

03+04/11 steeldoc

Construction parasismique

Conception et
dimensionnement



Savoir-faire traditionnel et technologies modernes

Le Japon étant depuis toujours exposé à de violents tremblements de terre, il dispose d'une grande expérience dans la construction parasismique. Les nouveaux bâtiments s'y inspirent, sur le plan statique, de la construction en bois traditionnelle – notamment, pour les gratte-ciel, du système très raffiné des pagodes, qui doivent leur résistance sismique à leur mât central et aux toits qui leur sont suspendus avec tout le jeu nécessaire.

Iris Mach

Que tout mode de construction ne convienne pas à toutes les situations, c'est ce dont le Japon fit la cruelle expérience lorsqu'une grande partie des bâtiments en brique réalisés selon le modèle occidental fut détruite par les tremblements de terre Nôbi à Nagoya (1891) et Kantô à Tokyo (1923). Quant aux constructions à poteaux-poutres en bois traditionnelles, elles furent certes nombreuses à résister aux secousses sismiques, mais furent réduites en cendres par les incendies qui s'ensuivirent. Il devenait ainsi évident que la tradition européenne de la construction massive exigeait une tout autre compréhension du comportement des matériaux que la construction à poteaux-poutres en bois japonaise.

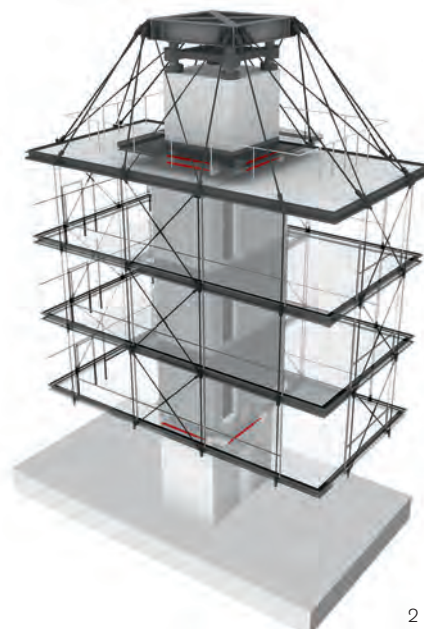
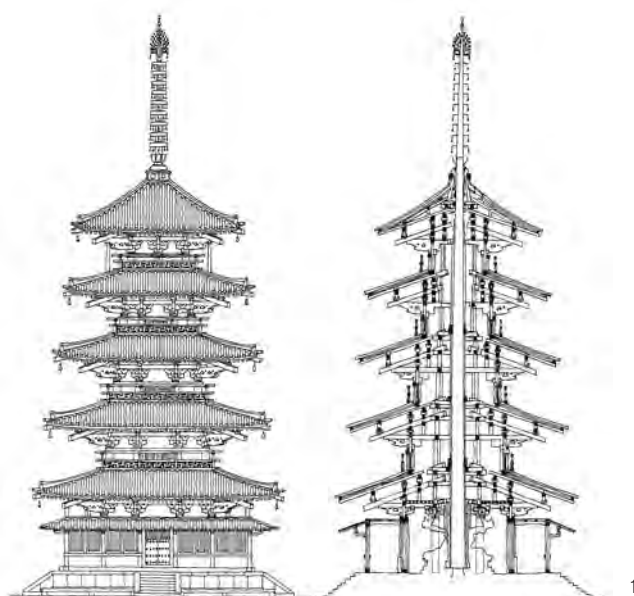
Au XX^e siècle, ces expériences conduisirent le Japon à repenser complètement les manières de construire et à se réorienter vers le béton armé et l'acier, des matériaux bien mieux adaptés aux structures parasismiques. Du fait de sa parenté avec la construction en bois, la construction métallique se prêtait particulièrement bien au développement des systèmes traditionnels à poteaux-poutres ou ossature. Le fait que l'intensité des tremblements de terre et l'accélération du sol étaient beaucoup plus importantes au Japon qu'en Europe favorisa cette évolution, de même que

la tendance à construire des bâtiments toujours plus hauts et élancés. Les dispositions de protection incendie devenant en outre toujours plus sévères, les bâtiments en bois traditionnels cédèrent peu à peu le pas aux constructions en acier. Alors qu'en Europe centrale, la construction massive continue de prédominer (85 % contre environ 5 % de construction métallique et 10 % de construction bois), le Japon présente aujourd'hui une proportion de bâtiments en acier tout à fait considérable (près de 20 %), qui n'est dépassée qu'en Amérique du Nord (environ 25 %).¹

C'est à la fin des années 1970 et dans les années 1980 que l'industrie japonaise de la construction connut l'essor le plus important. Une forte croissance économique, d'importants investissements dans la recherche et l'adoption de la technologie américaine portèrent le secteur japonais de la construction à un haut niveau d'innovation.² Depuis, la collaboration entre des entreprises de pointe et des architectes créatifs donne régulièrement lieu à des solutions qui concilient savoir-faire traditionnels orientaux et technologies modernes occidentales, et qui peuvent être considérées comme exemplaires en matière de sécurité parasismique.

1/3 Les pagodes japonaises présentent une remarquable résistance aux séismes. Celle-ci est due, d'une part, au mât central («shimbashira») qui limite le mouvement des différents niveaux et, d'autre part, aux vastes avant-toits qui, à la manière d'un mobile, assurent l'équilibre de l'ensemble et rentrent toujours dans leur position initiale. Ici: pagode Horyûji, Nara (32,45 m; VII^e siècle apr. J.-C.).

2 Le système SFS21 (Seismic-Free System, 21st Century): En 2009 a été réalisé, à Tokyo, le premier bâtiment de quatre niveaux conçu selon ce principe.





3



4

De la pagode au gratte-ciel

L'un des principes fondamentaux de la construction parasismique consiste à empêcher que les vibrations sismiques ne soient transférées à la structure du bâtiment. Pour ce faire (et aussi pour protéger le bois de l'humidité), les poteaux des constructions japonaises traditionnelles étaient posés sur une base en pierre, de manière à éviter, en cas de sollicitations horizontales, une liaison solidaire entre fondations et structure. La méthode actuelle de l'isolement bas («Base Isolation»), où des plaques en métal ou en matière synthétique font office de couche glissante entre fondations et structure, repose sur le même principe. Sur cette base, Shimizu Corporation a développé, en 2004, le système «Seismic-Free System, 21st Century» – en abrégé FS21. Ici, cependant, la dissociation ne se fait plus au niveau des fondations, mais au sommet du noyau du bâtiment, auquel les étages sont suspendus par des éléments en acier (CSI: «Core-Suspended Isolation»). La structure fonctionne comme un pendule, la suspension permettant, du fait de l'inertie, de réduire les vibrations et de les transformer en énergie de friction (FPS: «Friction Pendulum System»). L'intérêt du système réside aussi dans la répartition des efforts entre les matériaux mis en œuvre: alors que le noyau en béton armé n'est sollicité qu'en compression, la construction métallique est en permanence sollicitée en traction, ce qui permet d'exploiter de façon optimale les avantages de chacun en termes de comportement statique. Ce n'est qu'après de nombreux essais sur table à secousses qu'a été réalisé à Tokyo, en 2009, un premier bâtiment de quatre niveaux conçu selon ce principe.⁵

Les savoir-faire traditionnels sont aussi réinterprétés dans la réalisation d'immeubles de grande hauteur. On connaît la remarquable résistance sismique de pa-

godes vieilles de plusieurs siècles, dont certaines comptent jusqu'à cinq niveaux. Ainsi celle du temple Horyu-ji de Nara est-elle restée intacte malgré ses 1300 ans d'âge et ses 32,5 m de hauteur. Cela s'explique par le fait que les différents niveaux peuvent bouger assez librement, tandis que le mât central continu et statiquement indépendant («shimbashira») empêche la structure de se disloquer. De plus, les grands avant-toits contribuent à maintenir les étages en équilibre, un peu comme dans un mobile.⁴ Ce type de structure fait aujourd'hui l'objet de recherches poussées et a déjà été adapté, sous diverses formes, à la construction de tours modernes.⁵ Trois des plus récents gratte-ciel du pays – les Mode Gakuen Spiral Towers à Nagoya (2008, hauteur: 170 m, construction: Nikken Sekkei), la Mode Gakuen Cocoon Tower à Tokyo (2008, hauteur: 204 m, construction: Arup Japan) et le Tokyo Sky Tree (2011, hauteur: 643 m, construction: Nikken Sekkei) – se basent tous sur des principes inspirés des pagodes historiques.

Tronc et branches

Dans le cas des Mode Gakuen Spiral Towers, le «fût» central se compose de douze piliers en acier remplis de béton, qui forment un anneau autour du noyau en béton armé. Les trois manteaux en forme de spirale qui donnent son nom au bâtiment sont reliés à ce «tronc» par des «branches» prenant la forme de treillis horizontaux, et lui transmettent les efforts de torsion que génèrent en permanence les poteaux obliques. Comme dans un arbre, les éléments de structure sont conçus de manière à pouvoir, en cas de charge sismique maximale, amortir les excédents d'énergie par plastification. Celle-ci survient d'abord dans les «ramilles», puis dans les «branches» et, en dernier lieu, dans le «tronc», de sorte que la résistance de l'ouvrage soit assurée jusqu'à la fin du séisme, malgré des

4 Mode Gakuen Cocoon Tower, Tokyo 2008, 204 m, construction Arup Japan

5 Au Japon, les poteaux de bois étaient traditionnellement posés sur des pierres, de manière à limiter le report des forces sismiques sur la structure porteuse. Ici: Horyu-ji, Nara.

5





6 Mode Gakuen Spiral Towers, Nagoya 2008, 170 m, construction Nikken Sekkei Ltd.

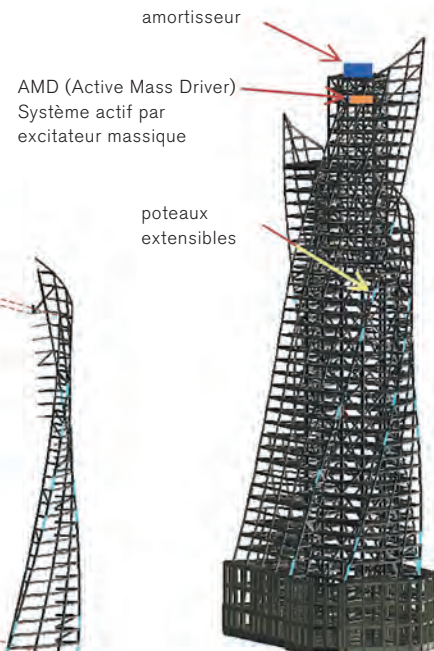
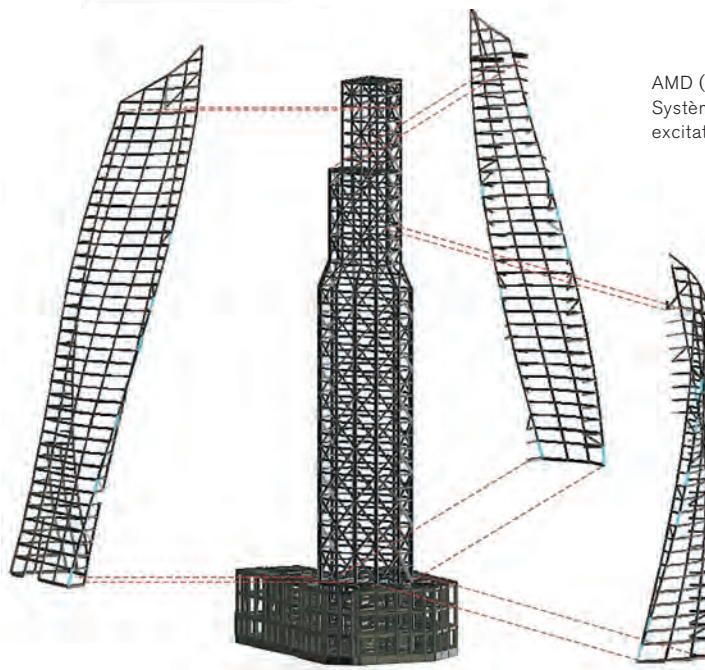
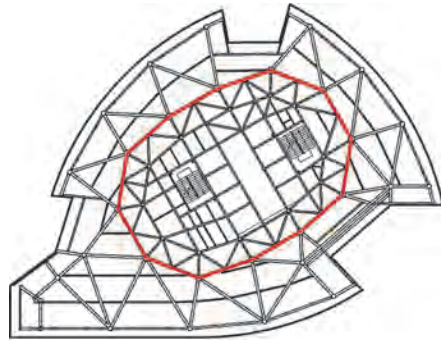
7 Tokyo Sky Tree, Tokyo 2011, 634 m, construction Nikken Sekkei Ltd.

8 Mode Gakuen Spiral Towers: construction et comportement statique en cas de séisme.



6

7



amortisseur

AMD (Active Mass Driver)
Système actif par excitateur massique

poteaux extensibles

8



9 Dans la halle de ski d'intérieur SSAWS (Spring-Summer-Autumn-Winter Ski), à Tokyo, la construction a été subdivisée en cinq tronçons reliés par des assemblages articulés, de manière à réduire les contraintes générées en cas de séisme.

10/11 La Crystal Brick House (2004) se présente sous la forme d'une structure tridimensionnelle grillagée en acier plat, dont les vides sont remplis par des briques de verre.

9

déformations toujours plus importantes.⁶ Constitue une autre mesure de sécurité l'amortisseur de masse placé au sommet de l'édifice, dont l'inertie atténue les vibrations en cas de séisme. Grâce à cet amortisseur et à d'autres disposés à des endroits stratégiques, il est possible de réduire les déformations de 22 %.

La Mode Gakuen Cocoon Tower repose sur un système similaire. Ici encore, la stabilisation du bâtiment contre les forces horizontales est assurée par un fût central composé de douze piliers en acier remplis de béton, qu'entourent trois manteaux triangulés («Diagrid Frames»). Celles-ci ne sont toutefois assemblées de façon rigide qu'au sommet de la tour. Les déformations susceptibles d'intervenir aux autres étages sont absorbées par des amortisseurs liquides.⁷

Dans la jungle des gratte-ciel japonais, le plus haut spécimen est de loin le Tokyo Sky Tree, une tour de radiodiffusion qui culmine à 634 mètres. Ce projet présente lui aussi une colonne centrale en forme

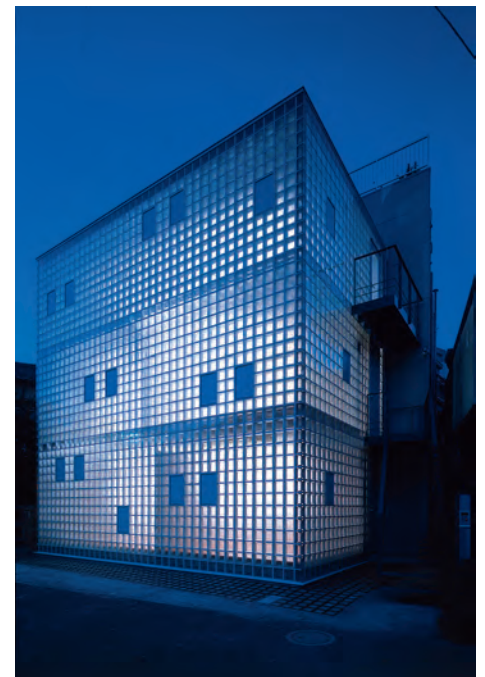
d'anneau, qui est cependant, en raison de sa hauteur, réalisée en béton armé. Dans la partie inférieure de la tour (jusqu'à 125 mètres environ), les manteaux métalliques qui entourent ce fût lui sont reliés de façon rigide et, au-dessus (jusqu'à 375 mètres), par des amortisseurs à huile. Ce principe a été nommé, en référence au modèle des pagodes historiques, «shimbashira seishin» ou «Center Column Vibration Control».⁸ Les trois pieds sur lesquels repose extérieurement la tour se rejoignent en une section circulaire dont le diamètre diminue avec la hauteur. Conçues comme des racines, les fondations plongent jusqu'à 50 mètres sous terre, les pieux étant dotés de bourrelets qui renforcent les frottements avec le terrain et accroissent ainsi la stabilité de l'ancrage.

Grilles et bulles

Le principe de la ductilité ne trouve pas d'applications que dans la construction de tours: dans les bâtiments qui s'étendent à l'horizontale aussi, la prise en compte des déformations potentielles en cas de séisme se

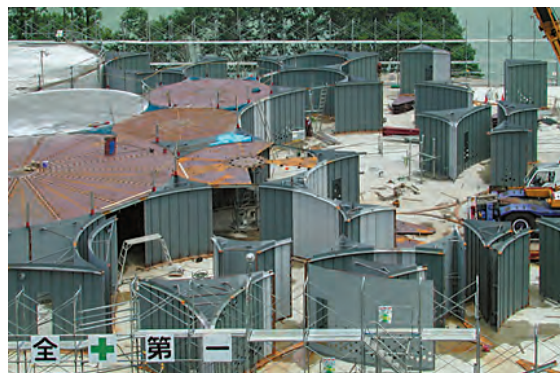
10

11

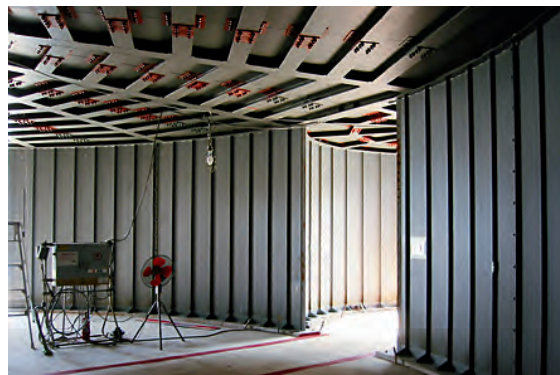




12



13



14

12-14 Le Tomihiro Art Museum (Azuma 2006) se compose de 33 «bulles» accolées les unes aux autres, qui répartissent les forces sismiques sur l'ensemble du bâtiment.

révèle primordiale. C'est ce qu'illustre par exemple le SSAWS Lala-Port Skidome à Tokyo (1995-2005), qui représentait en son temps, avec ses 100 mètres de hauteur et ses 500 mètres de longueur, la plus grande halle de ski d'intérieur du monde. Pour éviter que la structure de la rampe ne soit, en cas de séisme, endommagée par des différences de comportement aux vibrations, l'ouvrage de Kajima Corporation fut subdivisé en cinq parties, dont chacune peut bouger indépendamment des autres, avec des fréquences différentes.

Dans le cas de bâtiments plus petits, ne présentant pas de grandes différences de géométrie, il est aussi possible de recourir à des constructions plus rigides. Ainsi la «Crystal Brick House» (Tokyo, 2004) a-t-elle été conçue par l'architecte Yasuhiro Yamashita et l'ingénieur Jun Sato comme une structure grillagée tridimensionnelle en acier plat, dont les vides sont remplis par des briques de verre.⁹

Le concept statique et dynamique du Tomihiro Art Museum à Azuma (préfecture de Gunma, 2006) a été développé par l'architecte Makoto Yokomizo, en collaboration avec Arup Japan. À l'intérieur d'un carré de 52 mètres de côté se serrent l'une contre l'autre 33 salles de forme cylindrique qui se contreventent mutuellement et répartissent régulièrement les efforts horizontaux sur tout le bâtiment. Trois de ces «bulles» sont réalisées en béton armé, les autres se composent de plaques en acier de 9 mm d'épaisseur. Les planchers, aussi réalisés en acier, accroissent encore, du fait de leur structure rayonnante, la rigidité de l'ensemble.¹⁰

Liaisons névralgiques

Si le concept dynamique global est déterminant dans tout projet, l'exécution des détails ne l'est pas moins. Dans la mesure où l'acier possède lui-même une grande résistance à la traction et à la compression, les éléments de liaison représentent, en cas de séisme, le point critique: une soudure mal exécutée ou une plaque de raccordement mal conçue peuvent compromettre la résistance de tout l'ouvrage. Aussi convient-il de faire en sorte que ces zones sensibles soient le moins sollicitées possible. Pour ce faire, on recourt aux assemblages de type «Dog-Bone», qui consistent à réduire la section des poutres juste avant leur point de jonction, de manière à produire, non pas une rupture au niveau de la liaison, mais une déformation des poutres qui dissipe les efforts horizontaux et de torsion.¹¹

Malgré ses avantages, cependant, la propriété que possède l'acier de se déformer relativement facilement ne va pas toujours sans poser de problèmes. Ainsi les principales faiblesses du matériau résident-elles dans le risque de flambage des éléments de structure, ainsi que dans la forte réduction de leur résistance sous l'effet de la chaleur. Dans ce contexte, il est intéressant que ce soit la construction en bois, pourtant réputée moins performante, qui offre une solution. En effet, un groupe de chercheurs japonais a développé une construction hybride, tirant parti des deux matériaux.¹² Celle-ci consiste à envelopper de bois des poutres en acier ou à renforcer par de l'acier des poutres en bois («Reinforced Wood»), de manière à réduire la section de bois tout en améliorant sensiblement la résistance de l'élément métallique au



15

flambage. De plus, le «manteau» de bois protège paradoxalement l'acier contre le feu, la couche carbonisée qui se forme en cas d'incendie ayant pour effet d'isoler celui-ci de la chaleur. En 2005 a été réalisé un bâtiment-prototype de cinq niveaux (M-Building, Kanazawa), qui préfigure le renouveau des édifices en bois de plusieurs étages.

Des stratégies analogues sont aussi poursuivies en Europe. Ainsi des études et essais menés à l'Université de Wuppertal sous la direction du professeur Pegels, informaticien du bâtiment, ont-ils montré que la construction traditionnelle à colombage possède, grâce aux écharpes qui la contreventent, une grande résistance aux séismes. Dans le cadre d'un projet mené conjointement avec l'Université technique d'Isfahan a été réalisé, en 2007, un bâtiment-prototype où le bois a été remplacé – comme au Japon – par de l'acier. Conçu pour une intensité sismique maximale de 8,0, ce prototype est destiné à offrir, en Iran, une alternative à la fois sûre et relativement bon marché à la construction massive traditionnelle.

Tous les exemples décrits ci-dessus montrent qu'une combinaison intelligente entre savoir-faire traditionnels et technologie moderne permet non seulement de développer des solutions inédites, mais aussi de remettre au goût du jour des modes de construction éprouvés. Reste à espérer que les bâtiments conçus selon ces principes représenteront, en cas de séisme, de véritables abris et non des sources de danger, et que le nombre des victimes pourra être réduit en conséquence.

15 M-Building, Kanazawa (2005): une construction en bois et acier allie les avantages des deux matériaux (résistance statique, rigidité au flambage, comportement au feu) et permet de renouer avec la tradition des bâtiments en bois à plusieurs étages, tout en respectant les prescriptions actuelles en matière de sécurité incendie.

16 Grâce aux assemblages de type «Dog-Bone» – obtenus ici par découpage des semelles des poutres –, les efforts horizontaux n'agissent pas sur les liaisons entre poutres et poteaux, mais juste avant. Cela provoque, non pas une rupture, mais une déformation des poutres qui dissipe les efforts sismiques.

¹ Fournies par le Prof. Wolfgang Winter, Institut de structure et de construction bois, Université technique de Vienne.

² Sont ici à la pointe des sociétés actives au niveau international comme Takenaka, Shimizu, Kajima, Taisei et Obayashi Corporation, toutes classées parmi les 25 premières entreprises de construction mondiales. Informations tirées de Engineering News Record (2008).

³ Yutaka Nakamura, Masaaki Saruta, Akira Wada, Toru Takeuchi, Shigeru Hikone et Teiichi Takahashi: Development of the Core-Suspended Isolation System, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vol. 40, n° 4, 10 avril 2011, pp. 429–447.

⁴ Nipponia n° 33, 15 juin 2005, <http://web-japan.org/nipponia/nipponia33/en/topic/index.html#fig1> (09.07.2011).

⁵ Fujita K., Hanazato T., Sakamoto I.: Earthquake Response Monitoring and Seismic Performance of Five-storied Timber Pagoda, 13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B.C., Canada, 01-06.08.2004, contribution n° 54.

⁶ Katsuhiko Yamawaki, Toru Kobori (Structural Engineering Dpt., Nikken Sekkei Ltd.): Mode Gakuen Spiral Towers – An Approach to Structural Design for Realizing Advanced Structural Configurations in Earthquake-prone Countries, in: Steel Construction Today & Tomorrow, n° 25, Tokyo, décembre 2008, pp. 5–10.

⁷ Masako Minami (Senior Structural Engineer, Arup Japan): Mode Gakuen Cocoon Tower – An Iconic High-rise Campus in a Dense City, in: Steel Construction Today & Tomorrow, n° 25, Tokyo, décembre 2008, pp. 11–14.

⁸ Voir à ce propos: <http://www.nikken.co.jp/ens/skytree/structure> (09.07.2011).

⁹ Voir à ce propos: <http://www.tekuto.com/works/2004/075/info.html> (09.07.2011).

¹⁰ Voir à ce propos: <http://www.aatplus.com/css/top.html> (09.07.2011).

¹¹ Thomas Wenk: Erdbeibengerechter Entwurf von Hochbauten, Ecole polytechnique fédérale de Zurich, 2009.

¹² Mikio Koshihara, Hiroshi Isoda, Shuitsu Yusa: The Design and Installation of a Five-story New Timber Building in Japan, Tokyo, 2005

Crédits plans et photos:

1, 3, 5, 7, 9 mis à disposition; 2 Shimizu Corporation; 4 Arup Japan, photographe Koji Horiuchi; 6 Nikken Sekkei Ltd., photographe Ken'ichi Suzuki; 8 Nikken Sekkei Ltd.; 10, 11 Tekuto, photographe Makoto Yoshida; 12, 13, 14 aat + Makoto Yokomizo architects Inc., photographes Shigeru Ohno, Makoto Yokomizo; 15 Atsuko Tani, 16 Thomas Wenk, ETHZ



16

Impressum

Littérature et sources suisses

SIA Société suisse des ingénieurs et architectes, Zurich:

Norme SIA 260 (2003): Bases pour l'élaboration des projets de structures porteuses. Société suisse des ingénieurs et architectes, Zurich.

Norme SIA 260.801 (2004) EN 1998-1: Eurocode 8 – Conception et dimensionnement des structures pour leur résistance aux séismes – Partie 1, règles générales, actions sismiques et règles pour les bâtiments.

Norm SIA 261 (2003): Actions sur les structures porteuses

Norm SIA 263 (2003): Construction en acier

Cahier technique SIA 2018 (2004): Vérification de la sécurité parasismique des bâtiments existants

Documentation SIA D 0180 (2004): Termes techniques des normes sur les structures porteuses – Terminologie et définitions

Documentation SIA D 0181 (2003): Bases pour l'élaboration des projets de structures porteuses – Actions sur les structures porteuses – Introduction aux normes SIA 260 et 261

Autres:

Bachmann H. (2002): Conception parasismique des bâtiments – Principes de base à l'attention des ingénieurs, architectes, maîtres d'ouvrages et autorités. Office fédéral des eaux et de la géologie OFEG

Bachmann H. (2002): Erdbebensicherung von Bauwerken. Birkhäuser Verlag, Basel.

Paulay T., Bachmann H., Moser K. (1990): Erdbebenbemessung von Stahlbetonhochbauten. Birkhäuser Verlag, Basel.

Smit P. (2004): Entstehung und Auswirkungen von Erdbeben. Forum 4/2004. Bundesamt für Bevölkerungsschutz, Bern.

Wenk T., Lestuzzi P. (2003): Erdbeben. Dans: Documentation SIA D 0181 (2003): Bases pour l'élaboration des projets de structures porteuses – Actions sur les structures porteuses – Introduction aux normes SIA 260 et 261. S. 59–66. SIA Zurich

Wenk T. (2005): Erdbebeneinwirkung. In: Dokumentation SIA D 0211, Überprüfung bestehender Gebäude bezüglich Erdbeben – Einführung in das Merkblatt SIA 2018. S. 9–16, SIA Zurich

Weidmann M. (2002): Erdbeben in der Schweiz. Verlag Desertina, Chur.

Lignum, Economie suisse du bois: Bâtiments en bois parasismiques de plusieurs étages. Documentation technique de Lignum, Zurich, 2010

Fondation pour la Dynamique des structures et le Génie Parasismique ainsi que l'Office fédéral des eaux et de la géologie OFEG (2005): Construction parasismique en Suisse – ce qui est essentiel et pourquoi. Zurich.

Service Sismologique Suisse SED (2002): Swiss Hazard Map. (<http://www.earthquake.ethz.ch>)

Office fédéral de l'environnement OFEV (2004): L'aléa sismique en Suisse, Effets géologiques locaux (microzonage). (<http://www.bafu.admin.ch>)

Autres sources voir articles/bibliographies

Impressum

steeldoc 03+04/11, parution mai 2012
Construction parasismique – Conception et dimensionnement

Editeur:
SZS Centre Suisse de la construction métallique, Zurich
Evelyn C. Frisch, Directrice

Rédaction:
Evelyn C. Frisch (responsable)
Collaboration: Ann Schumacher, Virginia Rabitsch, Sascha Roesler
Critical Review: Kerstin Pfyl-Lang Zürich; Michel Crisinel, Lausanne
en collaboration avec les auteurs

Mise en page:
Evelyn C. Frisch et Virginia Rabitsch, SZS
Plans et graphiques partiellement retravaillés par cira drei, Munich

Photos et plans:
Titre: Yves André, St-Aubin-Sauges
Editorial: Raffaele Landolfo, Naples
Interview: Photos: Katja Jug; Illustration: Tremblement de terre de Bâle: Erdbeben und Kulturgüter, p. 13;
Conception et dimensionnement:
Raffaele Landolfo, Université Federico II, Naples (aeob), sources voir article
Principe de conception: voir article
Ecole de la Maladière: Photos: Yves André, St-Aubin-Sauges p. 32, 33, 37; Ingeni SA, Genève, p. 35, plans et schémas: architectes et ingénieurs
Confortement des bâtiments existants: voir article
Bâtiment de production K90: Plans et photos mis à disposition de Gruner AG et Flubacher-Nyfelner+Partner Architekten
Construction parasismique au Japon: voir article
Médiathèque de Sendai: voir article

Conception graphique: Gabriele Fackler, Reflexivity AG, Zurich

Administration et abonnements: Giesshübel-Office, Zurich
Impression: Kalt-Zehnder-Druck AG, Zoug

ISSN 0255-3104

Abonnement annuel CHF 48.– / étranger CHF 60.–
Numéros isolés CHF 15.– / doubles numéros CHF 25.–
Sous réserve de changement de prix.
A commander sur www.steeldoc.ch

**Abonnement annuel à Steeldoc pour CHF 48.–
(Étudiants gratuit) sur www.steeldoc.ch**

Construire en acier / steeldoc® est la documentation d'architecture du SZS Centre suisse de la construction métallique et paraît quatre fois par an en allemand et en français. Les membres du SZS reçoivent l'abonnement ainsi que les informations techniques du SZS gratuitement.

Toute publication des ouvrages implique l'accord des architectes, le droit d'auteur des photos est réservé aux photographes. Une reproduction et la traduction même partielle de cette édition n'est autorisée qu'avec l'autorisation écrite de l'éditeur et l'indication de la source.