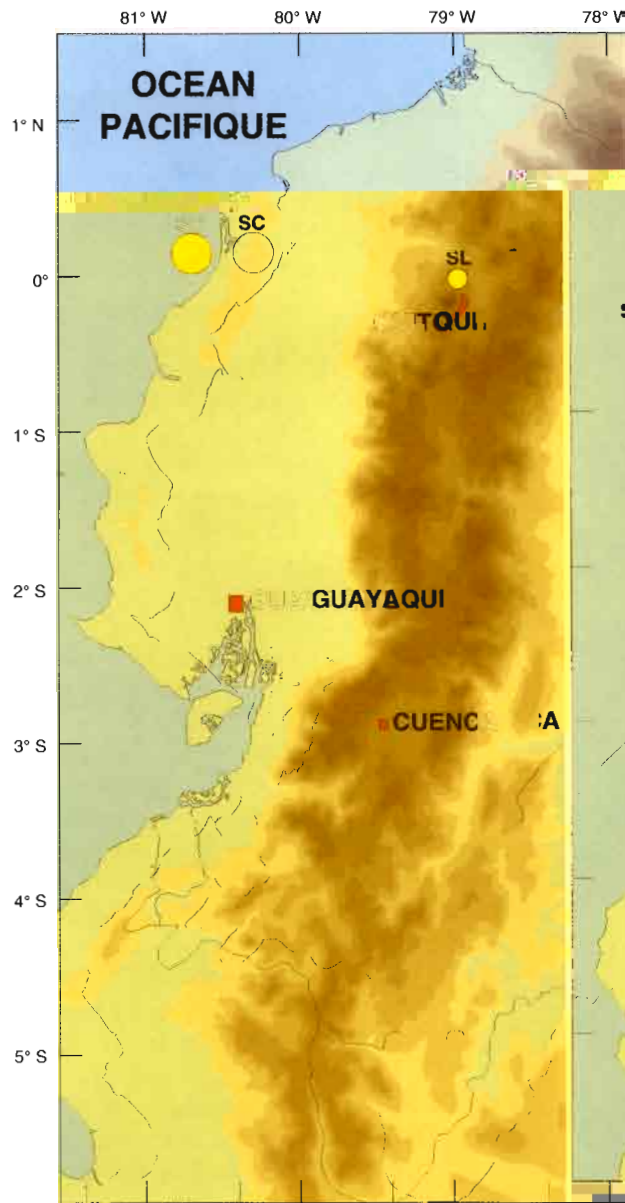


Un scénario sismique pour la ville de Quito

Si les zones de séismes sont actuellement connues, en revanche il n'est toujours pas possible de prévoir avec exactitude les tremblements de terre à court et moyen terme. Mais, plus que la date, le lieu, ou le mécanisme du prochain séisme pouvant affecter une ville, c'est finalement l'ensemble de ses conséquences socio-économiques qui importe et qu'il est nécessaire d'estimer. C'est ce qui a été fait en Californie et au Japon, où sont élaborés des scénarios sismiques. Ceux-ci s'attachent à définir les caractéristiques d'un séisme potentiel, à partir de la sismicité historique et du contexte tectonique régional, à 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, est réuni un ensemble de données, caractérisant l'habitat et les infrastructures urbaines. L'application de matrices standards permet alors d'obtenir une estimation des dommages et de leur distribution dans l'espace. Enfin, ces résultats, combinés avec d'autres études, permettent d'établir une série de recommandations pratiques dont l'objectif est de limiter les conséquences destructrices des séismes. L'Orstom et l'Ecole Polytechnique Nationale ont entrepris d'élaborer un tel scénario pour la ville de Quito.

Carte de l'Equateur
 Cette carte montre la localisation des 3 séismes étudiés dans le scénario, représentés par des ronds noirs. SL = Séisme local, SC = Séisme côtier, SCO = Séisme COntinental.

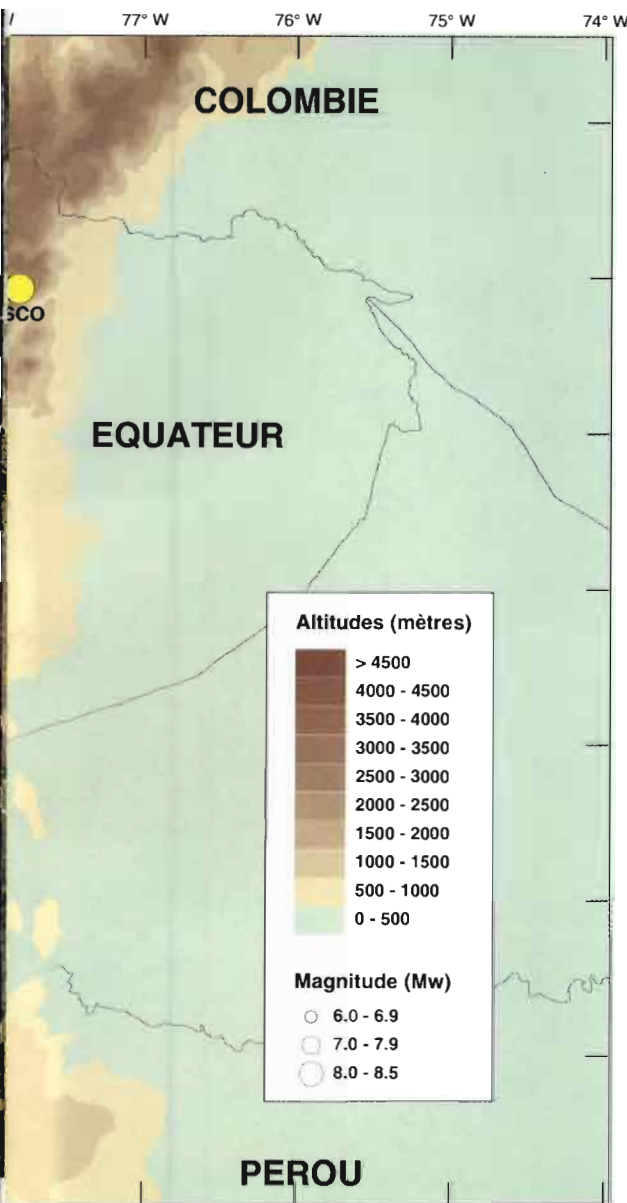


La situation de Quito justifiait à plus d'un titre l'élaboration d'un scénario sismique. Depuis la colonisation espagnole, 23 séismes d'intensité supérieure à 6 sur l'échelle de Richter ont été ressentis à Quito, dont 8 avec une intensité supérieure à 7. Le dernier séisme destructeur s'est produit en 1868. Celui de 1987, de moindre intensité, destructeur dans d'autres régions, a relativement peu affecté Quito.

Lors du séisme de 1868, Quito comptait 45 000 habitants sur 4 km²; maintenant l'agglomération comporte plus de 1 300 000 habitants sur une superficie cent fois plus grande et présente les caractères socio-économiques typiques d'une ville d'un pays en voie de développement. Il est donc évident que les seules données historiques ne peuvent servir à évaluer les risques liés aux tremblements de terre à Quito, puisque environ 90% de la ville n'ont jamais été soumis à une forte catastrophe sismique.

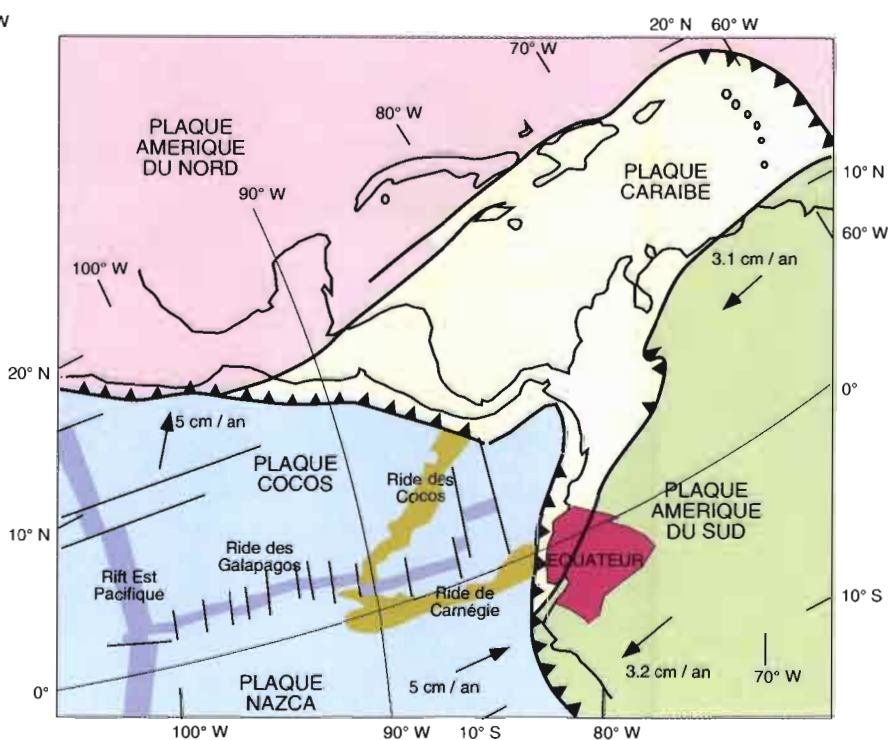
Vue générale de la ville de Quito.





LES DISPONIBILITÉS OFFERTES PAR LE SYSTEME D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE

Grâce à un projet de coopération scientifique entre la Direction de la Planification de la Municipalité de Quito et l'Orstom, la ville de Quito dispose depuis 1991 d'une base de données urbaines spatialisées, gérée par le Système d'Information Géographique (SIG) "Savane". L'existence de ce "Sistema Urbano de Informacion Metropolitana" (SUIM) a déterminé, en partie, le choix de la capitale équatorienne, et a permis la réalisation du scénario sismique. En effet, l'élaboration d'un tel scénario nécessite une information géographique importante et de bonne qualité. De plus, toutes les données doivent pouvoir être ramenées à une unité géographique commune pour l'application des matrices.



Face à ces exigences, le SIG est l'instrument le plus approprié. Il permet d'effectuer le regroupement et d'assurer la cohérence géographique de l'information, facilite sa gestion et sa consultation, permet d'effectuer les changements d'échelles, les agrégations et les croisements nécessaires à l'élaboration du scénario.

La base de données urbaines de Quito contenait déjà une bonne partie de l'information requise pour l'élaboration du scénario. Toute l'information topographique (pente, altitude) a pu être déduite de modèles numériques de terrain construits par "Savane" à partir des courbes de niveaux et points cotés numérisés dans la base.

Se posait le problème de la définition du découpage spatial permettant l'application des matrices de calcul. Nous aurions pu créer un maillage arbitraire pour agréger les données spatiales, comme cela se fait habituellement, mais nous avons préféré utiliser le découpage en îlot, unité spatiale d'agrégation des informations du recensement (population et logements) utilisée dans la base.

D'importantes difficultés sont apparues : le contenu de certaines données était inadapté aux caractéristiques requises pour les évaluations techniques (cas des données du recensement décrivant le logement), l'information n'avait pas toujours été actualisée, ou elle était purement et simplement absente (ce fut le cas pour la plupart des informations sur les réseaux). Pour combler ces lacunes, il n'a été que très exceptionnellement nécessaire de se livrer à des enquêtes directes. Dans la plupart des cas, l'information manquante existait, éparpillée dans divers services de différentes institutions équatoriennes.

Carte tectonique
La tectonique des plaques est un élément majeur de la compréhension des phénomènes de surrection des chaînes de montagne. Depuis une trentaine de millions d'années (début de la formation des Andes), c'est la direction et la vitesse de convergence, entre les plaques Nazca-Cocos et Amérique du Sud-Caraïbe, qui semblent contrôler la géométrie et la cinématique de la chaîne andine.

Figure 1

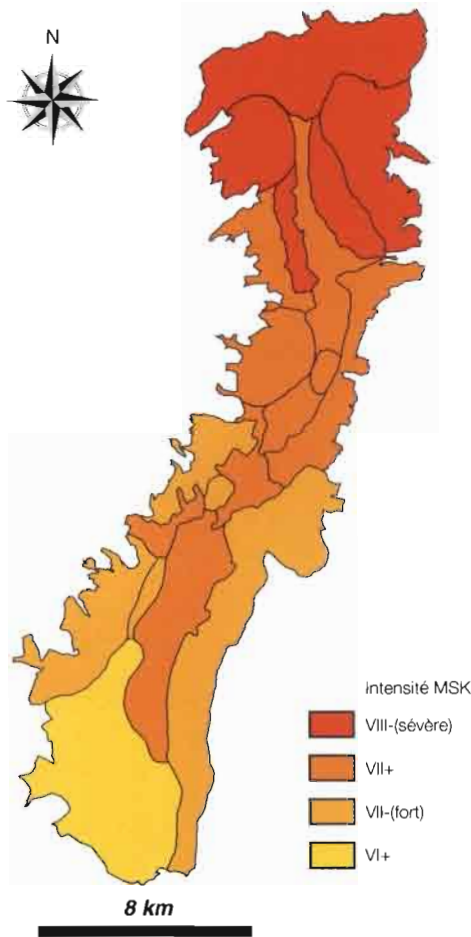


Figure 2

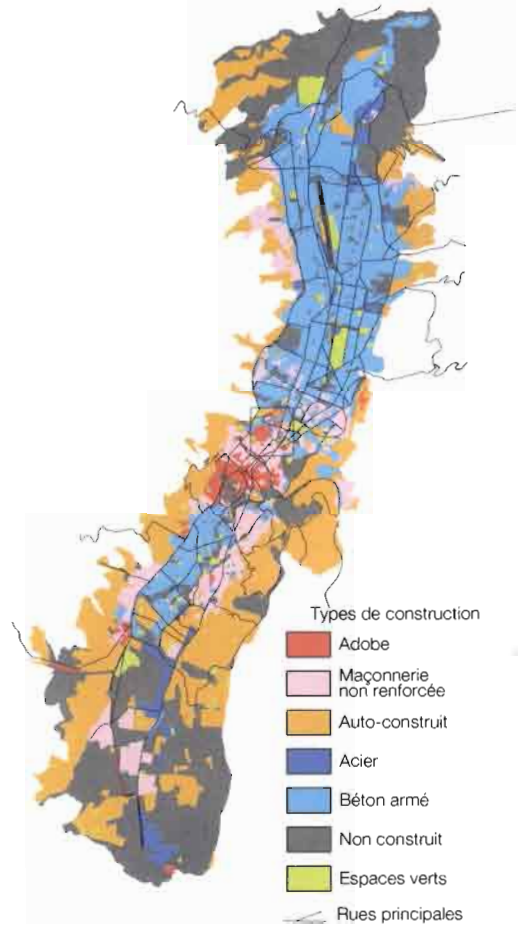


Figure 1 : intensités produites à Quito par le séisme local

Figure 2 : distribution des types de construction par îlot dans la ville de Quito

Figure 3 : Estimation des dégâts provoqués par le séisme local sur les bâtiments

.....



Eglise de la Merced, centre historique. Clocher ayant subi le séisme de 1987 et désormais protégé contre les dégâts.

Pour en savoir plus

Chatelain J.-L., H. Yepes, B. Guillier, J. Fernandez, J. Valverde, F. Kaneko, M. Souris, E. Duperier, G. Hoefler, T. Yamada, G. Bustamante, B. Tucker, C. Villacis, 1994, Les scénarios sismiques comme outils d'aide à la décision pour la réduction des risques : Projet Pilote à Quito, Equateur, *Revue de Géographie Alpine.*, Tome LXXXII, n°4, 131 - 150.

Chatelain J.-L., H. Yepes, B. Guillier, J.

Fernandez, J. Valverde, M. Souris, B. Tucker, G. Hoefler, F. Kaneko, T. Yamada, G. Bustamante, C. Villacis, 1995, Earthquake Risk Management Pilot Project in Quito, Ecuador, soumis à *GeoJournal.*

Del Pino y Yepes, 1990, Apuntes para una historia sismica de Quito. Centro Histórico de Quito. Problemática y perspectivas, *Dirección de planificación Ilustre Municipio*

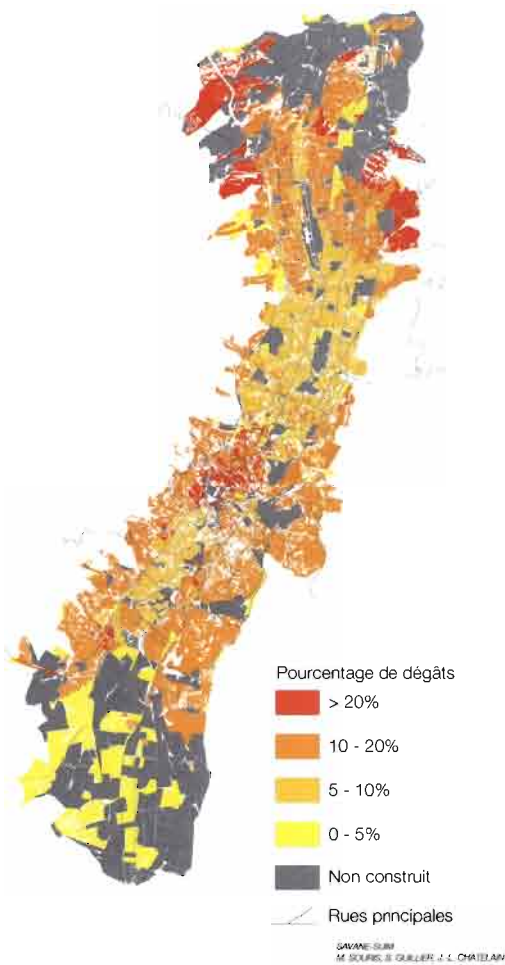
de Quito, Ecuador. **Escuela Politecnica Nacional,** GeoHazards International, Ilustre Municipio de Quito, Orstom, Oyo Corp., 1994a, The Quito, Ecuador, Earthquake Risk Management Project: An Overview, *GeoHazards International Publication,* San Fransisco, USA. **Escuela Politecnica Nacional,** GeoHazards International, Ilustre Municipio de Quito, Orstom, Oyo Corp., 1994b, The Quito,

Ecuador, earthquake risk management project: a compilation of methods, Data, and Findings, *Oyo Corp. Publication,* Japon.

Godard R., Maximy R. de, Souris M., 1993, Du SIG à l'Atlas Infographique de Quito, *Mappemonde,* 3, 35 - 40

Souris M., Lepage M., Pelletier F., 1984-1994, Le Système d'Information Géographique Savane, Logiciel Orstom.

Figure 3



Les réunions avec les principaux décideurs et gestionnaires urbains ont été l'occasion d'une prise de conscience de l'intérêt de l'élaboration d'un scénario sismique pour la ville.

Dans le cas du logement, le problème était différent : les critères descriptifs utilisés par l'institut de recensement ne correspondaient pas aux normes techniques permettant d'évaluer les capacités de résistance des bâtiments. L'information était donc inutilisable. Pour lever cette difficulté, les experts de l'Escuela Politecnica Nacional (EPN) de Quito se sont livrés à une enquête de terrain qui a permis de collecter l'information manquante. Il faut souligner l'engagement pris à cette occasion par les responsables de l'Instituto Nacional de Estadísticas y censos (INEC) d'intégrer ces critères lors du prochain recensement.

Notre connaissance des difficultés habituellement rencontrées pour accéder à l'information dans les pays en développement nous amène à souligner la rapidité



Après le séisme de 1987, consolidation en cours d'une maison en briques.

Nous remercions les équipes de GeoHazards International, Oyo Corporation, de la Municipalité de Quito, des services de l'Escuela Politecnica Nacional de Quito et de l'Institut français d'Etudes Andines pour leur participation à la réalisation du scénario, ainsi que B. Lortic,

J. 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.

Earthquake scenarios for the town of Quito

While one cannot accurately forecast the occurrence of earthquakes, one can define the probable characteristics and impact of future quakes. Essential data concern the region's tectonics and history of seismic activity and the likely intensity of a quake in different areas, according to topography, surface geology, soil mechanics, settlement patterns, urban infrastructures etc. Standard matrices can then be applied to estimate the likely pattern of damage and to make practical recommendations for damage limitation.

Scenarios of this kind have been drawn up for California and Japan, and Orstom set out to do the same for the particularly vulnerable city of Quito, Ecuador (pop. 1,300,000).

Orstom had already built up a computerized database on the town, based on the iSavane geographical information system and incorporating a mass of information on the city's physical geography, infrastructures, land use, census data, etc., which can be mapped and compared using the GIS. This proved immensely useful.

Gaps in the database were mainly filled by consulting the authorities concerned.

Only one field survey proved necessary, concerning the seismic resistance of its buildings; experts from Quito's

Escuela Politecnica Nacional ran the survey, and the Ecuador National Statistics Institute has agreed to incorporate this information in future censuses.

It was found that the city's uncontrolled growth has resulted in unplanned housing that meets no safety norms, and on hillsides that are particularly vulnerable to landslide.

Three earthquake scenarios were chosen, of different magnitudes and at distances of 25 to 200 km. Intensity and likely damage levels were calculated for each housing block in the city.

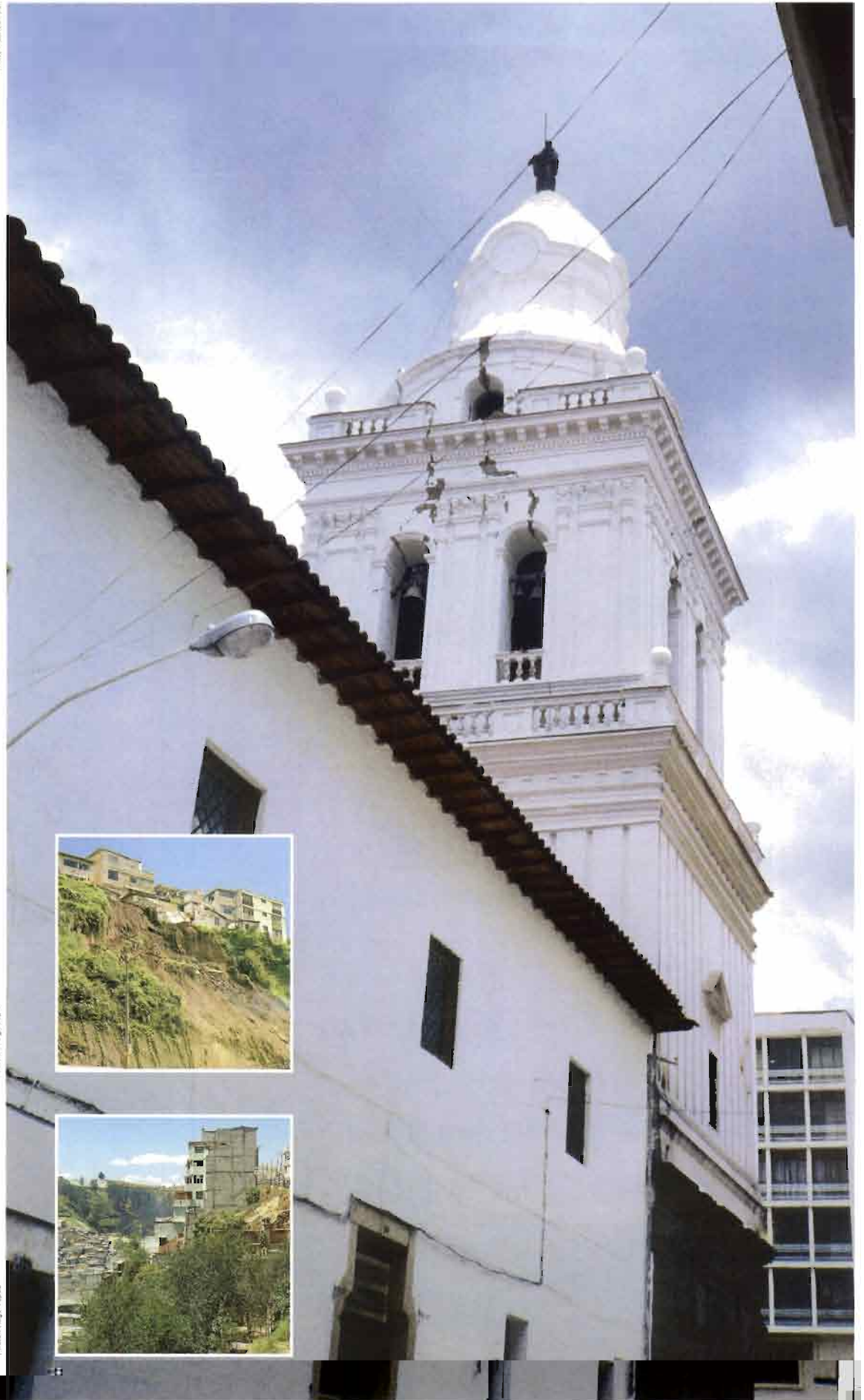
The results showed how vulnerable this city is: a local quake of 6.5 on the Richter scale would severely damage 20% of the town's buildings, while it would take at least three months to re-establish normal distribution of drinking water, and six months for the sewers.

The project was a model of collaboration between French, Ecuadorian, US and Japanese organizations, and also showed the great potential value of GIS-based urban information systems. The work will continue: these scenarios will be updated at intervals, other scenarios examined. Meanwhile, Quito's town planners and managers are much more aware than before of the real implications of earthquake hazard for Quito.

Photo : Carlos Abiel

Fissures sur la tour de l'église San Agustin, dues au tremblement de terre de 1987.

.....



Constructions exposées à un risque élevé de glissements de terrain, pouvant être déclenchés par un séisme.



Photo : Hugo Yáñez

Constructions informelles en maçonnerie ne répondant pas aux normes de sécurité.

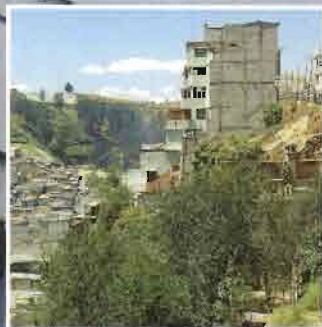


Photo : Hugo Yáñez

avec laquelle la collecte a ici été effectuée. Elle prouve qu'un projet mobilisateur (le scénario sismique), appuyé sur une technologie de gestion des données souple et ouverte (le SIG), peut, à l'occasion, donner l'opportunité d'abaisser les barrières inter-institutionnelles. Le SIG s'est avéré indispensable, non seulement pour les traitements auxquels il permet de soumettre l'information spatiale, mais aussi et surtout pour la mobilisation des capacités d'échange et de communication de l'information qu'il a suscitée.

SIMULATION DES CONSÉQUENCES DE SÉISMES DESTRUCTEURS DANS L'ESPACE URBAIN

La définition des caractéristiques d'un séisme potentiel repose sur les données de la sismicité historique et du contexte tectonique régional. Plusieurs séismes potentiels sont pris comme hypothèses de départ. Pour Quito, sur toutes les sources sismiques possibles, trois séismes ont été sélectionnés (cf. carte) :

- 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.

A partir des données de topographie, de géologie de surface et de caractéristiques des sols, une carte des zones homogènes dans leur comportement sismique est établie. Ensuite, pour chacun des séismes potentiels retenus, on calcule, dans ces zones, l'intensité produite en fonction de la magnitude du séisme, de la distance de la ville à l'hypocentre, et de l'atténuation des ondes sismiques. On obtient ainsi la carte de distribution des intensités sismiques.

Le SIG permet d'attribuer une intensité pour chaque îlot à partir de celles calculées dans les zones. Puis, en croisant les données d'intensité sismique (Fig. 1) avec celles concernant le type de bâti dominant (Fig. 2), on obtient l'évaluation des dégâts pour chaque îlot (Fig. 3). Le calcul utilise des matrices standards obtenues à partir d'observations historiques. Les seules matrices disponibles sont californiennes ou japonaises. Elles ont été adaptées au cas de Quito pour ce projet. D'autres matrices sont utilisées pour obtenir l'évaluation par îlot des pertes en vies humaines, en fonction des dégâts estimés et des données de population. Les dommages subis par les réseaux ont été calculés dans chaque zone d'intensité sismique homogène.

Enfin, des matrices différentes ont permis d'évaluer le temps nécessaire à la remise en fonctionnement des réseaux. Les délais calculés ont été réajustés sur la base des entretiens réalisés avec les responsables de ces réseaux, car les matrices temporelles standards (japonaises) sont les plus sensibles aux conditions locales.

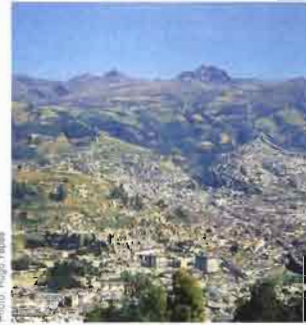
Les résultats montrent la forte vulnérabilité de

Quito en cas de séisme violent : dans le cas du séisme local, environ 20% du parc immobilier subirait d'important dommages (supérieur à 20 % du coût de la construction), et il faudrait au moins trois mois pour rétablir un service normal de distribution d'eau potable, six mois pour les égouts...

UN OUTIL POINTU D'AIDE À LA DÉCISION

Ce projet est exemplaire sur le plan de la coopération : il a impliqué plusieurs départements de l'Escuela Politecnica Nacional de Quito (géophysique, géologie, génie civil, mécanique des sols), la Municipalité de Quito, GeoHazards International (USA), Oyo Corporation (Japon), l'Orstom, et l'Institut Français d'Etudes Andines. La collaboration étroite entre ces organismes a permis de réaliser ce projet dans un délai très court (septembre 1992 - mars 1994).

Ce scénario n'est que la première étape de l'étude de la vulnérabilité sismique de la ville. Il a servi principalement à faire prendre conscience aux responsables des services de la ville de la réalité des problèmes de vulnérabilité sismique de Quito, grâce aux documents concrets produits à l'aide du SIG (cartes des intensités et des dégâts notamment).



Vue générale de la ville de Quito. En arrière-plan, développement de la ville sur les flancs du volcan Pichincha, particulièrement exposés aux glissements de terrain.

Escenarios sísmicos para la ciudad de Quito

La ocurrencia de un sismo no puede predecirse con exactitud, sin embargo es posible definir las probables características y el impacto de un futuro terremoto. La topografía, la geología, los mecanismos del suelo, los patrones de asentamiento, la infraestructura urbana, etc., proporcionan datos esenciales sobre la región tectónica, la historia de la actividad sísmica y la probable intensidad de un sismo en diferentes zonas, lo que permite aplicar matrices estándares para calcular el patrón de daños y brindar recomendaciones para limitarlos.

En Japón y en California ya se han trazado escenarios de este tipo; Orstom comenzó la misma tarea en Quito, Ecuador (1, 300, 000 hab.), ciudad muy vulnerable donde construyó una base de datos computarizada basándose en el sistema de información geográfica "Savane", y reuniendo datos sobre la geografía física, la infraestructura, el uso de suelo, las estadísticas, etc. Estos datos pueden trazarse en un mapa y compararse por medio del SIG, lo que resultó muy útil.

Los datos faltantes se resolvieron al consultar a las autoridades correspondientes. Sólo fue necesario realizar una investigación de campo sobre la resistencia sísmica de los edificios; expertos de la Escuela Politécnica Nacional

de Quito llevaron a cabo la encuesta y el Instituto Nacional de Estadística ha aceptado incorporar los resultados en censos futuros. Se descubrió que, como consecuencia de la explosión demográfica, muchas viviendas no cumplen con las medidas de seguridad y algunas, además, están construidas en colinas vulnerables a los deslizamientos.

Se eligieron tres escenarios de diferentes magnitudes y a distancias entre 25 y 200 Km. Para cada cuadra de la ciudad se calcularon los niveles de intensidad y de daños. Los resultados mostraron la grave vulnerabilidad de la ciudad: un sismo local de 6.5 en la escala de Richter dañaría seriamente el 20% de los inmuebles de la ciudad mientras que restablecer la distribución del agua potable llevaría 3 meses y 6 para el drenaje.

El proyecto, modelo de colaboración entre organizaciones francesas, ecuatorianas, norteamericanas y japonesas, mostró el gran potencial de los sistemas de información urbana basados en el SIG. Los trabajos continúan y estos escenarios se actualizarán. Mientras tanto, las autoridades políticas y económicas de Quito están ahora mucho más conscientes de las serias consecuencias que acarrearía un sismo en la ciudad.

Sur les flancs de la vallée de la rivière Machangara, une urbanisation sauvage en position dangereuse sur une très forte pente.



Photo: Hugo Yegor

Autopont dans la ville. Structure très vulnérable de par son type de construction en cas de séisme.



Photo: Hugo Yegor

Cette étude devra être complétée par l'estimation des risques liés à d'autres séismes (au Sud de la ville, par exemple). Les scénarios devront être mis régulièrement à jour, afin que les problèmes liés aux séismes destructeurs puissent être pris en compte dans la planification du développement de la ville. Enfin, il faudra prolonger cette étude dans d'autres directions, notamment vers l'analyse des dimensions sociales et politiques de la vulnérabilité (le gouvernement peut-il et/ou veut-il utiliser une telle étude ?) et un bilan des capacités de résistance de la ville différenciées dans l'espace.

Finalement, ce projet a permis de mettre en valeur la puissance du SIG pour les études de vulnérabilité. Sans une base commune regroupant toutes les données concernant la ville, provenant de sources très variées, il aurait été très difficile, sinon impossible de mener à terme ce projet. A partir de cette base de données il est ensuite aisé d'obtenir tous les croisements nécessaires. D'autre part, la facilité de mise à jour de la base de données permet une actualisation régulière du scénario, fournissant ainsi aux services concernés un outil pointu d'aide à la décision face aux risques sismiques. De plus, le SIG offre la possibilité de produire des documents très démonstratifs, permettant de convaincre les responsables des secteurs politiques et économiques de la réalité du risque ■

J.-L. Chatelain^{1,2}, B. Guillier^{1,2}, H. Yepes², J. Fernandez², J. Valverde², M. Souris^{1,3}, E. Dupérier^{1,3}, B. Tucker⁴, G. Hoefler⁴, F. Kaneko⁵, T. Yamada⁵, G. Bustamante³, C. Villacis⁵.

Cet article paraîtra, en partie modifié, dans la revue Mappemonde n°3 à l'automne 95.

¹ Orstom Département "Terre, Océan, Atmosphère" UR "Géodynamique actuelle et risques naturels", Quito, Equateur.

² Escuela Politecnica Nacional, Quito, Equateur.

³ Ilustre Municipio de Quito, Equateur.

⁴ GeoHazards International, San Francisco, USA.

⁵ Oyo Corporation, Saitama, Japon.

Chatelain Jean-Luc, Guillier Bertrand, Yepes H., Fernandes J.,
Valverde J., Souris Marc, Dupérier E., Tucker B., Hoefler G.,
Kaneko F., Yamada T., Bustamante G., Villacis C.

Un scénario sismique pour la ville de Quito

ORSTOM Actualités, 1995, (47), p. 8-14. ISSN 0758-833X