville et le volcan. Quito entre Pichincha et Cotopaxi (Équateur). *Cahiers des Sciences Humaines*, 28 (3) : 349-459.
- TUCKER, B., TRUMBULL, J., WYSS, S., sans date - Trends in Urban Earthquake Hazard and Earthquake Hazard Mitigation in Developing and Industrialized Countries, 9p., Note.

Les articles à publier doivent être adressés au responsable du bulletin de l'IFEA en respectant les règles suivantes:

1.- Le texte, d'un maximum de 30 pages imprimées du Bulletin soit environ 100 000 caractères, sauf accord préalable, sera envoyé en double exemplaires pour soumission aux rapporteurs. Une fois définitivement accepté pour publication (après remaniements éventuels), le texte sera remis sous forme de **disquette informatique** avec 1 tirage sur papier, imprimé à double interligne, avec une marge à gauche de 4 cm., sans ratures ni corrections. Les disquettes seront accompagnées de la désignation du ou des programmes utilisés. Les copies sur papier des articles ne seront pas renvoyées. Cependant, sur demande, disquette et figures seront retournées. Le texte peut également être envoyé par courrier électronique (abrouger@ifea.org.pe). Nous vous demandons de préciser le logiciel de traitement de texte utilisé.

2.- Les articles devront être rédigés en français, espagnol ou anglais et comporter obligatoirement un résumé dans ces trois langues. Le premier résumé devra être rédigé dans la même langue que le texte de l'article. Les deux autres résumés devront chacun être précédés du titre traduit dans la langue correspondante. Chaque résumé sera suivi de mots clés (huit au plus) dans la même langue.

3.- Les références bibliographiques devront être rédigées comme suit:

Périodiques

SARMA, A. V. N., 1974 - Holocene paleoecology of south coastal Ecuador. *Proceedings of the American Philosophical Society*, **118(1)** : 93-134.

Livres

BERNAND, C., 1985 - *La solitude des Renaissants, Malheurs et Sorcellerie dans les Andes*, 237p., Paris: Presses de la Renaissance.

Ouvrages collectifs

FELDMAN, R. A., 1972 - Preceramic Corporate Architecture: Evidence for the Development of Non-Egalitarian Social System in Peru. in: *Early Ceremonial Architecture in the Andes* (C. B. Donnan, ed.): 71-92; Dumbarton Oaks, Washington.

Congrès-Colloque

GONZÁLEZ, A. R. & PÉREZ, J. A., 1968 - Una nota sobre etnobotánica del noroeste Argentino. *Actas y Memorias del XXXVII Congreso Internacional de Americanistas*, **2**: 209-228; Buenos Aires.

Thèse

KAHN, F., 1983 - Architecture comparée de forêts tropicales humides et dynamiques de la rhizosphère. Thèse de Doctorat d'État, Université de Montpellier, 426p.

La liste des références devra comprendre tous les travaux cités dans le texte et rien que ceux-ci.

Les titres des revues devront être présentés en toutes lettres.

Les références seront données en liste bibliographique par ordre alphabétique à la fin du texte de l'article à publier.

Nous recommandons la plus grande rigueur dans la présentation des références bibliographiques, notamment en ce qui concerne les **nombre de pages, pour les articles comme pour les livres.**

Appels dans le texte : ils se feront suivant une des deux modalités suivantes:

- Nom de l'auteur inclus dans une phrase: ... Auteur (date) ...
- Nom de l'auteur hors-phrase : ... (Auteur, date) ...

4.- Toutes les illustrations devront être fournies prêtes pour la reproduction. Les illustrations dans le texte seront dénommées figures. Les illustrations hors texte seront publiées sous forme de planches à la fin de l'article. Les tableaux auront leur numérotation propre.

Les figures seront numérotées consécutivement en suivant l'ordre d'appel dans le texte. L'auteur indiquera en marge de son manuscrit la position approximative de chaque figure. Celles-ci (accompagnées d'une photocopie) devront être présentées avec un graphisme de bonne qualité, à l'encre de chine sur calque, avec leur numéro. Les écritures y figurant ne devront en aucun cas être effectuées manuellement mais à l'aide soit de lettres transfert, soit d'un normographe, soit de tout autre moyen mécanique ou informatique. Les croquis et dessins comporteront une échelle graphique. Si des graphiques sont envoyés sur disquette informatique, veuillez indiquer le nom du ou des programmes utilisés. Dans le cas de dessins tramés, vérifiez que les trames soient suffisamment différentes pour qu'aucune confusion ne soit possible, surtout après photocopie. Les dimensions totales devront être celles d'un format multiple de 190 x 126 mm. sans excéder 285 x 189 mm. (1,5 fois la justification du bulletin). Les légendes des figures seront rédigées et regroupées en un document séparé du texte. Les illustrations qui ne seront pas jugées conformes à la qualité requise par le Bulletin de l'IFEA seront, soit retournées aux auteurs soit, dans le cas de modifications légères, refaites par les soins de l'IFEA à la charge des auteurs.

5.- Les photos seront fournies sous forme de tirage en Noir et Blanc **fortement contrastés.**

6.- Les auteurs recevront 50 tirés-à-part gratuits de leur article. Des tirés à part supplémentaires payants pourront être fournis sur demande; les auteurs devront alors prendre contact avec le responsable de la publication après avoir été informés de l'acceptation de leur article au bulletin de l'IFEA.

7.- Il est recommandé aux auteurs de suggérer 2 rapporteurs possibles (nom et adresse) pour leur article en justifiant brièvement leur choix.

8.- Pour tout problème particulier concernant ces instructions, s'adresser au responsable de l'édition.

9.- Tout manuscrit ne respectant pas ces instructions sera renvoyé aux auteurs pour remise en forme.

10.- L'Institut Français d'Études Andines n'est pas responsable des idées émises par les auteurs qui indiqueront à la suite de leur nom, leur profession et leur adresse.

Recomendaciones a los autores

Los artículos a publicar deberán enviarse al responsable del Boletín del IFEA, **respetando las siguientes instrucciones:**

1.- El texto, con un máximo de 30 páginas impresas del Boletín, es decir aproximadamente 100,000 caracteres, salvo acuerdo previo, deberá ser mandado en 2 ejemplares para ser enviado al comité de lectura. Una vez aceptado para su publicación (después de modificaciones eventuales), el texto deberá remitirse en forma de **diskette informático** con 1 copia en papel, impresa a doble espacio, con un margen izquierdo de 4 cm., sin borraduras ni correcciones. Los diskettes estarán acompañados de la designación del o de los programas utilizados. La copia en papel de los artículos publicados no será devuelta. Sin embargo, en caso de que los autores lo deseen, les devolveremos el diskette y las figuras. El texto puede ser también enviado por correo electrónico (abrouger@ifea.org.pe). Pedimos a los autores indicar el programa de tratamiento de texto utilizado.

2.- Los artículos serán redactados en francés, español o inglés, e incluirán obligatoriamente un resumen en estos tres idiomas. El primer resumen deberá estar escrito en la misma lengua que el texto del artículo. Los dos otros resúmenes deberán estar precedidos del título traducido a la lengua correspondiente. Cada resumen se acompañará de un máximo de ocho descriptores en el mismo idioma.

3.- Las referencias bibliográficas se redactarán de la siguiente manera:

Publicaciones periódicas

SARMA, A. V. N., 1974 - Holocene paleoecology of south coastal Ecuador. *Proceedings of the American Philosophical Society*, **118(1)**: 93-134.

Libros

BERNAND, C., 1985 - *La solitude des Renaissants, Malheurs et Sorcellerie dans les Andes*, 237p., Paris: Presses de la Renaissance.

Obras colectivas

FELDMAN, R. A., 1972 - Preceramic Corporate Architecture: Evidence for the Development of Non-Egalitarian Social System in Peru. in: *Early Ceremonial Architecture in the Andes* (C. B. Donnan, ed.): 71-92; Dumbarton Oaks, Washington.

Congresos - Coloquios

GONZÁLEZ, A. R. & PÉREZ, J. A., 1968 - Una nota sobre etnobotánica del noroeste Argentino. *Actas y Memorias del XXXVII Congreso Internacional de Americanistas*, **2**: 209-228; Buenos Aires.

Tesis

KAHN, F., 1983 - *Architecture comparée de forêts tropicales humides et dynamiques de la rhizosphère*. Thèse de Doctorat d'État, Université de Montpellier, 426p.

La lista de las referencias deberá incluir todos los trabajos citados en el texto y sólo éstos.

Los títulos de revistas deberán presentarse completos.

Las referencias serán dadas en lista bibliográfica, por orden alfabético al final del artículo.

Recomendamos el rigor más grande para la presentación de las referencias bibliográficas, especialmente para **la cantidad de páginas, tanto para los artículos como para los libros.**

Llamadas en el texto: se harán siguiendo una de las dos modalidades siguientes:

- nombre del autor incluido en una frase: ... Autor (fecha) ...
- Nombre del autor no incluido en la frase: ... (Autor, fecha) ...

4.- Todas las ilustraciones deberán ser entregadas listas para su reproducción. Las ilustraciones mencionadas en el texto serán denominadas figuras. Las ilustraciones no consignadas en el texto serán publicadas como láminas al final del artículo. Los cuadros tendrán su propia numeración.

Las figuras serán numeradas consecutivamente, siguiendo el orden de llamada en el texto. El autor indicará en el margen de su manuscrito la posición aproximada de cada figura. Éstas (acompañadas de una fotocopia) deben ser presentadas con un grafismo de buena calidad, en tinta china sobre papel calco, con su número. Los escritos se harán ya sea con ayuda de letras transferibles, con normógrafo, o cualquier otro medio mecánico o informático, pero en ningún caso manualmente. Los croquis y dibujos llevarán una escala gráfica. En caso de enviar los gráficos en diskette informático, indicar el nombre del o de los programas utilizados. En el caso de dibujos tramados, verificar que las tramas sean suficientemente diferentes, para que no haya confusión posible, sobre todo al fotocopiarlos. Las dimensiones totales deberán ser las de un formato múltiple de 190 x 126 mm. sin exceder 285 x 189 mm. (1.5 veces la justificación del boletín). Las leyendas de las figuras deberán estar redactadas y agrupadas en un documento separado del texto. Las ilustraciones que no respondan a los requisitos de calidad pedidos por el Boletín del IFEA serán devueltas a los autores o, en caso de modificaciones leves, rehechas por el IFEA a cuenta de los autores.

5.- Las fotos deberán ser entregadas en Blanco y Negro **fuertemente contrastadas.**

6.- Los autores recibirán 50 separatas gratuitas de su artículo. Sobre pedido, podrán recibir ejemplares adicionales pagados; en este caso los autores deberán tomar contacto con el responsable de la publicación después de haber sido informados de la aceptación de su artículo en el boletín del IFEA.

7.- Se recomienda a los autores sugerir los nombres y direcciones de 2 posibles revisores para su artículo, justificando brevemente su elección.

8.- Para cualquier problema particular en relación con las normas anteriores, dirigirse al responsable de la edición.

9.- Todo manuscrito que no respete estas instrucciones será devuelto al autor para su arreglo.

10.- El Instituto Francés de Estudios Andinos no se hace responsable de las ideas formuladas por los autores quienes indicarán a continuación de su nombre, su profesión y dirección.

Responsable de la edición: **Anne-Marie Brougère**

Tarifa de suscripción anual (3 números)

Precio de suscripción:

Individual: 30 US \$ (ó 160 Fr. fr.) + costos de envío

Institución: 45 US \$ (ó 240 Fr. fr.) + costos de envío

Costos de envío:

	Sudamérica	Resto del Mundo
Vía aérea:	65 US \$ (ó 330 Fr. fr.)	72 US \$ (ó 380 Fr. fr.)
Correo 2e clase:	47 US\$ (ó 250 Fr. fr.)	53 US\$ (ó 280 Fr. fr.)
Certificación:	3.50 US \$ (ó 19 Fr. fr.)	

Módo de pago:

- 1) por cheque en Francos franceses a la orden de:
"Institut Français d'Études Andines".
- 2) por giro bancario en la cuenta: n° 15289/44900/00004400993/45 del Institut Français d'Études Andines en el Banco:
"Trésorerie Générale pour l'Étranger"
30 rue de Malville 44040 NANTES cedex, FRANCIA.
En este caso, mandar copia de la nota de débito ("avis de débit") de su banco.
- 3) en efectivo en dólares o en soles peruanos en las oficinas del IFEA en Lima a la tasa de cancillería del día.

Favor devolver el siguiente talonario a: IFEA, Editions Cas. 18-1217, Lima 18, PERÚ

Apellido y nombre:

Dirección:

Suscripción al tomo : Individual Institución

Deseo un envío..... que me costará

Le adjunto un cheque en Francos franceses de Fr.

o

una copia de la nota de débito de mi banco por una suma de Fr.

Fecha

Firma

CONTENTS

Preface	319
Natural phenomena generating damages	323
F. EGO, M. SÉBRIER, E. CAREY-GAILHARDIS, D. INSERGUEIX	
Seismic hazard in the ecuadorian Andes	325
C. HIBSCH, A. P. ALVARADO, H. A. YEPES, M. SÉBRIER, V.H. PEREZ	
Quito active fault and regional seismogenic sources: a seismic hazard study for Quito (Ecuador) inferred from Quaternary sediments analysis	359
M. MONZIER, P. SAMANIEGO, C. ROBIN	
Cayambe volcano (Ecuador): eruptive activity during the last 1,500 years and potential hazards	389
F. ROSSEL, É. CADIER, G. GÓMEZ	
Floods in the Ecuadorian coastal area: responsible patterns, existing and planned protection efforts	399
É. CADIER, O. ZEVALLOS, P. BASABE	
The landsline and catastrophic flooding of the Josefina in Ecuador ..	421
P. BASABE, E. ALMEIDA, P. RAMÓN, R. ZEAS, L. ÁLVAREZ	
Advances in the Prevention of Natural Disasters in the Río Paute, Ecuador	443
Some aspects of vulnerability	459
F. LEONE, E. VELÁSQUEZ	
Josefina's disaster back analysis (Ecuador, 1993). Contribution to vulnerability concept applied to mass movements	461
R. D'ERCOLE	
Cartography of vulnerability of people at risk. Case study: the Cotopaxi volcano area (Ecuador)	479
A. COLLIN DELAVALD	
Guayaquil during the cholera	509
Administration of risks, its tools, its problems	529
P. METZGER, P. PELTRE	
Urban environment management and "natural" hazards. The <i>quebradas</i> problematic in Quito (Ecuador)	531
J.-L. CHATELAIN, B. GUILLIER, H. YEPES, J. FERNÁNDEZ, J. VALVERDE, B. TUCKER, G. HOEFER, F. KANEKO, M. SOURIS, E. DUPÉRIER, T. YAMADA, G. BUSTAMANTE, A. EGUEZ, A. ALVARADO, G. PLAZA, C. VILLACIS	
A pilot seismic scenario in Quito (Ecuador): methods and results ...	553
P. METZGER, J.-L. CHATELAIN, B. GUILLIER	
The politic dimention of a scientific project: the Quito seismic scenario	589
C. DE MIRAS	
Natural hazards: between geophysics and the institutional approach	603