Zeitschrift: Ingénieurs et architectes suisses
Band: 127 (2001)
Heft: 12

Artikel: Vulnérabilité sismique du bâti existant suisse
Autor: Badoux, Marc
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-80051

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: 09.01.2026

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

Marc Badoux, Prof. Dr, ing. dipl. EPFZ
Institut de statique et structures (ISS),
Département de Génie Civil (DGC)
École Polytechnique Fédérale Lausanne (EPFL)

Vulnérabilité **sismique** du bâti existant suisse

Ces dernières années ont été marquées par des séismes dévastateurs en Italie, en Turquie, en Grèce, à Taiwan, en Inde et ailleurs. Les figures 1 à 3 (séisme de Kocaeli, 1999) illustrent la vulnérabilité sismique de bâtiments dont la conception, le dimensionnement et la construction ne respectent pas les règles du génie parasismique [5][1]. En Suisse, comme à l'étranger, ces catastrophes sismiques ont réactualisé les questions des ingénieurs, des architectes, des décideurs et du public concernant le risque sismique. La vulnérabilité sismique du bâti existant, en particulier des bâtiments construits avant l'introduction de prescriptions parasismiques dans les normes de construction, est centrale à l'évaluation de ce risque.

Risque sismique en Suisse

Dans son expression la plus simple, le risque peut être exprimé comme le produit de l'aléa (probabilité d'occurrence), de la vulnérabilité (degré d'endommagement) et de la valeur des objets et systèmes exposés au risque. Dans le cas du danger naturel sismique, la «valeur exposée au risque» est avant tout celle des bâtiments, «de leurs occupants», de leur contenu et des activités économiques qu'ils abritent. L'évaluation du risque sismique requiert donc la connaissance de la sismicité et de la vulnérabilité sismique du bâti. A l'échelle internationale, la sismicité suisse est faible à moyenne. Les séismes puissants, donc dévastateurs, y sont rares mais évidemment inéluctables [6].

Diverses études ont montré que, malgré la rareté des événements sismiques violents en Suisse, le risque induit par l'aléa sismique est considérable. Selon une étude conduite pour l'Office fédéral de la protection civile, ce risque constituerait jusqu'au quart du risque agrégé de tous les dangers naturels [9]. Cette conclusion, surprenante pour beaucoup, s'appuie notamment sur des estimations du coût des dégâts causés par la répétition contemporaine de séismes historiques. Pour une répétition de l'évènement sismique qui a frappé la région de Bâle en 1356, par exemple (fig. 4), les pertes économiques liées aux bâtiments sont estimées entre 30 et 80 milliards de francs suisses [13]. La répétition du séisme de Viège de 1855 entraînerait également des dégâts chiffrés en milliards de francs. Bien que ces estimations doivent être considérées avec prudence, étant donné l'état limité limité des connaissances, elles montrent que le risque sismique en Suisse ne doit pas être négligé.

Pour certains dangers naturels, le risque peut être réduit par la mise en œuvre de systèmes de détection avancée. Pour d'autres on peut intervenir «à la source» pour réduire l'aléa (par exemple, les ouvrages paravalanches). Ces approches ne sont pas possibles dans le cas du risque sismique: la seule parade efficace consiste à assurer une bonne tenue sismique des bâtiments et des infrastructures. C'est donc avant tout la tâche des ingénieurs structure et des architectes.

En termes d'objectifs de performance, il faut que les bâtiments démontrent un comportement adéquat pour différents niveaux d'action sismique. Pour les séismes violents et rares, d'importants dégâts sont acceptés pour autant que la protection de la vie humaine soit garantie (état limite de sécurité structurale). Pour des séismes de moindre intensité, mais plus fréquents, les exigences sur la réponse de la structure

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

1

Fig.1: Dégats sismiques typiques à un immeuble multi-étages («soft-story»)

Fig. 2: Dégats sismiques typiques à un immeuble avec murs en maçonnerie non armée

Fig. 3: Insuffisance sismique des détails de construction des éléments verticaux d'une structure en béton armé

visent à limiter les pertes économiques directes et indirectes, voire pour certaines catégories de bâtiments, à prévenir une interruption d'exploitation (états limites d'utilisation ou de service).

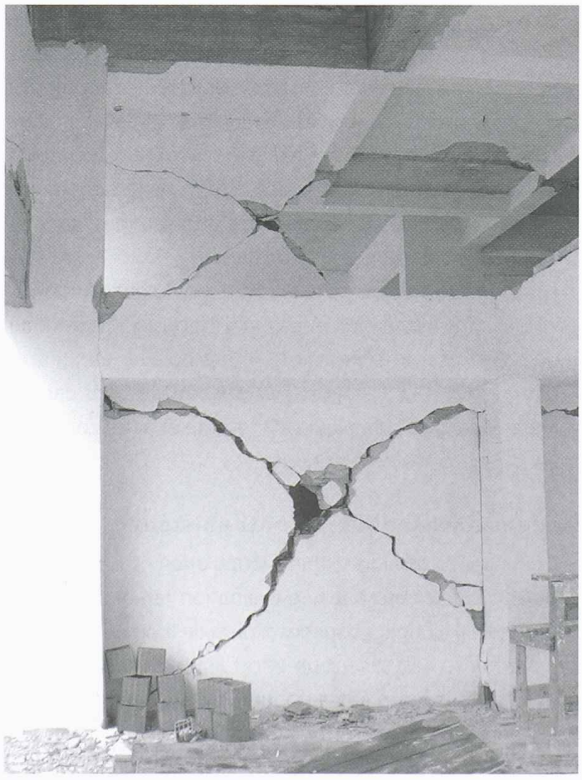
Évolution des prescriptions parasismiques des normes SIA

Les normes ont une grande influence sur la conception et le dimensionnement des structures. Fruits d'un vaste effort international de recherche, les normes parasismiques modernes permettent en règle générale de construire des bâtiments qui ont une bonne tenue sismique. Cela est largement confirmé par l'expérience de séismes à l'étranger. Une étude statistique à grande échelle conduite à Kobe après le séisme de 1995 a fourni les résultats illustrés à la figure 5 [8]. La grande majorité des bâtiments construits après l'introduction des normes parasismiques modernes en 1981 n'a subit que peu ou pas de dégâts. Cette excellente tenue au séisme est en contraste avec celle des bâtiments plus anciens, surtout ceux qui précèdent les normes transitoires introduites en 1972.

Pour ce qui est de la Suisse, les éléments suivants ressortent de l'analyse de l'évolution des normes parasismiques. Les premières prescriptions parasismiques furent introduites en 1970 et se limitaient à spécifier une charge statique horizontale de remplacement variant entre 2 et 5% du poids du bâtiment. C'est en 1989 que des prescriptions parasismiques modernes furent introduites dans les normes de construction suisses. Ces nouvelles prescriptions introduisent une carte sismique, des spectres de dimensionnement (basés sur un séisme ayant une période de retour d'environ 400 ans), ainsi que des règles de conception, de dimensionnement et de construction déterminantes. On peut s'attendre à ce que les structures conçues et dimensionnées en respectant la norme en vigueur présentent une bonne tenue sismique.

A titre d'exemple, la figure 6 montre l'évolution de l'effort horizontal de dimensionnement selon les normes SIA pour un bâtiment représentatif situé dans la région bâloise. Cet effort s'entend au rez-de-chaussée d'un bâtiment de neuf étages, en béton armé, sous l'action du vent et du séisme (charge statique de remplacement). On constate l'augmentation massive de ce paramètre clé du dimensionnement parasismique après 1989. La figure 6 donne aussi une estimation de la répartition de l'inventaire des bâtiments suisses selon la norme en vigueur lors de leur construction (sur la base de [14]). Cet inventaire selon l'âge des bâtiments montre que

2



3

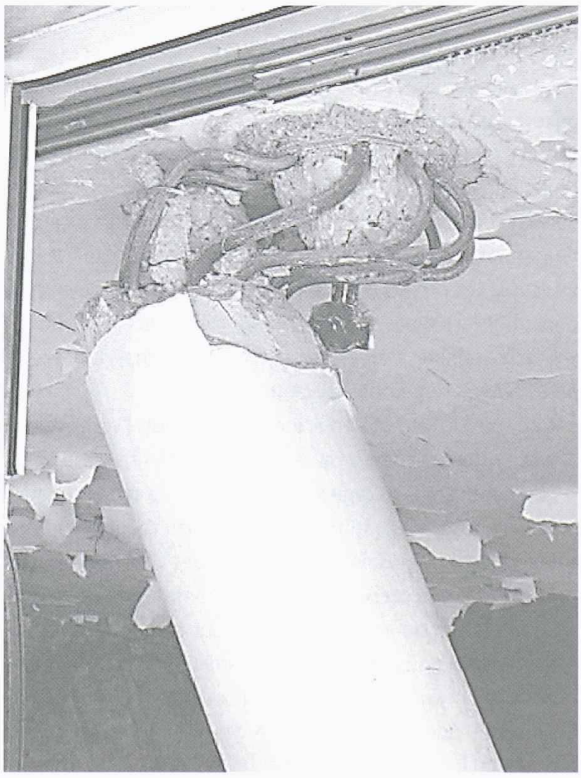
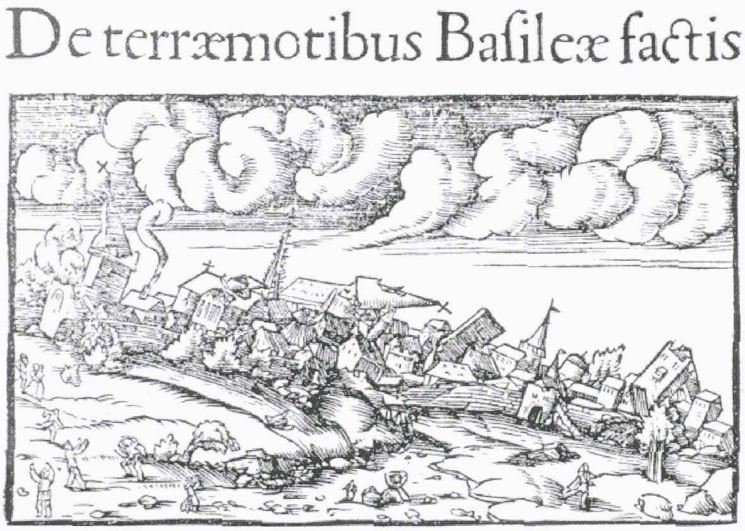


Fig. 4: Interprétation d'époque sur le thème du grand séisme de Bâle en 1356

Fig. 5: Influence des normes de construction parasismique sur la tenue sismique d'un échantillon de bâtiments du centre de la ville de Kobe durant le tremblement de terre de 1995 (premières prescriptions en 1972, puis norme parasismique moderne dès 1982)

Fig. 6: Influence de la période de construction (génération de normes SIA) sur l'effort horizontal statique de dimensionnement pour un immeuble représentatif de la région de Bâle



4

plus de neuf bâtiments sur dix ont été construits avant l'introduction dans les normes, en 1989, de prescriptions parasismiques efficaces. Dans la mesure où les normes en vigueur sont respectées, c'est donc clairement la vulnérabilité sismique du bâti construit avant 1989 qui domine le risque sismique en Suisse.

Vulnérabilité du bâti existant

La vulnérabilité sismique du bâti existant en Suisse est encore mal connue et difficile à quantifier. En l'absence de séismes importants et donc révélateurs, l'évaluation réaliste de la vulnérabilité d'un bâti aussi diversifié que celui de la Suisse est une tâche difficile et les études conduites à ce jour ne permettent qu'une estimation limitée de sa vulnérabilité effective. Les projets d'évaluation doivent se poursuivre afin d'identifier les types de bâtiments sensibles et de quantifier leur vulnérabilité. Dans l'état actuel des connaissances, on peut faire les remarques suivantes.

- Comme il l'a été mis en évidence plus haut, l'essentiel du bâti existant suisse n'a pas été conçu et dimensionné explicitement selon les règles de l'art du génie parasismique. Pour autant, ces bâtiments ne sont pas tous clairement inadéquats d'un point de vue sismique. Une grande partie d'entre eux présentent heureusement une «résistance sismique par défaut», adéquate pour prévenir un effondrement lors du niveau d'action sismique de référence des normes en vigueur pour leur région. C'est notamment le cas pour une grande majorité des bâtiments en béton armé [11].
- Le bâti existant inclut cependant de nombreux éléments qui ne satisfont pas aux exigences de la sécurité structurale pour l'action sismique de référence (état limite d'effondrement). Pour ces bâtiments, un effondrement et des pertes en vies humaines sont possibles lors d'un séisme violent. Si le nombre de ces bâtiments est incertain, il est certainement significatif, si bien que la menace ne saurait être ignorée.
- Les structures sismiquement inadéquates se concentrent dans des catégories de «bâtiments à risque». L'expérience de séismes étrangers et les études analytiques montrent que ces catégories sont généralement définies par une ou plusieurs des caractéristiques suivantes: des fondations sur un sol peu compact - tel que l'on peut en rencontrer dans les terrains alluvionnaires non-compactés -, un nombre d'étages supérieur à trois, la présence de discontinuités et d'excentricités structurelles, l'absence de murs porteurs, et des murs porteurs en maçonnerie non armée.
- Les bâtiments anciens de plusieurs étages constituent une catégorie dont le potentiel de vulnérabilité est élevé. Ces «non-engineered structures» combinent généralement une construction en maçonnerie de pierres et des planchers en bois peu rigides dans leur plan (effet diagramme faible). Elles sont sujettes, lors de séismes importants, à l'effondrement dans le plan, ou hors plan, des murs de maçonnerie.
- Même si sa sécurité structurale est adéquate, un bâtiment peut s'avérer inadapté si sa tenue sismique ne satisfait pas aux états limites d'utilisation (endommagements ou interruptions d'exploitation limités) et de nombreux bâtiments existants en Suisse sont vraisemblablement vulnérables selon ces critères. Vu le coût des interventions parasismiques, les critères d'utilisation ne devraient toutefois être appliqués qu'à une catégorie restreinte de bâtiments, qui inclut l'infrastructure du réseau vital (hôpitaux, casernes de pompier, bâtiments de police, centres de télécommunication, systèmes de transports, etc.), les installations dangereuses (industries chimiques par exemple) et les constructions du patrimoine historique.

Évaluation sismique du bâti existant

L'évaluation sismique d'une population de bâtiments débute normalement par une évaluation rapide selon des méthodes développées pour des projets de triage (*screening*). Ces méthodes nécessitent un effort limité et sont conçues pour être appliquées à des populations de bâtiments, afin d'identifier ceux qui présentent potentiellement un risque sismique important. Elles se basent principalement sur des

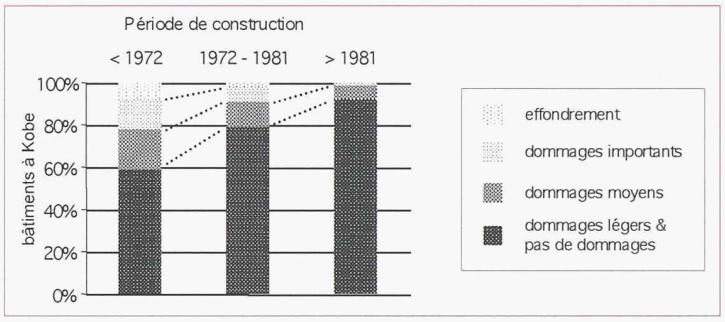
observations visuelles et ne requièrent que peu ou pas de calculs [10].

Un bâtiment identifié, par des évaluations préliminaires rapides, comme potentiellement vulnérable doit ensuite faire l'objet d'une évaluation détaillée. Lorsque les calculs basés sur un comportement linéaire de la structure (méthodes des forces de remplacement et/ou du spectre de réponse) ne donnent pas de résultats clairs, il peut être intéressant de recourir à des outils d'analyse non-linéaire. L'analyse non-linéaire dynamique dans le temps est une méthode éprouvée. Elle permet de calculer les déformations et le degré d'endommagement de la structure. La figure 7 illustre les résultats d'une telle analyse pour un bâtiment situé à Bâle. Les analyses non-linéaires dynamiques requièrent un effort de modélisation, de calcul et d'interprétation nettement plus grand que les méthodes statiques.

La famille des méthodes d'analyse statiques non-linéaires offre une alternative intéressante pour l'évaluation des structures. Ces méthodes permettent notamment d'effectuer un calcul relativement fiable des déformations inélastiques et de l'endommagement d'une structure ductile avec un effort raisonnable. Bien qu'approximatives, ces méthodes sont suffisamment exactes dans de nombreuses situations face aux incertitudes qui caractérisent le choix des sollicitations sismiques de calcul. L'une des méthodes statiques non-linéaires, la méthode du spectre de capacité (*capacity spectrum method*), a été utilisée et étendue dans un récent projet de recherche sur l'évaluation sismique des bâtiments avec des refends en béton armé [11]. La figure 8 montre une application de cette méthode au bâtiment de la figure 7.

Concernant l'évaluation sismique de bâtiments existants, il faut signaler les éléments suivants.

- Les normes de construction telles que les normes SIA, ont été développées pour la conception et le dimensionnement de nouvelles structures. Pour une structure neuve, les réserves de résistance, respectivement la performance parasismique, peuvent être réalisées facilement et à coûts bas. Les normes peuvent donc proposer des approches qui produisent des réserves de performance («approches conservatrices»). La situation est différente dans le cas des structures existantes. En raison des coûts généralement élevés des interventions parasismiques, il est souhaitable de bien connaître la performance d'une structure afin d'intervenir judicieusement. Il est donc souvent intéressant de conduire des analyses avec des modèles de calcul plus complexes et plus réalistes que pour un ouvrage neuf. Il est aussi souhaitable d'adapter les critères d'évaluation sismique à la réalité de l'utilisation du bâtiment. Une évaluation parasismique de la vulnérabilité des bâtiments ne devrait pas se faire uniquement sur la base des critères définis par la norme en vigueur. Le «performance based engineering» propose une approche bien adaptée à la problématique de l'évaluation sismique [7].
- Dans de nombreux cas, et malgré une analyse détaillée de sa structure, la tenue sismique réelle d'un bâtiment peut être difficile à cerner. Il faut alors se reposer sur le jugement de l'ingénieur. L'avis d'experts parasismiques peut devenir déterminant. Lors de l'évaluation parasismique d'une structure, il est possible que diverses méthodes donnent des résultats très différents. Ces contradictions doivent être reconnues et contribuer à la formation du jugement de l'ingénieur sur la structure.
- La prédiction de la performance sismique effective d'une structure se heurte généralement à de nombreuses incertitudes. Celles-ci portent notamment sur les caractéristiques des séismes à considérer, sur l'effet de site, sur la modélisation du comportement des éléments structuraux et sur l'influence des éléments non-structuraux. De plus, les propriétés de la structure sont souvent mal connues (caractéristiques des matériaux, détails d'armature ou de connections, fondations, etc.). En regard de ces incertitudes et dans un contexte de gestion de risque, une approche probabiliste de l'évaluation sismique devrait se développer.



5

Période de construction	effort horizontal total (bâtiment KJA)	part de l'inventaire des bâtiments suisses
< 1956	13%	~ 1/3
1956 - 1970	23%	~ 1/3
1970 - 1989	29%	~ 1/4
> 1989	100%	~ 1/12

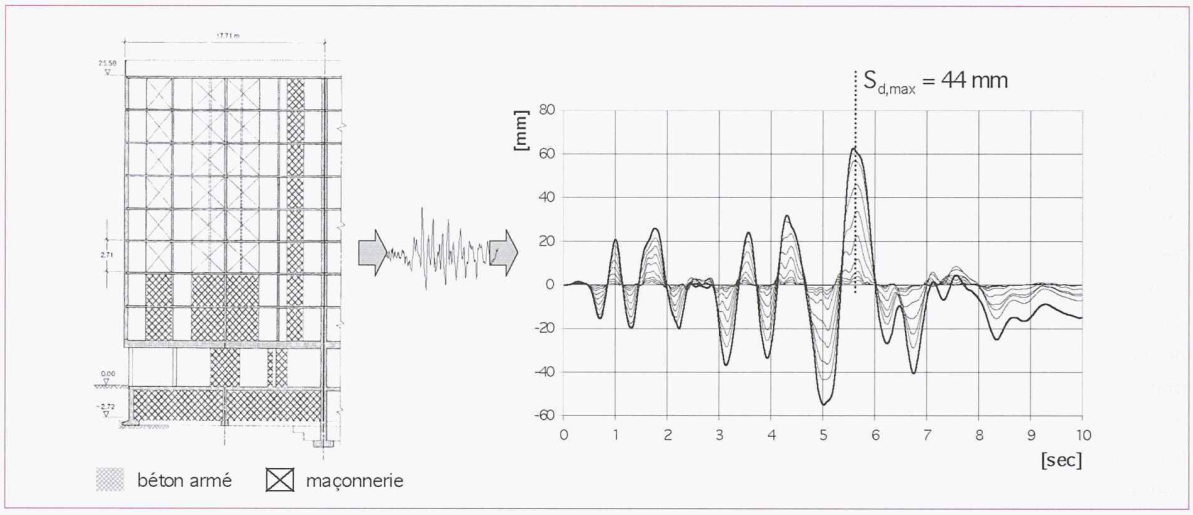
6

Fig. 7: Simulation numérique par calcul non-linéaire dynamique de la réponse sismique d'un bâtiment existant à Bâle pour un séisme correspondant au spectre des normes européennes en développement

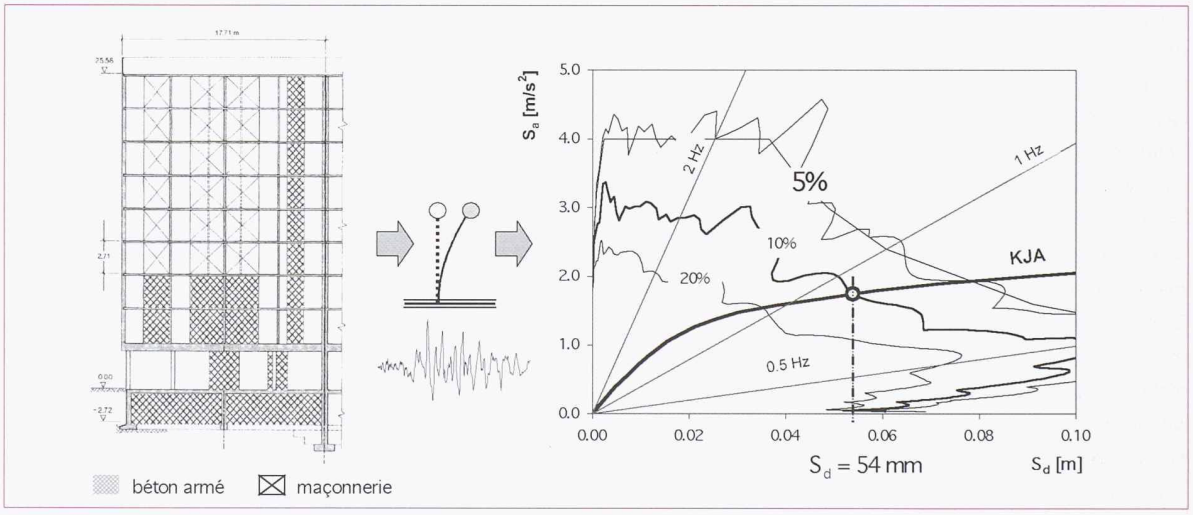
Fig. 8: Simulation numérique par la méthode du spectre de capacité pour le même bâtiment et le même séisme que ceux de la figure précédente

Fig. 9: Intervention parasismique sur un mur en maçonnerie lors de la transformaton-lourde d'un bâtiment ancien à Zurich (Schwegler, 1996)

7



8



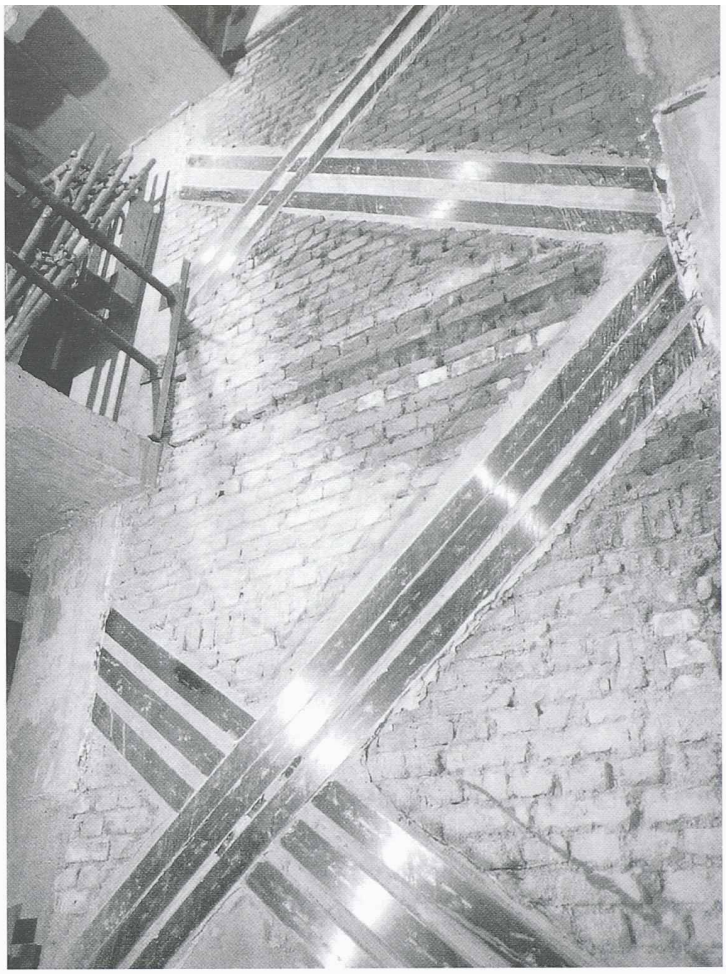
Interventions parasismiques

L'intervention parasismique sur des structures sismiquement inadéquates est chose courante dans certains pays. Aux Etats-Unis, certains bureaux d'ingénieurs sont spécialisés dans le «seismic retrofitting» des structures. En Californie par exemple, la tenue sismique de milliers de piles de ponts a été améliorée au moyen de chemises de confinement en métal ou en matériaux composites. Il existe une grande diversité de techniques et de stratégies d'intervention, reflétant la diversité des faiblesses sismiques qui doivent être corrigées [4].

En ce qui concerne la Suisse, on peut mentionner à titre d'exemple les interventions parasismiques sur le bâtiment de physique de l'EPFZ au Hönggerberg, et sur l'immeuble de la police à Sion. La figure 9 illustre une intervention parasismique sur un mur en maçonnerie au moyen de lamelles de fibres de carbone, lors de la transformation lourde d'un bâtiment ancien à Zurich [15]. La récente intervention sismique sur un réservoir d'une industrie chimique en Valais, par l'installation d'appuis souples qui «isolent» largement la structure des mouvements sismiques du sol, constitue une application élégante de la stratégie de protection sismique [2]. Cet exemple est l'occasion de rappeler qu'une intervention parasismique n'implique pas forcément le «renforcement» de la structure. Il est parfois judicieux d'assouplir ou même d'affaiblir la structure [3].

À moins qu'elle puisse être mise en œuvre dans le cadre d'une transformation lourde, l'intervention sur la structure requiert souvent l'évacuation partielle ou totale du bâtiment et d'importants travaux de second œuvre. L'amélioration sismique d'un bâtiment existant occupé est donc généralement une opération onéreuse et difficile, qui ne se justifie que pour des bâtiments présentant un danger réel d'effondrement ou

9



pour des structures particulières. Il s'agit, pour ces dernières, de bâtiments essentiels, dangereux ou irremplaçables dont le disfonctionnement ou l'endommagement durant un séisme n'est pas acceptable.

Synthèse et perspectives

Les 90 % du bâti suisse ont été construits avant l'introduction de normes parasismiques modernes en 1989, et n'ont généralement qu'une «résistance sismique par défaut». Cette population contient une proportion encore mal connue de bâtiments sismiquement vulnérables. La réduction du risque sismique requiert une meilleure connaissance de la vulnérabilité du bâti existant. Il s'agit donc:

- d'établir des inventaires sismiques, afin de préciser le profil de vulnérabilité du bâti existant suisse et de quantifier le risque;
- de définir des méthodes et des critères d'évaluation qui permettent d'identifier les besoins réels en interventions parasismiques; ces méthodes doivent être éprouvées et permettre des évaluations rapides;
- de développer et de valider des techniques d'intervention parasismique fiables et économiques.

Au-delà du défi technique posé aux spécialistes (ingénieurs et architectes notamment), la vulnérabilité sismique du bâti existant pose à la société le défi de développer la volonté politique et les outils juridiques et financiers favorisant la prise de mesures correctives. Cela doit être fait en incluant la réduction du risque sismique dans une politique nationale de gestion intégrée des risques liés aux dangers naturels [12].

Le catalogue des mesures développé par la SGEB pour un programme de réduction du risque sismique inclut notamment la sensibilisation des décideurs et du public, ainsi que la clarification des bases légales [1].

Parce que la responsabilité de protéger la population et l'économie des effets d'évènements catastrophiques prévisibles leur incombe, les pouvoirs publics ont un rôle moteur à jouer. Ils peuvent aussi, en tant que maîtres d'ouvrages importants, mener des projets pilotes d'évaluation et ordonner des interventions parasismiques.

Le Canton du Valais par exemple, a lancé une politique de réduction du risque sismique, incluant notamment l'évaluation sismique de son réseau vital, à commencer par les hôpitaux. La Confédération a créé un bureau de coordination pour la réduction du risque sismique au sein de l'Office fédéral des eaux et de la géologie. Il est notamment prévu de dresser un inventaire sismique des bâtiments de la Confédération dans les classes d'ouvrages plus exigeantes situés dans les zones sismiques Z2 et Z3.

Références

[1] Bachmann H., Darbre G. R., Deichmann N., Koller M. G., Studer J., Tinic S., Tissières P., Wenk Th., Wieland M., Zwicky P.: «Handlungsbedarf von Behörden, Hochschulen, Industrie und Privaten zur Erdbebensicherung in der Schweiz», SGEB - Schweizer Gesellschaft für Erdbeben-Ingenieurwesen und Baudynamik, SIA-Dokumentation D 0150, 1998

[2] Bachmann H., Wenk.: «Softening Instead of Strengthening for Seismic Rehabilitation», *IABSE Journal of Structural Engineering*, N° 1/ 2000

[3] Badoux M., Jirsa J. O.: «Steel Bracing of RC Frames for Seismic Retrofitting», *ASCE Journal of Structural Engineering*, 1990

[4] Badoux M.: «Forschung und Entwicklung zur Erdbebensicherung bestehender Bauwerke», Documentation SIA D0145, DACH-Tagung 1997

[5] Badoux M., Studer J., Göksu E., Lestuzzi P.: «Le séisme de Kocaeli en Turquie: mission de reconnaissance», *Ingénieurs et architectes suisses* N° 01-02/2000

[6] Giardini D.: «Prenez garde! Le prochain tremblement de terre est inévitable», Rapport de gestion 1998 du Pool suisse pour la couverture des dommages sismiques, 1999

[7] Holmes W.: «Risk Assessment and Retrofit of Existing Buldings», 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, 2000

[8] Inukai M.: «Investigation of building damages by the 1995 Hyogken Nambu Earthquake», Structural Dynamics – Eurodyn, 1996

[9] Katanos: «Katastrophen und Notlagen in der Schweiz. Eine vergleichende Übersicht», Rapport pour l'Office Fédéral de la Protection Civile, 1995

[10] Kölz E.: «Verfahren zur Beurteilung der Erdbebensicherheit bestehender Gebäude: Beurteilung des kantonalen Gebäudebestandes im Aargau», Documentation SIA D0162, SGEB-Tagung, 2000

[11] Peter K.: «Erdbeben-Überprüfung bestehender Stahlbeton-Gebäude», thèse N° 2285, EPF Lausanne, 2000

[12] Planat - Plate-forme nationale «Dangers naturels»: «De la défense contre les dangers à la gestion du risque», Brochure d'information, 1998

[13] Schmid E., Schraft A: «Versicherungsdeckungen sind heute unzureichend. Was, wenn in der Schweiz die Erde bebt?», Swiss Re Publishing, 2000

[14] Wüest & Partner Rauminformation: «Monitoring 1995, Bau- und Immobilienmarkt Schweiz», 1995

[15] Schwegler G.: «Vertärkung von Mauerwerkbauten mit CFK-Lamellen»; *SI+A* N° 44; 1996