

GUY SANGLERAT, THIERRY R. SANGLERAT*

Philosophie des séismes

1. Historique

L'exemple récent de San Francisco a sensibilisé l'opinion sur les conséquences des tremblements de terre qui peuvent être catastrophiques.

La plus grande tragédie est associée aux tremblements de terre de 1906:

- 830.000 morts à Hensi en Chine.
- Dégâts: 80 millions de dollars pour les effondrements de bâtiments et 400 millions de dollars par le feu à San Francisco.

En Alaska en 1964 et à San Fernando en 1971, dégâts de 400 millions de dollars.

Les zones très affectées sont situées:

- Tout autour du Pacifique
- Le long de la côte Est des Etats-Unis et de l'Amérique du Sud, puis au Japon, en Chine, aux Philippines, en Nouvelle Zélande, ainsi qu'en Iran, au Liban, en Grèce, en Turquie, en Italie, en Espagne et au Sud de la France.

On classe les tremblements de terre en fonction de leur intensité, de leur magnitude, de l'accélération donnée au sol et de sa vitesse d'oscillation (tableau 1).

On peut distinguer trois types de tremblements de terre:

- 1) Tremblements de terre d'effondrement provoqués par exemple par la rupture de cavités souterraines. Souvent violents, ils n'affectent qu'un espace réduit.

*G. SANGLERAT, Ecole Centrale de Lyon, 182 bis Félix Faure, 69000 Lyon; T.R. SANGLERAT, Vice President Geosyntec Consultants, 16541 Gothard Street, Suite 211, Huntington Beach, California 92647, USA.

Tableau 1

Magnitude et énergie des tremblements de terre

Place	M	Nombre de morts	E [ergs]	E/E Agadir
Lisbonne 1755	9	des milliers	$8 \cdot 10^{24}$	80.000
Assam 1950	8.6	1.500	$2 \cdot 10^{24}$	20.000
Tokyo 1923	8.3	143.000	$7 \cdot 10^{23}$	7.000
San Francisco 1906	8.2	700	$5 \cdot 10^{23}$	5.000
Messine 1908	7.5	100.000	$4.5 \cdot 10^{23}$	450
Orléansville 1954	6.8	1.400	$3.3 \cdot 10^{21}$	33
Agadir 1960	5.8	12.000	10^{20}	
Hiroshima bombe A 20.000 t TNT			$8 \cdot 10^{20}$	

- 2) Tremblements de terre volcaniques qui accompagnent les éruptions. Ils peuvent s'expliquer par les „coups de bélier” donnés par les gaz et les laves pour s'échapper d'une cheminée volcanique obstruée.
- 3) Tremblements de terre tectoniques, de beaucoup les plus importants. Ils sont les conséquences du réajustement des plaques constituant l'écorce terrestre, ou de tensions accumulées par de lents glissements suivant certaines failles de cette écorce. Ces tremblements de terre tectoniques peuvent libérer des énergies considérables.

2. Action des tremblements de terre

Pour tenter d'atténuer les effets des tremblements de terre, il faut tout d'abord analyser les causes exactes des désordres qui se produisent. Il faut distinguer les mouvements du sol et leur conséquences sur les bâtiments et ouvrages d'art. Un tremblement de terre est un phénomène naturel qu' on ne peut empêcher. Par contre, on peut calculer les ouvrages pour résister aux sollicitations susceptibles de les atteindre.

Quelles sont ces sollicitations? Ce sont des vibrations transmises par ondes de choc. On distingue quatre types d'ondes vibratoires:

- a) Ondes P longitudinales ou de compression, pouvant provoquer également des mouvements vers le haut
- b) Ondes S transversales ou de cisaillement, mouvement orthogonal aux ondes P
- c) Ondes de Rayleigh engendrées par les ondes P arrivant à la surface terrestre. La composante horizontale de ces ondes est toujours supérieure à leur composante verticale
- d) Ondes de „Lowe” de cisaillement engendrées par les ondes S .

Un tremblement de terre provoque donc sur les ouvrages des chocs horizontaux et verticaux. Au droit de certaines fractures du sol, il peut y avoir un rejet du terrain sur 1 à 2 m de hauteur dans des zones très localisées. Souvent, le long de rivages, les tremblements de terre sont accompagnés de raz-de-marée qui peuvent être dévastateurs.

Ces chocs accidentels sont généralement de courte durée: ils peuvent se répéter à quelques minutes, quelques heures ou quelques jours d'intervalle, mais sont susceptibles d'avoir deux conséquences très différentes. Dans certains cas, ils désorganisent complètement le sol. C'est le cas de sables fins qui se liquéfient, et les bâtiments peuvent s'effondrer ou basculer dans le sol. Tel a été le cas de tremblements de terre en Alaska en 1960 et à Niagata, au Japon, en 1963.

Autre action, beaucoup plus courante: le sol est suffisamment résistant et ne subit aucun désordre. Par contre, il transmet intégralement tous les efforts aux structures des bâtiments et ouvrages qu'il supporte. Les secousses induites désorganisent les structures si elles n'ont pas été calculées pour tenir compte des efforts qui sont engendrés.

Les séismologues ont utilisé tour à tour différentes échelles macrosismique d'intensité. La plus usitée actuellement est l'échelle macrosismique internationale d'intensité qui donne des degrés de I à XII en fonction des désordres observés. Contrairement à une opinion très répandue, l'expérience montre que les bâtiments édifiés sur un sol meuble souffrent beaucoup plus que ceux dont les fondations sont établies sur le rocher. Ce comportement défavorable des constructions sur sol meuble tient, d'une part, au fait que toutes choses étant égales par ailleurs, l'amplitude des mouvements du sol est nettement plus grande dans le cas de terrains meubles que dans le cas des rochers, et d'autre part, aux déformations relativement importantes que peuvent subir les fondations au cours des mouvements. Il est naturellement capital que la superstructure soit bien liée aux fondations.

3. Réglement français

Les règles parasismiques rédigées sous l'égide de SOCOTEC SECURITAS en 1969 ont été révisées en 1982 et en 1985. Elles définissent par département, arrondissement, canton, les zones de séismicité:

- Nulle ou négligeable : Zone 0
- Faible : Zone 1
- Moyenne : Zone 2
- Forte : Zone 3

Les Zones 3 se rencontrent en Guadeloupe et Martinique, mais pas en France métropolitaine. Les départements métropolitains dans lesquels se trouvent les cantons intéressés par les Zones 1 et 2 sont au nombre de 24. Rappelons qu'en France, il y a, en moyenne, une dizaine de secousses telluriques par an. Les séismes véritablement destructeurs sont rares, cependant leur importance ne doit pas être minimisée. Il y en a eu en particulier en 1556, 1564, 1617, 1618, et le grand séisme de Diano Marina, en 1987, a rendu 115 maisons inhabitables à Menton et Nice. Le Comté de Nice a connu des secousses dévastatrices en 1348, 1494, 1556, 1564, 1617, 1744, 1752, 1818, 1854, 1887, 1905, 1909. Le 13 Août 1967, un séisme destructeur s'est produit sur le front Nord pyrénéen, près d'Arette.

4. Protection antisismique

Pour se prémunir contre les effets des tremblements de terre, ou tout au moins réduire leurs conséquences, il suffit de calculer les structures pour résister aux mouvements horizontaux et verticaux, les mouvements horizontaux ayant généralement une amplitude beaucoup plus importante. Les problèmes de la protection contre les séismes sont susceptibles de solutions d'autant plus élégantes sur le plan technique et d'autant moins onéreuses sur le plan économique qu'ils sont abordés plutôt dans le courant des études. Sans recourir à des calculs compliqués, il est nécessaire tout d'abord de souligner l'importance des règles normales de construction, ont des chances non négligeables de supporter convenablement des secousses destructrices d'intensité modérée. Inversement, il a été constaté que, soumises aux mêmes sollicitations des constructions de conception irrationnelle, des ouvrages mal projetés et mal exécutés, sont généralement le siège d'accidents très graves, souvent meurtriers, comme cela a été le cas à Mexico, Agadir ou Orléansville. Le constructeur qui désire réaliser un ouvrage parasismique doit donc, en premier lieu, respecter les prescriptions techniques normalement en usage: ferrailage correct des éléments en béton armé, continuité des armatures d'un élément à l'autre, etc. Ce préliminaire souligné, examinons comment on peut concevoir et calculer des ouvrages antisismiques. Deux méthodes sont envisageables:

- a) Ou bien on calcule la structure pour encaisser tous les efforts auxquels on peut s'attendre, ou bien on isole des fondations la structure grâce à des appuis, espèces de ressorts composés de lames d'acier et de caoutchouc néoprène, qui absorbent une grande partie des vibrations.
- b) Tout d'abord il est très important de déterminer la manière dont le sol entre en vibration et comment la structure réagit. Il est évident qu'une structure souple et une structure raide, dans le même sol, soumises aux mêmes efforts horizontaux, n'auront pas le même comportement. Grâce aux ordinateurs, on sait très bien approcher ce problème. Il faut d'abord déterminer les caractéristiques du sol, ses modules de déformation statique et dynamique sous l'action des efforts horizontaux. Ensuite on effectue des calculs qui mettent en jeu ce qu'on appelle „l'interaction sol-structure”.

L'action du tremblement de terre horizontal est analogue à celle du vent et là, il faut souligner ce qu'on peut appeler un paradoxe. Il est beaucoup plus simple de rendre anti-sismique un immeuble de grande hauteur qu'un immeuble bas, tels que groupe scolaire ou stade. En effet, dans un immeuble comme la Tour du Crédit Lyonnais à Lyon ou la Tour d'Amérique Latine à Mexico, il est prévu des murs de contreventement pour résister au vent dont l'action est très importante. Lorsqu'il y a un tremblement de terre, cela correspond à une surcharge, mais qui n'est pas considérable par rapport à l'action du vent de tempête ou de tornades. Donc, pour un bâtiment haut, prendre en compte les effets sismiques conduit à une majoration de quelques pour cent des sections d'acier lorsque la conception initiale est saine. Par contre, dans un immeuble en rez-de-chaussée, groupe scolaire, hall d'exposition ou petit bâtiment d'habitation,

le vent n'a que peu d'effet, il n'y a pas de structure avec refends porteurs ou portiques raides, il faut donc le prévoir en plus. En conséquence, le surcoût dû à la protection contre les tremblements de terre est proportionnellement beaucoup plus élevé pour les constructions basses que pour celles de grande hauteur.

Dans le cas de centrales nucléaires, il est évidemment très important de résister aux tremblements de terre et d'éviter les fissures qui laisseraient passer des radiations atomiques. Il a paru beaucoup plus simple de calculer une centrale nucléaire reposant sur des appuis élastiques. Il suffit donc de dimensionner chaque fois ces appuis élastiques et le reste de la structure est bon; d'où une économie considérable de calculs, de plans d'exécution, etc. pour des ouvrages d'une aussi grande complexité. On doit naturellement tenir compte de l'action du tremblement de terre sur les tuyauteries internes et externes.

Des géotechniciens ont calculé des centrales nucléaires au Japon sur des zones de failles très sensibles aux tremblements de terre. Il faut déterminer si ces failles sont susceptibles de bouger ou pas, et on fait appel au paléomagnétisme, variation de la position du pôle magnétique au cours des millénaires.

J'attire tout spécialement l'attention des Maîtres d'Ouvrage, des Architectes, des Constructeurs et de tout participant à l'acte de construire, sur un point dont l'importance est capitale pour la sauvegarde des vies humaines. En effet, certains séismes ont revêtu par le passé, comme celui de San Francisco en 1906, un caractère tragique en raison des ruptures de canalisations de gaz et d'eau. La rupture des premières a été à l'origine de graves incendies, celle des secondes a privé les Services de Protection Civile des moyens de combattre les sinistres ainsi déclarés.

Il ne faut pas oublier que le raccordement des réseaux intérieurs et extérieurs est un point très vulnérable des canalisations, en raison des conditions de fondation parfois très différentes de chacun d'eux. Il mérite une étude approfondie. Naturellement, le comportement des tuyauteries internes dans le cas d'usines ou centrales nucléaires doit être étudié sous l'action des tremblements de terre.

5. Prévision des séismes

Il ne faut se faire aucune illusion: il est absolument impossible de prévoir les séismes. Certains ont prétendu que l'observation du comportement des animaux de basse-cour ou des chiens, chevaux, serpents, rats, etc., permettait de détecter, d'une manière très précise, l'imminence d'un tremblement de terre. Les Chinois sont partisans de cette méthode qu'ils ont appliquée, avec grand succès d'ailleurs, dans un cas particulier il y a quelques années. Hélas, six mois plus tard, un séisme est survenu sans que ce signal ait fonctionné, et il y a eu des milliers de morts. Je suis donc très sceptique sur ce genre d'alarme. A mon avis, la meilleure méthode pour se protéger contre l'action des séismes est de construire correctement, en fonction des données scientifiques dont nous disposons. Il est intéressant de noter à ce sujet l'exemple du Japon, où il y a un tremblement de terre et un glissement de terrain par semaine. Dans ce pays on construit, soit des maisons souples et très légères, soit des structures métalliques ou en béton armé dans lesquelles seuls les remplissages peuvent s'effondrer.

Récemment, deux fortes secousses de magnitude 5 et 6 ont parcouru les deux grandes îles de Hokkaido et de Honsu. Puis, le 4 Octobre 1985, à une heure d'intervalle, sont survenus à Tokyo deux tremblements de terre. L'un d'eux, très violent, de magnitude 6, était le plus fort enregistré dans la capitale japonaise depuis 56 ans. Aucun mort n'a été déploré lors de ces quatre séismes.

6. Tremblement de terre de Mexico du 19 Septembre 1985

Le tremblement de terre du 19 Septembre 1985 à Mexico, qui a duré trois minutes, a été exceptionnel, puisqu'il a atteint une magnitude 9 dans l'échelle de Mercali modifiée. L'épicentre se trouvait sur la côte Pacifique du Mexique, à 400 km. En fait, il y a eu deux séismes superposés séparés de 26 secondes, ce qui a donné lieu à cette magnitude exceptionnelle (Fig. 1). On a observé que, suivant le type de sols, la réponse a été très

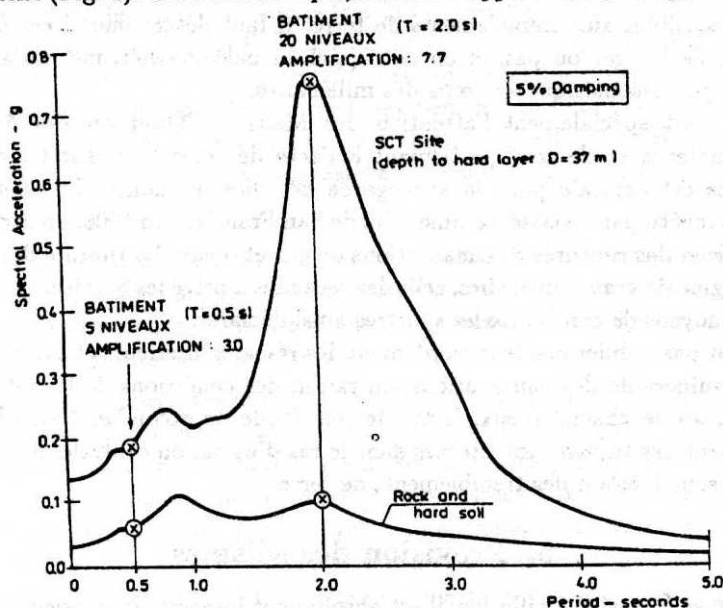


Fig. 1. Séisme du Mexique (Seed et al. 1988)

différente, c'est-à-dire que dans la zone des sols mous, d'origine lacustre, il y a eu une amplification considérable du mouvement sismique, ce qui a conduit à des accélérations qui ont atteint 20% de l'accélération de la pesanteur en direction horizontale. En outre, la période du tremblement de terre a été très longue, de l'ordre de deux secondes, ce qui a entraîné des phénomènes de résonance. Ce sont les bâtiments dont la période propre correspond précisément à deux secondes qui ont été le plus sollicités, et ces bâtiments sont ceux dont le nombre d'étages était compris entre 10 et 18. Ce sont donc ceux qui ont été le plus éprouvés, car ils sont entrés en résonance avec le tremblement de terre.

Du point de vue de la structure des bâtiments, les causes principales des dommages observés à Mexico sont les suivantes:

- a) D'une part, les règlements de construction ne prévoyaient pas un tremblement de terre de cette importance, d'autre part, certains défauts de construction ont aggravé les conséquences du séisme. On s'est aperçu en particulier que certains bâtiments se trouvant à l'angle de deux rues n'avaient pas été calculés pour le moment de torsion auquel ils se sont trouvés soumis pendant le tremblement de terre.
- b) On a constaté aussi de nombreux défauts de construction, en particulier au niveau du béton armé: certains bâtiments avaient été mal construits, les aciers mal répartis dans les poteaux et les aciers de liaison insuffisants, par exemple. Certains systèmes de construction, en particulier les planchers alvéolés, ce sont très mal comportés. Des leçons très utiles, non seulement pour Mexico, mais aussi pour toutes les villes du monde situées en zone sismique, peuvent être tirées de ce tremblement de terre du point de vue structure: 90% des désordres sont imputables aux structures et 10% aux fondations.
- c) Du point de vue des fondations, on a observé des comportements tout à fait étonnants, en particulier la formation de fissures profondes dans le sol, chose qui avait été rarement observée au paravant. Certaines fondations, en particulier celles de certains bâtiments lourds, ont subi brutalement des tassements très importants qui, dans plusieurs cas, ont pu dépasser 1 - 1,50 m.
- d) Les bâtiments construits sur pieux flottants ont souvent, aussi, présenté des problèmes, soit par diminution du frottement sol-pieu, c'est-à-dire altération du frottement qui assure la stabilité de ces pieux, soit par rupture des pieux eux-mêmes.
- e) Du point de vue des fondations et structures, on a pu tirer un bon nombre de leçons dont tiendra compte le nouveau règlement de construction.

L'un des problèmes qui se pose, c'est celui de définir les tremblements de terre que devront prendre en compte les ingénieurs dans leurs projets. Si on devait retenir comme base de projet le tremblement de terre du 19 Septembre 1985, il faudrait pratiquement renoncer à construire dans la ville de Mexico. Il faut donc trouver un moyen terme, c'est-à-dire un tremblement de terre qui soit acceptable économiquement pour les projets. Bien entendu, cela pose des problèmes de décision difficiles.

Cependant, l'une des conclusions les plus importantes que l'on peut tirer de la catastrophe du 19 Septembre 1985 est la suivante: Pour limiter les conséquences d'un tremblement de terre, il faut impérativement:

- a) Réaliser une étude complète du terrain avant d'établir le projet,
- b) Choisir un parti architectural permettant de résister aux secousses horizontales (formes simples, éléments raidisseurs bien répartis et continus de haut en bas), éviter les rez-de-chaussée très ouverts avec des points d'appui isolés,
- c) Calculer l'ossature correctement,
- d) Exécuter les travaux conformément aux règles de l'art, ce qui implique que les plans et l'exécution doivent être soigneusement contrôlés.

7. Le séisme de Loma Prieta

7.1. L'évènement sismique

Le séisme du 17 octobre 1989, dit de „Loma Prieta” de magnitude 7,1 a été causé par la rupture d'un tronçon d'environ 40 km de la faille de San Andreas, tronçon situé dans les montagnes de Santa Cruz, à environ 80 km au Sud-Sud Est de San Francisco (Fig. 2). Il s'agit là du premier séisme de magnitude supérieure à 6 survenant sur la partie de la faille de San Andreas ayant joué lors du séisme de Californie du Nord de 1906 (magnitude > 8), le tronçon remis en mouvement le 17.10.89 étant en fait l'extrémité sud de la zone cassée en 1906.

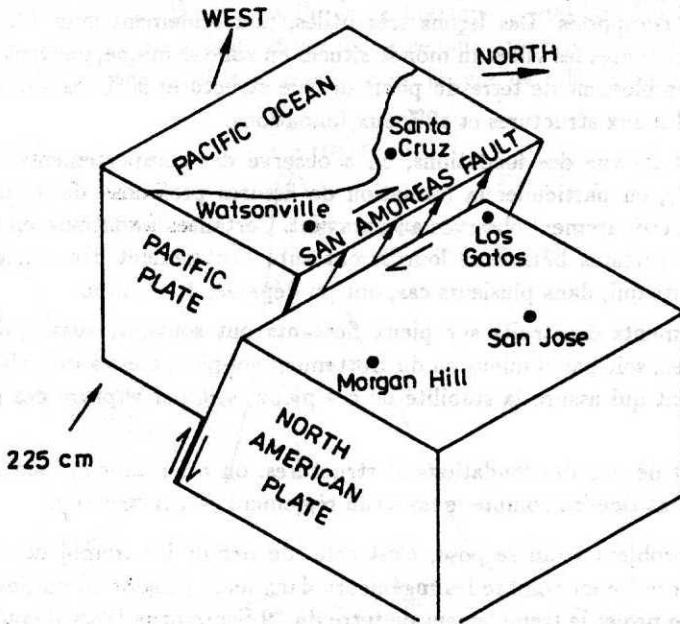


Fig. 2. Séisme du San Francisco (1989)

Le foyer de ce séisme, comme celui des milliers de répliques qui lui ont succédé (4 760 exactement au 7 novembre 1989), a été très bien localisé par l'USGS (United States Geological Survey) grâce, en particulier, aux données de son réseau très dense de Californie centrale, et également par d'autres réseaux sismologiques mondiaux (dont le réseau français Géoscope): au 30.10.89, les localisations de l'USGS et de l'Université de Berkeley étaient les suivantes:

- heure origine 0h04'15" TU le 18.10.89 (17h04'15" le heure locale 17.10)
- latitude 37.037 N (USGS) 37.027 N (Berkeley)
- longitude 121.883 W (USGS) 121.880 W (Berkeley)
- profondeur 18 km (USGS) 15.5 km (Berkeley)

(L'épicentre est donc situé à environ 15 km à l'Est-Nord-Est de Santa Cruz et à 95 km au Sud-Sud-Est de San Francisco).

7.2. Comportement des sols

Les manifestations de l'influence du comportement des sols pendant le séisme de Loma Prieta sont nombreuses: amplification du mouvement sismique par les terrains meubles de couverture, liquéfaction, tassements, glissements de terrains. Ces manifestations ne constituent pas des faits nouveaux; elles ont été observées pendant la plupart des séismes majeurs et confirment des données maintenant bien établies et admises:

- les couches alluvionnaires de surface sont susceptibles de modifier de façon significative le mouvement sismique incident,
- les dépôts alluvionnaires récents, dans un état de densité lâche, sont le siège de tassements importants lors de sollicitations cycliques,
- ces mêmes dépôts saturés peuvent perdre leur résistance au cisaillement et se comporter, au moins temporairement, comme des liquides avec pour conséquence des désordres importants dans les structures qu'ils supportent.

7.2.1. Glissements de terrain

De nombreux glissements de terrain (plus d'un millier d'après les renseignements que nous avons recueillis à l'Université de Berkley) ont été relevés dans la région de Santa Cruz, en particulier le long de la route n°17 entre Santa Cruz et San Jose; cependant il est difficile de certifier que l'ensemble de ces glissements soit dû au séisme; les pluies abondantes qui l'ont suivi peuvent en avoir été la cause. La conséquence de ces glissements a été de rendre la circulation excessivement difficile dans cette région.

7.2.2. Tassements des sols

Les exemples de tassements les plus importants qu'il nous ait été donné de constater concernent la région de San Francisco et Oakland. Le long de la baie, côte San Francisco au voisinage du Bay Bridge et plus au sud dans le port et dans Chines Basin, des tassements de plusieurs dizaines de centimètres (30 à 50 cm) ont été relevés. Dans ces zones, le sol consiste généralement en une dizaine de mètres de remblai hydraulique surmontant 10 à 15 m de Bay mud. Côté Oakland, des tassements importants ont également été relevés le long de la baie, au nord du port.

Plus proche de la zone épiscopale nous avons pu constater des tassements importants d'un remblai dans la centrale de Moss Landing. Ce remblai situé dans la station d'arrivée de gaz, pratiquement pas compacté lors de sa mise en place d'après les renseignements que nous avons pu recueillir, a subi un tassement d'ensemble de l'ordre d'une quinzaine de centimètres. Ce tassement a eu pour effet de supprimer l'appui de certaines tuyauteries sans pour autant leur induire de désordres.

De façon générale, les tassements ont affecté les zones de remblai peu ou pas compactées et ils peuvent représenter une déformation verticale de plusieurs pourcents.

7.2.3. Liquéfaction

Les phénomènes de liquéfaction se sont manifestés de façon extensive dans la région de San Francisco - Oakland mais également dans la région de Santa Cruz. Le quartier le

plus touché est le quartier de Marina où la liquéfaction du remblai hydraulique de 10 m d'épaisseur a provoqué des dommages importants aux habitations mais a également été la cause de la rupture des canalisations en fonte enterrées servant à la distribution du gaz. Ce remblai est constitué de sable fin noirâtre dans un état lâche (valeurs de SPT inférieures à 5) qui a été éjecté par des cratères dont il était possible de constater la présence en surface (sand boils). Aux niveaux des habitations, cette liquéfaction s'est traduite par des basculements et enfoncements, des soulèvements des revêtements et bordures de trottoir.

7.3. Comportement des bâtiments

Trois éléments permettent en principe de juger et d'expliquer le comportement des bâtiments:

- l'agression sismique (niveau d'accélération, contenu fréquentiel, durée, etc.),
- la qualité du sol (rocher, sable liquéfiable, etc.),
- la qualité de la construction.

Globalement, les accélérations relevées à San Francisco, sur le rocher, ne dépassaient pas 0.10 g; par conséquent, les bâtiments érigés sur ce type de sol ont été modérément sollicités.

Contrairement au site rocheux, le mauvais sol de fondation, comme celui de Marina de San Francisco, a donné lieu à des accélérations importantes atteignant ou dépassant 0.25 g.

La plupart des structures de bâtiments se sont bien comportées, sauf:

- les maisons à murs porteurs, en brique, non renforcés: centre de Santa Cruz, Watsonville, Los Gatos, quelques bâtiments de San Francisco;
- les bâtiments à structure bois de Marina - San Francisco, ayant un parking au rez-de-chaussée.

Etant donné la moisson des enregistrements recueillis, les études des comportements des bâtiments se poursuivra pendant plusieurs années.

8. Conclusions

On sait en génie parasismique que toutes les dispositions doivent être prises pour qu'une structure puisse entrer en phase plastique et écriéter ainsi les efforts qui ont été à l'origine même de sa plastification. Indépendamment de tout aspect „analyse”, cette simple exigence qualitative nécessite essentiellement deux précautions:

- éviter toute liaison fragile, même a priori anodine, qui souvent amorce la rupture (au sens ruine et non seulement fissurations ou dégâts importants), même si les liaisons structurales essentielles ont été étudiées dans le détail et largement dimensionnées;

- étudier tous les détails qui constituent les conditions essentielles pour que le béton armé garde son intégrité et puisse jouer le rôle qu'on lui demande. Cette étude de conception ne demande d'ailleurs qu'une bonne maîtrise des principes élémentaires de ce matériau complexe qu'est le béton armé (principe dont l'enseignement semble sacrifié de plus en plus au profit des techniques élaborées de calculs et de recherche de nuances dans la détermination du bras de levier du couple élastique en flexion simple ou composée) puisqu'elle ne concerne que l'étude: de la transmission et de la continuité des efforts dans les noeuds; de l'ancrage des aciers; du recouvrement et de la tenue des aciers trop proches des parements; des angles sollicités qui risquent d'être dépourvus d'acier compte tenu du rayon de cintrage; etc.

Les leçons du séismes de San Francisco

Quelles leçons pratiques peut-on tirer de ce séisme?

1. Un „effet de site”, similaire à celui du séisme de Mexico en 1985, avec liquéfaction, est responsable de l'effondrement de certains ouvrages, alors que des ouvrages similaires construits sur de bons sols ont résisté.
2. Sur les ouvrages de grande longueur, les mouvements différentiels du sol sont à prendre en compte (mouvements non synchrones).
3. La structure doit présenter un degré d'hyperstaticité aussi élevé que possible pour dissiper l'énergie par plastifications successives des noeuds.
4. La rupture des piliers soit toujours survenir après celles des poutres.
5. Les armatures de ligatures transversales dans les poteaux sont essentielles, plus encore que les armatures longitudinales.
6. Il est préférable de construire une structure raide sur un terrain meuble et une structure souple sur un terrain raide.

Summary

Philosophy of the Earthquakes

The general characteristics of earthquakes were briefly reviewed and presented in this paper. The impact of the Agadir (1960), Niigata (1963), Caracas (1967), Mexico (1985) and San Francisco (1989) earthquakes on structures and foundations were analysed in detail. Special attention was given to the evaluation of subsoil behaviour including settlements, liquefaction, and movements resulting in landslides. Design methods to minimize the impact of earthquakes on structures and their foundations were presented.

Streszczenie

Filozofia trzęsień ziemi

Dokonano krótkiego przeglądu ogólnych charakterystyk trzęsień ziemi. Przeanalizowano szczegółowo wpływ trzęsień ziemi w Agadirze (1960), Niigata (1963), Caracas (1967), Meksyku (1985) i San Francisco (1989) na konstrukcje i fundamenty. Szczególną uwagę poświęcono analizie zachowania się podłoża gruntowego w przypadku osiadań, upłynięciu gruntów i ruchom towarzyszącym osuwiskom. Przedstawiono również kilka zaleceń projektowych minimalizujących wpływ trzęsień ziemi na konstrukcje i ich fundamenty.