

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

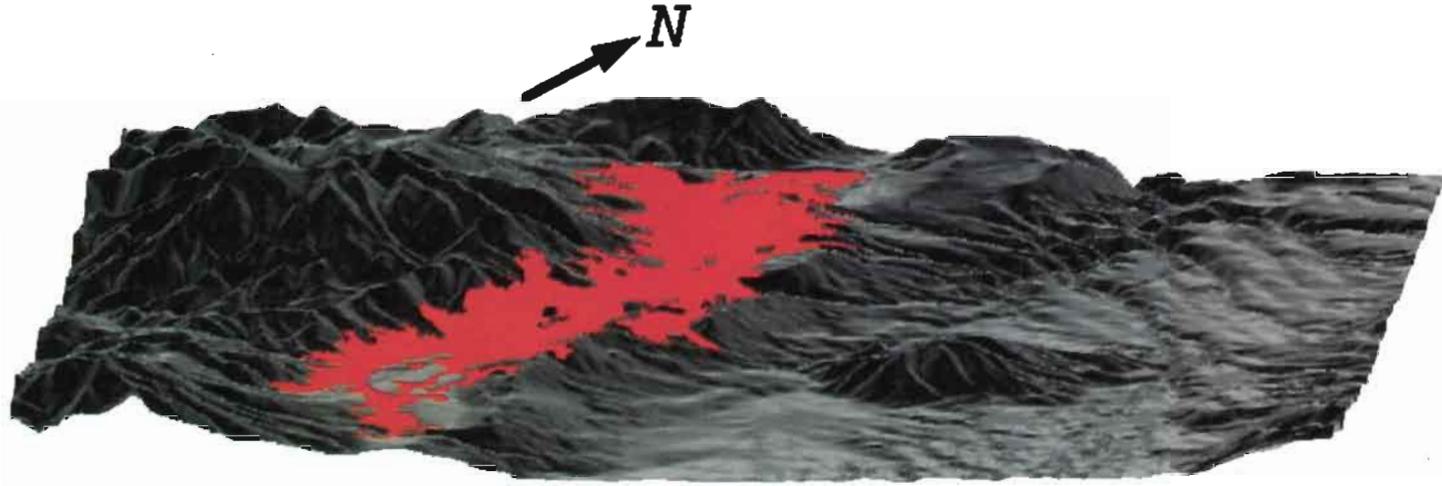


Fig. 1 - Modèle numérique de terrain de Quito et ses environs. La zone en rouge représente l'étendue de la tache urbaine (Source SUIM).

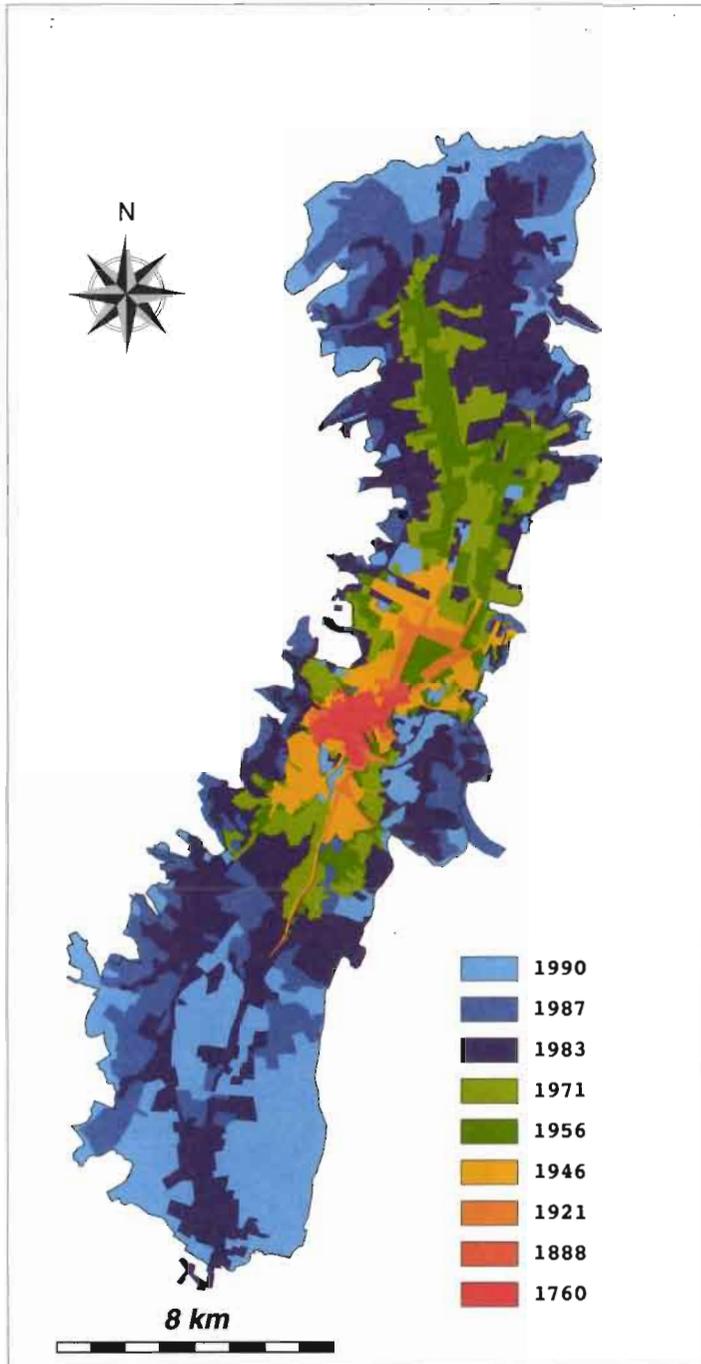


Fig. 2 - Croissance de la ville de Quito de 1760 à 1990 (Source : SUIM) .

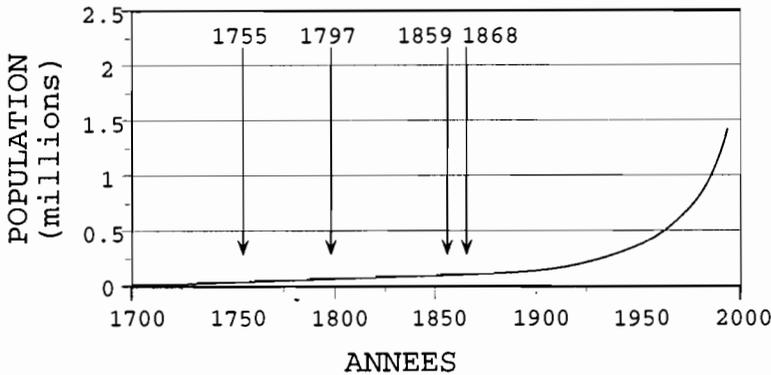


Fig. 3 - Évolution de la population de Quito de 1700 à 1990, avec les dates des principaux séismes destructeurs ayant affecté la ville.

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

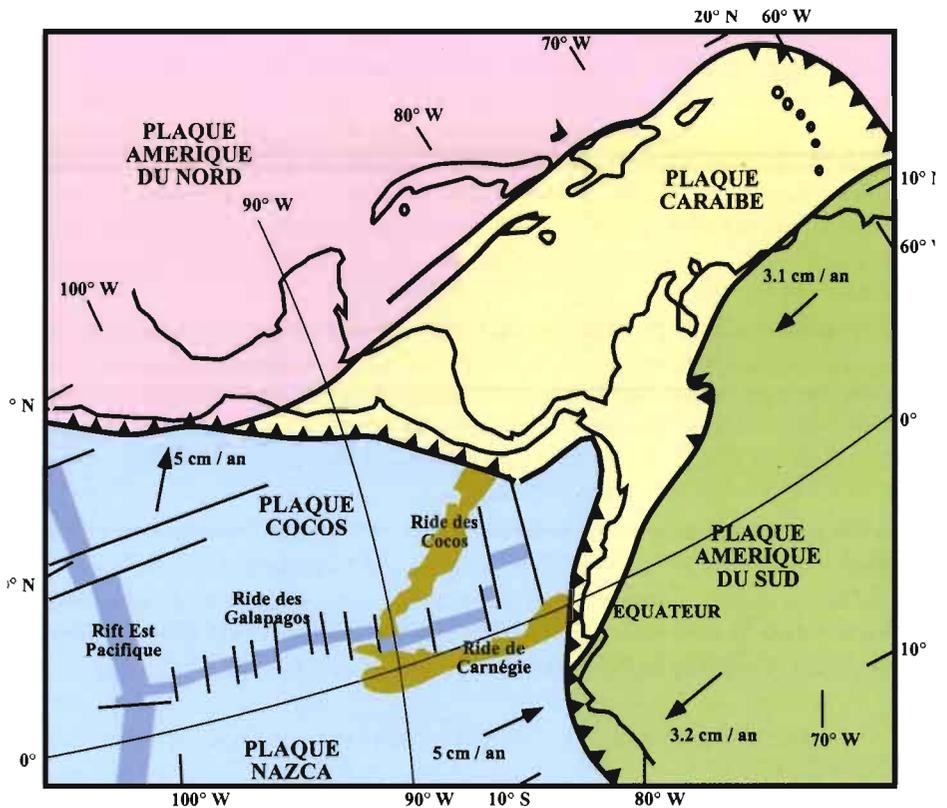


Fig. 4 - Cadre sismo-tectonique de l'Équateur. La plaque océanique Nazca ainsi que la ride de Carnegie s'enfoncent sous la plaque continentale sud-américaine sur laquelle est situé l'Équateur. Les flèches représentent les vitesses de convergence des plaques (D'après Bourgois *et al.*, 1985).

(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.

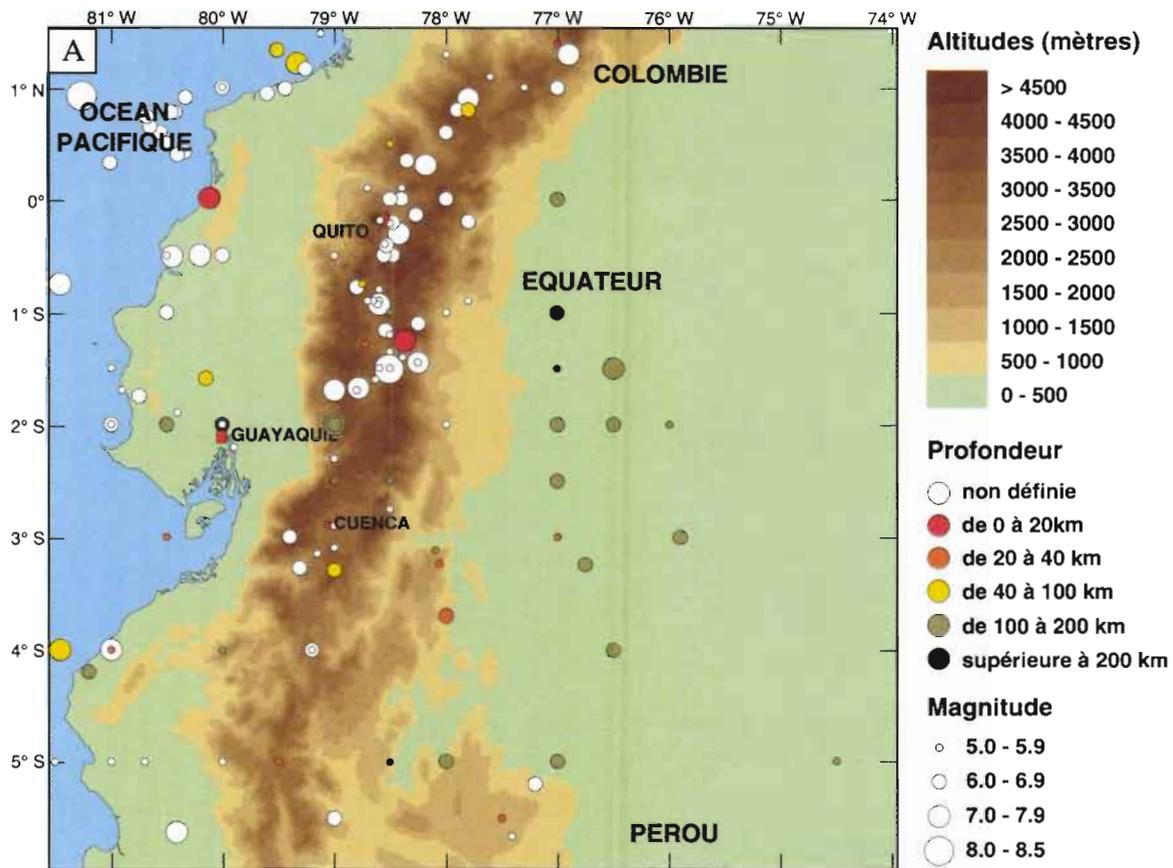


Fig. 5a - Carte montrant la localisation des séismes de magnitude supérieure ou égale à 5,0. : sismicité historique (1545 - 1960),

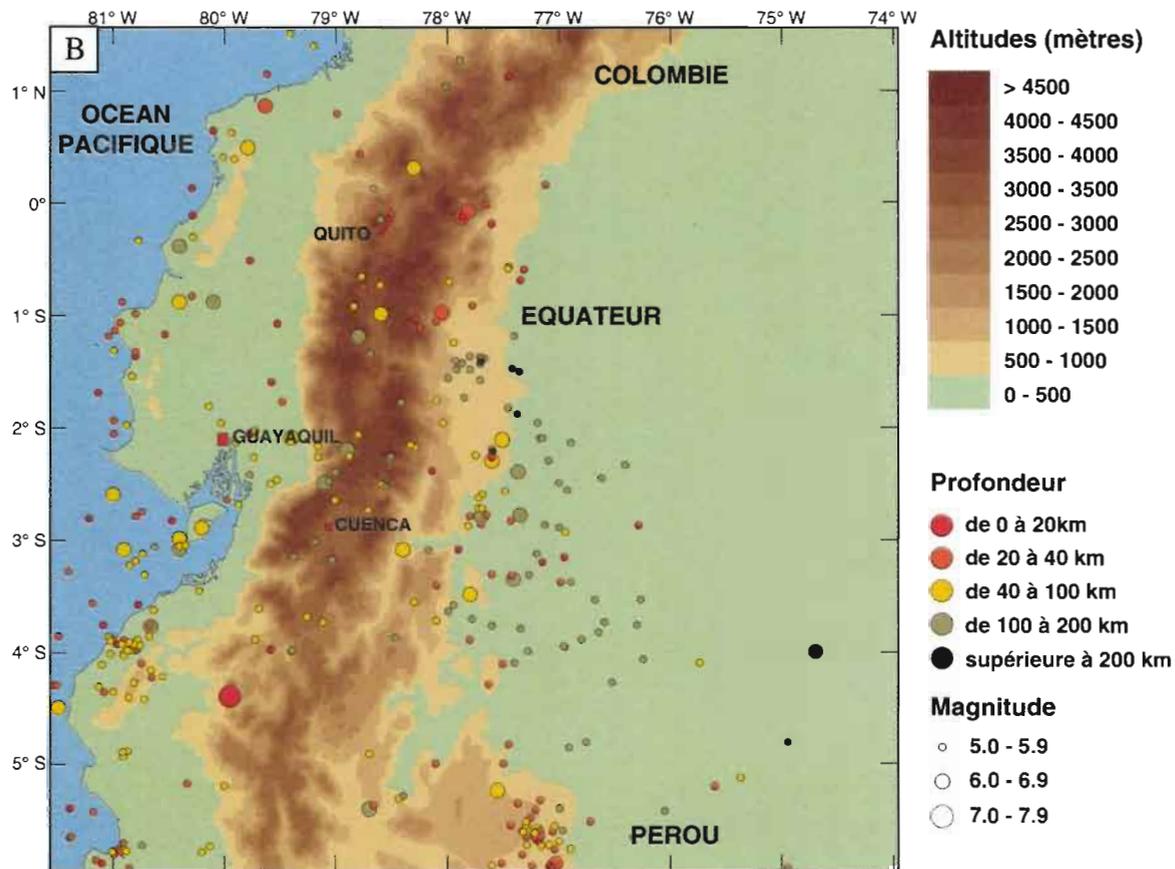


Fig. 5b - Carte montrant la localisation des séismes de magnitude supérieure ou égale à 5,0. : sismicité instrumentale (1961 - 1993).

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

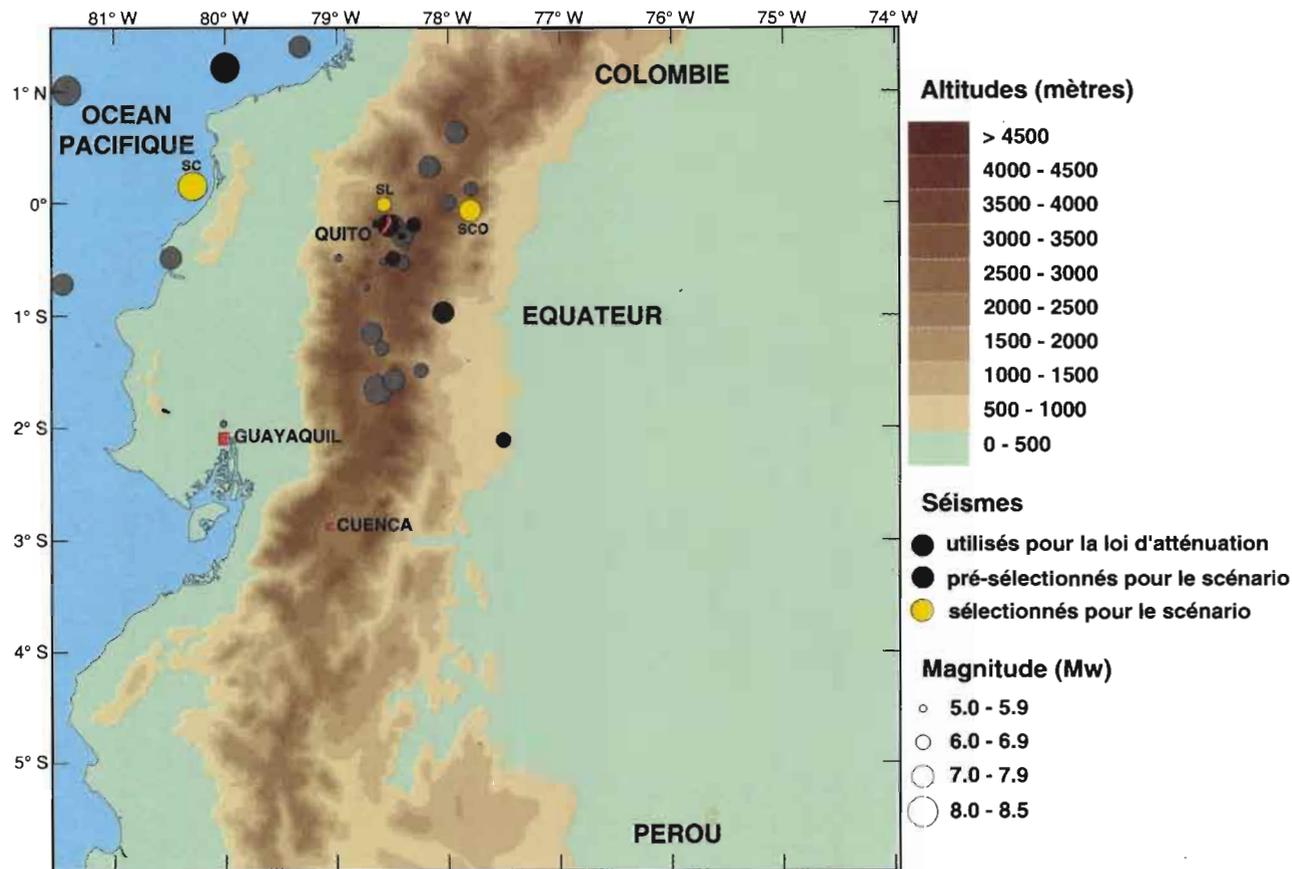


Fig. 6 - Carte montrant la localisation des 10 séismes les plus probables pouvant affecter la ville de Quito (ronds noirs et jaunes) et les 23 séismes utilisés pour établir la loi d'atténuation des ondes sismiques (ronds grisés). Les 3 séismes retenus pour cette étude sont représentés par les ronds jaunes (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.

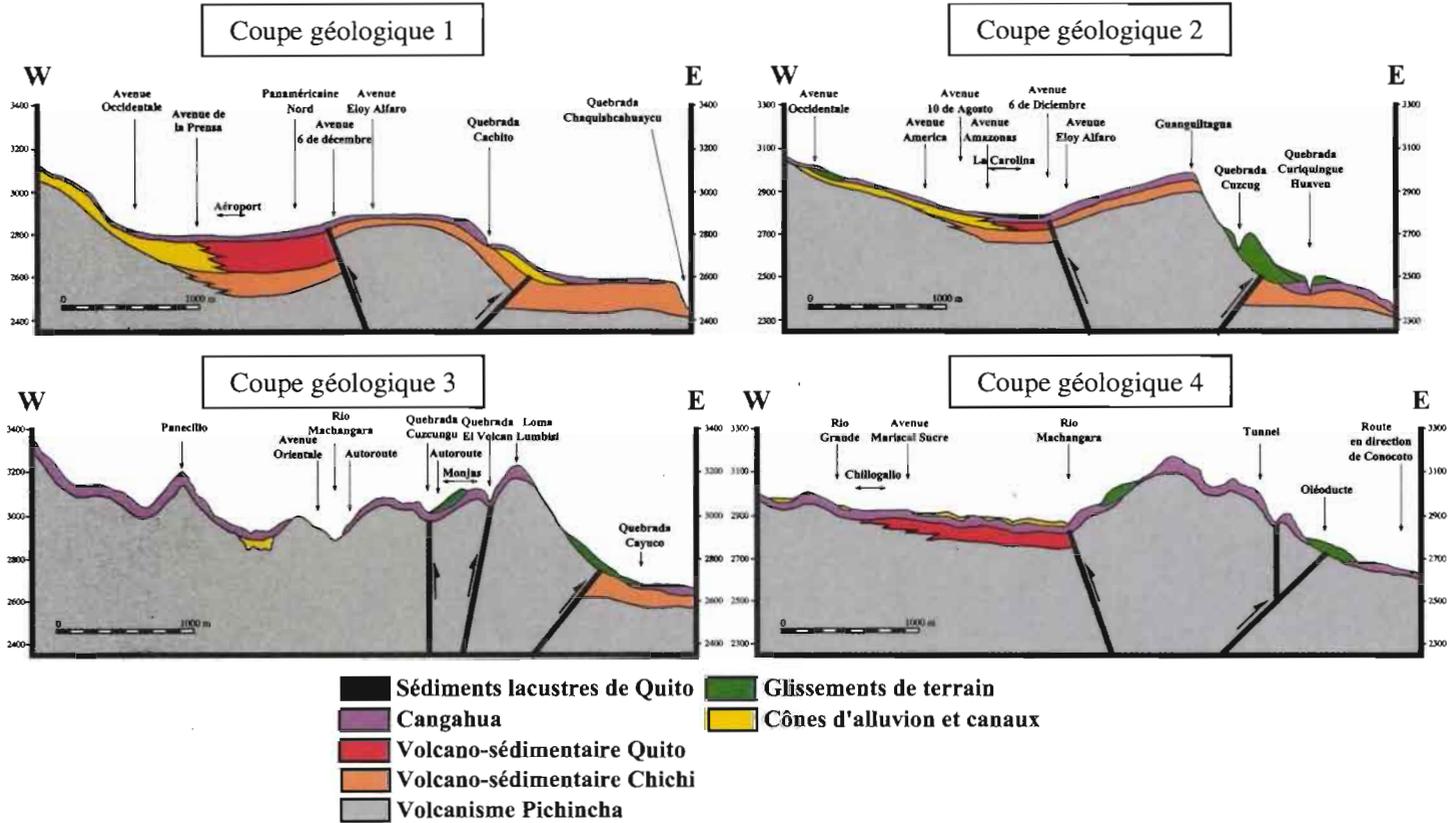


Fig. 7 - Les 4 coupes géologiques disponibles utilisées pour le zonage de la ville (la localisation des coupes est indiquée sur la figure 12).

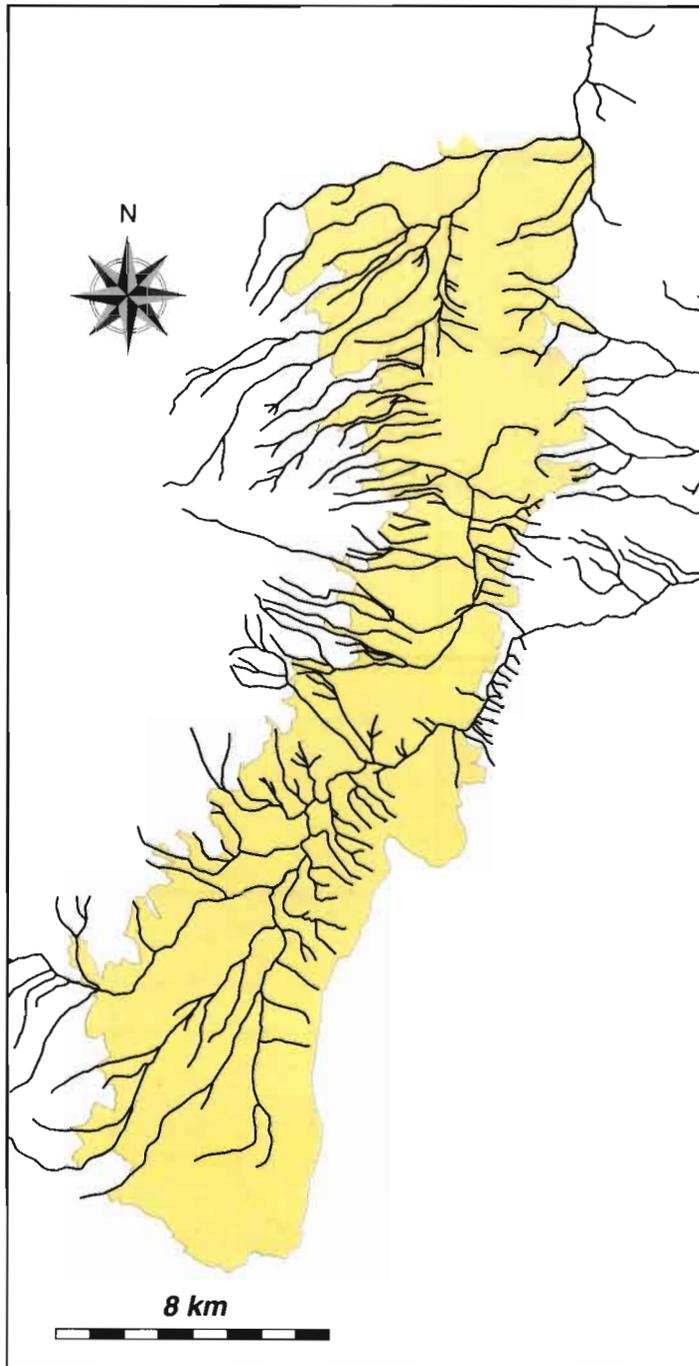


Fig. 8 - Carte montrant la répartition des ravines (*quebradas*) dans la ville de Quito.

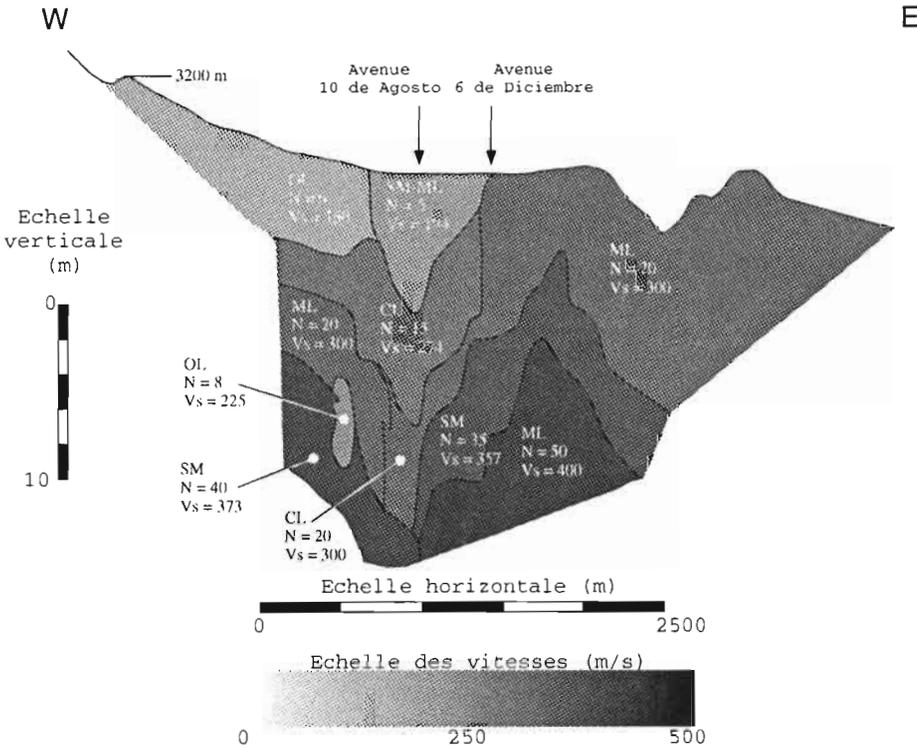


Fig. 9 - Exemple de profil de sol pour une zone de Quito ; SM-CL-ML-OL : types de sol du Système Unifié de Classification des Sols ; N : nombre de chocs lors des Tests Standard de Pénétration.

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).

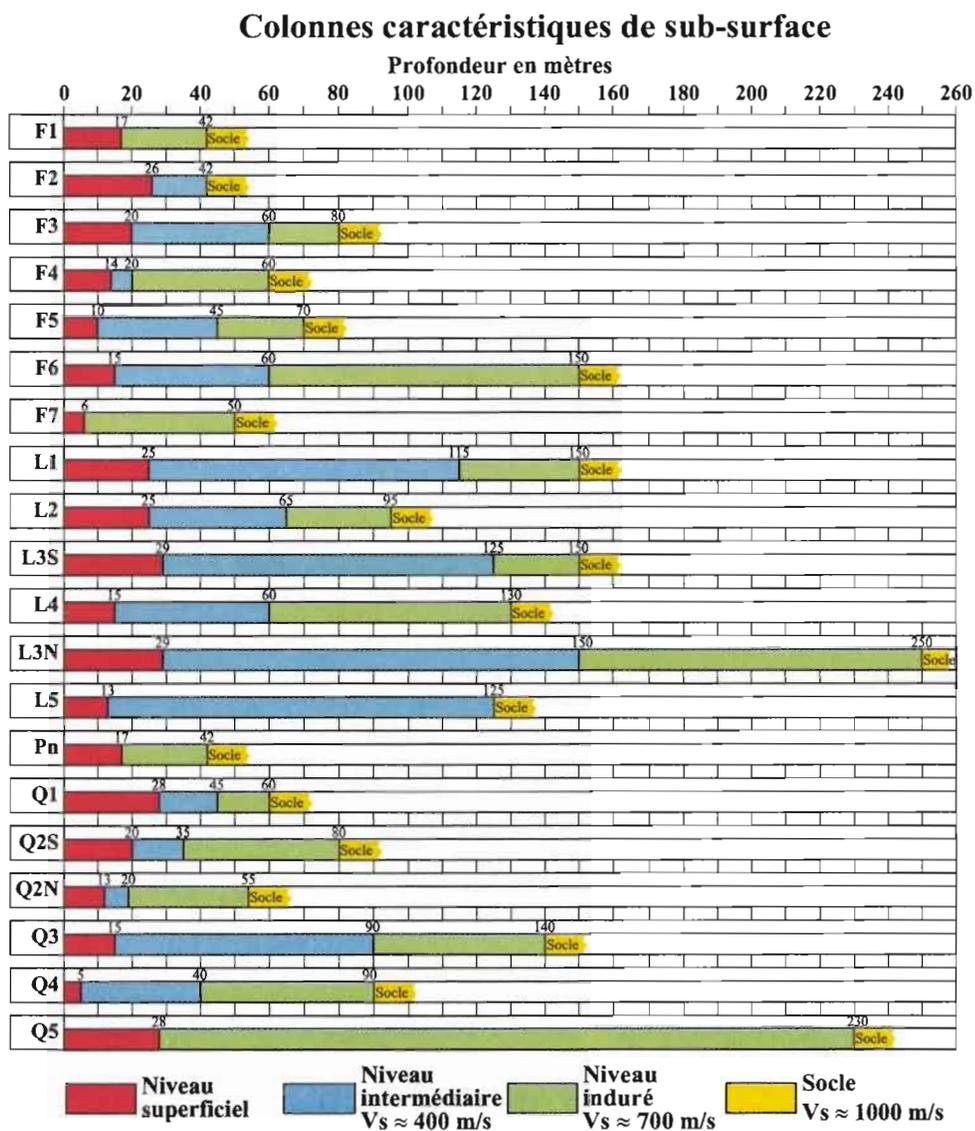


Fig. 10 - Colonnes de sub-surface caractéristiques des zones de la ville de Quito.

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 épiscopale 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) ;

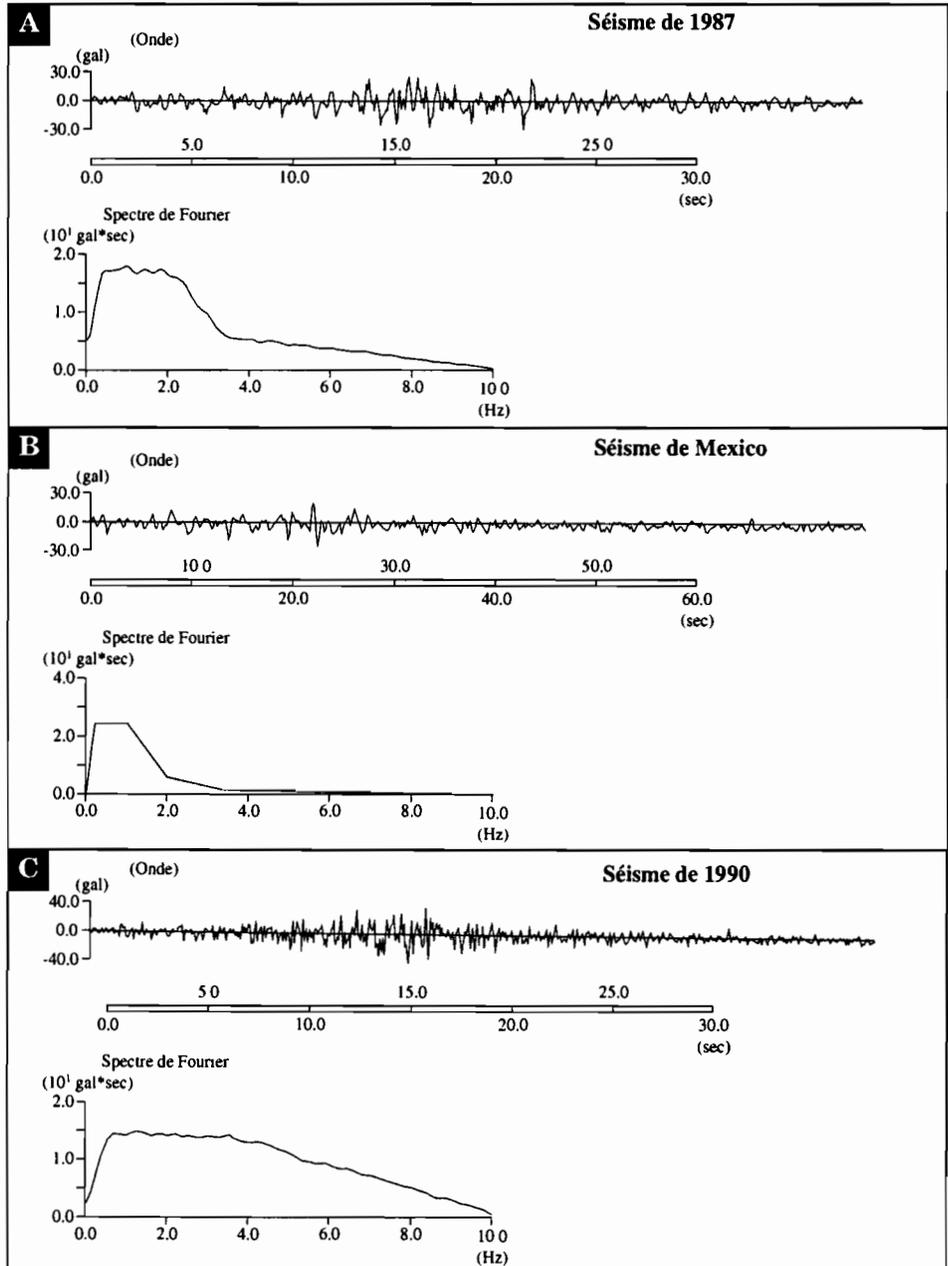


Fig. 11 - Accélérogrammes et spectres de Fourier utilisés pour l'étude de la réponse du sol et le calcul des intensités : (a) séisme de 1987, (b) séisme de Mexico, et (c) séisme de 1990.

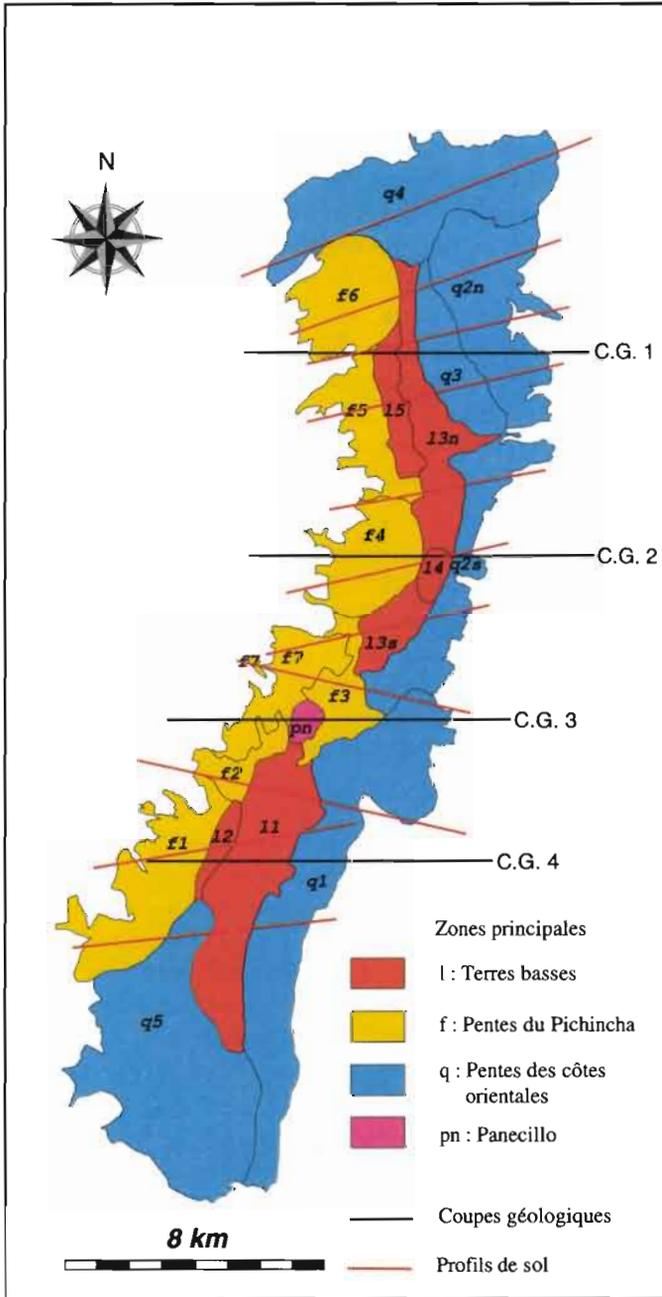


Fig. 12 - Zonage de la ville de Quito : (f) flancs du volcan Pichincha, (l) basses terres, (q) flancs des collines orientales et (Pn) Panecillo. Les lignes noires représentent la localisation des 4 coupes géologiques, les lignes rouges la localisation des 11 profils de sol utilisés pour le zonage.

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 structuraux 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

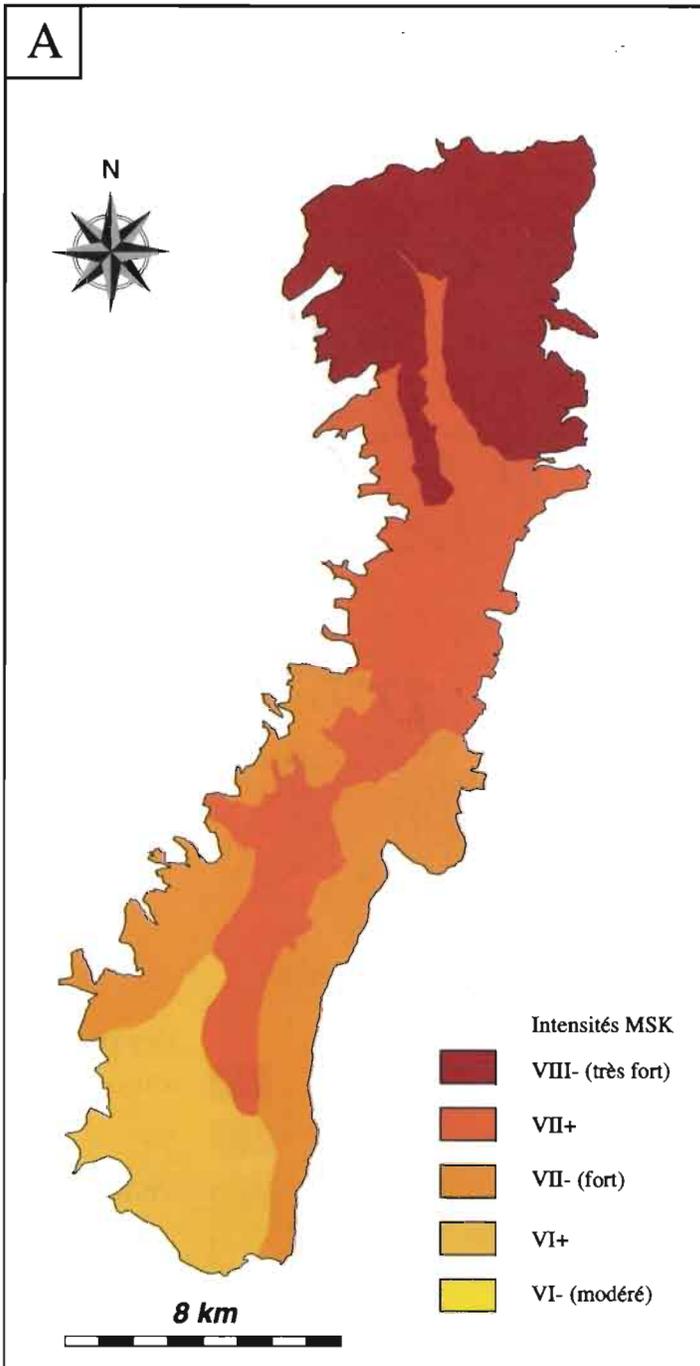


Fig. 13a - Carte de distribution des intensités produites par le séisme local.

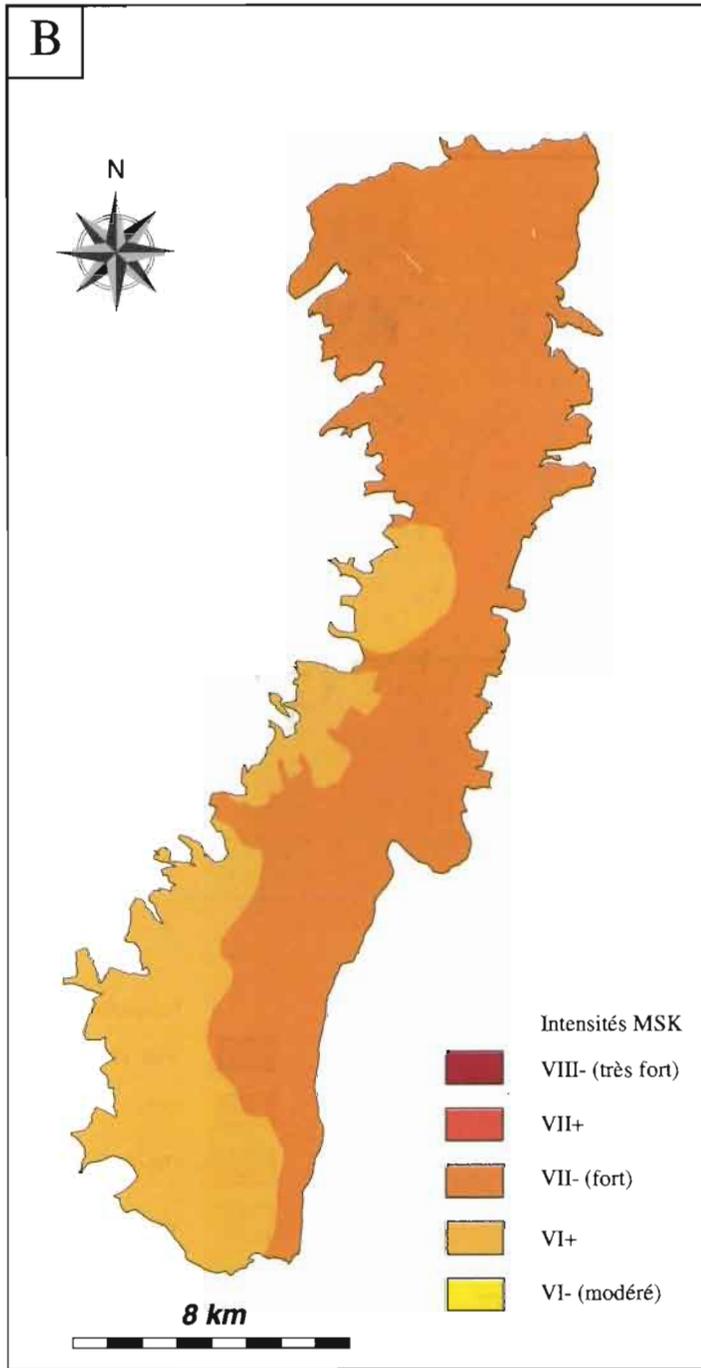


Fig. 13b - Carte de distribution des intensités produites par le séisme continental.

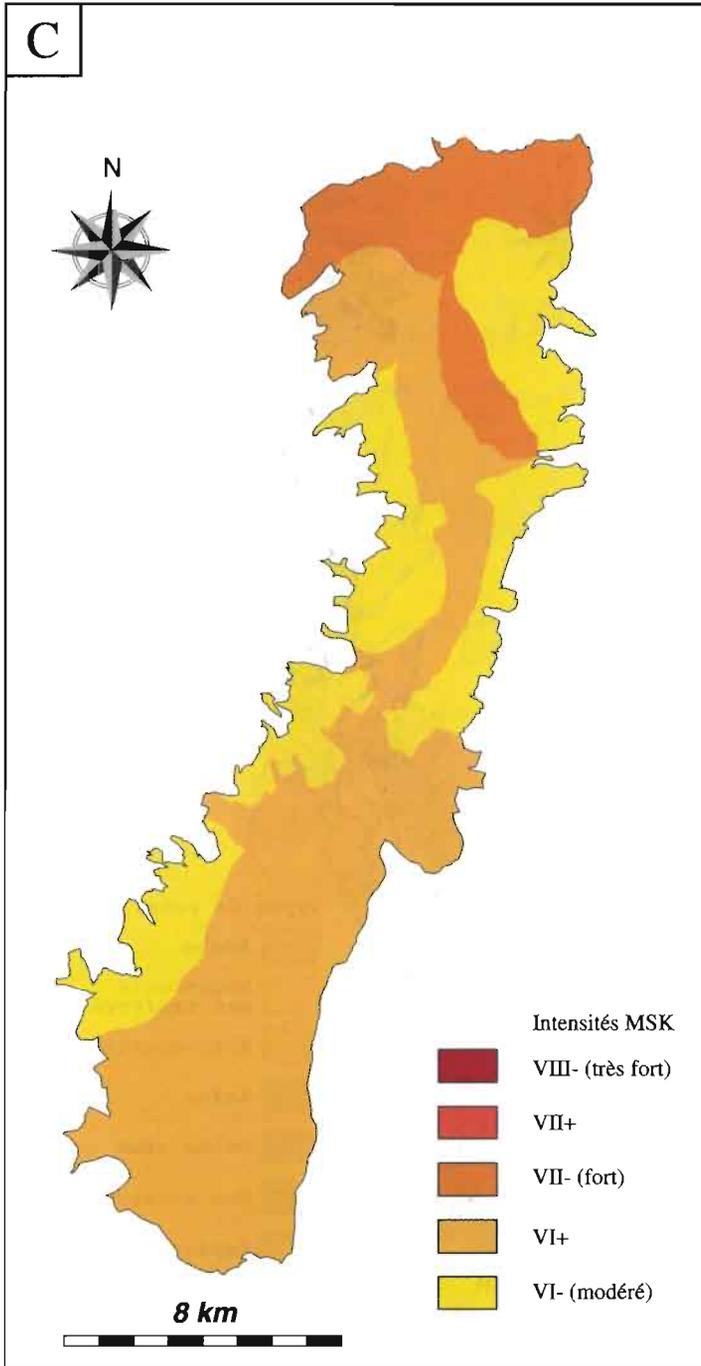


Fig. 13c - Carte de distribution des intensités produites par le séisme côtier .

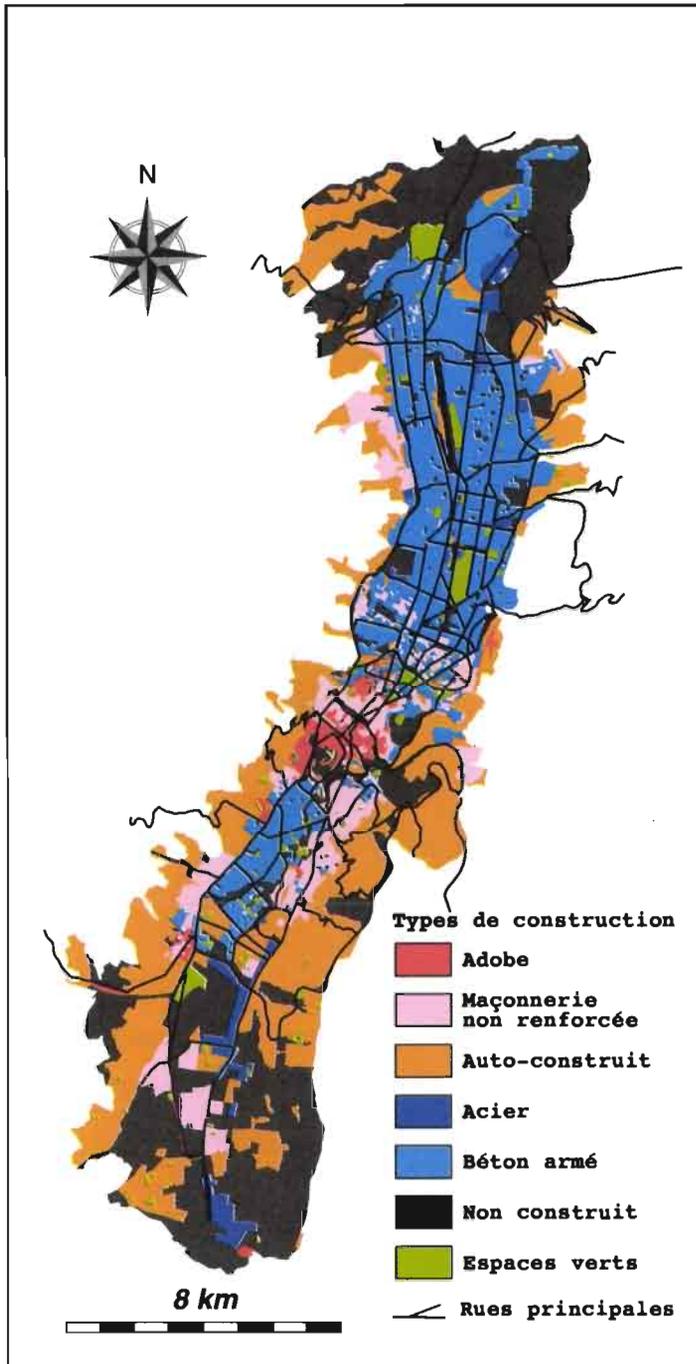


Fig. 14 - Carte de distribution des types de construction par îlot dans la ville de Quito.

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

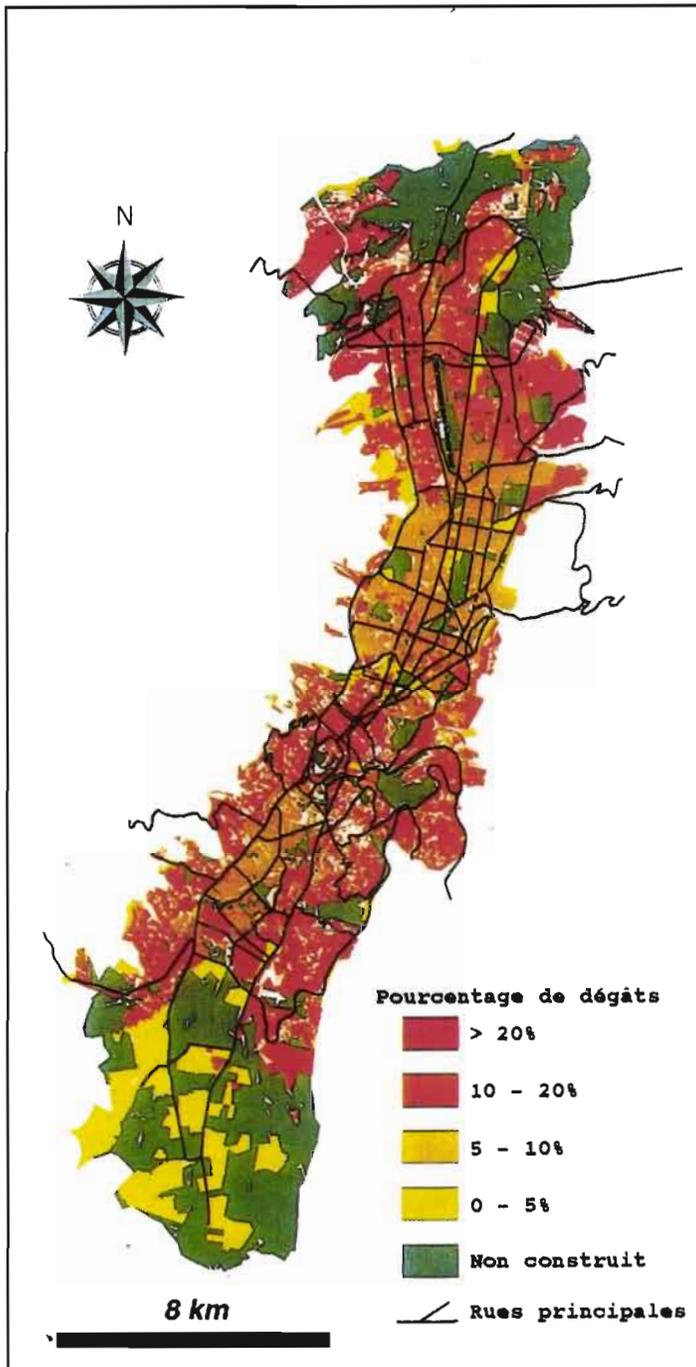


Fig. 15 - Carte de l'estimation des dégâts provoqués par le séisme local sur les bâtiments de Quito.

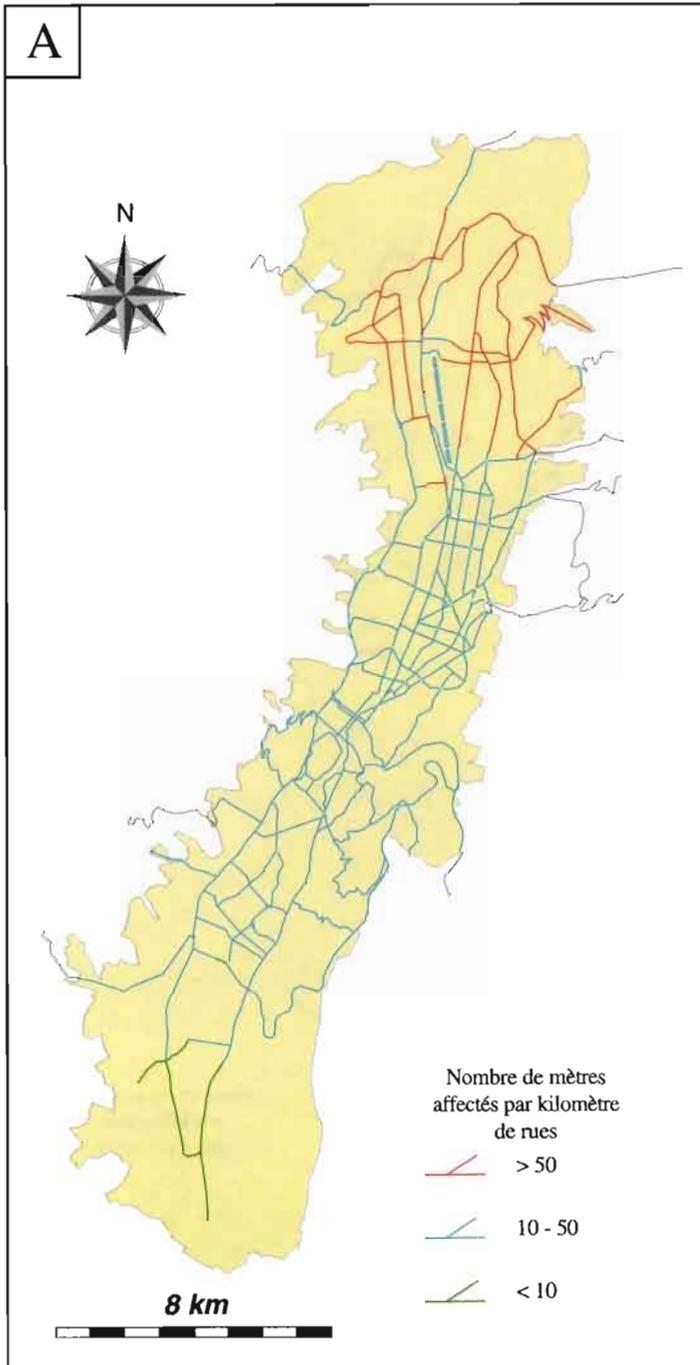


Fig. 16a - Carte de l'estimation des dégâts provoqués par le séisme local sur les réseaux principaux de voirie.

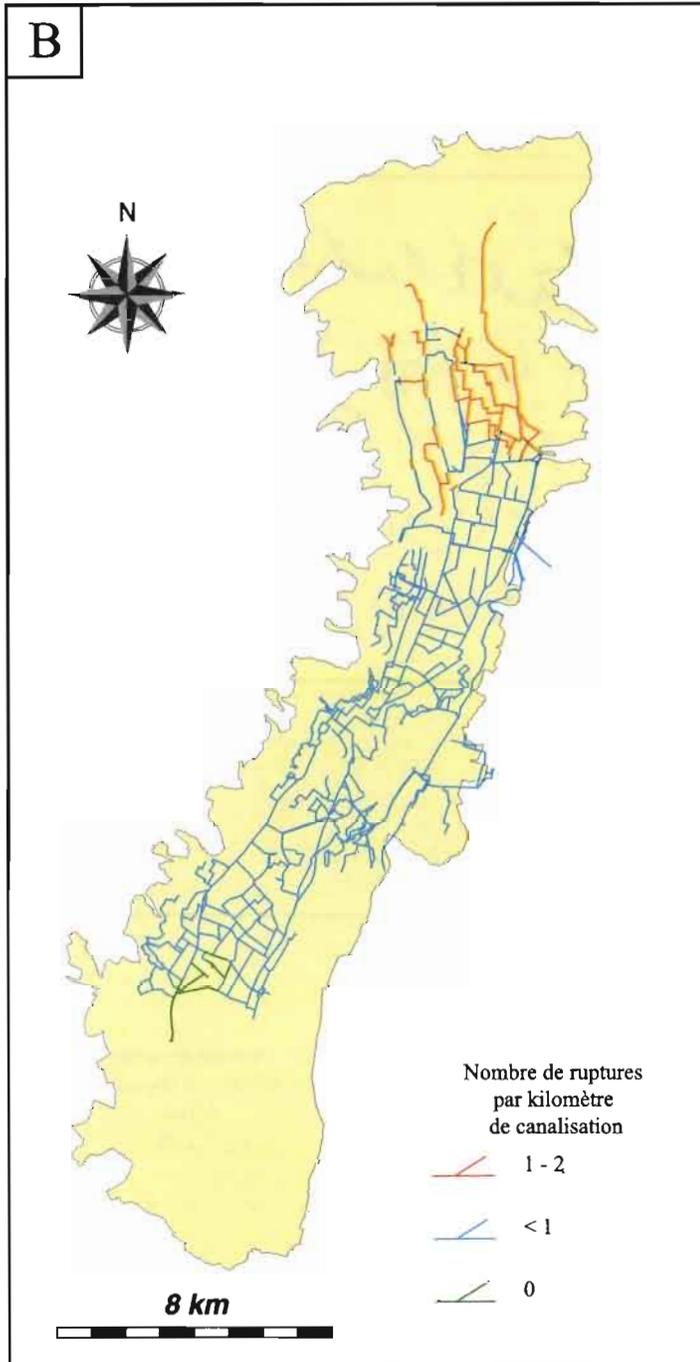


Fig. 16b - Carte de l'estimation des dégâts provoqués par le séisme local sur les réseaux de distribution d'eau.

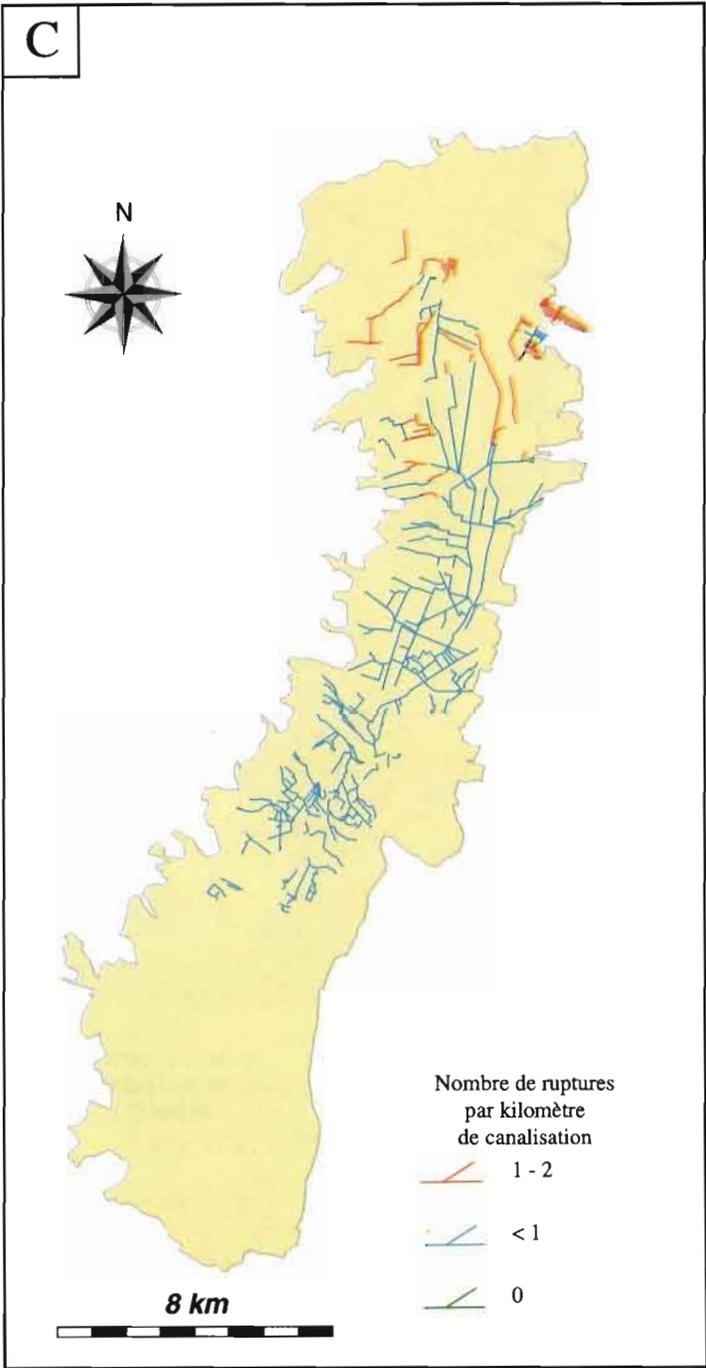


Fig. 16c - Carte de l'estimation des dégâts provoqués par le séisme local sur les réseaux principaux d'égouts.

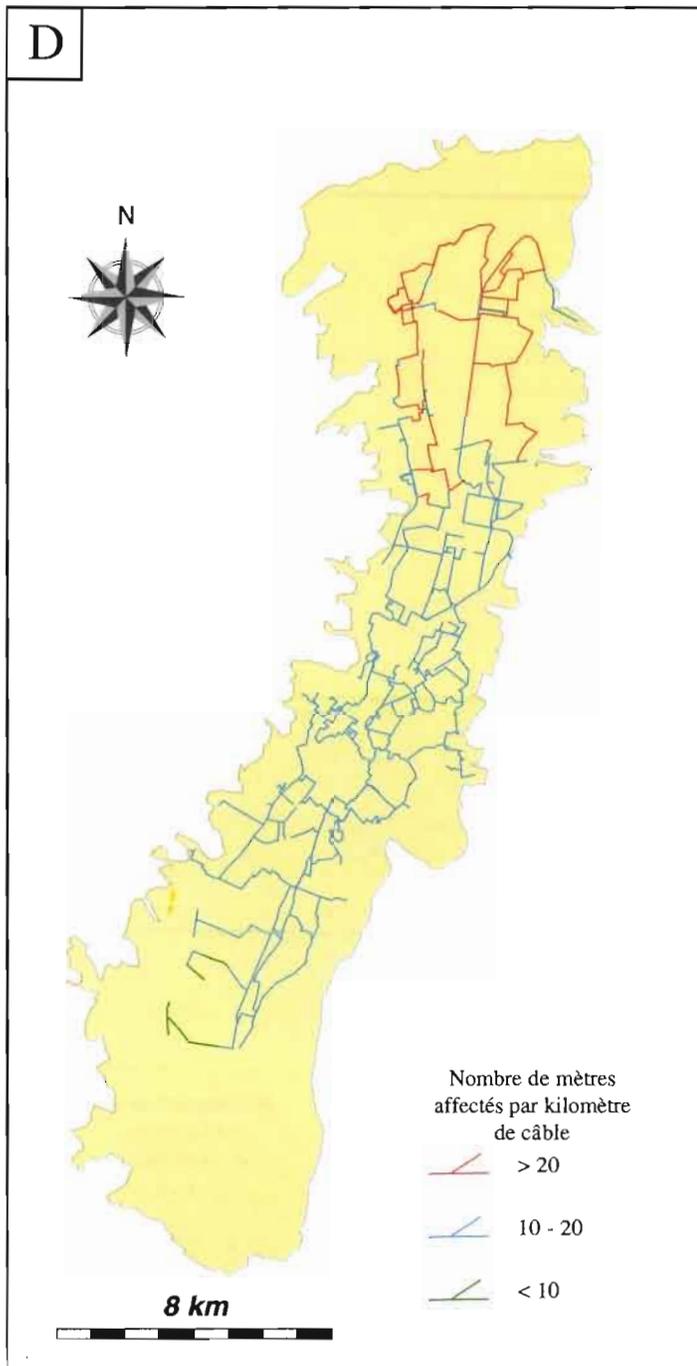


Fig. 16d - Carte de l'estimation des dégâts provoqués par le séisme local sur les réseaux principaux d'électricité.

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) ;

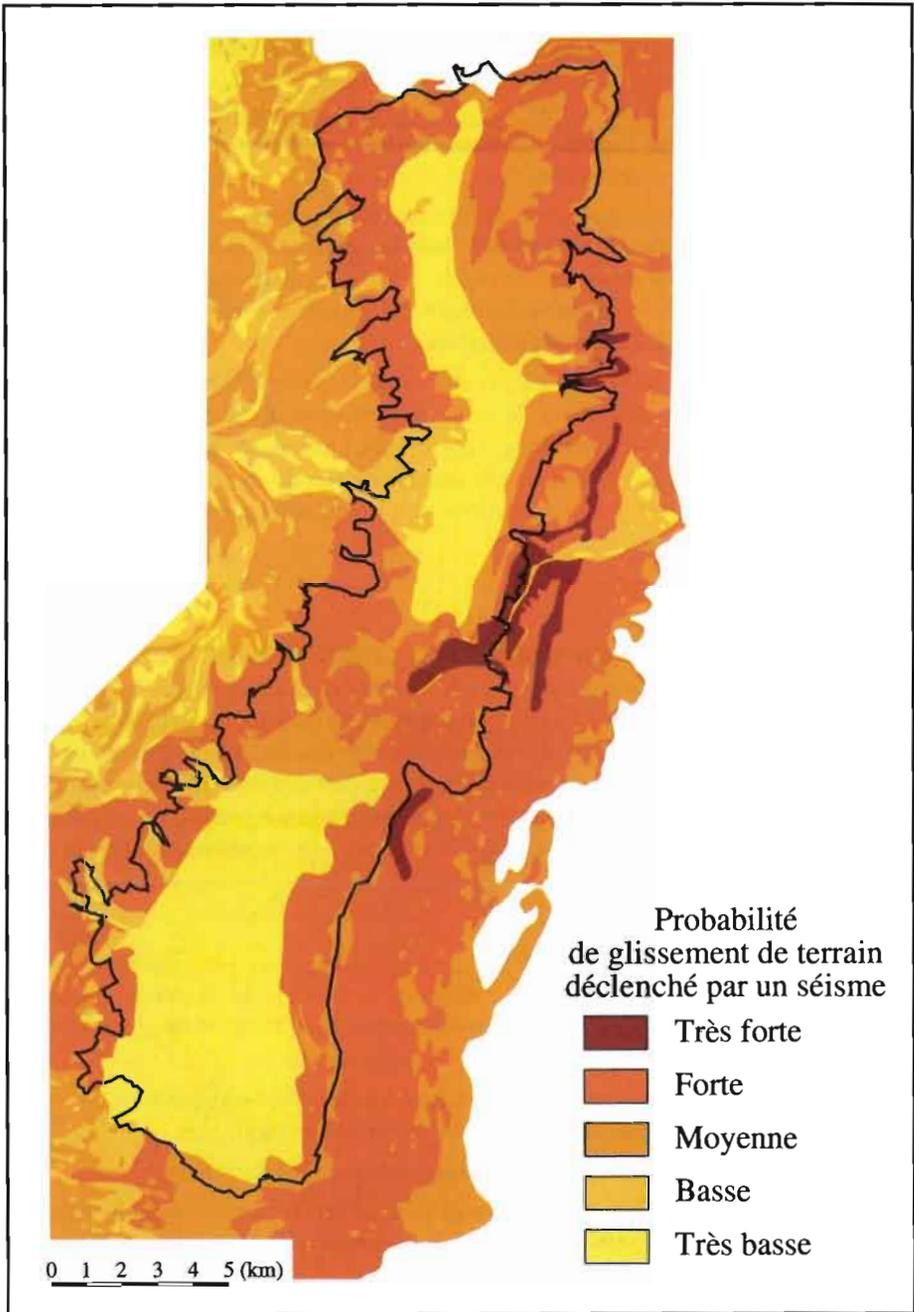


Fig. 17 - Carte de susceptibilité de glissements de terrain pour Quito et ses environs (les contours de la ville de Quito sont représentés en trait noir épais).

- 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 Publicación.
- 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.

1996

Tome 25
N° 3

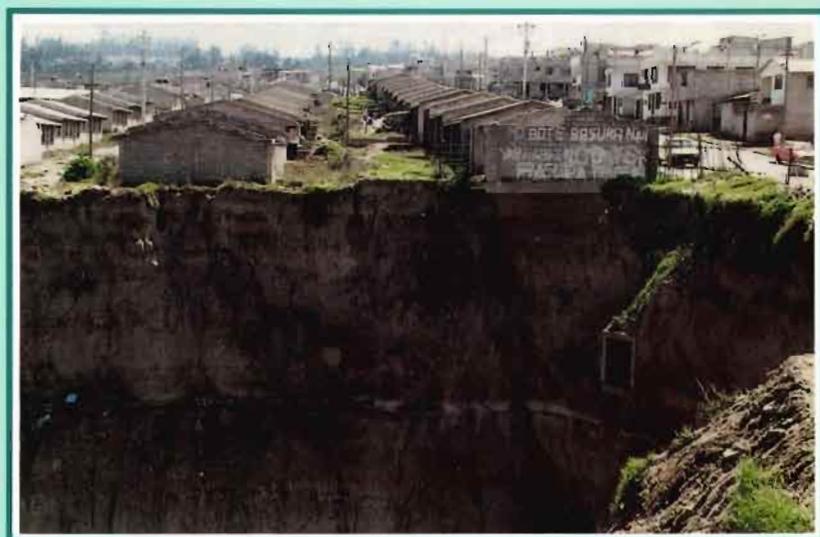
LIMA - PÉROU

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)