

ANEXO 3:

Informe del CETE-Méditerranée

Jean Pierre MENEROUD
Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement (CETE-Méditerranée)
Ministere de l'Equipement, du Logement, Des Transports et du Tourisme
Laboratoire Géologie-Sols
France
Tél. 04.02.00.81.81
Fax. 04.92.00.81.99

LE SEISME DE CARIACO DU 9 JUILLET 1997

(Etat de Sucre, Vénézuéla)

Introduction

Le 9 juillet 1997, à 19 : 24 : 10.8 GMT un séisme de magnitude 6.9 a frappé la partie nord-est du Vénézuéla (Etat de Sucre). L'épicentre du tremblement de terre était proche de la petite ville de Casanay et, à environ, 450 km de Caracas, la profondeur du foyer étant d'une dizaine de kilomètres.

A la suite de ce séisme, et devant assister au séminaire sur : « El terremoto de Caracas del 29 de Julio de 1967, 30 anos despues », je me suis rendu durant 3 jours, du 26 au 28 Juillet, sur le site du tremblement de terre, avec l'appui de l'AFPS, pour recueillir des informations sur les effets de ce séisme. Cette mission n'a été rendue possible que grâce à l'aide de la FUNVISIS et de son président, M. André Singer, dont un des chercheurs, M. Michael Schmitz, m'a obligeamment accompagné sur le terrain.

Déroulement de la mission

Vendredi 25 Juillet:

Départ de Nice pour Caracas; arrivée à Caracas à 14:40 heure locale; départ de Caracas à 20:20, arrivée à Cumana à 21:15. Accueil par M. Schmitz

Samedi 26 Juillet:

Réunion à l'université del Este à Cumana puis départ pour la zone épicertrale, avec un arrêt à Cumana sur le seul immeuble effondré de la ville (au carrefour de l'avenida Aristides Rojas et la calle Marino. Deuxième arrêt sur le port de Cumana pour observer les désordres d'entrepôts. Glissement horizontal (lateral spread) de Los Capote. Liquéfaction de Margualida. Glissement horizontal de San Antonio del Golfo, faille en surface à Muelle de Cariaco Problème hydraulique de Cariaco. Faille à Cariaco et sur la propriété Lambertini. Faille à Casanay; arrivée à Carupano à 17:30. Réunion au service local du ministère des communications. Couché à Carupano.

Dimanche 27 Juillet:

Carupano: observations des désordres dans la ville et retour sur Cariaco. Observation de la faille aux alentours de Cariaco, observations des désordres dans la ville et sur des bassins d'élevage de crevettes. Retour sur Cumana. Couché à Cumana.

Lundi 28 juillet

Cumana: observation des désordres du Pont Gonzalo o Campo et des glissements horizontaux sur les berges du Rio Manzanares.

Université orientale

Retour à Caracas. Arrivée à 20h20 à l'aéroport de Maiqueita.

Aspects Geomorphologiques

Le séisme de Cariaco, a donné lieu à plusieurs manifestations géomorphologiques, tant tectonique (la faille sismogène est apparue en surface) que géotechnique (phénomènes de liquéfaction et de mouvements de terrain avec notamment des glissement horizontaux).

Tectonique

Le séisme de Cariaco a été par le déplacement d'un segment (d'une trentaine de km) de la faille du Pilar. Cette faille parfaitement identifiée avant le tremblement de terre par les études de la FUNVISIS, et qui limite les plaques Caraïbes et Amérique du sud, a fait l'objet d'un relevé systématique après le séisme par le même organisme. La faille est apparue en surface entre Muelle de Cariaco et l'est de Casanay, à Las Varas. Elle recoupe un certain nombre de routes où le déplacement est parfaitement identifiable: il s'agit d'un décrochement dextre dont le déplacement cosismique varie d'un maximum de 40 cm, à un minimum de 8 cm, avec une valeur de 25 cm sur la plus grande partie de l'accident (entre Carrizal de la Cruz et Muelle de Cariaco). Elle disparaît à l'ouest dans le golfe de Cariaco sans que l'on soit sûr de son prolongement en mer. La longueur de faille est à peu près en accord avec la magnitude de séisme, la valeur de celle-ci peut-être approchée par la formule empirique, suivante:

$$L = 2 \cdot 10^{-7} M^{10}$$

ce qui donnerait de faille de 42 km pour une magnitude de 6.8 et 30 km pour une magnitude de 6.6 l'ordre de grandeur est donc bien respecté et il n'est pas impossible que la faille se poursuive en mer sur quelques kilomètres. Les observations que l'on peut faire de ce décrochement indiquent une largeur totale de la déformation de l'ordre de 3 à 4 mètres. Les structures décrochantes sont relayées par des fissures jouant en compression. D'après les témoignages la rupture se serait propagée d'est en ouest ceci serait concordant avec la rapide atténuation du déplacement que l'on observe à

l'extrémité est de la structure qui a joué. Au cours de la mission j'ai pu observer cette faille en plusieurs endroits.

Muelle de Cariaco: le décrochement traverse la route ainsi qu'une maison située en bordure de la voie, puis une seconde habitation. On peut noter que les maisons sont affectées par le décrochement lui-même, avec un déplacement relatif des deux lèvres, mais qu'elles ne se sont pas effondrées. Ce phénomène, déjà observé lors du séisme de Hyogo Ken Nambu (Kobé), au Japon, en 1995, montre que la vibration est probablement moins importante dans le plan de faille qu'à quelques mètres de ce dernier (Figure 1)

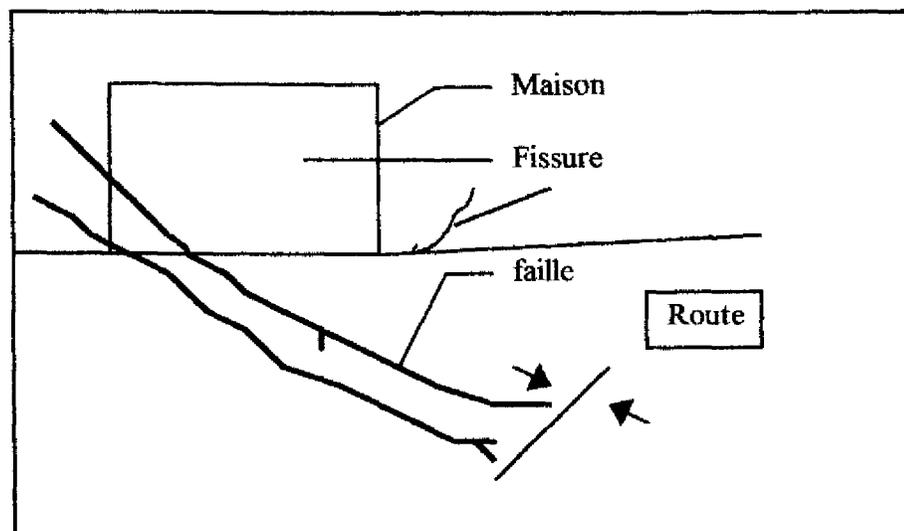


Figure 1

Propriété Lambertini

La faille traverse la propriété et prend en écharpe le coin du bâtiment. On observe également sur ce site que, mis à part des désordres très localisés au droit du passage de la faille et liés au déplacement des deux compartiments, le bâtiment a bien résisté et n'a pratiquement aucune déformation ni fissure dans la partie de la maison éloignée de l'accident (Figure 2), ce qui conforte l'observation précédente.

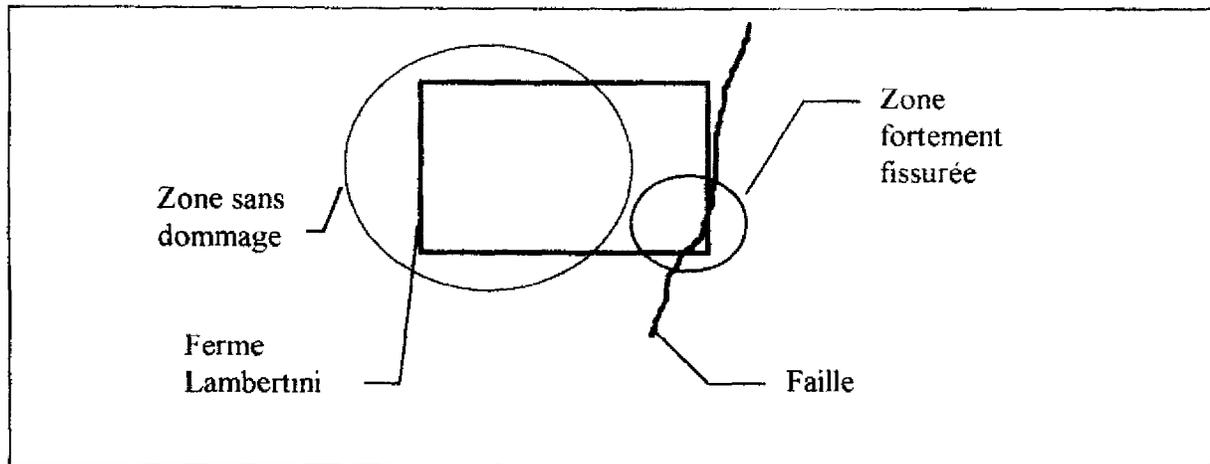


Figure 2

Autres sites où la faille a été observée:

À Casanay où elle traverse la route et où elle se termine à l'est de la ville. Cette terminaison met bien en évidence l'atténuation du déplacement, à Cariaco où elle traverse également la route.

Liquéfaction

Les phénomènes de liquéfaction ont été nombreux au cours du séisme de Cariaco, que se soit de la liquéfaction stricto sensu ou des mouvements induits par ce type de phénomène comme les glissements horizontaux (lateral spread). Ces phénomènes peuvent s'observer jusqu'à Cumana située à 75 km. de l'épicentre

Les caractéristiques des sables ne sont malheureusement pas connues, il est donc très difficile d'évaluer le potentiel de liquéfaction de ces terrains. La contrainte tangentielle peut être estimée par

$$\tau = 0.65.(a_{\max} / g)\sigma_v(1 - 0.015h)$$

dans la zone épiscopentrale, cette contrainte, à une dizaine de mètres de profondeur et avec l'hypothèse d'une nappe qui se situerait à 2 mètres, devrait varier entre 20 et 25 kPa pour des densités de sables courantes, valeurs supérieures aux résistances cycliques de cisaillement que l'on peut obtenir dans ces matériaux. A Cumana, la valeur de la contrainte qui doit varier entre 15 et 18 kPa est également en accord avec les possibilités de liquéfaction

Liquéfaction ss.

Des traces de liquéfaction ont été observées sur différents sites en bordure de mer ou de fleuve:

- sur la plage de Maigualida, entre Cumana et San Antonio del Golfo, sur la rive sud du golfe de Cumana: on y décèle des remontées de sable très typiques. Près de cette même plage, latéralement, où l'essentiel de ces remontées s'est fait par fissuration après claquage du terrain, néanmoins, en certains points, on peut voir des volcans de sable caractéristiques.

- à Cumana, sur un terrain près de l'Hospital de Veteranos où l'on observe également des remontées de sable dans des fissures.

Je n'ai personnellement pas observé de désordres importants provoqués directement par de la liquéfaction ss. Les deux sites décrits ci-dessus n'étaient pas construits. Il ne semble pas que ce phénomène soit responsable de dommages sur la ville de Cumana, ni sur celle de Cariaco où les dégâts les plus importants ont été observés.

Glissements horizontaux (lateral spread)

Ce phénomène, lié à la liquéfaction de la couche dans laquelle se développe les ruptures, a été abondant au cours de ce tremblement de terre et est à l'origine de graves désordres.

- à Cumana où les mouvements se sont produits en rive droite du Rio Manzanares, près de l'embouchure, sur un site occupé par des baraques de pêcheurs (Figure 3).

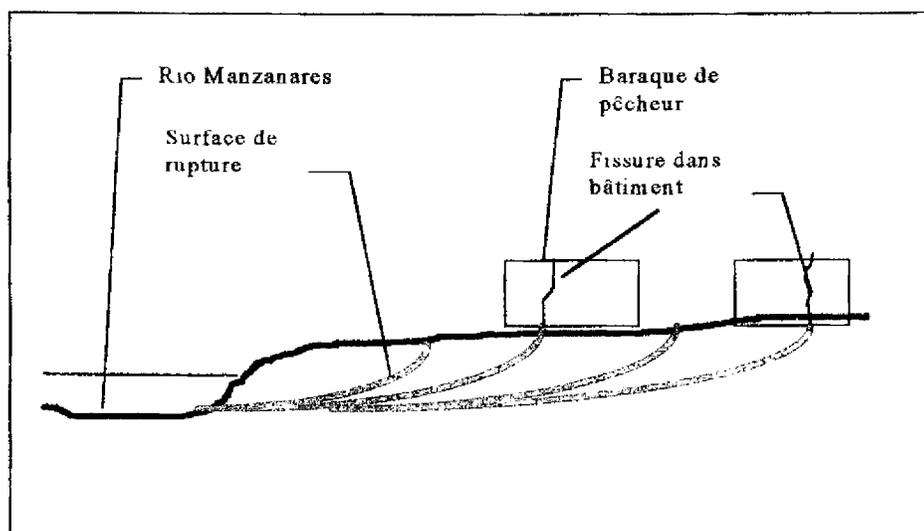


Figure 3

Cinquante et une baraques de pêcheurs, dont la construction est de mauvaise qualité, ont été très endommagées par les déplacements liés aux glissements horizontaux. Ces déplacements sont restés modestes (de l'ordre de quelques centimètres) et si les constructions sont pratiquement inhabitables, elles ne se sont toutefois pas écroulées, préservant ainsi les vies humaines;

- à Los Capote, en bordure de mer entre Cumana et San Antonio del Golfo, un petit glissement affecte une aire de pique-nique et a endommagé un abri. Ce mouvement correspond morphologiquement à un glissement horizontal (lateral spread) probablement lié à un processus de liquéfaction au niveau de la mer.

- à San Antonio del Golfo, on observe, en bordure de mer, une fissure de décompression sur la partie aval de la chaussée. Cette décompression est liée à un phénomène de glissement horizontal.

- dans l'exploitation d'élevage de crevettes: cette exploitation est constituée de bassins limités par des digues en terre. Ces bassins se sont vidés après le séisme du fait de la rupture des digues, ruptures plus ou moins achevées, et qui vont de la fissure au déplacement de masse de terre importante. Il s'agit en fait de glissement horizontal assez typiques très certainement liés à des phénomènes de liquéfaction (Figure 4).

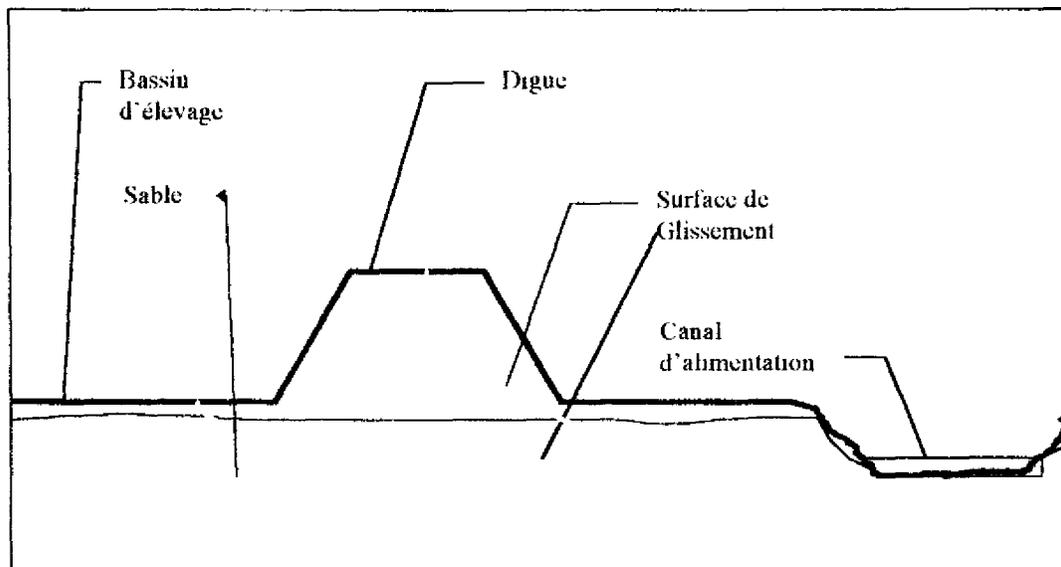


Figure 4

La liquéfaction est attestée par des traces de remontée de sable que l'on observe dans le canal d'alimentation. On observe d'ailleurs également sur une des digues une morphologie typique de glissement horizontal avec désorganisation complète de la structure du terrain comme on a pu l'observer par ailleurs, dans les gorges du Cheliff, au cours du séisme d'El Asnam de 1980.

Comportement des bâtiments et des ouvrages d'art.

Bien que l'épicentre du séisme soit situé près de Casanay, les destructions les plus importantes ont été observées à Cariaco situé à 15 km à l'ouest de Casanay. De sévères dommages se sont également produits dans d'autres localités plus éloignées de l'épicentre, comme à San Antonio del Golfo et même dans la capitale de l'Etat de Sucre, Cumana, qui a été affectée par des désordres conséquents puisque l'intensité y a varié de V à VII selon les quartiers.

Bâtiments

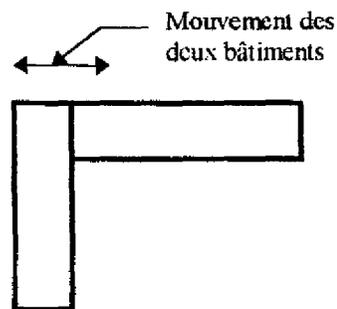
- **A Cariaco** : les dommages les plus importants concernent deux établissements scolaires qui ont été partiellement détruits et où l'on déplore, pour l'un d'eux (le lycée), 35 morts.

Ecole Valentin Valiente: l'effondrement de l'école Valentin Valiente de Cariaco est très instructif et très classique. Le bâtiment rectangulaire est de type dalle supportée par des poteaux (portique). La dalle est nervurée seulement dans la direction transversale par des poutres qui s'appuient sur les poteaux. D'après les observations de la FUNVISIS, le ferrailage des poutres principales ne comporterait pas d'acier supérieur ni inférieur, mais serait uniquement constitué d'une seule barre recourbée en bout d'élément. Bien que le rez-de-chaussée soit fermé, les murs ne sont pas solidaires de la structure, on peut donc considérer que le rez-de-chaussée est transparent. La rupture s'est faite au niveau des nœuds en raison d'une insuffisance du ferrailage transversal (les étriers étaient distants de 25 cm.). A la base des poteaux, au niveau 0, on peut observer la destructuration du béton provoqué par la flexion de l'élément. L'effondrement total de la dalle a été curieusement évité à une extrémité du bâtiment, par un report des charges sur les murs indépendants destinés à fermer le rez-de-chaussée. De ce point de vue, ces murs ont joué un rôle important. Par contre, à l'autre extrémité, la dalle s'est complètement effondrée, le processus décrit plus haut n'ayant pas suffi à arrêter le mouvement.

En conclusion, les désordres ayant affecté cette école sont dus à la présence d'un rez-de-chaussée transparent, d'un manque de renforcement de la dalle dans le sens longitudinal ainsi qu'une absence de contreventement dans le même sens et, enfin, d'un manque de ferrailage transversal des poteaux, surtout au niveau des nœuds et de la base. L'importante masse de la dalle en béton, épaisse de 50 cm, est également un facteur qui a joué un rôle défavorable dans la stabilité de l'ensemble, d'autant que les poteaux ont des dimensions modestes (25 x 25 cm.) Il faut préciser que cette construction avait plus de cinquante ans d'existence au moment du séisme et qu'elle était donc bien antérieure aux premières règles de construction parasismique.

Lycée Raimondo Martinez: ce lycée, de plan rectangulaire, était construit en béton armé, de type portique, avec des dalles nervurées dans les deux sens et probablement sans contreventement efficace, ce type de structure étant particulièrement vulnérable aux secousses sismiques. L'observation sur le site du lycée qui était interdite a été très difficile mais les observations de la FUNVISIS ont montré que l'espacement des ligatures entre poutres et poteaux étaient correct. Il semble qu'il y ait eu des problèmes d'adhérence entre barres d'acier et béton. L'effondrement de ce bâtiment, qui a fait appelons-le 35 morts, est apparemment lié à la rupture du rez-de-chaussée. Le bâtiment reposait sur les fondations par l'intermédiaire de poteaux courts, il était construit par modules. Un des modules centraux s'est complètement effondré, à la différence de certains modules d'extrémité qui n'ont subi que des dommages légers

Autres observations : un cas assez curieux a pu être observé, il s'agit d'un immeuble en L dont les corps de bâtiments sont séparés par un joint trop mince. Un des bâtiments a perdu tous ses murs de façade et ses cloisons en raison des chocs entre les deux corps. La structure est là encore de type portique, mais elle a bien résisté. Les « remplissages » (cloisons et façades) n'étaient pas liées à la structure.



On peut observer à Cariaco d'autres effondrements de petits bâtiments à structure en portique, où la construction est souvent de mauvaise qualité. Des maisons construites en « torchi armé », les armatures étant constituées de bambous, n'ont pas résisté au séisme. Ces structures ne sont pas adaptées pour résister à une secousse sismique, elles périssent par basculement des murs porteurs non suffisamment liés entre eux, ce qui provoque l'effondrement de la toiture.

Un cas « classique » d'effondrement a également été constaté au coin de deux rues alors que les mêmes constructions autour n'ont subi que des dommages légers. Cette disposition est en effet très vulnérable et c'est une observation constante des missions post sismiques

En résumé l'importance des destructions à Cariaco est certainement liée à la proximité de l'épicentre et aux déficiences des systèmes constructifs ainsi qu'à la mauvaise qualité des matériaux. On doit cependant souligner que, dans certains cas,

les constructions en portique se sont honorablement comportées. Sur cette petite ville, le nombre de bâtiments effondrés est important, mais celui de constructions où les dommages sont irréversibles et incapables de résister à une nouvelle secousse même faible est très important.

Enfin, sur Cariaco, un cas original a été observé, il s'agit de l'effondrement total de la banque dont il ne reste que le coffre-fort intact, ce qui prouve que l'argent des habitants était bien gardé !

• A Cumana

Edifice Miramar: l'édifice Miramar, haut de 7 étages, s'est complètement effondré lors du séisme faisant une trentaine de victimes. Il n'est guère possible de faire des observations étant donné que cet immeuble n'est plus qu'un tas de gravats. D'après certaines informations récoltées par la FUNVISIS, la structure de l'immeuble était constituée de murs porteurs en béton armé, orientés perpendiculairement à la longueur de l'édifice. Les planchers étaient armés dans une direction avec des poutres planes et supportés par des poutres principales appuyées sur les murs porteurs. L'épaisseur de la dalle était de 30 cm., de même que celle des murs porteurs, ferrailés avec des barres de 7/8 disposées en maille (avec une maille par face); la hauteur des poutres principales était de 40 cm. Les observations de la FUNVISIS ont montré qu'il existait des irrégularités dans le ferrailage longitudinal des nervures de la dalle où l'acier, devant travailler en traction, n'était pas correctement disposé dans les poutres et qu'il y avait une absence totale d'étriers dans ces éléments. Sur les poutres principales, on observait par contre une disposition conventionnelle avec des étriers distants de 10 cm. Dans la zone de confinement, mais en certains cas, on a observé l'usage de ligatures de 3/8 qui sont interdites au Vénézuéla dans les projets en béton armé. Il a pu aussi être observé des intervalles de 20 cm entre les étriers, dans la partie confinée des piliers, ce qui est également prohibé par la norme parasismique vénézuélienne. Les enquêtes réalisées après le tremblement de terre semble accrédiiter le fait que l'immeuble a, à l'origine, souffert d'un problème de torsion, ainsi que de légers mouvements latéraux, ces informations étant à prendre avec circonspection. Cet immeuble est le seul à s'être effondré dans une zone géographique relativement importante. Les causes de l'effondrement sont probablement multiples:

- variations verticales de rigidité,
- déficience de la structure en béton armé (bien que les observations ne permettent pas de penser que ces déficiences à elles seules puissent être responsables de l'effondrement;
- problème de torsion lié à la présence d'une cage d'escalier incorrectement positionnée;
- arrêt de la construction au niveau du premier ou deuxième étage, avec probablement un manque de soin lors de la reprise pour réaliser un monolithisme

suffisant par une bonne connexion des aciers. Cette zone de fragilité peut expliquer la rupture entre les étages supérieurs et inférieurs et l'écroulement du bâtiment.

• A Maigualida

De petites cabanes posées sur pilotis dans l'eau ont été très endommagées par basculement ou écroulement. Les désordres sont liés à un classique problème de poteaux courts qui ont été cisailés juste au-dessous des planchers des maisons. Celles-ci ont été désolidarisées de leurs fondations et soit ont basculé, soit sont retombées à côté des poteaux. La corrosion des poteaux a sûrement joué un rôle dans leur cisaillement.

Ouvrages d'art

Aucune rupture ou effondrement d'ouvrage d'art ne s'est produit sur l'aire affectée par le tremblement de terre. Les seuls désordres sur le réseau routier - qui se montent tout de même à 4 millions d'USD - ont été provoqués par les passages de la faille sur les routes.

A Cumana, seul le pont Gonzalo o Campo a subi de très légers dommages: déplacement entre TN et culée, épaufrage des piles par frottement de poutre sur pile.

Autres phénomènes

Lors du rétablissement du réseau d'eau qui avait été coupé dans la zone de la faille, un phénomène de torsion sur une conduite a été mis en évidence ainsi qu'une rupture de cette même canalisation. Ces déformations sont probablement liées au mouvement tectonique.

Conclusion

Le séisme de Cariaco est assez riche d'enseignements. Dans le domaine géomorphologique, il a donné lieu à plusieurs manifestations, tant tectoniques (la faille sismogène est apparue en surface), que géotechniques (phénomènes de liquéfaction et de mouvements de terrain, avec notamment des glissements horizontaux - lateral spread-). L'apparition de faille en surface n'est pas un phénomène qui se produit dans tous les grands séismes et l'étude des déformations tectoniques, là où elles ont lieu, n'en est que plus importante pour avancer dans la connaissance de ces mécanismes. Après Kobe, le tremblement de terre de Cariaco a confirmé que la trace de la faille en surface n'était pas le lieu le plus dangereux vis-à-vis de la vibration.

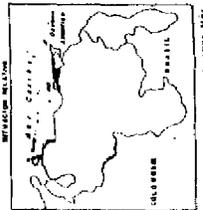
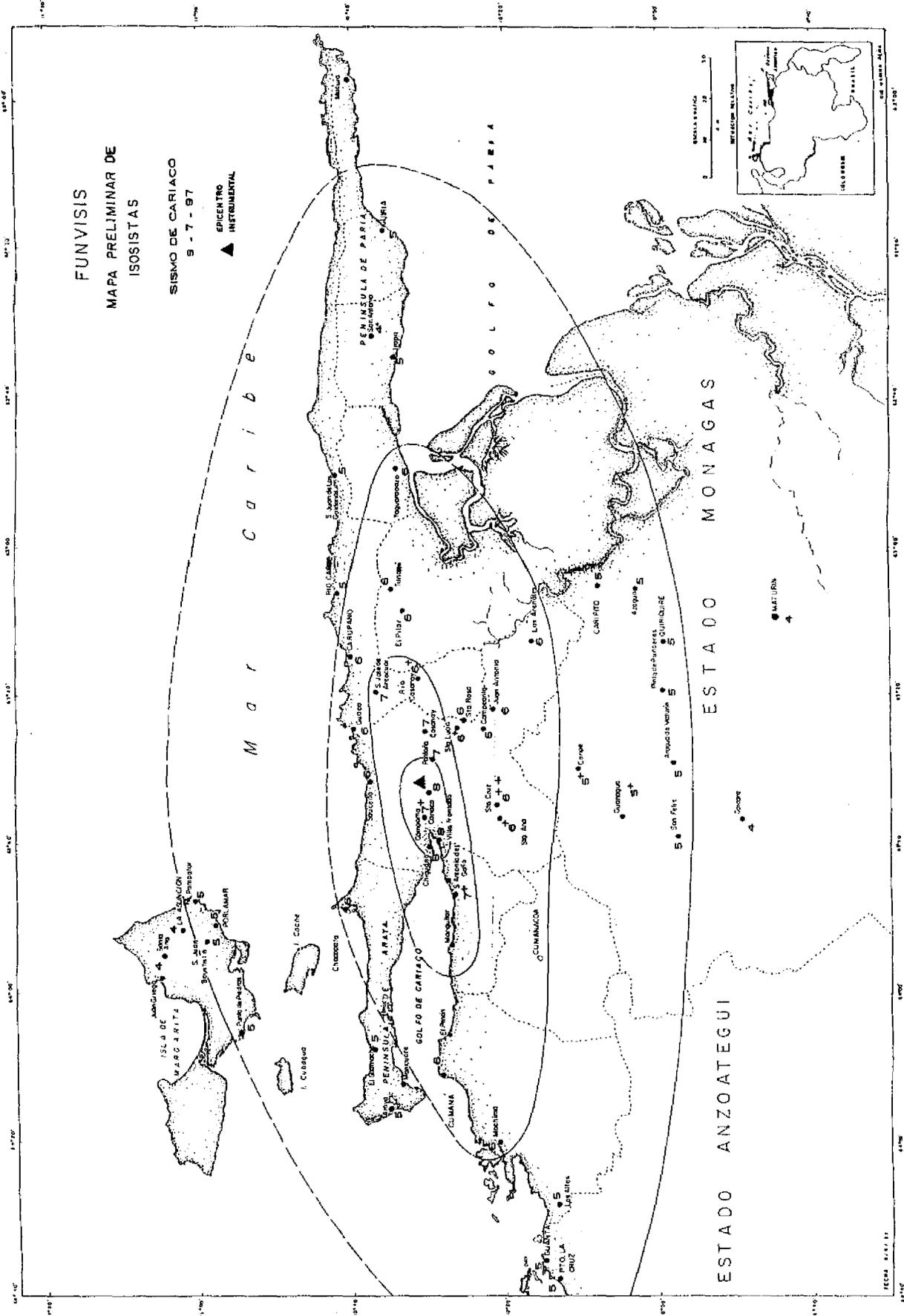
Séisme après séisme, le phénomène de liquéfaction se révèle comme une grande constante des tremblements de terre, dès que le sol est sableux et qu'il peut, avec les glissements horizontaux qui lui sont associés, être responsable de nombreux dégâts, lorsque ces types de terrain sont couverts de constructions.

Les désordres observés sur les bâtiments sont très « traditionnels » et confirment les grands types de défauts à éviter, tous pris en compte dans les codes modernes. Un point particulier est ici à souligner, il concerne les problèmes de corrosion qui constituent un facteur aggravant en zone tropicale comme le sont les Antilles françaises.

FUNVISIS
MAPA PRELIMINAR DE
ISOSISTAS

SISMO DE CARIACO
9-7-97

▲ EPICENTRO
INSTRUMENTAL





FUNDACIÓN VENEZOLANA DE INVESTIGACIONES SISMOLÓGICAS
Prolongación Calle Mara, Urb. El Llanito, Caracas, Venezuela
Apdo Postal 76.880, Caracas 1070-A, Venezuela
Telfs. (02) 257 5153 / 257.7672 / 257 9346 / 258.0308 / 258.0693
Fax: (02) 257.9977 / 257 9084 / 257.9860