

# Néotectonique et sismicité du site de La Paz (Bolivie) :

un exemple de failles récentes  
sans trace de sismicité historique ;  
conséquences pratiques pour le développement urbain

Jean-Louis BLÈS \*  
Jean GOGUEL\*  
Alain LAVENU \*\*  
Philippe MASURE \*

**MOTS-CLÉS : Risque sismique, Faille, Néotectonique, Sédiment lacustre, Pliocène, Morphodynamique, Urbanisme  
Bolivie (La Paz)**

## RÉSUMÉ

Les failles rencontrées le plus fréquemment dans la région de La Paz sont des failles normales développées au Quaternaire par deux phases de distension horizontale NNE-SSW dont la plus récente s'est manifestée il y a moins de 10 000 ans. Sous forme de failles en échelon NW-SE, elles affectent de vastes zones de l'Altiplano dont certaines sont en cours d'urbanisation. Une partie de ces failles peut-être liée aux tassements différentiels qui n'ont pas manqué de se produire dans la série lacustre pliocène (100 à 700 m d'épaisseur), actuellement surconsolidée. La plupart est due au jeu de grandes failles affectant le substratum rocheux antépliocène. Aucun des événements sismiques régionaux rapportés jusqu'ici ne permet de penser que ces failles ont eu une activité sismique depuis la fondation de la ville, en 1554 (absence d'épicentre au droit des failles ou dans leur prolongement).

Les secousses sismiques qui ont affecté le plus sensiblement la ville de La Paz correspondent à des séismes profonds liés au plan de Benioff et situés sous la Cordillère royale. Ces secousses sont très amorties lorsqu'elles atteignent La Paz et les environs (intensité maximale V MM).

La prise en compte du risque sismique à La Paz s'est donc reportée plus précisément sur une zonification des failles récentes et des nombreux risques induits comme, éboulements, effondrements, glissements et coulées de terrain.

## ABSTRACT

The most frequent faults in the La Paz region are Quaternary normal faults with two horizontal NNE-SSW distension phases of which the most recent was active less than 10 000 years ago.

These faults are in echelon NW-SE and affect extensive zones of the Altiplano where some areas are now being urbanized. Some faults may be linked to differential settling in the now overconsolidated lacustrine Pliocene series (100-700 m thickness). Most of the faults are due to large faults displacements in the Prepliocene rock substratum. None of the known regional seismic events indicate that these faults have had seismic effects since the foundation of the city in 1554 (no epicenter perpendicular to faults or on prolongations).

The shocks which most forcibly affected La Paz relate to deep quakes linked to the Benioff fault plane or under the Royal Cordillera. These shocks were very attenuated when they reached La Paz and its immediate area (maximum intensity V MM).

Seismic hazards for La Paz were plotted more precisely on zoning maps showing recent faults and many associated hazards such as landslides, collapses and earth flows.

\* Bureau de recherches géologiques et minières, B.P. 6009, 45060 Orléans Cedex.

\*\* Convenio U.M.S.A., ORSTOM, Cajon Postal 8714, La Paz, Bolivia.

A la demande de la Municipalité de la ville de La Paz, le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) dirigeait en 1976 et 1977 (1), une mission d'études géologiques, économiques et urbanistiques en vue de définir les grands axes de la planification urbaine aux horizons 1990 et 2010. La définition des programmes d'extension de la ville devait tenir compte, pour une large part, des caractéristiques physiques exceptionnelles du site, constitué par un ensemble de vallées encaissées dans 800 m de sédiments meubles déposés depuis le Pliocène dans la fosse endoréique de l'Altiplano.

Bien que la Bolivie soit un pays de sismicité moins élevée que celle des pays voisins (Pérou et Chili surtout), les études de E. DOBROVOLNY signalaient, dès 1962, l'existence de failles

affectant les dépôts quaternaires de La Paz. L'analyse des relations possibles entre failles récentes et sismicité du site de La Paz, ainsi que l'identification précise des nombreux phénomènes d'instabilité affectant les pentes vertigineuses de la ville (glissements, éboulements, coulées de boue, etc.) ont permis de définir et d'évaluer les risques sismiques directs et induits dans le cadre d'une analyse exhaustive des risques naturels menaçant le site.

Après un bref rappel des conditions géologiques générales du site on trouvera dans ce qui suit la synthèse de l'étude réalisée pour la Municipalité de La Paz en matière de néotectonique et sismicité et les conséquences pratiques de l'évaluation du risque sismique sur la planification urbaine.

## 1. CADRE GÉOLOGIQUE GÉNÉRAL

La ville de La Paz est située dans la partie nord de l'Altiplano andin — vaste plateau dont l'altitude varie entre 3 500 et 4 500 m — à 70 km au sud-est du lac Titicaca, par 16° 30' de latitude sud (fig. 1). Elle a été créée en 1554, à l'abri des vents froids de l'Altiplano, par les "conquistadores" espagnols, en bordure de la cordillère orientale des Andes.

Alors qu'elle n'occupait à l'origine qu'une partie du fond plat de la vallée du rio Choqueyapu (fig. 2), la ville s'étale aujourd'hui sur l'ensemble des vallées des affluents du rio La Paz. Remontant largement sur les flancs de la cuvette, l'urbanisation a atteint récemment le bord de l'Altiplano qui la dominait, les constructions s'élevant entre 3 300 m d'altitude dans le fond des vallées, jusqu'à 4 100 m sur l'Altiplano (fig. 4).

Ce site exceptionnel, constitué par un ensemble de sillons entaillant profondément les séries plio-quaternaires stratifiées de l'Altiplano, est le résultat d'un phénomène puissant d'érosion régressive par le rio La Paz depuis qu'il a été capturé par le rio Beni (fig. 1). Cet affluent de l'Amazone, en recoupant la cordillère orientale au sud-est de La Paz, a lié une partie du réseau hydrographique de l'Altiplano (4 000 m) au bassin supérieur de l'Amazone (650 m). Ce travail d'érosion régressive se poursuit encore aujourd'hui et s'accompagne de nombreux phénomènes d'instabilité de pente dont les plus fréquents se déclenchent en période pluvieuse.

A la base des dépôts de l'Altiplano, la formation La Paz, attribuée au Pliocène, constitue le fond et une partie des flancs de la cuvette de La Paz (fig. 2). C'est une formation d'origine lacustre qui peut atteindre 700 m d'épaisseur. Elle est constituée d'argiles et de silts gris clairs surconsolidés dans lesquels s'intercalent des niveaux de sables et de cailloutis.

Au-dessus, les terrains quaternaires de la série de l'Altiplano sont constitués de formations caillouteuses morainiques ou fluviales assez bien consolidées. Ces formations ont été déposées lors des périodes glaciaires ou interglaciaires du Pléistocène et elles sont séparées par des surfaces d'érosion et d'altération.

Un glacis fluvial termine la série et occupe une grande part de la surface actuelle de l'Altiplano.

Chaque étape de creusement des vallées et des cuvettes d'érosion a été accompagnée de dépôts alluviaux et de glissements de terrain dont certains ont eu une très grande extension. On rencontre aussi des formations morainiques et des dépôts lacustres d'extension limitée.

Actuellement, du fait de la poursuite des phénomènes d'érosion régressive par le rio La Paz et de la mauvaise qualité des terrains plioquaternaires, les flancs des vallées sont le siège d'une érosion très intense se traduisant par un ravinement accusé, des éboulements de falaises, de nombreux glissements de pente et le déclenchement périodique de coulées boueuses.

Ces phénomènes constituent autant de contraintes et risques naturels qui s'opposent au développement urbain dans de nombreux secteurs de la cuvette de La Paz et de ses environs.

La série plioquaternaire de l'Altiplano repose en discordance sur un substratum de schistes paléozoïques et de conglomérats crétaqués qui affleurent au sud de la ville à proximité des quartiers les plus bas.

Ces schistes et ces conglomérats affleurent à la faveur d'une remontée du substratum qui forme un petit relief E-W : la Serania de Aranjuez, séparant la cuvette d'érosion de La Paz au nord, de la cuvette d'érosion d'Achocalla au sud.

La cuvette d'Achocalla est elle-même bordée au sud-ouest par l'important soulèvement du substratum de Loma Ventilla.

(1) Avec la collaboration du Bureau central d'études Outre-Mer (BCEOM), du Secrétariat de missions d'urbanisme et d'habitat (SMUH) et du Bureau d'études bolivien Prudencio Claros y Asociados (PCA).

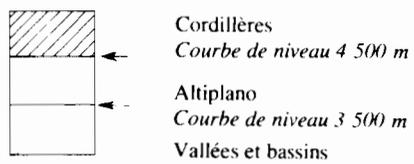
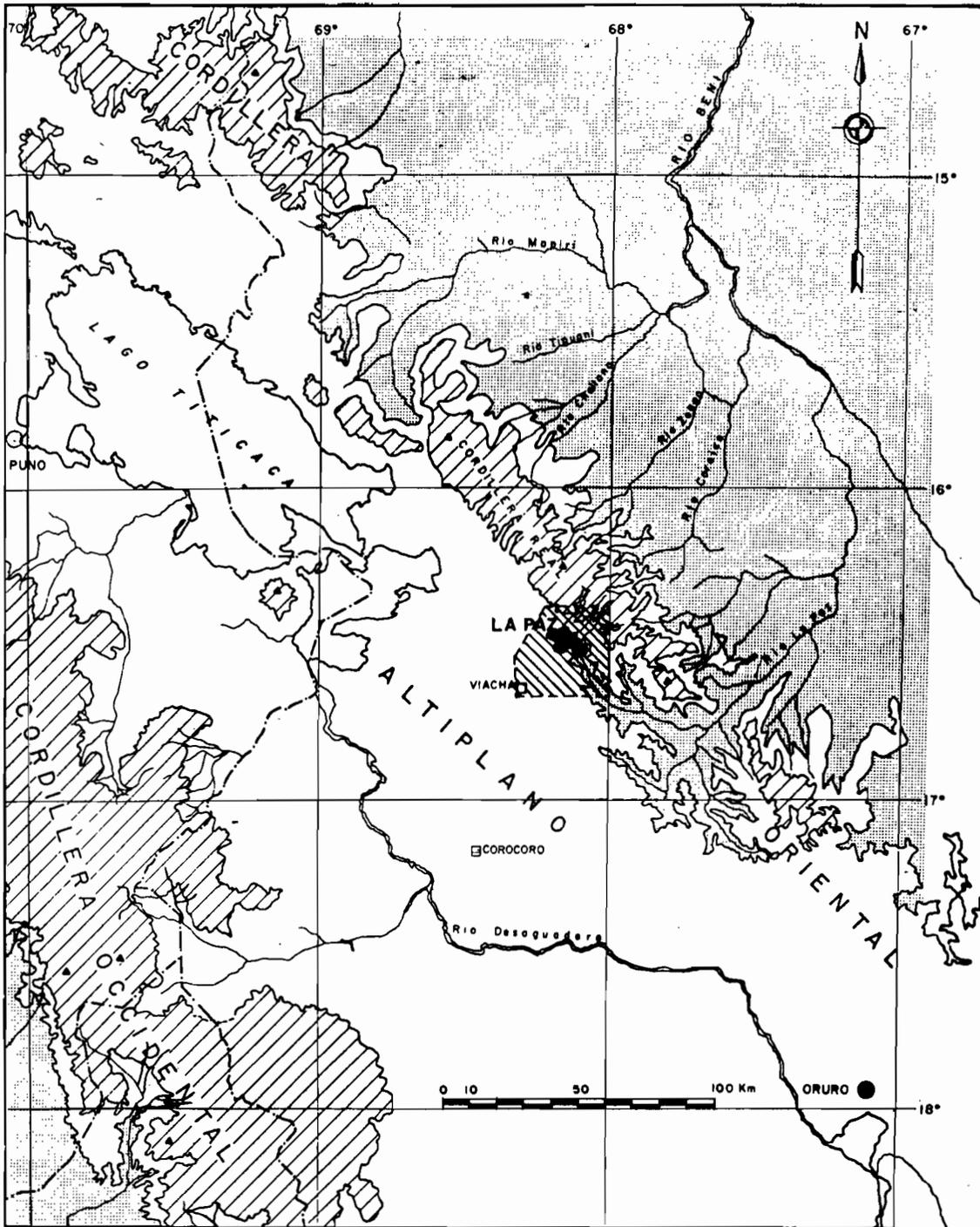


FIG. 1. — Situation géographique.



## 2. NÉOTECTONIQUE ET SÉISMICITÉ

L'évaluation du risque sismique sur le site de La Paz passait, dans une première phase, par l'analyse des relations pouvant exister entre failles récentes et séismicité. Si la définition détaillée des déformations cassantes plioquaternaires et des failles ayant joué récemment a pu être possible, la connaissance de la séismicité historique s'est achoppée sur la relative "jeunesse" de la ville, les chroniques recouvrant seulement quatre siècles.

### 2.1. NÉOTECTONIQUE

Les failles les plus spectaculaires de la région de La Paz sont celles qui affectent le glacis terminal de l'Altiplano en provoquant des décalages verticaux de quelques mètres de rejet de la surface actuelle du plateau.

Ces failles de directions E-W à NW-SE sont souvent disposées en échelon dont la direction générale est NW-SE (fig. 2). Les plus importantes s'échelonnent depuis le rio Seco jusqu'à Allpacoma, dans le prolongement de la Serrania de Arranjuez, d'une part et de Chijini grande jusqu'à Amachuma, en bordure de la remontée du substratum de Loma Ventilla, d'autre part.

Ces failles résultent probablement de la propagation dans la couverture plio-quaternaire de mouvements des grandes failles existant en profondeur dans le substratum antépliocène.

L'étude géométrique et cinématique des petites failles associées à ces grandes failles montre qu'elles ont joué plusieurs fois (fig. 3) :

- à la fin du Pliocène, elles ont fonctionné en décrochements senestres sous l'effet d'une compression E-W ;
- pendant le Quaternaire elles ont joué au moins deux fois en failles normales sous l'effet d'une distension N-S (à NE-SW) ;
- avant la deuxième distension importante du Quaternaire s'est produite une compression NW-SE, mais on ne sait si les grandes failles ont joué sous l'effet de cette compression.

L'activité répétée des failles normales pendant le Quaternaire peut être observée en bordure de l'Altiplano sur le trajet de la faille de Allpacoma :

- en un premier temps, cette faille normale a décalé le Quaternaire ancien d'au moins 50 mètres ;
- le second jeu normal de cette faille correspond au décalage de quelques mètres seulement du glacis terminal et de la surface actuelle de l'Altiplano.

Ces observations ont été confirmées et complétées par les résultats d'une campagne de prospection électrique destinée à étudier les nappes aquifères de l'Altiplano.

La phase de compression NW-SE ainsi que la deuxième phase de distension N-S ont un âge proche de 10 000 ans : une faille appartenant à ces phases affecte les terrains du gigantesque glissement d'Achocalla-Mecapaca qui est daté indirectement d'un âge voisin de 10 000 ans (fig. 2).

Une partie du jeu ancien de ces failles normales peut être due au tassement différentiel de la formation La Paz. L'épaisseur de cette formation est de 600 m dans le secteur d'Achocalla et de 700 m dans celui de La Paz, alors qu'au droit des remontées

du substratum d'Arranjuez et de Loma Ventilla, cette épaisseur est réduite respectivement de 400 m et 100 mètres.

Par contre l'explication du tassement différentiel ne peut être utilisée pour le deuxième jeu des failles normales : aucune inflexion d'ensemble pouvant provenir d'un tassement ne perturbe la régularité de la pente naturelle du glacis terminal de l'Altiplano laquelle n'est troublée que par le décalage brutal et bien localisé des failles.

Une des failles d'Amachuma qui décale le sommet de l'Altiplano (deuxième jeu normal quaternaire) a rejoué pendant la période historique ou préhistorique. Le nouveau plan de faille décale en effet de 1,5 m un empilement linéaire de pierres édifié par des paysans (fig. 5). Le décalage dextre est compatible avec une compression NW-SE comme celle qui alterne avec les phases de distension quaternaires.

Les failles qui affectent le sommet de l'Altiplano sont donc des failles récentes qui peuvent être considérées comme potentiellement actives pour avoir rejoué depuis la fin de la dernière glaciation quaternaire.

### 2.2. SÉISMICITÉ

La séismicité de la région de La Paz est relativement faible [cf. carte de séismicité de Bolivie par R. CABRE, 1976].

Les catalogues de séismes et les chroniques historiques n'indiquent pas d'épicentre qui soit localisé dans la ville de La Paz ou dans ses environs (fig. 6). Aucun foyer de séisme n'a pu être décelé au droit des failles récentes ni dans leur prolongement vers le NE ou vers le SW.

Les séismes importants les plus proches (magnitude = 6 à 7,5) sont situés à environ 100 km au nord de La Paz dans la cordillère orientale (région de Sorata). Ce sont pour la plupart des séismes liés à la subduction de la plaque océanique de Nazca qui en cet endroit est située entre 200 et 300 km de profondeur.

D'après l'histoire sismique de la Bolivie écrite par P.-M. DESCOTES et R. CABRE [1965 et 1973], les tremblements de terre ressentis à La Paz depuis sa fondation en 1554 n'ont jamais dépassé l'intensité V de l'échelle de Mercalli. Ces secousses provenaient de séismes intermédiaires ou profonds dont les épicentres étaient situés en dehors de la zone de La Paz.

En conséquence, le site de La Paz n'a pas connu de séismicité propre depuis la construction de la ville et les secousses ressenties ont toujours été de faible intensité.

La présence de failles quaternaires potentiellement actives sans trace de séismicité historique propre conduit à deux hypothèses possibles qui peuvent être complémentaires :

- d'une part, les jeux les plus récents de ces failles ont pu se faire de manière souple et relativement continue (glissement) sans alternance de périodes d'accumulation d'énergie et de périodes de relaxation brutale de celle-ci (cisaillement) ; c'est-à-dire sans produire des secousses sismiques. La plasticité des

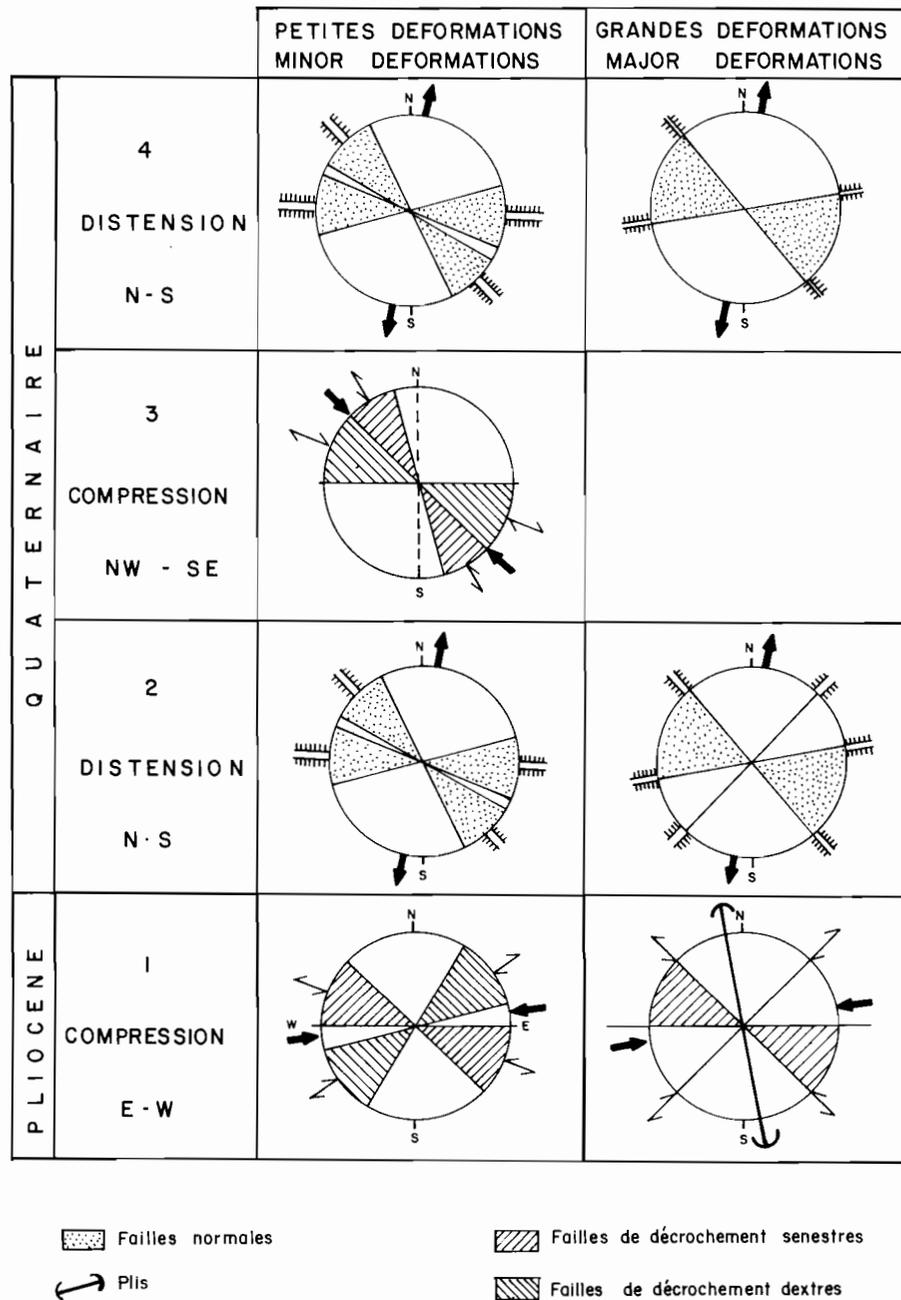


FIG. 3. — Déformations néotectoniques : chronologie.

dépôts meubles de la couverture plio-quaternaire et des schistes paléozoïques du substratum peut justifier cette hypothèse :

— d'autre part, la dernière activité de ces failles a pu avoir lieu pendant la période préhistorique c'est-à-dire avant le XVI<sup>e</sup> siècle. Dans ce cas, la zone de La Paz serait actuellement dans une période de calme tectonique et sismique. Cette hypothèse semble confortée par l'évolution décroissante du rejet normal des failles au cours du Quaternaire : ce rejet est compris

entre 50 et 100 m au Pléistocène ; lors de la deuxième phase, il varie de 1 à 10 m et lors de la période préhistorique il n'atteint pas 0,5 mètre.

Si ces failles de l'Altiplano ont eu une activité préhistorique accompagnée de sismicité, les foyers correspondants devaient être superficiels et par conséquent résultaient de mécanismes différents de ceux des séismes actuels, intermédiaires ou profonds, localisés dans les régions voisines.



FIG. 4. — Vue panoramique de la ville de La Paz.



FIG. 5. — Faille affectant des traces d'activité humaine.

### 3. ÉVALUATION DU RISQUE SISMIQUE - CONSÉQUENCES PRATIQUES POUR L'URBANISATION

Le caractère morphologique exceptionnel du site de La Paz et l'intensité des phénomènes d'instabilité liés à l'érosion régressive développée par le rio La Paz indiquent clairement que si les secousses sismiques atteignaient une intensité assez élevée sur le site, elles seraient au moins aussi meurtrières de par les phénomènes d'instabilité de pente induits que par l'effet direct sur les constructions qui sont de très mauvaise qualité dans tous les quartiers périphériques. La planification urbaine a donc dû tenir compte de trois types complémentaires de risque "sismo-tectoniques".

#### 3.1. RISQUE SISMIQUE *SENSU STRICTO* :

L'intensité des tremblements les plus forts qui pourraient être ressentis à La Paz correspondrait aux degrés V à VI de l'échelle de Mercalli modifiée ce qui correspond à des accélérations de 0,15 à 0,32 m/s<sup>2</sup>.

Ces secousses sismiques liées à des mouvements profonds pourraient être ressenties uniformément dans la ville et ses environs et de ce fait il n'a pas été possible d'établir une véritable zonation sismique autre que celle qui fait référence aux cartes géotechniques (caractéristiques physiques et mécanismes des terrains) et topographiques.

Les intensités envisageables ne nécessitent pas d'imposer de véritables règles de construction parasismique car toutes les constructions de bonne qualité peuvent les supporter.

Ce risque sismique (intensité V à VI) incite à éviter les constructions qui ne seraient pas conformes aux "règles de l'art" : fondations insuffisantes ou mal exécutées, chaînage discontinu, porte à faux, etc., précaution élémentaire qui n'est souvent pas respectée.

#### 3.2. RISQUE LIÉ AUX FAILLES POTENTIELLEMENT ACTIVES

Le déplacement éventuel du sol par une faille potentiellement active est un risque qui s'ajoute au risque sismique lié à

l'ébranlement des terrains. A la verticale ou à proximité de ces failles, les constructions pourraient être détruites ou endommagées.

A La Paz on a proposé d'interdire toute construction jusqu'à 50 m de part et d'autre de ces failles et d'autoriser les seules constructions de moins de deux étages dans les zones comprises entre 50 m et 100 m de celles-ci.

Les surfaces disponibles sur l'Altiplano sont pratiquement illimitées et les zones de failles interdites à la construction seront occupées par des zones boisées et des espaces verts.

#### 3.3. EFFETS SECONDAIRES DES SECOUSSES SISMQUES SUR LES RISQUES NATURELS

L'ampleur des phénomènes d'instabilité qui marquent les pentes de la cuvette de La Paz par des phénomènes souvent catastrophiques en période pluvieuse (fluage et glissements de masses, éboulements, érosion souterraine et effondrements de surface, liquéfaction des terrains et coulées de boue pour ne citer que les plus fréquents) et les caractéristiques géotechniques de certains terrains quaternaires conduisent à penser que des secousses sismiques d'une intensité supérieure — voire égale — à celles qui ont été connues depuis la création de la ville déclencherait un ensemble de phénomène de géodynamique externe qui pourraient avoir des conséquences catastrophiques tout particulièrement en saison pluvieuse. La saturation des terrains faiblement perméables, mais accessibles à l'eau par un réseau important de fentes de dessiccation et de surfaces de traction ou de cisaillement laisse craindre en effet l'apparition de phénomènes de liquéfaction de certains terrains et le déclenchement de nombreux glissements et éboulements.

#### 3.4. CONSÉQUENCES PRATIQUES POUR L'URBANISATION

Face aux risques naturels, l'action du planificateur ne peut être réellement efficace que dans les phases d'extension de

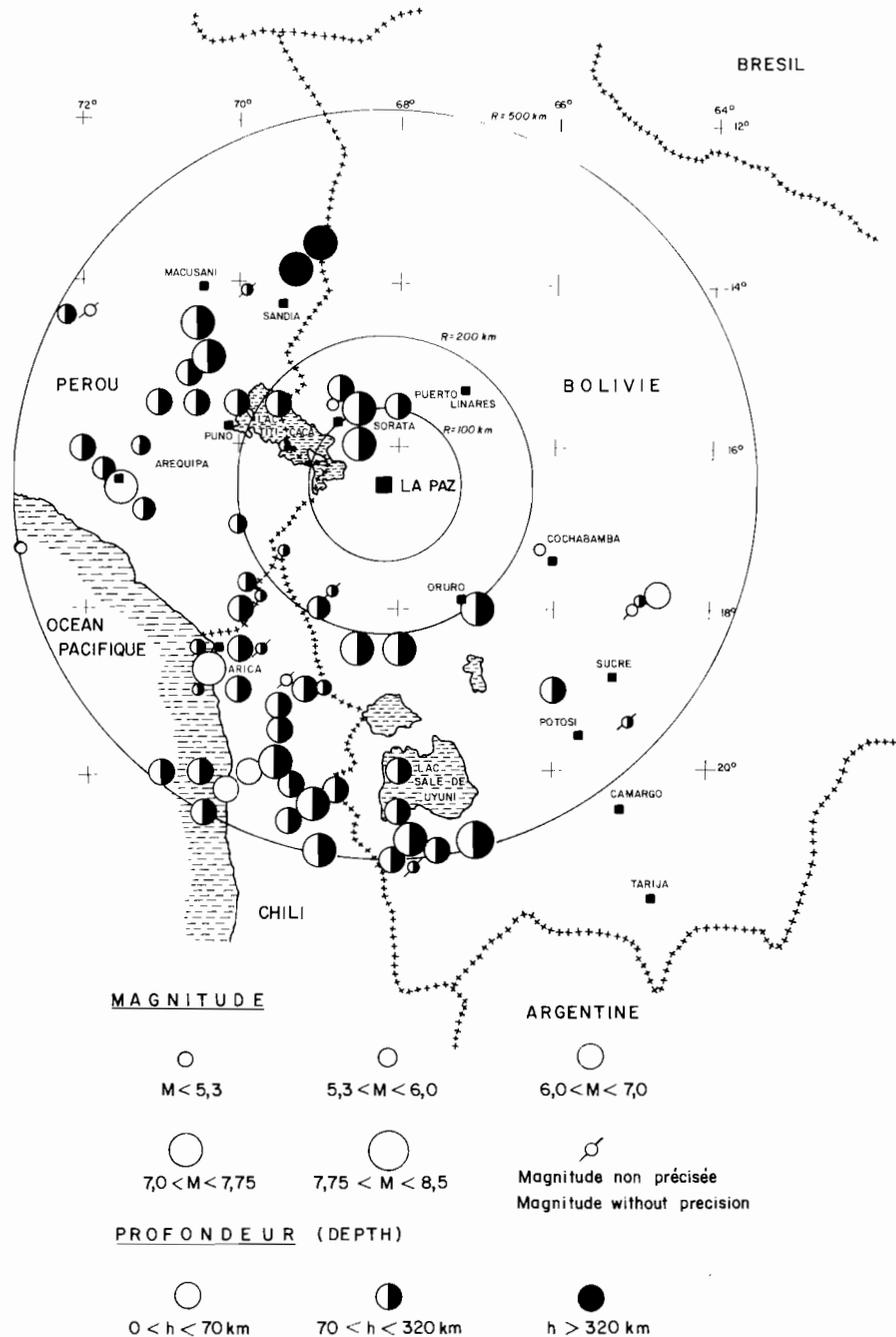


FIG. 6. — Localisation des séismes jusqu'à 500 km autour de La Paz.

l'urbanisation pour lesquelles l'occupation du sol et la normalisation de la construction peuvent être contrôlées. Pour les zones déjà urbanisées seules une sensibilisation et une incitation de la population à se déplacer ou pour le moins à améliorer la résistance des constructions sont possibles, avec un effet pratique généralement limité aux opérations dirigées et financées par les municipalités.

Le zonage de la ville de La Paz tenant compte de l'ensemble des risques naturels et des caractéristiques géotechniques des

terrains qui a été présenté dans une carte de constructibilité a aussi pris en compte les risques liés aux failles potentiellement actives et les effets secondaires des secousses sismiques sur les phénomènes d'instabilité de pentes. Des recommandations ont été faites sur le respect des normes de construction assurant une bonne résistance aux structures, sans que ne soient imposées des règles de construction parasismique, les éléments de sismicité historique étant insuffisants pour affirmer leur nécessité.

Un important travail de stabilisation et de réhabilitation de zones instables mené par la municipalité a été recommandé dans les zones où cette action est économiquement justifiée. Il n'en reste pas moins que la sécurité des habitants de La Paz ne

sera valablement assurée que par le déplacement d'un certain nombre de quartiers édifiés de manière incontrôlée depuis 1950 dans des zones nécessitant la mise en œuvre de moyens de confortement dont le coût serait immense.

### RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AHLFELD F., BRANISA L. (1960). — Geología de Bolivia. *Inst. Bol. del Petróleo*, pp. 145-152.
- BALLIVIAN O., BLÈS J.-L., SERVANT M. (1978). — El plio-cuaternario de la region de La Paz (Andes orientales, Bolivia). *Cah. O.R.S.T.O.M., Géol. Fr.*, X, n° 1, pp. 101-113.
- BARAZANGI M., ISACKS B.L. (1976). — Spatial distribution of earthquakes and subduction of the Nazca plate beneath South America. *Geology*, 4, november 1976, pp. 686-692.
- CABRE R. (1976). — Conocimientos sobre el riesgo sísmico en Bolivia. *Rev. geof.*, n° 5, pp. 157-160.
- DESCOTES P.M., CABRE R. (1965). — Historia sísmica de Bolivia. *Bol. Inst. Bol. Petrol. (I.B.P.)*, 5, n° 1-2, pp. 16-28.
- DESCOTES P.M., CABRE R. (1973). — Historia sísmica de Bolivia. *Geofis. Panamericana*, 2, n° 1, pp. 251-278.
- DOBROVOLNY E. (1956). — Geología del valle superior de La Paz (Bolivia). Publication H. Alcaldía Municipal de La Paz.
- DOBROVOLNY E. (1962). — Geología del valle de La Paz. *Publ. Min. Minas y Petróleo*, Bol. 3 (especial), 153 p.
- DOBROVOLNY E. (1969). — Un torrente de barro de gran volumen, post glacial, en el valle de La Paz, Bolivia. *Bol. Sec. Geol. Bol.*, 12, julio-sept., pp. 5-17.
- GUTENBERG B., RICHTER C.F. (1954). — Seismicity of the earth. 2nd ed., Princeton, N.J., 310 p. (pp. 249-254).
- INTERNATIONAL SEISMOLOGICAL CENTER (1973). — Catálogo de los sismos para el año 1973 (p. 35).
- LAVENU A. (1977). — Neotectónica de los sedimentos plio-cuaternarios de la Cuenca de La Paz (Bolivia). *Rev. Geociencias*, U.M.S.A. (Bolivia), I, n° 1, pp. 31-56.
- MARTINEZ C., KUSSMAUL S., SUBIETA T., TOMASI P. (1973). — Historia estructural del Altiplano de Bolivia. II Congr. Latinoamericano de geología. Caracas 1973, 19 p., 9 fig.
- MEGARD F., PHILIP H. (1976). — Plio-quaternary tectono-magmatic zonation and plate tectonics in the central Andes. *Earth and planetary Science Letters*, 33, pp. 231-238.
- ROTHER J.-P. — The seismicity of the earth : 1953-1965. Publication UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization) Paris, 1969, pp. 78-88.
- WEBER C. (1975). — Progrès récents aux U.S.A. en matière de sécurité sismique. Rapport B.R.G.M. n° 75 - SGN-280.

### Rapports du plan de développement urbain de la ville de La Paz (1977).

- Rapport n° 2 : Cadre géologique général ;
- Rapport n° 5 : Caractéristiques lithostratigraphiques de la cuvette de La Paz et de ses environs ;
- Rapport n° 7 : Néotectonique et sismicité de la région de La Paz ;
- Rapport n° 13 : Risques naturels rencontrés dans la cuvette de La Paz ;
- Rapport n° 15 : Caractéristiques géotechniques de la cuvette de La Paz ;
- Rapport n° 16 : Utilisation de la carte de constructibilité de la cuvette de La Paz et de ses environs.
- Rapport n° 23 : Influence des conditions éco-géologiques sur la planification urbaine de La Paz.