

Zeitschrift: Ingénieurs et architectes suisses
Band: 126 (2000)
Heft: 01/02

Artikel: Le séisme de Kocaeli en Turquie: mission de reconnaissance
Autor: Badoux, Marc / Studer, Jost / Göksu, Ersan
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-81476>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 10.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Marc Badoux, Prof. Dr., ing. dipl. EPFL,
ISS EPF Lausanne
Jost Studer, Dr., ing. dipl. EPFZ, Studer
Engineering, Zürich
Ersan Göksu, ing. dipl. EPFL,
Management & Engineering, Düdingen
Pierino Lestuzzi, ing. dipl. EPFL, IBK EPF
Zürich

Le séisme de Kocaeli en Turquie: mission de reconnaissance

Le séisme qui a frappé la région de Izmit, à l'ouest de la Turquie, le 17 août 1999 a été particulièrement dévastateur. Le bilan de cette catastrophe s'élève à environ 15 000 morts, 50 000 blessés et 600 000 sans-abri. Quelque 18 000 bâtiments ont été détruits et 26 000 autres sont inutilisables. Quant aux pertes économiques, elles se situent selon certaines estimations entre 30 et 50 milliards de francs suisses, dont seuls 5 milliards font l'objet de couvertures d'assurance.

Un groupe de la SIA, la Société Suisse du Génie Parasismique et de la Dynamique des Structures (SGEB), a organisé une mission de reconnaissance du 7 au 13 septembre 1999 dans la région d'Izmit. Succédant à d'autres missions similaires à la suite de précédents séismes - notamment celui qui avait frappé la région d'Adana-Ceyhan en 1998 au sud du pays [1]¹ - cette reconnaissance avait pour objectif premier d'étudier les effets de telles catastrophes sur l'environnement bâti dans la perspective d'une meilleure compréhension des facteurs de risque et des vulnérabilités sismiques en Suisse. Le présent article décrit les principales observations recueillies par le groupe d'ingénieurs actifs dans la pratique, les compagnies de réassurance et les EPF qui ont participé à cette mission. L'accent est mis sur les dégâts structuraux des bâtiments, avec un complément sur le comportement des installations industrielles et des «lifelines». Un article similaire a été publié en allemand dans SI+A [2].

Le séisme de Kocaeli

Le 17 août 1999 à 3 heures locales du matin, la région de Kocaeli (chef lieu Izmit) à l'ouest de la Turquie a été secouée par un tremblement de terre dont la magnitude est estimée à 7,4 Mw. Son épicentre était situé près de Gölcük, à une dizaine de kilomètres au sud de la ville d'Izmit (environ 90 km à l'est d'Istanbul) et à une profondeur de 17 km. Il s'est déclenché dans une faille connue qui a déjà été à l'origine de plusieurs séismes importants durant ce siècle (fig. 1).

¹ Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article

La zone affectée par le séisme s'étend sur une bande longue de 150 km depuis l'est de la ville d'Adapazari jusqu'au sud d'Istanbul en passant par la rive sud du golfe d'Izmit. Dans cette zone, les mouvements du sol ont été importants, atteignant jusqu'à 4 m horizontalement et 2 m verticalement, avec des accélérations horizontales maximales mesurées s'éllevant jusqu'à 0,36 g. La figure 2 montre, pour la station sismique de Izmit, les enregistrements corrigés de l'accélération, de la vitesse et des déplacements horizontaux parallèlement à la faille. Ces données témoignent de la longue durée du séisme de Kocaeli, y compris de sa phase la plus violente. Cette figure inclut aussi le spectre de réponse élastique d'accélération. A titre comparatif, les spectres de réponse des normes turques et suisses sont indiqués à la figure 3.

Le séisme du 17 août a été suivi de nombreuses répliques, puis par un nouveau tremblement de terre de magnitude de 7,1 Mw le 12 novembre 1999. Cette seconde catastrophe, dont l'épicentre est situé près de Duzce, à une centaine de kilomètres à l'est de Izmit, a encore fait des centaines de victimes.

Dégâts aux immeubles résidentiels et commerciaux

Les immeubles résidentiels et commerciaux de plusieurs étages et de construction récente ont subi les dégâts les plus dramatiques et les plus importants lors du séisme de Kocaeli. La figure 5 montre un exemple type des immeubles construits pendant le boom qu'a connu la construction au cours des vingt dernières années en Turquie. Il s'agit d'un bâtiment de six étages avec des dalles et des colonnes en béton armé et des murs de remplissage en maçonnerie non-armée. L'étage inférieur est ajouré dans le but d'accueillir des commerces. Or ce genre de construction combine malheureusement plusieurs caractéristiques défavorables du point de vue de la tenue sismique et entraîne des dégâts dont les plus typiques sont illustrés par les figures 4, 6, 7, 8 et 9.

Dégâts typiques

Certains dégâts sont typiquement liés à la construction des immeubles (fig. 4). Ainsi, les murs de remplissage en maçonnerie étant plus rigides que les cadres en béton armé, des fissures en croix s'ouvrent dans la maçonnerie sous l'effet d'ef-

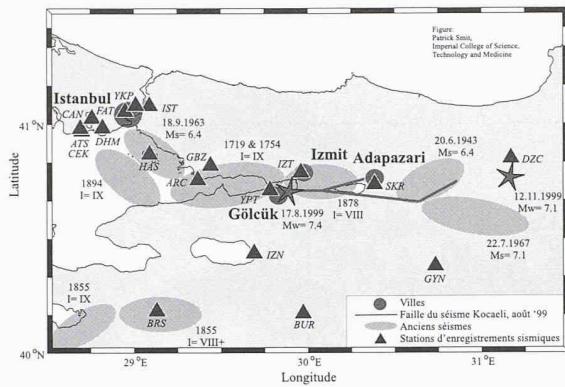
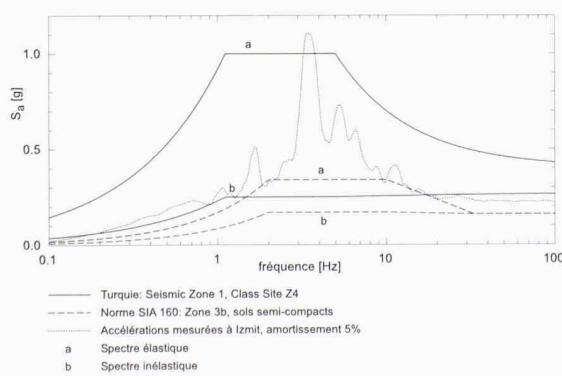
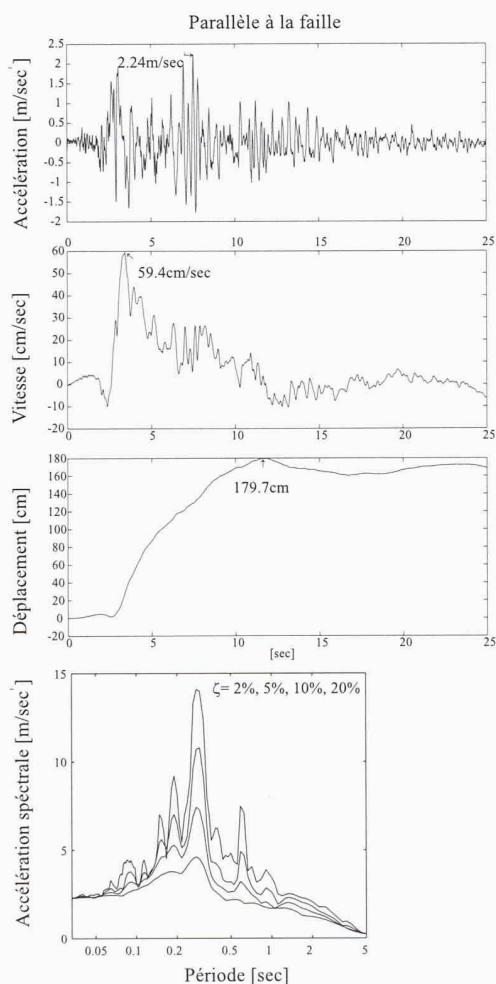


Fig. 1 - Carte de la région affectée par le séisme de Koaceli du 17 août 1999 à l'ouest de la Turquie

Fig. 2 - Enregistrements corrigés de l'accélération, de la vitesse et des déplacements horizontaux parallèles à la faille et spectres de réponse élastique (station de mesure d'Izmit) [1]

Fig. 3 - Spectres de réponse de l'accélération des normes turques et suisses (amortissement de 5 %) [1]



forts horizontaux (fig. 4 et 6). Ces fissures sont symptomatiques de la fragilité de ces murs (manque de ductilité): lorsque la maçonnerie s'écroule, la rigidité horizontale de la structure est fortement réduite, mettant celle-ci est à la merci de grandes déformations qui peuvent conduire à sa ruine.

Les dégâts visibles sur la façade de l'immeuble de la fig. 4 montrent que les plus fortes sollicitations sismiques touchent les étages inférieurs, alors qu'elles sont (en général) moins importantes dans les étages supérieurs. C'est souvent le rez-de-chaussée qui est le plus exposé à l'effondrement, comme l'illustre la situation fréquente (fig. 7) où un immeuble s'est affaissé sur son rez-de-chaussée. Lorsque ce dernier est ajouté (tel le bâtiment de la fig. 5), autrement dit quand les éléments de stabilisation latérale sont discontinus au rez, ce problème est exacerbé. On parle alors de «soft story», d'étage mou. Cela dit, l'inverse est également possible: c'est le cas du bâtiment de la fig. 8 dont tous les étages se sont effondrés sauf le rez. Un autre problème courant observé lors de la mission de reconnaissance est celui des colonnes captives (short columns). Des mécanismes de colonnes captives sont souvent liés à des discontinuités des murs de remplissage en maçonnerie (dues à la présence de fenêtres ou d'interruptions du mur à mi-hauteur, par exemple). Pour suivre les déplacements horizontaux des dalles, les colonnes ne peuvent se déformer que sur une partie de leur hauteur, ce qui augmente l'effort tranchant qu'elles subissent et engendre des rotules plastiques où elles n'avaient pas été prévues. La ductilité de la structure s'en trouve considérablement réduite, ainsi que sa capacité à tolérer des inversions de la direction des sollicitations (charges cycliques).

Dans nombre de cas, les détails constructifs ne sont pas adéquats du point de vue sismique. Il est ainsi fréquent que l'armature de confinement (les étriers) soit déficiente dans les zones où la demande de ductilité locale est élevée (fig. 9). L'écartement des étriers est trop grand et leurs crochets d'angle à 90° (au lieu de 135°) ne permettent pas d'en prévenir l'ouverture lorsque le béton est soumis à d'importantes sollicitations cycliques. Il en résulte une dégradation rapide des éléments porteurs verticaux sous l'action sismique.

En ce qui concerne les matériaux, des essais *in situ* au scléromètre n'ont pas mis en évidence de graves déficiences de la qualité du béton. Seuls quelques cas isolés, ont révélé une mauvaise mise en œuvre du béton sous la forme de nids de graviers importants. Quant à l'armature la plus couramment utilisée, elle est constituée de barres lisses même dans les constructions récentes. Des tests conduits à l'EPFZ sur une barre de 16 mm ramenée d'un chantier de la région de Gölcük ont montré que l'acier d'armature possède d'excellentes caractéristiques de ductilité liées à une basse limite d'élasticité.

Fig. 4 - Dégâts modérés à un immeuble de cinq étages

Fig. 5 - Construction typique pour les immeubles de la région de Kocaeli

Tableau 1 - Taux d'endommagement pour deux quartiers du centre-ville.

Fig. 6 - Fissures en croix caractéristiques dans un mur de remplissage en maçonnerie

Fig. 7 - Effondrement du rez-de-chaussée d'un bâtiment (soft story)



Répartition des dégâts

D'une manière générale, les dommages sont concentrés sur les bâtiments de quatre à sept étages. Le tableau 1 reproduit les résultats d'un relevé des atteintes observées dans des quartiers du centre ville de Gölcük et d'Izmit. Le niveau d'endommagement 3 correspond à des dégâts importants aux éléments non-porteurs, mais modérés quant à la structure porteuse. Le niveau d'endommagement 5 équivaut à la destruction totale de la structure. Les résultats mettent en évidence les destructions considérables subies à Gölcük. Dans cette ville située près de l'épicentre, la grande majorité des bâtiments a en effet été endommagée.

L'étude des dégâts constatés dans cette ville met en évidence l'influence prépondérante que peuvent exercer les conditions géotechniques locales (effets de site) sur les sollicitations sismiques et donc sur le niveau d'endommagement des structures. Certains quartiers ont été pratiquement détruits (classes d'endommagement 3 - 5) alors que des zones

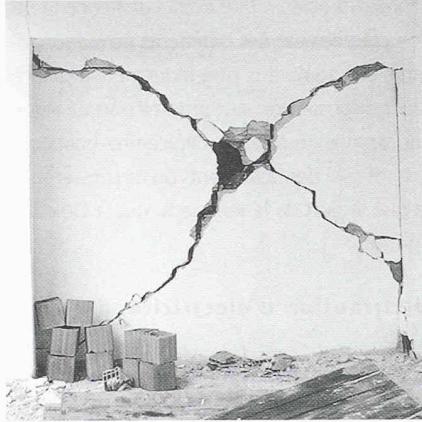
voisines, dont la substance bâtie est apparemment semblable, n'ont été que légèrement endommagées (classe 1 et 2). Gölcük se situe sur la côte de la mer de Marmara et certains quartiers modernes sont construits sur des sols alluvionnaires mous. Des glissements sur la rive ont provoqué des dégâts et parfois même des écroulements.

La ville d'Adapazari offre de nombreux exemples de défaillances sismiques d'un genre particulier. Comme c'est le cas de certaines zones de la ville de Mexico, par exemple, la cité est bâtie sur des dépôts sédimentaires mous et le niveau de la nappe phréatique ne se trouve qu'à 1 m de profondeur. Ces conditions géotechniques ont provoqué de nombreuses défaillances liées à la liquéfaction du sol de fondation: les bâtiments touchés se sont enfouis dans le sol alors que sur leur pourtour, le terrain est resté à son niveau original ou a été soulevé par l'expansion latérale du sol sous la fondation. La figure 10 montre un bâtiment qui s'est incliné à la suite de l'enfoncement différentiel de ses fondations dans le sol.

Normes parasismiques turques

Les normes turques reflètent depuis une vingtaine d'années les règles de l'art modernes en matière de dimensionnement parasismique. Dans les années septante, une première norme parasismique a été introduite, qui a été révisée au début des années nonante, avant qu'une nouvelle prescription basée sur une norme parasismique américaine entre en vigueur en 1998. La Turquie y est divisée en cinq zones sismiques, la région de Kocaeli se trouvant dans la partie la plus exposée, avec une accélération effective du sol s'élevant à 0,40 g. Le spectre de réponse de dimensionnement pour les sols mous situés dans cette zone est représenté à la fig. 3. Un facteur de réduction des charges R tient compte de l'influence favorable des déformations ductiles. Ce facteur vaut 4 pour des parois en béton armé avec une ductilité nominale.

Classes d'endommagement variant de 1 (dommages légers) à 5 (effondrement) selon l'échelle macroseismique européenne (EMS) [1]		
Classe d'endommagement	Gölcük (centre)	Izmit (centre)
1	5%	45%
2	30%	40%
3	25%	10%
4	15%	4%
5	25%	0%



Jusqu'à la fin du plateau, le spectre de réponse inélastique est obtenu en divisant la valeur correspondante du spectre élastique par R . A titre de comparaison, les spectres de dimensionnement de la norme SIA 160 pour la zone 3b et les sols semi-compacts sont également reproduits à la fig. 3. Le spectre inélastique a été construit avec un coefficient de déformation (facteur de réduction) de $K=2,5$. Malgré l'utilisation d'un facteur de réduction plus important, les valeurs de dimensionnement de la norme turque demeurent nettement au-dessus de celles de la Suisse. Enfin, le spectre de réponse de l'accélération mesurée à Izmit pour un amortissement de 5% est aussi reproduit à la fig. 3.

Dégâts aux installations industrielles

L'un des volets de la mission de reconnaissance s'est attaché aux installations industrielles et aux systèmes « life-line ». Outre les dégâts aux structures, il s'agissait par exemple de reconnaître l'effet d'un séisme comme celui de Kocaeli sur des équipements de production industrielle.

Importance économique

Durant les deux dernières décennies, la région de Kocaeli, favorisée par de bonnes infrastructures et la proximité de la mer, s'est imposée avec Istanbul comme le centre industriel le plus important de la Turquie. De nombreuses entreprises nationales et internationales sont implantées dans la région et l'on estime à quelque huit mille les firmes touchées par le séisme, les petites et moyennes entreprises subissant les plus graves dommages. Souvent actives dans un environnement très compétitif, ces dernières sont en effet menacées par des interruptions de production prolongées et nombre d'entre elles ont de surcroît perdu des employés occupant des fonctions clés. Quant aux grandes entreprises nationales et internationales, si elles sont en général assurées contre le risque

sismique direct, la couverture des pertes économiques liées à l'arrêt de la production n'existe qu'à titre exceptionnel.

Observations générales

En ce qui concerne les structures porteuses, la plupart des usines rassemblent divers types de halles industrielles d'un étage hautes de 8 à 10 m. Bien que de telles structures ne soient que modérément sensibles aux séismes en raison de leur faible hauteur, certaines halles n'en ont pas moins subi des dégâts importants. Là encore, les conditions géotechniques propres à des sites industriels construits près de la mer expliquent une grande partie des dommages. Dans d'autres cas, la conception ou la construction (exécution des joints) s'est avérée défaillante, telles ces halles abritant une industrie textile et dont la structure porteuse constituée de cadres en béton préfabriqué n'était pas contreventée.

Au chapitre des dégâts typiques aux installations industrielles, il faut encore signaler les innombrables conduites (eau, électricité, carburant, gaz, air comprimé, sprinkler) sectionnées. La conduite d'aménée principale de plusieurs réservoirs fixes a notamment été coupée, ce qui a en général entraîné la perte totale du contenu (et provoqué une pollution maritime dans certains cas).

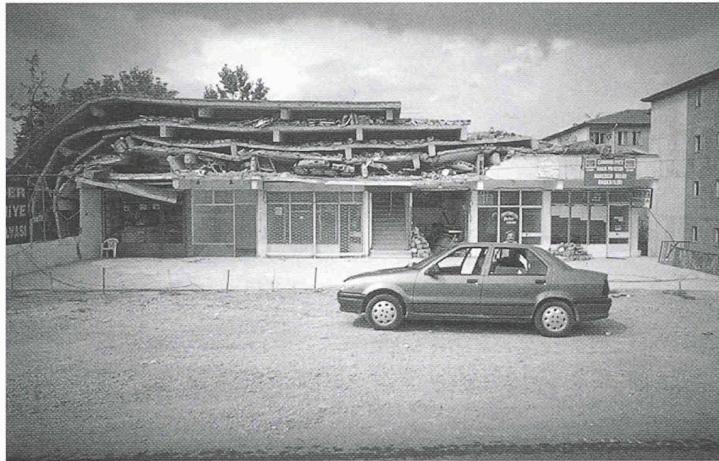
Raffinerie

L'une des installations industrielles les plus touchées par le séisme est une grande raffinerie qui produit environ un quart des produits à base d'huile minérale consommés en Turquie. Construits directement sur la rive, certains de ses équipements ont payé un lourd tribut à des conditions géotechniques particulièrement défavorables. Une cheminée en béton armé de 120 m de haut s'est ainsi brisée à une hauteur d'environ 20 m et son effondrement sur une unité de production a déclenché un incendie.

Fig. 8 - Effondrement des étages supérieurs d'un immeuble (pancake collapse)

Fig. 10 - Détails constructifs d'une colonne

Fig. 9 - Poinçonnage de la fondation suite à la liquéfaction du sol



Un second incendie, qui a détruit six réservoirs de produits hydrocarbures, a été provoqué par des étincelles dues aux chocs de leur couvercle flottant avec l'enveloppe durant le séisme. Pour ne rien arranger, la lutte contre ces sinistres a été considérablement retardée par la rupture des deux pipe-lines qui approvisionnent le site en eau industrielle depuis un lac éloigné de 35 km.

Industrie automobile

Conçue pour une production annuelle de 60 000 véhicules, une usine de conception moderne abrite une industrie automobile dans trois grandes halles en construction métallique. À la différence de beaucoup d'industries voisines dont les locaux reposent sur des fondations superficielles, ces structures sont fondées sur des pieux flottants. Aucun tassement ne s'est donc produit, et la structure porteuse, bien qu'ayant subi d'importantes déformations, n'a été que faiblement endommagée. Cette bonne tenue au séisme des halles n'a toutefois pas empêché une interruption de l'activité durant plusieurs mois, car des déformations très faibles des chaînes de fabrication et des installations robotisées ont suffit à infliger d'importants dégâts aux équipements de production.

Dégâts aux systèmes et ouvrages « lifeline »

Le comportement sismique des systèmes et ouvrages « lifeline » a également revêtu un intérêt particulier pour cette mission de reconnaissance.

Systèmes de transport

Les ponts et les routes ont généralement démontré une bonne tenue au séisme. Les principaux dommages (défoncement de la chaussée et ouverture de fentes atteignant jusqu'à 1 m de largeur) se sont produits sur l'autoroute Adapazari – Izmit, qui coupe la faille à plusieurs reprises. Un passage supérieur, dont l'une des culées était située sur la faille, s'est

effondré coûtant la vie à dix personnes lorsqu'un bus l'a heurté. Dans les zones urbaines, il faut aussi signaler certaines voies de circulation coupées par des bâtiments écroulés.

Une grande partie des nombreux sites industriels implantés dans le golfe d'Izmit disposent de leur propres port et digue. Situées à moins de vingt kilomètres de l'épicentre, beaucoup de ces installations ont subi des tassements ou des glissements de terrain, tandis que le port de la marine turque à Gölcük a été entièrement détruit.

Réseaux de distribution d'électricité, d'eau et de gaz

Le séisme a causé des coupures de courant électrique qui ont affecté une grande partie de la Turquie durant quelques heures suite à l'endommagement d'une station du réseau de distribution souterrain 380 kV. A l'exception des quartiers où les dégâts structuraux étaient considérables, le courant a toutefois pu être rétabli rapidement, des générateurs de secours étant dans certains cas appelés à la rescoufse (dans les hôpitaux et certaines industries par exemple).

La région est approvisionnée en eau potable par deux lacs artificiels situés près de l'épicentre du séisme. Si les ouvrages de retenue (digues de terre) et les principales conduites se sont très bien comportés, le réseau de distribution a été endommagé dans les villes les plus touchées, d'où la nécessité d'y assurer une distribution par camion-citerne.

Quant aux réseaux de distribution de gaz, ils sont peu répandus dans la région touchée et aucun accident n'a été reporté de ce côté-là. A la suite du tremblement de terre de Kobe² en 1995, la ville d'Izmit avait en outre pris la précaution d'équiper son réseau d'un système de fermeture automatique, un dispositif qui a apparemment bien fonctionné.

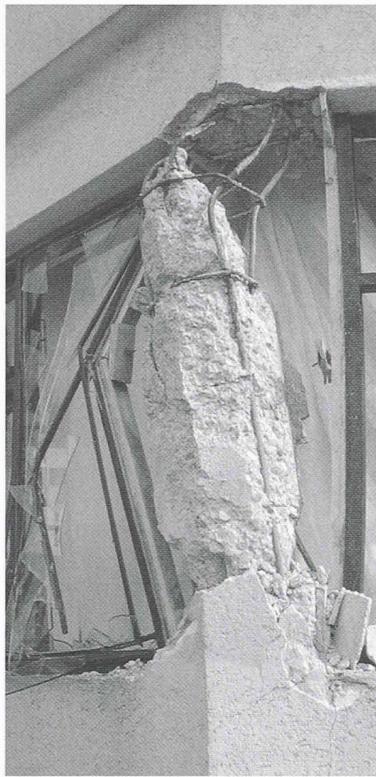
Systèmes de télécommunication

Immédiatement après le tremblement de terre, les communications téléphoniques ont été coupées dans la zone directement touchée et les régions voisines. Or cette défaillance - due à une surcharge du système et surtout aux dégâts subis, tels l'effondrement d'un bâtiment de télécommunication ou l'endommagement de câbles de fibres optiques - a nui à la gestion des opérations de secours.

Divers

L'un des quatre établissements hospitaliers de la ville d'Izmit a été fortement endommagé et devra être démolie. A l'hôpital principal de la ville, il a fallu déplacer provisoirement

² A propos de cet autre séisme, voir IAS N° 8 du 29 mars 1995: «Le grand séisme du Hanshin du 17 janvier 1995» par MARTIN KOLLER, JOST STUDER et THOMAS WENK (texte français : PIERRE BETTENS)



une partie des lits dans des tentes. Et bien que les installations médicales n'aient pas souffert du séisme, le personnel craignait de travailler dans des bâtiments endommagés, ce qui a perturbé les soins.

Enfin, le centre de recherche nucléaire de Cekmece, à 90 km à l'ouest de l'épicentre, n'a apparemment pas été affecté par le tremblement de terre. Les mesures sur le site ont donné une accélération maximale de 0,18 g horizontalement et de 0,06 g verticalement [3].

Résumé et synthèse

La mission de reconnaissance de la SGEB suite au séisme de Kocaeli a mis en évidence les éléments résumés ci-après.

En règle générale, les systèmes de transport et d'approvisionnement en eau et en énergie ont fait preuve d'une bonne tenue sismique. En ce qui concerne les installations industrielles, bien qu'il y ait eu relativement peu de cas d'effondrement ou d'endommagement structural graves, beaucoup d'entreprises ont subi des interruptions de production pour diverses raisons. En frappant au cœur d'une région industrialisée, le séisme de Kocaeli a rappelé la vulnérabilité sismique importante des systèmes de production économique d'une société industrialisée.

Les immeubles résidentiels et commerciaux ont subi les dégâts les plus importants, allant dans de nombreux cas jusqu'à l'effondrement partiel ou total. La majorité des dommages observés sur des immeubles de plusieurs étages en béton armé est à mettre sur le compte des facteurs suivants:

- l'inobservation de l'influence des conditions géotechniques locales sur le niveau de sollicitation sismique ou sur la stabilité des fondations (liquéfaction du sol);
- une conception structurale défavorable, en particulier la présence de rez-de-chaussée ajourés (*soft story*) dans de nombreux immeubles;

- des détails constructifs inadéquats, notamment des détails d'armature insatisfaisants qui ne permettent pas le développement d'une ductilité suffisante;
- la qualité insuffisante des matériaux de construction et de leur mise en œuvre a probablement joué un rôle dans certains cas, notamment au niveau de l'ancre des barres d'armatures.

Ces facteurs de vulnérabilité sont connus et ne constituent pas une surprise. Une partie importante des effondrements aurait pu être prévenue si les règles de l'art du génie parasylique, notamment telles qu'elles sont spécifiées dans les normes de construction turques, avaient été respectées. Il faut aussi préciser que de nombreux bâtiments situés dans la région affectée se sont bien comportés, ne subissant pas ou que peu de dommages. Ces constructions ont notamment bénéficié de la simplicité et de la robustesse de leur conception structurale (en plan et verticalement), alliée à une exécution de qualité.

Références

- [1] WENK Th., LACAVE C., PETER K.: ADANA-CHEYHAN, « Turquie, séisme du 27 juin 1999 », *IAS Bulletin technique de la Suisse romande*, N°. 21, 7 octobre 1998
- [2] STUDER J., BADOUX M., BERTOOG M., GÖKSU E., ISLER P., LESTUZZI P., SMIT P., THIELE K., TINIÇ S., ZWICKY P.: « Erdbeben in der Westtürkei vom 17. August 1999, Erkundungsmission der Schweizer Gesellschaft für Erdbebengenieuerwesen und Baudynamik », *Schweizer Ingenieur und Architekt*, Nr. 43, 29. Oktober 1999
- [3] Bogaziçi University, Kandilli Observatory and Earthquake Engineering, Istanbul, Turquie
<http://www.koeri.boun.edu.tr/earthqk/earthqk.html>
- [4] Istanbul Technical University, Istanbul, Turquie
<http://www.ins.itu.edu.tr>

Remerciements

Les membres de la mission de reconnaissance de la SGEB remercient tous ceux qui ont apporté leur soutien à ce travail, en particulier l'Ambassade de Suisse en Turquie et le Corps suisse d'aide en cas de catastrophe.