

# Le grand séisme du Hanshin du 17 janvier 1995

Autor(en): **Koller, Martin G. / Studer, Jost A. / Wenk, Thomas**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Ingénieurs et architectes suisses**

Band (Jahr): **121 (1995)**

Heft 8

PDF erstellt am: **13.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-78591>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# Le grand séisme du *Hanshin* du 17 janvier 1995

Par Martin G. Koller,  
ing.dipl. EPFZ/SIA-  
ASIC, Dr. ès sc.  
techn.,  
Résonance  
Ingénieurs-conseils  
SA,  
rue J.-Grosselin 21,  
1227 Carouge  
Jost A. Studer,  
ing.dipl. EPFZ/SIA,  
Studer Engineering,  
Steinwiesstr. 30,  
8032 Zurich  
Thomas Wenk,  
ing.dipl. EPFZ/SIA  
Institut de statique  
et de construction,  
EPFZ, 8093 Zurich  
Texte français:  
Pierre A. Bettens,  
ing.civil EPFL,  
Genève

## Introduction

Le grand séisme du *Hanshin* du 17 janvier 1995 est le tremblement de terre le plus destructeur subi par le Japon depuis 1923. Il a particulièrement touché le cœur de la ville industrielle de Kobe, où l'on a décompté quelque 5300 morts et 27 000 blessés. 107 000 maisons ont été fortement endommagées (ce qui représente le 30% des immeubles de la ville) et 20 000 d'entre elles, des maisons en bois pour la plupart, se sont effondrées.

Dans le cadre de la SIA, la Société suisse du génie parasismique et de la dynamique des structures a mandaté trois experts pour une mission de reconnaissance avec les objectifs suivants:

- une observation particulière des dégâts permettant d'analyser la fiabilité des critères et des normes utilisés actuellement pour la vérification de la sécurité aux tremblements de terre, et
- une prise de contact avec les organismes locaux permettant par la suite, des analyses et des recherches plus approfondies.

La mission a eu lieu en collaboration avec l'Aide suisse en cas de catastrophes (ASC).

Le Comité suisse de la Décade internationale pour la réduction des catastrophes naturelles (IDNDR) ainsi que le Programme national de recherche (PNR) 31 ont fourni également une aide financière.

## Aperçu des dégâts

Kobe - ville industrielle et port le plus important du Japon - compte 1,5 millions d'habitants. Le développement industriel de cette région a commencé après le grand séisme du *Kanto* de 1923, lorsque, pour des raisons de sécurité, une partie des industries s'est déplacée de la région de Tokyo vers celle de Kobe.

Pendant la Deuxième Guerre mondiale, Kobe a été presque entièrement détruite. L'après-guerre a connu jusqu'au début des années 70 une intense activité de reconstruction, suivie durant les années 80 et 90 par la construction de nouveaux immeubles. La structure bâtie de Kobe peut donc être qualifiée de relativement récente.

Les dégâts inventoriés ci-dessous sont tirés des communiqués de la presse locale. Les intensités indiquées dans le tableau 1 sont celles qui ont été enregistrées par l'agence météorologique japonaise.

Si le tremblement de terre avait eu lieu un peu plus tard que 5h46 (heure locale), soit pendant l'heure de pointe matinale où les trains de banlieue et les routes surélevées sont surchargés, le nombre des morts et des blessés aurait été encore plus important.

Le réseau ferroviaire local, où la cadence des trains est très dense, ainsi que le réseau des routes à grande circulation ont été en grande partie détruits, plongeant

le trafic dans un immense chaos qui a fortement entravé les interventions de secours et de déblaiement. C'est pourquoi les autorités ont fixé comme priorité la reconstruction - du moins provisoire - des voies ferrées et des voies de communication. Mais il faudra des mois pour que le réseau ferroviaire redevienne entièrement praticable.

Le tremblement de terre a complètement privé l'agglomération de Kobe d'électricité, de gaz et d'eau. Mais six jours plus tard déjà, tous les immeubles restants étaient à nouveau alimentés en courant électrique, à l'exception de 40 000 logements faisant partie des bâtiments détruits ou instables. Et quatorze jours après le sinistre, des alimentations de fortune distribuèrent de l'eau dans les quartiers les moins touchés.

La rupture des conduites d'eau a rendu pratiquement impossible la lutte contre les quelque 350 incendies qui ont ravagé surtout les quartiers principalement composés de maisons en bois. Ces incendies ont duré

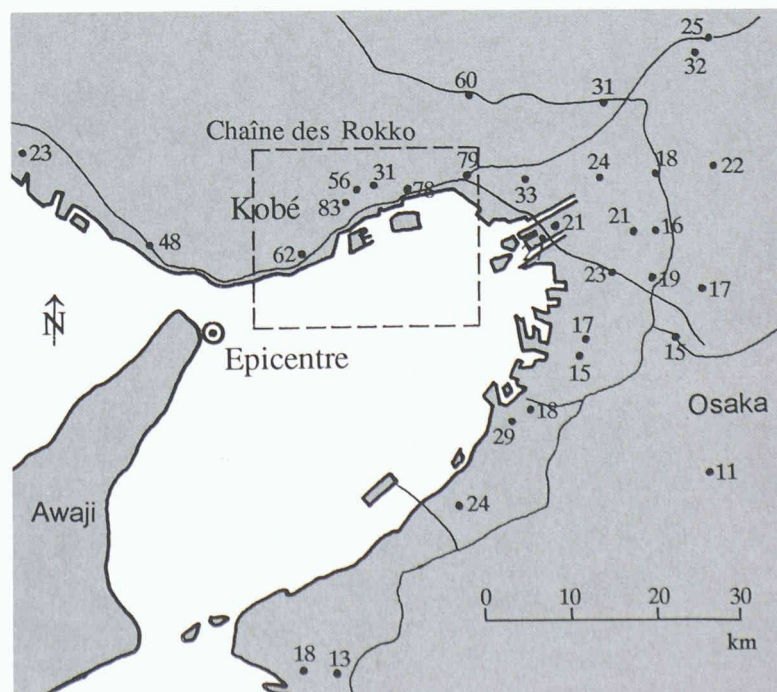


Fig. 1. - Situation de Kobe avec indications des accélérations maximales du sol mesurées en % de g



**Tableau 1 - Intensités observées lors du grand séisme du Hanshin du 17 janvier 1995**

Intensités		
Echelle japonaise	MSK	
7	XI	Zone des dégâts principaux
6	VIII - X	La grande partie de Kobe et Sumoto, le nord de l'île Awaji
5	VI - VII	Kyoto, Hikon, Toyooka
4	V - VI	Osaka, Nara, Maizuru, Wakayama, Himeji

plus de deux jours. Trois jours après la secousse, Kobe était à nouveau reliée au monde extérieur par un grand nombre de liaisons par satellites que tout le monde pouvait utiliser gratuitement, ce qui relève d'une toute autre doctrine que celle qui serait appliquée en Suisse en cas de grande catastrophe, où il est prévu de couper toutes les liaisons téléphoniques privées. Les travaux de déblaiement ont été extrêmement rapides et efficaces bien que les médias, même japonais, aient écrit que, dans les heures qui ont suivi le tremblement de terre, les interventions de secours avaient été trop lentes et mal coordonnées.

**Aspects sismologiques**

La ville portuaire de Kobe et ses banlieues forment une longue bande logée entre la baie d'Osaka et la chaîne des Rokko paral-

lèle à la côte (fig. 1). Si l'on pratique une coupe perpendiculaire à cette côte, on constate que les quartiers extérieurs côté montagne sont situés sur du granit. Dans le secteur médian prédominant, le sous-sol est composé de couches d'alluvions «semi-compactes», en grande partie du sable graveleux, avec une vitesse des ondes de cisaillement d'environ 350 m/s à proximité de la surface. L'épaisseur de ces alluvions augmente lorsque l'on se rapproche de la côte, où les couches atteignent plusieurs centaines de mètres. Une bande de remblais de plusieurs centaines de mètres de largeur longe la côte, au large de laquelle se trouvent également deux îles artificielles fortement bâties, faites également de remblais. L'épicentre du grand séisme du Hanshin, d'une magnitude de  $M_I = 7,2$ , se situe entre l'île

Awaji et le continent, à une profondeur de 13 km. Un glissement de décrochement s'est produit très près de la surface, sur une longueur de 40 km, atteignant ainsi la ville de Kobe sur toute sa longueur. Il est fort probable que deux ruptures se soient produites l'une après l'autre, en l'espace de quelques secondes. Une autre rupture d'environ 10 km de longueur s'est formée également dans la direction opposée, le long de la côte nord-ouest de l'île Awaji, où elle a atteint la surface sur une longueur de 9 km. La chute de contrainte due à la rupture, au droit de la faille, n'a pas encore été définie de manière précise mais il est certain qu'elle a atteint des valeurs très élevées, quelques estimations parlant même de plus de 100 bars. Les valeurs maximales des accélérations horizontales du sol sont indiquées à la figure 1. Elles ont été soit mesurées directement, soit calculées à partir de vitesses mesurées. Des valeurs supérieures à 80% de  $g$  ont été relevées dans la partie alluvionnaire, ce qui permet de souligner une fois de plus que des valeurs aussi élevées sont possibles dans les sols meubles. Pour le moment, seuls deux sismogrammes de la secousse principale sont disponibles pour la région de Kobe. Il s'agit de

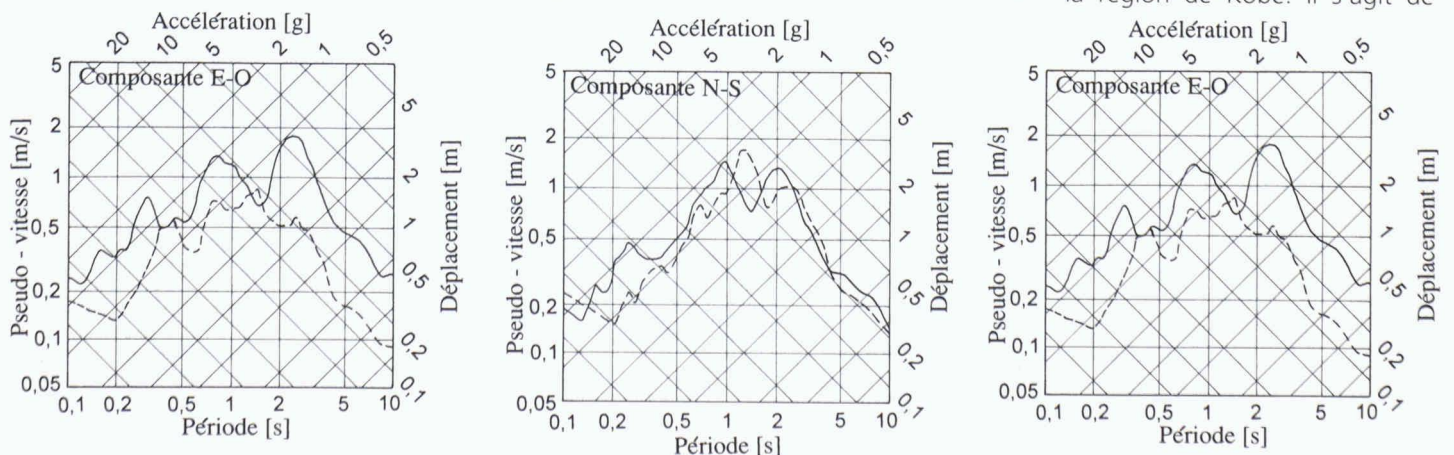


Fig. 2. - Spectres de réponse mesurés par les stations de Kobe-University et Kobe-Motoyama  
 — Kobe-Motoyama  
 - - - - Kobe-University



mesures de vitesses enregistrées dans les stations de *Kobe-University* – sise sur le rocher – et de *Kobe-Motoyama*, sise sur les alluvions; malheureusement pour ces dernières, l'enregistrement saturait à 400 mm/s. Il a toutefois été possible d'établir des accélérogrammes et des spectres de réponses approximatifs à partir des parties non saturées des mesures (fig. 2). Ce faisant, il a été constaté une fois de plus que, contrairement à la plupart des normes parasismiques actuelles, les valeurs maximales des accélérations, pour les spectres de réponse sur des sols alluvionnaires semi-compacts, peuvent être supérieures aux valeurs sur rocher. Il faut relever également que pour un mécanisme de décrochement, les accélérations verticales du sol ont été particulièrement fortes, ce qui peut s'expliquer par la proximité de l'épicentre. Les caractéristiques frappantes – mais pour l'instant encore peu compréhensibles – de ce tremblement de terre sont les dimensions de la zone où se sont produits les dégâts principaux, soit 30 km de longueur pour seulement un à deux kilomètres de largeur. Le bord de cette zone côté montagne ne suit que partiellement la limite entre granit et alluvions. Côté mer, les sites artificiels sur remblais sont en grande partie en dehors de la zone principalement sinistrée. Ainsi, à première vue, les mauvaises qualités du sol ne semblaient pas avoir joué de rôle prépondérant, et comme beaucoup d'experts le pensaient, la configuration de la zone sinistrée s'expliquerait par la formation d'une faille située directement sous elle. Mais cette interprétation est mise en doute par une analyse plus approfondie. En effet, si la rupture, cause du tremblement de terre, se trouvait effectivement sous la zone sinistrée, les stations de *Kobe-University* (avec  $a_{\max} = 31\%$  de

$g$ ; fig. 1) et *Kobe-Motoyama*, (avec  $a_{\max} = 78\%$  de  $g$ , fig. 1) – selon ce qui ressort des cartes géographiques disponibles – auraient dû se trouver de part et d'autre de la faille. Or, la polarisation des mouvements horizontaux du sol est la même pour les deux stations, ce qui fait dire que ces stations sont du même côté de la faille. Les hypothèses émises sont contredites également par la localisation des hypocentres des nombreuses répliques qui ont suivi la secousse initiale, hypocentres qui se situent d'ordinaire sur, et surtout sur le bord, de la faille principale.

La rupture devrait se trouver plutôt le long des segments de faille déjà connus, c'est-à-dire en bordure nord-ouest de la ville (fig. 3). Le fait que la zone des dégâts principaux soit très étroite serait dû plutôt à des effets de site. Mais pourquoi les zones remblayées ne présentent-elles pas les plus gros dégâts, comme on peut le constater d'habitude?

A première vue, on est tenté d'avancer comme explication la non linéarité des effets dans les sols remblayés. Les nombreux instruments de mesure installés par l'Université de Kyoto après

le tremblement de terre ont montré lors de faibles répliques, que les accélérations spectrales, particulièrement à 2 Hz, sont nettement plus importantes dans la zone principalement sinistrée que dans la zone remblayée. Y a-t-il coïncidence entre les fréquences propres des sites et des bâtiments de la zone sinistrée? Des recherches plus approfondies seront nécessaires pour trouver une explication plus sûre des phénomènes constatés.

### Aspects géotechniques

La plus grande partie des dégâts induits par les fondations a été constatée sur les remblais en bordure de la côte et sur les îles artificielles. De gros déplacements verticaux et horizontaux du sol ont été relevés dans la zone des installations portuaires et sur les îles artificielles. Ces déplacements sont dus à une liquéfaction étendue du sous-sol. De grosses surfaces des îles artificielles se sont abaissées de 0,3 à 1 m. Des murs du port se sont dérochés sur de grands tronçons, ce qui a eu pour conséquence des déformations horizontales de plusieurs mètres et des affaissements atteignant localement trois mètres. Mais grâce

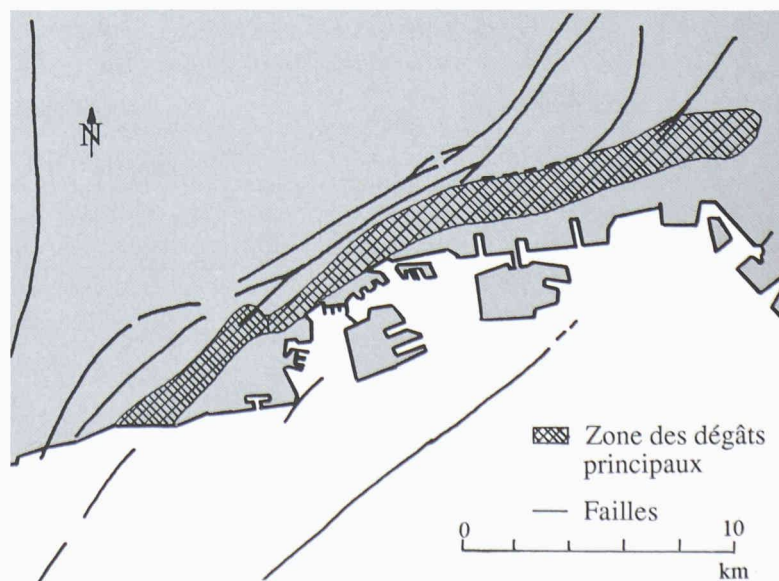


Fig. 3. – Extrait agrandi de la figure 1



au progrès de la technique des fondations, on n'a plus vu de maisons d'habitation renversées ou de réservoirs soulevés, comme cela avait été le cas en 1964 à Niigata. Il est d'ailleurs surprenant de constater que les constructions ont été relativement peu touchées. Par exemple, l'hôpital de *Port-Island*, fondé sur des pieux de 60 m de longueur, est resté opérationnel. Seuls de petites inclinaisons ou des légers soulèvements ont été constatés sur un nombre limité de constructions, du reste peu importantes.

Les matériaux qui ont été éjectés du fait de la liquéfaction du sol ont une granulométrie assez uniforme correspondant typiquement à celle d'un sable fin homogène. Ces matériaux ont recouvert de grandes surfaces d'une couche de plusieurs centi-

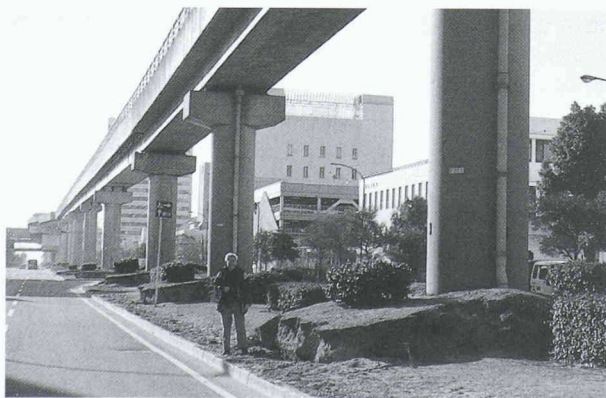


Fig. 4. – Tassement quasiment homogène à l'intérieur de Port-Island dû à la liquéfaction du sol



Fig. 5. – Déplacements horizontaux et verticaux du sol dus à la rupture d'un mur de quai dans le port de Port-Island

mètres d'épaisseur, de sorte que les routes et les places ont dû être déblayées comme s'il avait neigé.

Un chemin de fer surélevé parcourt l'île artificielle de *Port-Island*. La figure 4 montre un gros affaissement de presque 1 m à proximité des piliers. Vu ses fondations profondes, celui-ci, comme la superstructure de la voie ferrée, n'a pas été endommagé, pas plus que les constructions à l'arrière-plan. La figure 5 montre les dégâts sur l'un des nombreux murs du port. Les déformations horizontales mesurent plusieurs mètres. Vu leurs fondations profondes, les bâtiments en retrait sont restés pratiquement intacts.

La cité de Kobe compte trois grands tunnels routiers et deux grands tunnels ferroviaires. Deux de ces tunnels routiers et l'un des tunnels ferroviaires, chacun d'une longueur d'environ 7 km, traversent la chaîne des *Rokko* perpendiculairement à la côte. Quant au tunnel du train à grande vitesse *Shinkansen*, d'une longueur de deux fois 15 km, il traverse la chaîne des *Rokko*, parallèlement à la côte. Selon des indications de source japonaise, le tunnel routier serait intact, tandis qu'en un endroit du tunnel du *Shinkansen* – vraisemblablement au droit de la faille – le revêtement serait légèrement endommagé.

#### Installations industrielles

La plupart des installations industrielles de Kobe sont implantées le long de la côte, donc sur la zone remblayée. La plupart des dégâts constatés, subis par ces installations, ont été provoqués essentiellement par les déformations importantes du sol et très peu par les accélérations elles-mêmes.

Sur le plan économique et compte tenu des arrêts de production qui vont s'étendre sur plusieurs mois, les dégâts aux installations industrielles comme

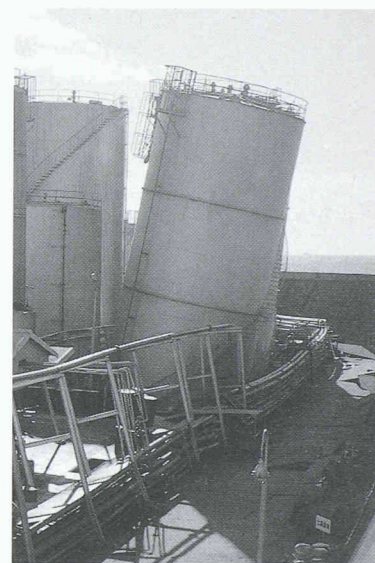


Fig. 6. – Réservoir incliné par suite de la liquéfaction du sol, mais sans pertes de contenu

aux installations portuaires, sont désastreux. En revanche, sous l'angle de la sécurité et de la protection de l'environnement, la plupart des installations et des dépôts ont bien résisté, même si le *Japan Times* du 5 février 1995 a pu annoncer que 40% des 415 réservoirs pour les produits pétroliers étaient endommagés. En réalité, il s'agissait en grande partie de déformations ou d'inclinaisons à peine visibles à l'oeil nu, à l'exception de cas isolés spectaculaires comme celui de la figure 6. Les auteurs du présent mémoire n'ont pas vu un seul réservoir qui se soit effondré ou ait présenté des dégâts typiques



Fig. 7. – Sacs de sable utilisés pour colmater les fissures d'un bassin de rétention dans un parc de réservoirs



dits «pied d'éléphant». Heureusement, les installations industrielles n'ont pas eu à souffrir du feu comme ce fut le cas pour les zones d'habitation.

Un seul incident sérieux nous a été rapporté: il s'agissait d'une fuite sur la vanne d'une conduite qui a nécessité l'évacuation de la population dans un rayon de deux ou trois kilomètres. Enfin, si l'on a pu constater ici et là des fissures dans les semelles et les parois des bassins de rétention (fig. 7), celles-ci sont restées sans conséquences, puisqu'il n'y a pas eu de fuite sur les réservoirs eux-mêmes.

Comme l'on pouvait s'y attendre, l'accès aux domaines industriels n'a pas été possible. Les observations ont dû être faites «depuis l'extérieur». Toutefois, les auteurs ont pu visiter le parc des réservoirs de la *Nihon Oil / Kobe Depot* sous la conduite personnelle de son directeur et recueillir ainsi des informations intéressantes. Organisée par un haut fonctionnaire de l'administration communale, cette visite se voulait un geste de bonne volonté en rapport avec l'engagement des secours suisses. Une bonne douzaine de gros réservoirs de la *Nihon Oil*, mesurant jusqu'à 25 m de diamètre, reposent librement, sans ancrages, sur des radiers et sont essentiellement reliés entre eux et aux stations de remplissage situées sur le môle du port, par des conduites à l'air libre. Or, bien que ce môle se soit déplacé de presque cinq mètres vers la mer, aucune de ces conduites ne s'est fissurée; seul un joint a fui légèrement. Une bonne tenue qui est certainement due aux nombreux compensateurs de déplacement qui équipent ce réseau de conduites. Par contre, les réseaux enterrés d'alimentation en électricité et en eau ont été mis hors service par des ruptures de câbles et de conduites. Comme les installations ne disposaient pas de groupe de se-

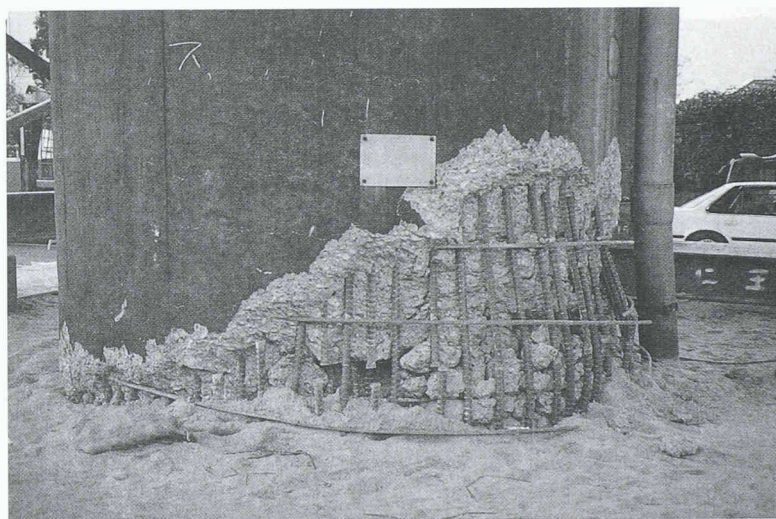


Fig. 8. – Armatures rompues et tordues au pied d'un pilier rond de l'autoroute express du Hanshin

cours, la *Nihon Oil* n'aurait pas pu, en cas d'incendie, intervenir efficacement par ses propres moyens.

Aux dires des Japonais, les centrales hydrauliques dans l'arrière-pays de Kobe n'ont pas subi de dégâts. En revanche, une digue située sur l'île *Awaji* aurait été légèrement endommagée. Les auteurs n'ont pas pu recueillir d'indications plus précises jusqu'à leur départ le 1<sup>er</sup> février. Pour ce qui est des centrales thermiques, dix unités (d'une puissance totale de 1,6 MW) sur trente-six ont été touchées. Mais, l'après-midi du 23 janvier déjà, sept d'entre elles pouvaient être remises en fonction. Quant aux centrales nucléaires, il n'y en a pas aux environs immédiats de Kobe.

#### Ponts

La chute la plus spectaculaire d'un ouvrage provoquée par ce tremblement de terre est bien celle du renversement latéral de la route express du *Hanshin*, sur une longueur d'environ 500 m. Il s'agit d'une autoroute de 20 m de largeur qui traverse la ville de Kobe sur plusieurs kilomètres, à 10 m de hauteur. La travée type, d'une longueur de 35 m, est à poutres continues reposant sur des piliers simples

avec tête en forme de marteau. Le mécanisme exact de cette chute n'a pas pu être inspecté sur place, les travaux de déblaiement étant déjà fort avancés. En revanche, sur les tronçons restés en place, un grand nombre de piliers du même type présentaient des dégâts allant de quelques éclats de béton à des situations frisant la chute.

La figure 8 montre un cas typique de dégâts dus à des efforts considérables à la base d'un pilier (environ 1 m au-dessus de la semelle coiffant les

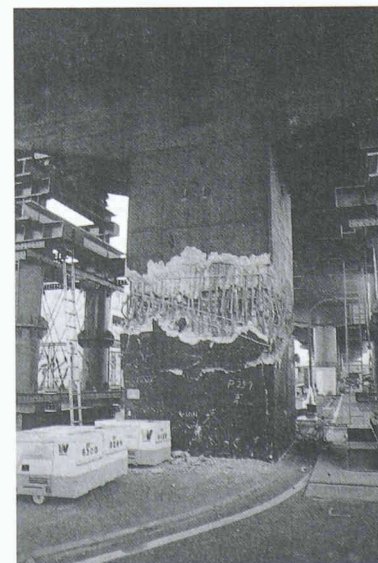


Fig. 9. – Zone de rupture à mi-hauteur d'un pilier de l'autoroute express du Hanshin



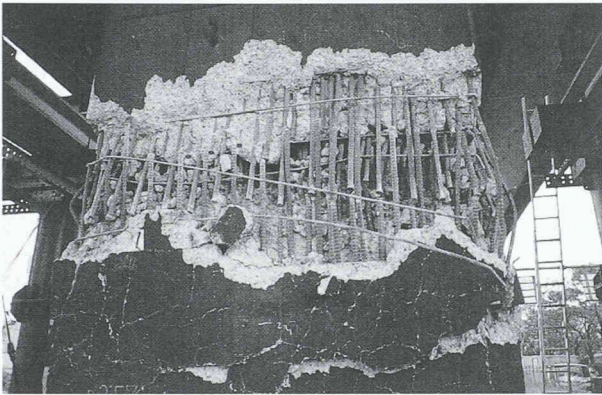


Fig. 10. – Détail de la figure 9 avec rupture des zones de liaisons par soudure bout à bout des armatures verticales

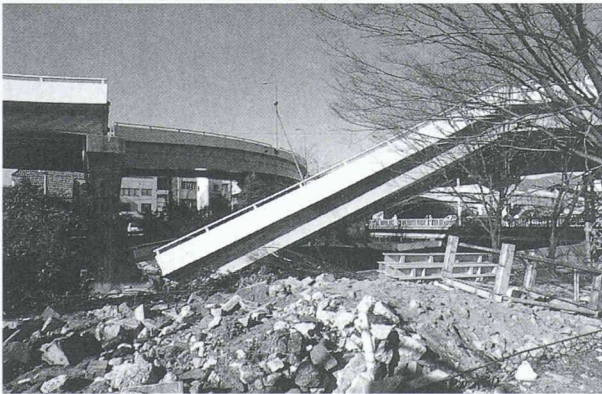


Fig. 11. – Chute d'une poutre porteuse sur un pont mixte béton-acier



Fig. 12. – Porteur du pont supérieur sur le point de tomber

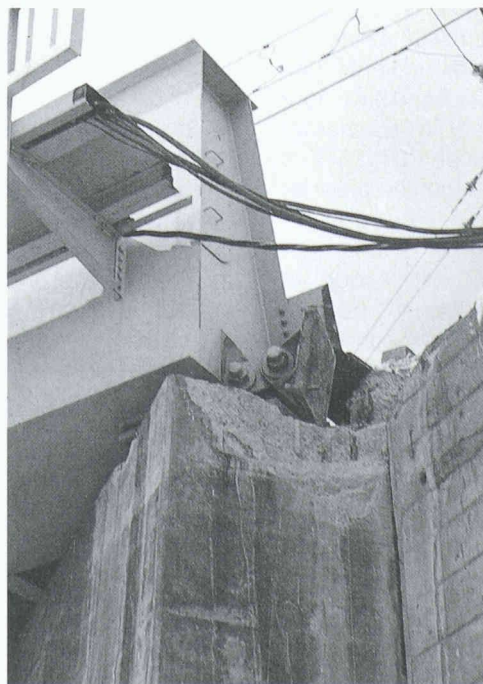


Fig. 13. – Rupture de l'appui horizontal d'un pont de chemin de fer

pieux). Dans le cas particulier, il s'agit d'un pilier en béton armé de 3,10 m de diamètre, du même type que ceux du tronçon renversé de la route express du *Hanshin*. Le cas de figure en question représente vraisemblablement le stade initial des dégâts qui ont conduit au renversement de l'ouvrage. L'armature verticale est constituée de deux à trois couches de barres de 35 mm, avec une distance de 10 cm entre les barres. Comme on peut le voir au centre de la figure 8, quelques-unes de ces barres sont rompues à l'endroit des raccords par soudure bout à bout. D'autres se sont pliées sous des effets de compression. Les étriers circulaires de 16 mm de diamètre sont distants de 30 cm. Pour des piliers de 3,10 m de diamètre, avec par conséquent des courbures relativement faibles, l'effet de cerce des étriers est certainement insuffisant. Ainsi, le comportement fragile à la rupture est la cause du manque de réserve aux sollicitations extraordinaires engendrées par le tremblement de ter-

re. Pour avoir un meilleur comportement « ductile » des piliers, il aurait fallu prévoir des étriers mieux dimensionnés, et disposer les soudures des armatures verticales en dehors de la zone d'articulation plastique du pied du pilier.

La figure 9 montre des éclatements de béton qui se sont produits sur une bande horizontale sise à mi-hauteur d'énormes piliers rectangulaires supportant certains tronçons de cette même autoroute surélevée du *Hanshin*. Une prise de vue plus détaillée (fig. 10) montre que les soudures des armatures se trouvent toutes à cette mi-hauteur, ce qui explique pourquoi les dégâts ne se sont pas produits au pied du pilier, pourtant plus sollicité. Presque toutes les armatures verticales sont rompues au droit des raccords soudés; ces raccords sont bien décalés d'une couche à l'autre, mais la distance n'est que de 10 fois le diamètre des barres en question. Des étriers rectangulaires ne sont visibles que sur le pourtour des armatures verticales. Il manque une armature additionnelle de stabilisation à l'intérieur de la section du pilier.

Des dégâts semblables ont aussi été constatés à mi-hauteur sur une série de piliers circulaires en béton armé et en acier. Les dégâts sont certainement dus au fait que, pour les piliers en béton, la couche intérieure des armatures verticales s'arrête à cette hauteur, tandis que les parois des piliers métalliques changent d'épaisseur à cet endroit. La symétrie des dégâts sur le pourtour des piliers est certainement due à une amplitude peu commune des accélérations verticales. Preuve en sont les valeurs spectrales mesurées, qui dépassent 1 g en hautes fréquences (voir ligne continue sur la figure 2 de gauche).

Il est bien connu que pour les ponts-poutres, la chute des porteurs est souvent due à des



zones d'appui trop courtes. Ce fut aussi le cas à Kobe. La figure 11 montre la chute d'un ouvrage en courbe de la voie express du *Hanshin*. La figure 12 montre une poutre sur le point de tomber pour la voie supérieure d'un pont reposant sur un pilier en forme de cadre. Dans ce cas, la zone d'appui relativement large a évité le pire. Cependant, sur plusieurs autres tronçons, les porteurs sont tombés de leurs supports.

La figure 13 concerne un pont de chemin de fer à trois travées pour lequel l'appui fixe, côté culée, n'a pas résisté aux sollicitations dues au tremblement de terre. La plaque d'ancrage est arrachée et la chute des poutres a probablement été évitée parce que l'appui mobile sur la culée opposée a encaissé le choc.

Dans les années 1950 à 1970 au cours desquelles furent construits un grand nombre des ouvrages endommagés, ainsi que l'autoroute express du *Hanshin*, les normes japonaises pour les ponts ne prescrivaient malheureusement qu'un coefficient sismique de 15 à 30% de  $g$ . Et pour la vérification de la sécurité aux tremblements de terre, ces normes recommandaient que les contraintes admissibles pour le poids propre et les surcharges soient majorées de 80%. Si l'on compare ces exigences avec les accélérations du sol mesurées pendant le tremblement de terre (fig. 2), on constate que les valeurs susmentionnées ne sont pas suffisantes. Des conditions plus modernes, avec des valeurs d'accélération plus élevées et tenant compte du concept de la ductilité, n'ont été introduites qu'au début des années 80.

### Maisons en bois

Les spécialistes s'accordent pour dire que les petites maisons en bois résistent en général bien aux tremblements de terre. Mais à Kobe, la plupart des pertes en vies humaines a eu lieu dans les

quartiers très denses, avec une majorité d'habitations en bois. Pour ces constructions traditionnelles, la vérification de la résistance aux séismes n'est pas exigée si elles ne dépassent pas deux étages. On a alors pu constater que beaucoup de ces maisons, sous l'effet typique dit *soft-storey*, ont basculé par rues entières, quand leur rez-de-chaussée ne s'est pas tout simplement affaissé.

Il a été possible d'examiner de plus près quelques bâtiments de ce type en construction. Les contrementements sont insuffisants, parfois même inexistantes. En général, la rigidité latérale n'est assurée que par des panneaux-plâtres cloués sur des lattes constituant les parois extérieures. Lors de secousses de faible amplitude, ces parois se sont relativement bien comportées et ont l'avantage d'être facilement réparables. Mais lors d'un fort tremblement de terre, il y a rupture fragile de ces plaques et le bâtiment perd pratiquement toute sa rigidité horizontale, car la construction japonaise traditionnelle ne connaît pour ainsi dire pas les parois intérieures, susceptibles d'améliorer la rigidité du bâtiment. De plus, à Kobe, les rez-de-chaussée d'un grand nombre de ces constructions étaient aménagés en commerces ou en locaux pour l'artisanat, raison de plus qui a facilité l'effet *soft storey*. Pour des raisons climatiques (protection contre les typhons), les toitures sont constituées de tuiles relativement lourdes, posées sur une couche de sable de 5 à 10 cm. Or, ce mode de faire ne favorise pas non plus la tenue aux séismes.

La figure 14 est un exemple typique de dégâts subis par les maisons en bois. Sous l'effet *soft-storey*, ce bâtiment a basculé de 1,5 m vers la droite. Le sous-sol ne présente guère de raidissements, mais sur le côté droit, une paroi de 1,5 à 2 m de

large en tient lieu. Les éléments de parois clouées du rez-de-chaussée sont complètement démolis; celles de l'étage le sont partiellement. Il ne reste pour tout raidissement, que le treillis sans diagonale formé par les lattes de l'infrastructure des parois.

### Bâtiments en béton armé et constructions métalliques

Il était impressionnant de voir, un peu partout, d'anciens bâtiments effondrés juste à côté de constructions récentes pratiquement intactes (fig. 15 et 18). Cela est certainement dû aux prescriptions plus sévères relatives à la résistance aux tremblements de terre, introduites par les Japonais pour les bâtiments en 1981. Un exemple: l'ancien bâtiment de huit étages de l'administration communale de Kobe, construit en 1957, a vu son sixième étage s'effondrer (fig. 15, premier plan). En revanche, l'immeuble tour de la même administration, inauguré en 1989, est resté intact (fig. 15, arrière plan). Le changement de normes ainsi que la différence de comportement dynamique expliquent ce contraste. L'ancienne construction, plus rigide, a été plus sensible aux mouvements du sol d'une fréquence relativement élevée. La figure 16 montre l'état des bureaux panoramiques situés juste en dessous de l'étage effondré: le mobilier est pêle-mêle, tandis que les poutres du plafond ne sont que peu fissurées. Les dégâts sont pratiquement limités au seul étage effondré.

Sur plusieurs édifices, on a pu constater ce type caractéristique de dégâts par l'effondrement d'un étage à mi-hauteur de l'ouvrage, quand ce n'était pas le rez-de-chaussée. Ce fut le cas essentiellement de bâtiments commerciaux (fig. 17), d'un hôpital et de quelques immeubles d'habitation. Les dommages à l'étage ne montraient souvent





Fig. 14. – Maison en bois ayant basculé sur la gauche sous l'effet de soft-storey



Fig. 16. – Mobilier renversé dans le bâtiment de la figure 15



Fig. 17. – Effondrement d'un étage intermédiaire presque sans aucun déplacement horizontal

que très peu de déplacement horizontal, ce qui est étonnant. Les cas d'effondrement du rez-de-chaussée sont dus à une rigidité réduite de ce niveau, en général à cause de grandes ouvertures permettant le développement de l'effet de *soft-storey*.

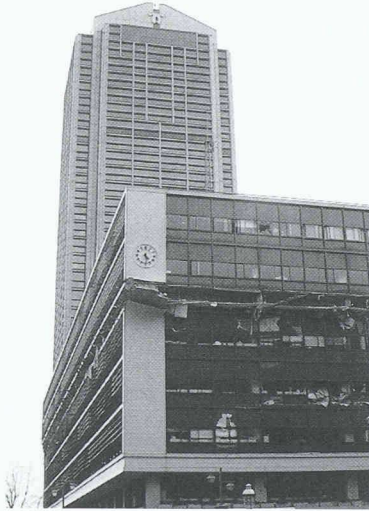


Fig. 15. – Bâtiment de l'administration communale avec un étage intermédiaire effondré



Fig. 18. – Ancien bâtiment endommagé, incliné contre un bâtiment récent intact

Des analyses plus approfondies seront nécessaires pour déterminer la raison exacte de l'effondrement des étages intermédiaires. Plusieurs causes peuvent être à l'origine de ce phénomène:

- le changement de rigidité et de résistance aux surcharges dues à un changement de la dimension des piliers au-dessous de l'étage effondré,
- le passage abrupt de piliers mixtes béton-acier à une section simple de béton armé, à la hauteur de l'étage effondré (cas de la figure 15),
- la discontinuité d'éléments secondaires renforçant le raidissement comme les parois non porteuses,
- la combinaison défavorable de sollicitations horizontales et verticales.

### Conclusions

Des observations que les auteurs ont pu faire sur place dans le cadre de leur mission de recon-

naissance il est possible de tirer les conclusions suivantes.

- Le grand nombre de morts et de blessés est dû au manque de résistance aux tremblements de terre des maisons traditionnelles en bois de Kobe.
- Les constructions récentes répondant aux nouvelles normes japonaises se sont relativement bien comportées et accusent peu de dégâts.
- Par le recours à des fondations bien conçues, les dégâts peuvent être limités même en cas de liquéfaction généralisée du sous-sol.
- Les gros dégâts constatés sur les constructions anciennes sont avant tout dus aux méthodes surannées (et basées sur des valeurs d'accélération beaucoup trop faibles) qui ont été utilisées pour leur dimensionnement.
- A moyen terme il ne serait possible de réduire les effets d'une telle catastrophe qu'en renforçant le bâti existant.