

Zeitschrift: Tracés : bulletin technique de la Suisse romande
Herausgeber: Société suisse des ingénieurs et des architectes
Band: 128 (2002)
Heft: 06

Artikel: Principes de base de la conception parasismique des bâtiments
Autor: Bachmann, Hugo
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-80266>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 08.02.2025

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

Principes de base de la conception **parasismique** des bâtiments¹

Chez certains professionnels – surtout les architectes – on considère encore que la sécurité parasismique des bâtiments est uniquement une question de calcul et de dimensionnement de la structure porteuse par l'ingénieur civil. Or ce n'est de loin pas le cas! La conception et l'exécution de la structure porteuse et des éléments non-porteurs jouent un rôle non moins important. Tels qu'ils sont présentés ici, les principes de base de la conception parasismique des bâtiments concernent aussi bien le travail de l'architecte que celui de l'ingénieur civil.

Introduction

La sécurité parasismique de nouveaux bâtiments est liée à l'observation de principes de conception, puis de réalisation de la structure porteuse et des éléments de construction non-porteurs (cloisons intermédiaires, éléments de façade, etc.), qui déterminent la sécurité en cas de séisme (comportement à la rupture) et la vulnérabilité sismique (endommagement). L'ensemble de ces principes est exposé dans le présent article.

Des calculs et un dimensionnement, aussi élaborés soient-ils, ne sauraient en effet compenser les erreurs ou les défauts «parasismiques» d'une structure porteuse et de ses éléments non-porteurs, tandis qu'une conception et une exécution appropriées de ce point de vue n'entraînent en général pas ou peu de surcoût pour une nouvelle construction – même lorsque l'on fait appel aux méthodes modernes de calcul et de dimensionnement, en particulier le dimensionnement en capacité, basé sur les déformations.

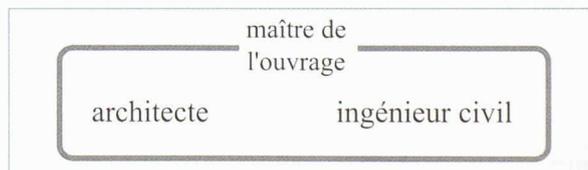
Cela étant, le respect des préceptes de conception et de réalisation énoncés ci-après n'est qu'un premier pas: des calculs et un dimensionnement appropriés sont également fondamentaux. Alors que l'architecte et l'ingénieur civil sont tous

deux concernés par l'élaboration du projet ainsi que par certains aspects de la construction, les quelques principes de calcul et de dimensionnement qui suivent s'adressent essentiellement à l'ingénieur civil. Leur observation par ce dernier sera le plus souvent largement compensée par une économie des coûts de construction.

Principe général pour la planification

Avant tout, le respect du principe commandant une étroite collaboration entre architecte et ingénieur civil dès les premières étapes d'un projet, puis tout au long de sa réalisation, s'avère déterminant pour atteindre une solution optimale!

Souvent, de sérieuses lacunes persistent encore dans la collaboration entre l'architecte et l'ingénieur civil, qui peuvent entraîner des surcoûts inutiles importants. Il n'est en effet pas rare que l'ingénieur civil se trouve impliqué trop tard dans un projet et, dans ce cas, même les calculs les plus habiles ne pourront compenser des erreurs ou des défauts «parasismiques» affectant la conception et la réalisation de la structure porteuse et des éléments non-porteurs. C'est pourquoi une collaboration étroite est absolument nécessaire dès les toutes premières étapes d'un projet (fig. 1).



Il est donc faux de travailler «les uns après les autres». Autrement dit, il s'avère défavorable que l'architecte élabore d'abord un projet pour la structure porteuse et choisisse des cloisons non-porteuses et des éléments de façade, puis s'adresse ensuite à l'ingénieur pour les calculs et le dimensionnement. Il est également erroné de commencer par élaborer la structure porteuse pour les charges verticales, puis les cloisons non-porteuses et les éléments de façades, avant de compléter la structure pour qu'elle résiste aux effets des séismes.

¹ Traduction de la version revue et complétée de «Grundsätze für Ingenieure und Architekten für den erdbebengerechten Entwurf von Hochbauten», présentée lors de la journée d'études de la Société Suisse du Génie Parasismique et de la Dynamique des Structures («Prévention sismique en Suisse - Mesures parasismiques pour les constructions existantes et nouvelles») qui s'est tenue les 7 et 8 septembre 2000 à l'EPFZ.

Il est nettement plus avantageux de «projeter ensemble»: l'architecte et l'ingénieur élaborent de concert une structure porteuse «polyvalente», soit une solution conçue pour les charges verticales et les forces sismiques, et choisissent ensemble les cloisons intermédiaires et les éléments non-porteurs convenant à cette structure. Ce procédé évite des surcoûts considérables, de même qu'il écarte les constructions revues et corrigées qui se révèlent tout de même inadaptées en fin de compte.

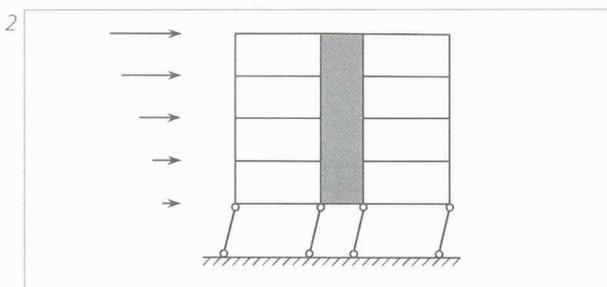
Principes de conception

Les principes énoncés dans ce chapitre concernent la conception de la structure porteuse et des éléments non-porteurs (avant tout les cloisons et les éléments de façade), pour laquelle une collaboration étroite entre l'architecte et l'ingénieur civil est primordiale.

Rez-de-chaussée

Lors d'un tremblement de terre, de nombreux effondrements de bâtiments sont à mettre sur le compte d'éléments de stabilisation présents dans les étages supérieurs, mais absents au rez-de-chaussée, où seules des colonnes relativement minces subsistent. Cela entraîne un rez-de-chaussée flexible horizontalement («soft storey»), et conduit au dangereux «mécanisme de colonnes» (mécanisme d'étage).

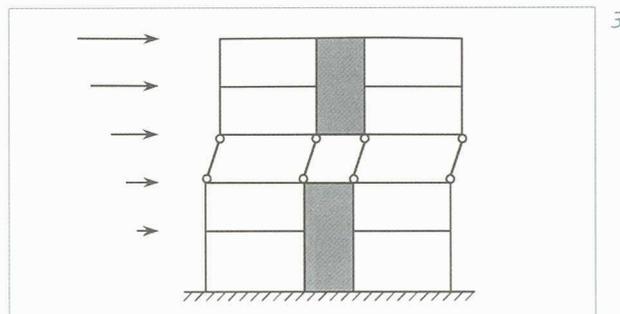
Principe (fig.2): éviter les rez-de-chaussée flexibles!



Etages

Un étage supérieur où la stabilisation horizontale est affaiblie, ou même totalement absente, entraîne un étage flexible et par conséquent un «mécanisme de colonnes» dangereux (mécanisme d'étage).

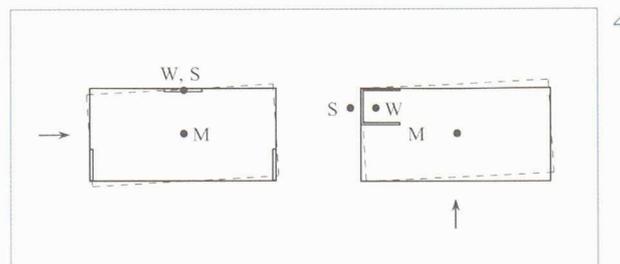
Principe (fig.3): éviter les étages supérieurs flexibles!



Stabilisations

Sur les plans de la figure 4, seules les parois constituant les éléments de stabilisation horizontale du bâtiment sont représentées. Les colonnes, conçues uniquement pour reprendre des charges verticales, n'y figurent pas. Les refends sont disposés de façon fortement asymétrique. Le centre de résistance W ne coïncide pas avec le centre de masse M , ce qui entraîne une forte torsion avec rotation autour du centre de cisaillement S et, surtout, la rupture des colonnes les plus éloignées du centre de cisaillement S .

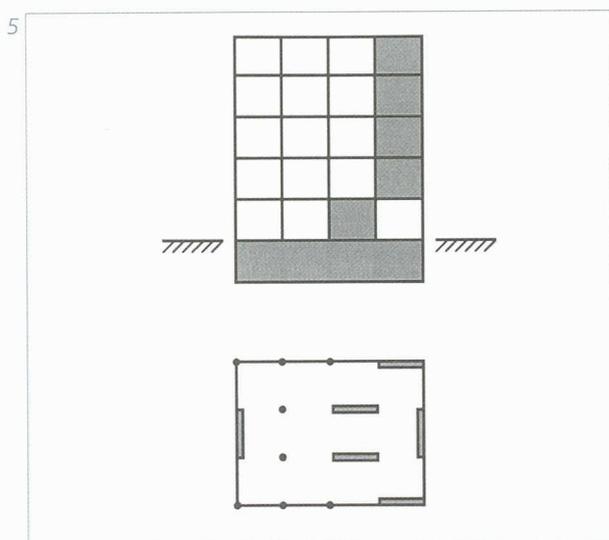
Principe (fig.4): éviter les stabilisations non-symétriques!



Discontinuités de stabilisation

Une disposition différente en plan et/ou en élévation sur la hauteur des bâtiments, soit des discontinuités de stabilisation, constituent toujours des points sensibles et conduisent souvent à l'effondrement des bâtiments. Au droit des discontinuités, les moments de flexion et les efforts tranchants ne peuvent généralement pas être transmis de manière satisfaisante.

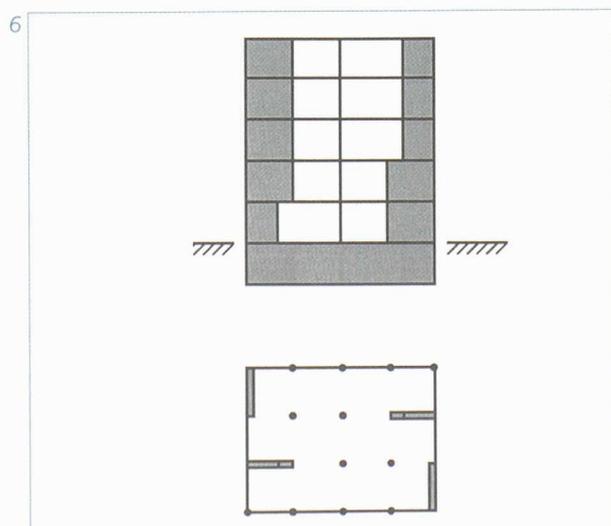
Principe (fig. 5): toute discontinuité de stabilisation est à éviter absolument!



Rigidité et résistance

Des sauts de rigidité et de résistance du contreventement principal sur la hauteur de la structure porteuse peuvent entraîner un comportement dynamique irrégulier et engendrer des problèmes lors de la transmission locale des efforts. Une augmentation de la rigidité et de la résistance de bas en haut (à gauche dans la figure 6) est nettement moins favorable qu'inversement. En tout cas, le plus grand soin doit être apporté au dimensionnement et aux dispositions constructives des zones de transition.

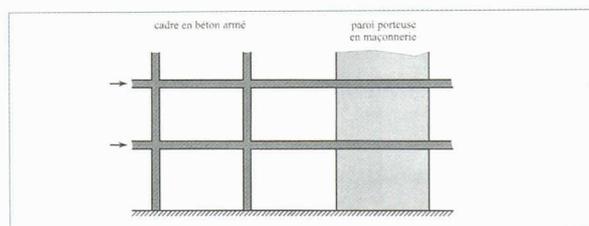
Principe (fig. 6): les sauts de rigidité et de résistance sont problématiques!



Systèmes mixtes

Les systèmes porteurs mixtes composés de cadres et de parois porteuses en maçonnerie ne sont pas bien adaptés à la reprise des efforts sismiques. Même en considérant un cadre relativement massif, les forces sismiques sont pratiquement toutes reprises par les parois en maçonnerie, qui sont nettement plus rigides que le cadre. Lorsque celles-ci s'effondrent sous l'effet des forces sismiques, elles ne peuvent alors plus reprendre les charges verticales, ce qui conduit le plus souvent à un effondrement total. Les systèmes mixtes de cadres et de parois en maçonnerie sont de surcroît mal adaptés aux modifications d'utilisation de plus en plus fréquentes au cours de la vie d'un bâtiment. Pour cette raison également, ils devraient être évités. A long terme, il est donc également dans l'intérêt du maître de l'ouvrage d'opter pour une structure porteuse avec quelques refends élancés en béton armé, disposés sur toute la hauteur du bâtiment. Des modifications ultérieures compliquées et coûteuses sur la structure porteuse sont ainsi automatiquement évitées.

Principe (fig. 7): éviter les systèmes mixtes de cadres et de parois porteuses en maçonnerie!



Remplissages en maçonnerie

Le remplissage des cadres par de la maçonnerie est une combinaison extrêmement défavorable de deux méthodes de construction très différentes: les cadres sont souples et plus ou moins ductiles, tandis que la maçonnerie est rigide et fragile. Au début d'un tremblement de terre, cette dernière reprend presque toutes les forces sismiques, puis s'écroule souvent par compression oblique ou glissement (faible frottement suite à un manque de compression). Il peut aussi arriver que la maçonnerie cisaille les piliers.

Principe (fig. 8): éviter le «remplissage» des cadres par de la maçonnerie!

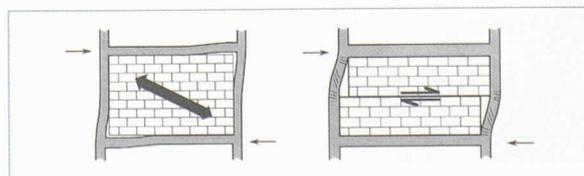
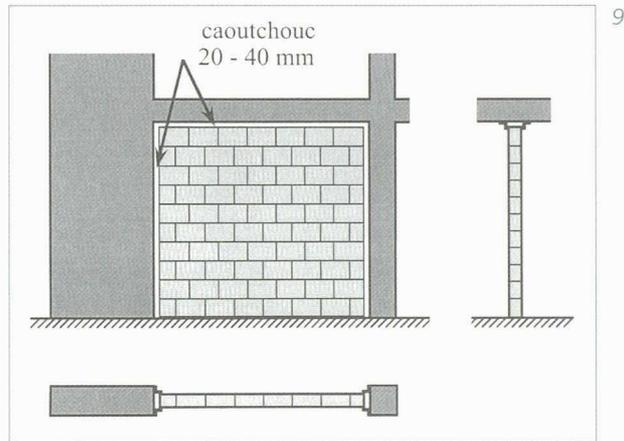
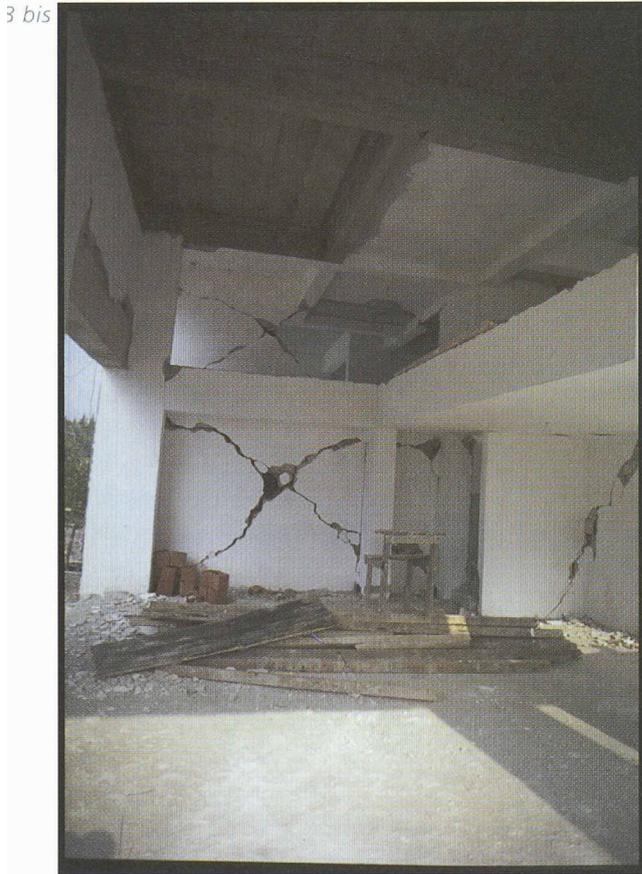


Fig. 8 bis: Tremblement de terre de Kocaeli (Turquie) du 17 août 1999
 Déchirure en croix dans une paroi non-porteuse en maçonnerie à Yalova - Gölcük

(Document: mission de reconnaissance du Groupe suisse du génie parasismique et de la dynamique des constructions - SGEB/GSPB)



Bâtiments en maçonnerie

Relativement rigides, les bâtiments en maçonnerie ont souvent une fréquence propre élevée (dans la zone du plateau du spectre de dimensionnement) et subissent, par conséquent, de grandes forces sismiques. Par ailleurs, les parois en maçonnerie non armées sont fragiles et ne permettent qu'une dissipation d'énergie relativement faible. Comme il n'est pas possible, en général, d'atteindre une sécurité sismique suffisante pour les bâtiments en maçonnerie « purs », même pour des tremblements de terre modérés (par exemple zone 1 selon SIA 160), il faut stabiliser les bâtiments en maçonnerie non armée par des refends en béton armé.

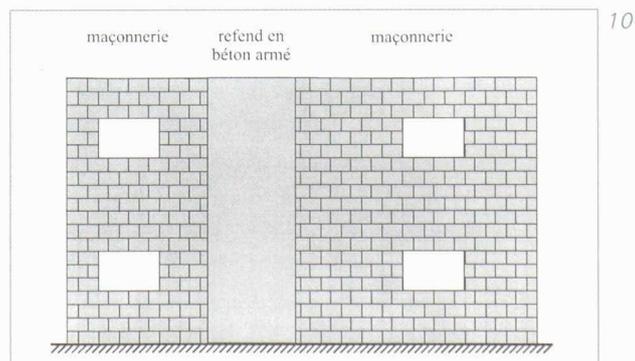
Les refends en béton armé doivent être conçus de façon suffisamment rigide (la longueur de la paroi et la quantité d'armature verticale sont déterminantes). Ils doivent supporter leur part des forces sismiques en restant élastiques, c'est-à-dire sans plastification de l'armature. Pour le séisme de dimensionnement, les déplacements horizontaux du bâtiment ne doivent pas excéder le déplacement entraînant la rupture des parois en maçonnerie les plus rigides (longues).

Principe (fig. 10): stabiliser les bâtiments en maçonnerie avec des refends en béton armé!

Cloisons et parois

Il peut souvent être utile de séparer les cloisons intermédiaires - particulièrement les parois en maçonnerie non-porteuses relativement rigides dans leur plan et fragiles - de la structure porteuse par des joints afin d'éviter leur endommagement lors de faibles tremblements de terre (inférieurs au séisme de dimensionnement). Les joints doivent être remplis par un matériau très souple, et si possible insonorisant, comme le caoutchouc par exemple. Le liège, les mousses dures, les kits pour joints, etc., sont en revanche trop rigides. L'épaisseur nécessaire du joint dépend de la rigidité de la structure porteuse et de la sensibilité à la déformation des cloisons intermédiaires, ainsi que du niveau de sécurité choisi (inférieur au séisme de dimensionnement). Souvent, il faut également assurer les cloisons intermédiaires contre les accélérations latérales, par exemple à l'aide de cornières, afin d'éviter leur effondrement hors plan.

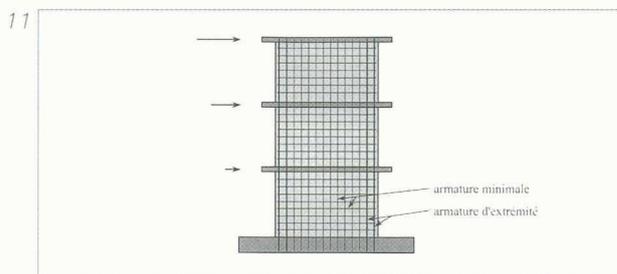
Principe (fig. 9): dans les bâtiments stabilisés par des refends en béton armé, séparer les parois en maçonnerie au moyen de joints et les assurer contre les accélérations transversales!



Parois porteuses en maçonnerie

Au lieu de stabiliser les bâtiments en maçonnerie avec des refends en béton armé, il est possible d'armer les parois porteuses en maçonnerie. Il faut alors prévoir une armature horizontale minimale et une armature verticale d'extrémité renforcée. Ainsi, les glissements dans les joints d'appui seront évités et une certaine ductilité ($\mu_{\Delta} \sim 2$) pourra être atteinte.

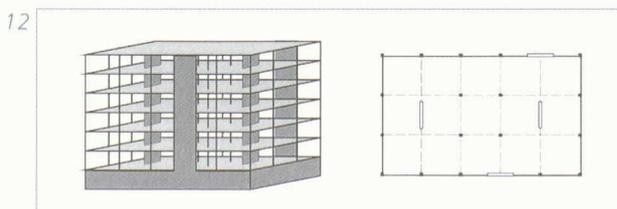
Principe (fig. 11): armer les parois porteuses en maçonnerie!



Stabilisation par des murs de refend

Pour les zones de faible sismicité, comme c'est le cas en Suisse, deux refends élancés par direction principale, en béton armé, s'étendant sur toute la hauteur du bâtiment suffisent en général. Cela est en particulier valable dans le cas de cloisons intermédiaires non-porteuses plutôt flexibles ou séparées de la structure porteuse par des joints (pas de remplissage en maçonnerie sans joints). Pour diminuer les effets de torsion, les refends devraient être disposés symétriquement et, si possible, à la périphérie du bâtiment. Mais il vaut mieux éviter de les placer dans un angle, car la diffusion des forces de réaction correspondantes dans le sol est alors difficile. En outre, des refends présentant une section en L (parois d'angle) et des refends avec une section en U sont souvent nettement moins favorables que ceux de section rectangulaire, car ils peuvent difficilement être conçus de manière ductile. En revanche, des refends en béton armé de section rectangulaire peuvent être facilement adaptés pour augmenter leur ductilité, ce qui permet d'atteindre une sécurité parasismique élevée pour l'ensemble du bâtiment.

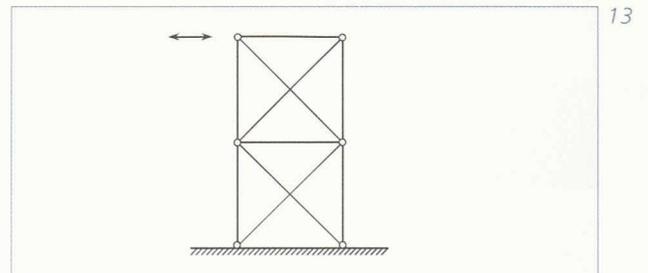
Principe (fig. 12): dans les bâtiments stabilisés par des murs de refend, deux refends élancés en béton armé dans chaque direction principale sont souvent suffisants!



Contreventements triangulés

Les contreventements triangulés, avec les liaisons centrées usuelles aux nœuds, se comportent souvent de manière très défavorable lors d'une sollicitation cyclique. Les diagonales élancées se plastifient en traction, s'allongent et flambent ensuite en compression. De ce fait, la rigidité des contreventements triangulés diminue fortement au passage du point de déformation nulle, ce qui entraîne des effets dynamiques qui peuvent contribuer à la ruine de la structure. De tels contreventements ne devraient donc être prévus que pour des comportements élastiques ou une ductilité très basse. Les contreventements triangulés constitués de barres massives et des liaisons excentriques se comportent nettement mieux. Il faut de toute manière soigneusement vérifier la compatibilité des déformations des contreventements triangulés avec les autres éléments de construction porteurs ou non-porteurs.

Principe (fig. 13): choisir et concevoir soigneusement les contreventements triangulés!



Colonnes

Dans les cadres constitués de poutres massives, les colonnes peuvent être sollicitées au plus jusqu'à leur moment plastique M_{pl} . Dans le cas de colonnes courtes et massives, il se produit un énorme gradient de moment, à l'origine d'un important effort tranchant qui entraîne, avant même d'atteindre M_{pl} , une rupture par cisaillement (une alternative pour éviter une telle rupture est de dimensionner de telles colonnes au cisaillement et de les construire selon les règles du dimensionnement en capacité).

Principe (fig. 14): éviter les colonnes courtes!

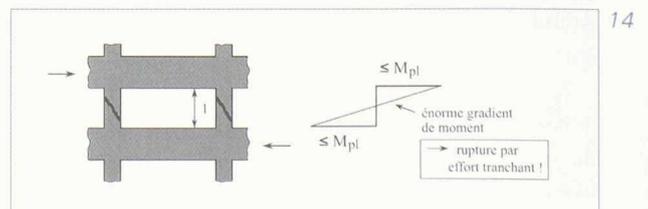
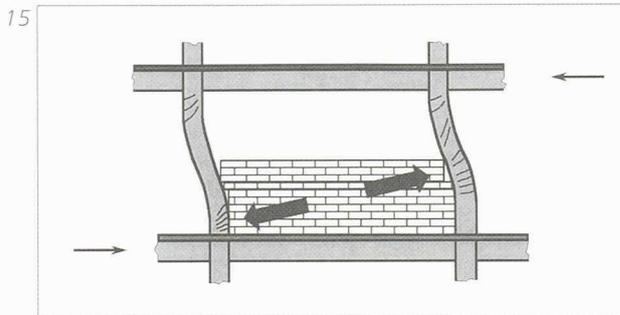


Fig. 15 bis: Tremblement de terre de Kocaeli (Turquie) du 17 août 1999
Effet «short column» dans le bâtiment de la mosquée à Gölcük
(Document: mission de reconnaissance du Groupe suisse du génie parasismique et de la dynamique des constructions - SGEB/GSPB)

Remplissages partiels

L'insertion sans joint de remplissage partiel dans les cadres a pour conséquence l'apparition du phénomène des colonnes courtes ou captives (voir principe précédent). Cela entraîne une rupture par cisaillement ou – en cas de résistance au cisaillement suffisante – un mécanisme de colonnes avec des effets du deuxième ordre importants (effet $P-\Delta$).

Principe (fig. 15): éviter les remplissages partiels dans les cadres!

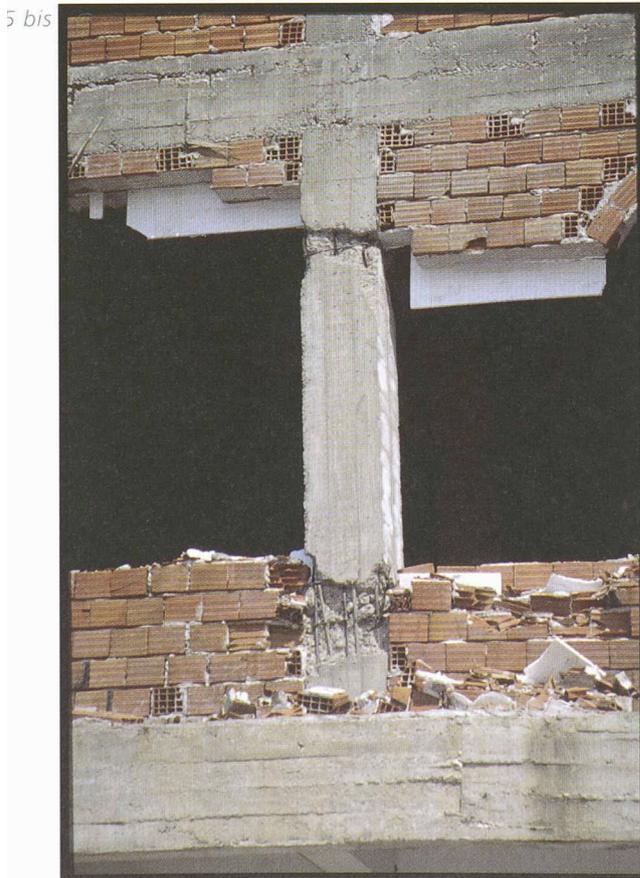
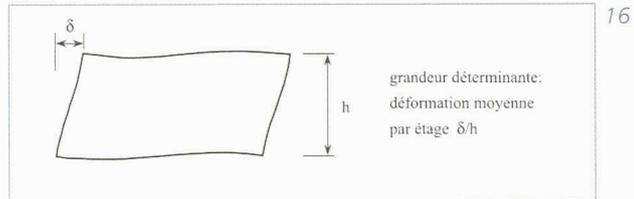


Rigidité de la structure

Si l'on combine, sans joint, des cloisons intermédiaires peu déformables (par exemple en maçonnerie) avec une structure porteuse souple horizontalement (par exemple un cadre), même de faibles séismes sont en mesure de provoquer des dommages importants.

La grandeur déterminante est la déformation moyenne par étage («storey drift»), c'est-à-dire le rapport entre la déformation de l'étage δ et sa hauteur h .

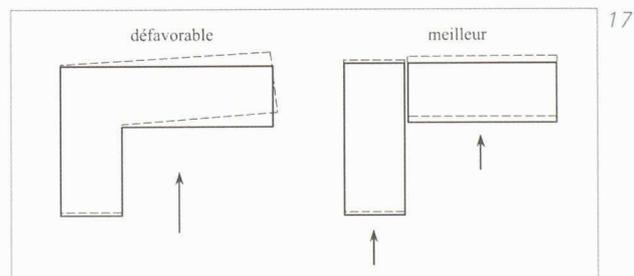
Principe (fig.16): accorder la rigidité de la structure porteuse à la sensibilité aux déformations propre aux cloisons non-porteuses et éléments de façade!



Plan

Les parties gauche et droite du bâtiment représenté à la figure 17 voudraient vibrer de façon différente, mais se gênent mutuellement. Cela conduit, en particulier dans la zone de transition, à de fortes sollicitations. Le comportement s'avère nettement meilleur si le plan est séparé en deux parties compactes par un joint.

Principe (fig. 17): préférer les plans compacts!



Joints entre bâtiments

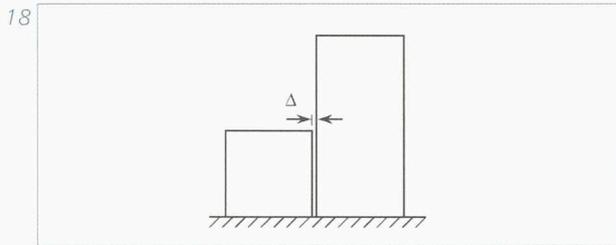
- avoir une largeur minimale (normes);
- être vides et ne pas présenter de points de contact.

Les joints doivent en effet éviter que les bâtiments voisins s'entrechoquent («pounding») et se martèlent («hammering»), deux phénomènes qui s'avèrent particulièrement dangereux lorsque les dalles des bâtiments se trouvent à des niveaux différents et viennent heurter les colonnes de l'autre.

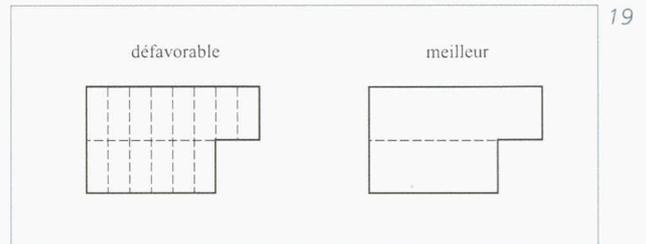
Fig. 18 bis: Tremblement de terre de Kocaeli (Turquie) du 17 août 1999
Collision entre deux bâtiments très proches, au centre de la ville d'Adapazari

(Document: mission de reconnaissance du Groupe suisse du génie parasismique et de la dynamique des constructions - SGEB/GSPB)

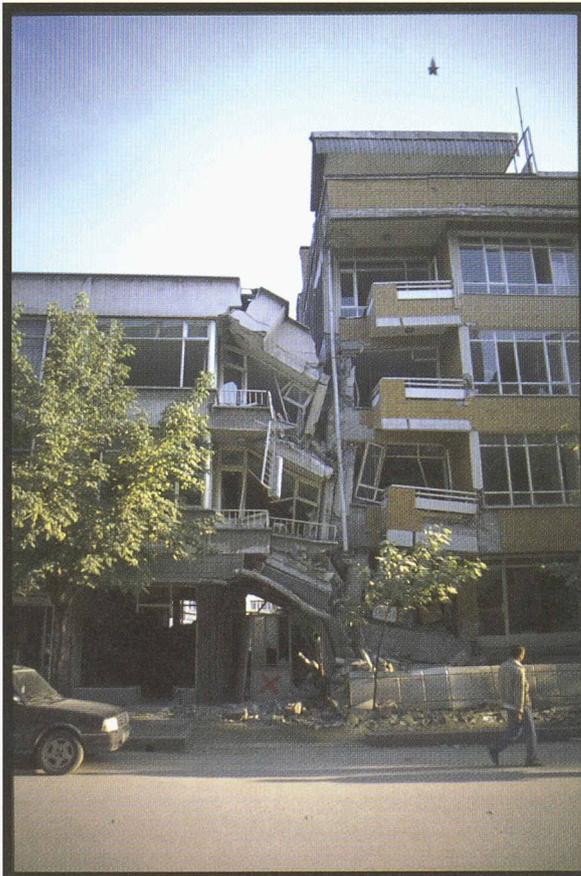
Principe (fig.18): concevoir les joints entre deux bâtiments de façon appropriée!



Principe (fig.19): assurer la cohésion grâce à des dalles monolithiques et répartir les forces sismiques!



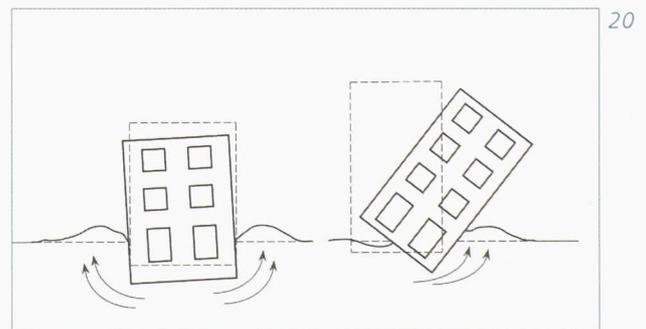
18 bis



Nature du sol

Certains sols sableux à teneur en eau plutôt élevée sont très stables et supportent bien les charges statiques, mais se comportent subitement comme un liquide sous l'effet des vibrations qu'engendre un tremblement de terre. Les bâtiments peuvent s'affaisser ou – si le sol est inhomogène ou en cas de liquéfaction inégale – s'incliner, sans exclure un effondrement total. Un examen soigneux du sol de fondation et des mesures spéciales telles que le renforcement par injections, une fondation profonde (pieux), etc, peuvent pallier ce phénomène.

Principe (fig. 20): en cas de sol sableux, tenir compte d'une éventuelle liquéfaction du sol!



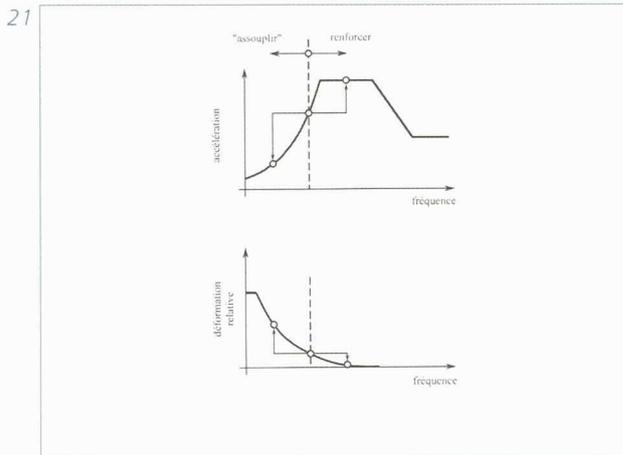
Dalles

Les dalles doivent être compactes et reliées à tous les éléments porteurs verticaux, de façon à pouvoir transmettre la compression et la traction. Les dalles en éléments préfabriqués sans béton armé de liaison, par exemple, ne sont pas recommandées (à gauche sur la figure 19). Les dalles monolithiques en béton armé - qui fonctionnent dans leur plan comme des voiles rigides et conservent ainsi la section des refends (effet de diaphragme) - sont préférables.

Assouplissement des structures

Un «assouplissement» («softening»), respectivement un affaiblissement de la structure porteuse – par exemple, en y incorporant des appuis sismiques en matière synthétique – peut provoquer un déplacement de la fréquence propre dans le domaine favorable du spectre de dimensionnement. Contrairement à un renforcement, respectivement un raidissement – souvent combiné avec une augmentation de l'amortissement – les forces sismiques résultantes peuvent s'en trouver notablement réduites. Les déplacements relatifs augmentent en revanche fortement.

Principe (fig. 21): «assouplir» peut être plus efficace que renforcer!



Principes de base du calcul et du dimensionnement

S'ils concernent en priorité les domaines spécialisés de l'ingénieur civil et sismique, les principes de base du calcul et du dimensionnement exposés ci-après ils peuvent également s'avérer importants pour l'architecte.

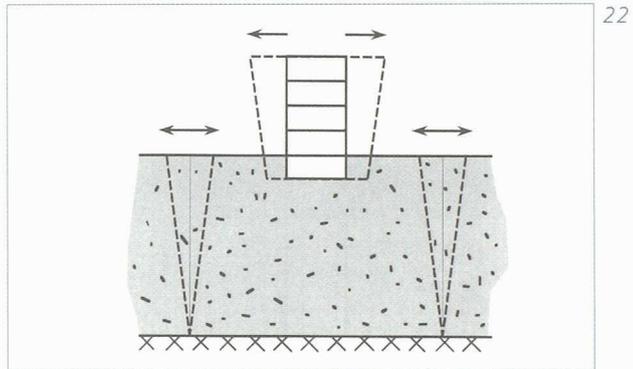
Spectre de site

Les conditions locales du sol peuvent conduire à des amplifications notables du mouvement du sol et de la réponse structurale. Cela peut se produire :

- pour des sols meubles, dont la vitesse des ondes de cisaillement est inférieure à 200 m/s ou/et dont l'épaisseur est importante;
- dans certaines vallées caractérisées par des remplissages alluviaux ou glaciaires (rapport de la profondeur à la largeur plus grand que 0,2 environ);
- de façon générale, en cas de soupçon d'une résonance entre le sol et le bâtiment.

Dans de telles conditions, même lors de faibles tremblements de terre, les vibrations propres très prononcées du sol tendent à amplifier les mouvements sismiques. C'est pourquoi des études spéciales sont indispensables. Si aucun microzonage avec les valeurs spectrales correspondantes (spectre de réponse) n'est disponible, il faut déterminer la fréquence propre du sol et élaborer un spectre de dimensionnement propre au lieu (spectre de réponse de l'accélération et du déplacement).

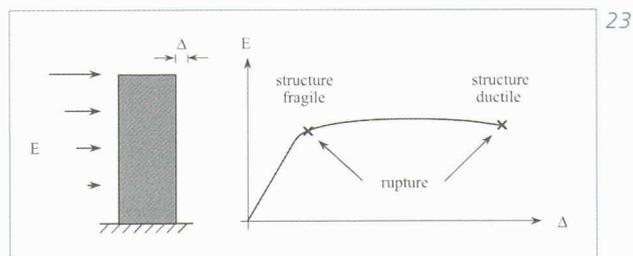
Principe (fig. 22): dans certains cas, le développement d'un spectre de site est nécessaire!



Dimensionnement en capacité

La structure porteuse d'un bâtiment doit toujours être conçue de façon ductile, c'est-à-dire fortement déformable dans les zones sollicitées plastiquement. Cela demeure généralement valable dans le cas extrême où la résistance ultime est tellement grande, que le séisme de dimensionnement peut être supporté dans le domaine «élastique». En effet, les tremblements de terre peuvent dépasser de beaucoup le séisme de dimensionnement! La méthode de dimensionnement en capacité offre ici un procédé simple et efficace. Grâce à elle, la sécurité à la rupture peut être considérablement augmentée (facteur 2-4) sans surcoûts importants.

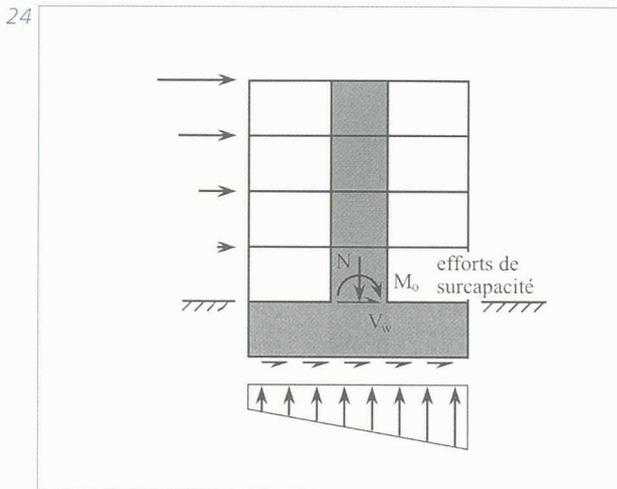
Principe (fig. 23): une structure porteuse ductile grâce au dimensionnement en capacité!



Protection des fondations

Selon les principes de base du dimensionnement en capacité, la fondation doit reprendre les efforts de surcapacité de la structure et pouvoir les reporter sans plastification au sol de fondation. Les fondations devraient toujours rester dans un état élastique: elles évitent ainsi le développement de zones plastiques, qui conduisent généralement à des comportements incontrôlés produisant de grandes déformations de la structure. Des réparations sont également bien plus difficiles à effectuer dans les fondations que dans la structure. Il faut donc absolument éviter des sollicitations excessives et des déformations plastiques du sol.

Principe (fig. 24): protéger les fondations par le dimensionnement en capacité et acheminer les forces jusqu'au sol de fondation!



Principes de base s'appliquant aux détails constructifs

Cette troisième série de principes concerne les aspects importants de la construction de la structure porteuse, des éléments non-porteurs, ainsi que des installations techniques et des aménagements. Ils concernent dans certains cas aussi bien l'ingénieur civil que l'architecte.

Aciers d'armature

En Europe, une grande partie de l'acier d'armature disponible sur le marché – en particulier les barres de petits diamètres – n'est pas assez ductile. Pour pouvoir atteindre une ductilité moyenne des structures en béton armé, l'acier d'armature dans les zones plastiques doit répondre au minimum aux exigences suivantes (valeurs fractiles) :

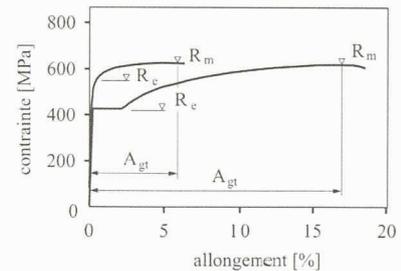
- rapport de la résistance à la traction $R_m = f_t$ à la limite d'écoulement $R_e = f_y$: $R_m/R_e \geq 1.15$
- allongement total à la force de traction maximale: $A_{gt} \geq 6\%$

Des désignations telles que «acier d'armature selon norme SIA162» ou «répond aux exigences des normes» ne sont pas suffisantes et induisent en erreur, car les normes actuellement en vigueur sont elles-mêmes insuffisantes. Il est vivement recommandé de faire des essais appropriés avant la mise en place de l'acier d'armature.

Principe (fig. 25): dans les zones plastiques des refends en béton armé, il faut utiliser de l'acier d'armature ductile avec $R_m/R_e \geq 1.15$ et $A_{gt} \geq 6\%$ (valeurs fractiles)!

R_m/R_e : rapport d'écroutissage

A_{gt} : allongement total à la traction maximale



Crochets d'armature

Dans les zones plastiques des refends et des colonnes en béton armé (longueur plastique L_p), il faut stabiliser les barres d'armature verticales pour éviter qu'elles ne flambent sous les charges de compression. Parfois, le béton doit également être confiné afin de permettre des déformations de compression plus élevées. L'armature transversale nécessaire – armature de stabilisation et de confinement avec des étriers et des barres de liaison – doit être ancrée avec des crochets à 135° ; des crochets à 90° ne suffisent pas, et les dommages observés lors de chaque nouveau séisme le rappellent invariablement (fig. 26 bis). La distance verticale nécessaire relativement faible entre les étriers et les barres de stabilisation $s \leq 5d$ (d = diamètre des barres stabilisées) est due à la ductilité souvent mauvaise (faible rapport d'écroutissage R_m/R_e) des aciers d'armature européens, qui conduisent à un effet de flambement défavorable.

Principe (fig. 26): dans les zones plastiques des refends et des colonnes, munir l'armature transversale de crochets à 135° et les disposer à intervalle $s \leq 5d$!

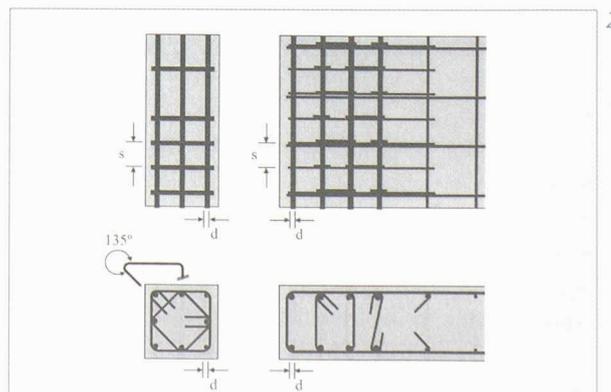
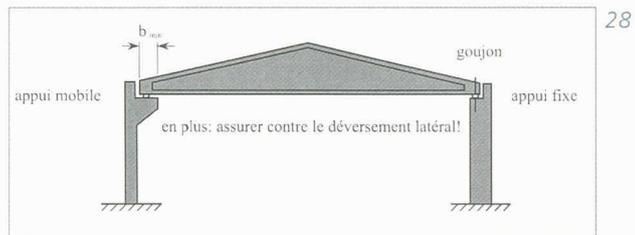


Fig. 26 bis: Tremblement de terre de Kocaeli (Turquie) du 17 août 1999 Adapazari: base de pilier comportant des étriers en nombre suffisant, mais dont les crochets d'armatures sont repliés à 90° au lieu de 135°

(Document: mission de reconnaissance du Groupe suisse du génie parasismique et de la dynamique des constructions - SGEB/GSPB)



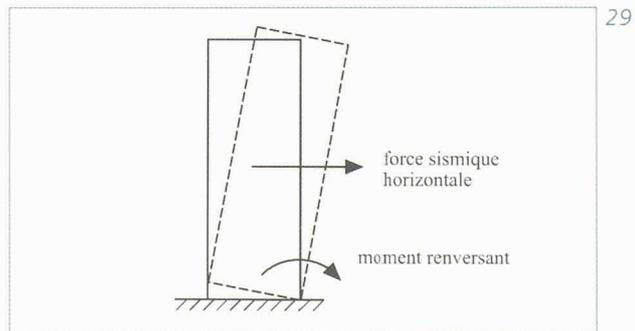
Principe (fig. 28): pour les constructions préfabriquées, assurer les appuis!



Eléments libres

Les forces sismiques horizontales provoquent toujours un moment renversant. S'il n'y a pas d'ancrage, ou que celui-ci est insuffisant, l'élément bascule et tombe.

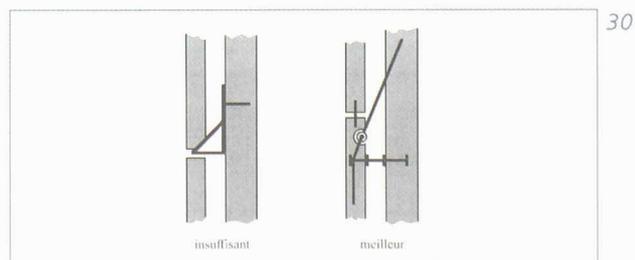
Principe (fig. 29): ancrer les remplissages partiels et les murs libres!



Eléments de façade

Les éléments de façade ne doivent pas simplement être posés sur des consoles, car le frottement résultant des charges verticales peut être vaincu par les accélérations horizontales et verticales lors d'un tremblement de terre. Les ancrages des éléments de façade doivent donc également être dimensionnés pour l'accélération horizontale de l'étage considéré.

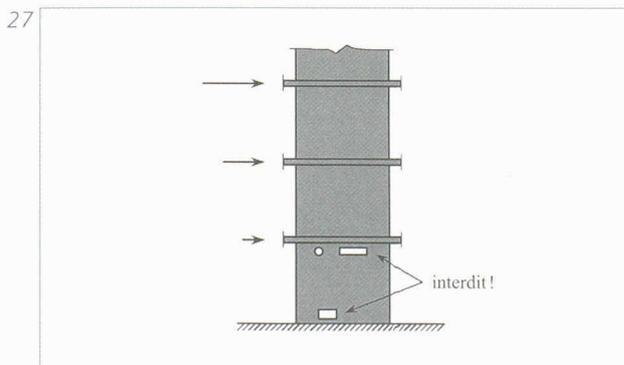
Principe (fig. 30): ancrer également les éléments de façade pour les forces horizontales!



Evidements pour conduites

Sur les chantiers, les éléments pour l'évidement des conduites, des canaux de ventilation et autres passages sont souvent insérés dans le coffrage d'éléments de la structure porteuse très sollicités - quand ils ne sont pas simplement repiqués après coup ! - sans concertation avec l'ingénieur civil. Or cela peut conduire à la ruine d'éléments porteurs soigneusement planifiés (par exemple des refends, des colonnes) et, par là, à de graves problèmes de sécurité. Les évidements doivent donc être planifiés en étroite collaboration avec l'ingénieur civil et inscrits dans des plans d'évidement, avant d'être soigneusement contrôlés sur le chantier.

Principe (fig. 27): les évidements destinés aux conduites, canaux de ventilation et autres ne doivent pas empiéter sur la structure porteuse!



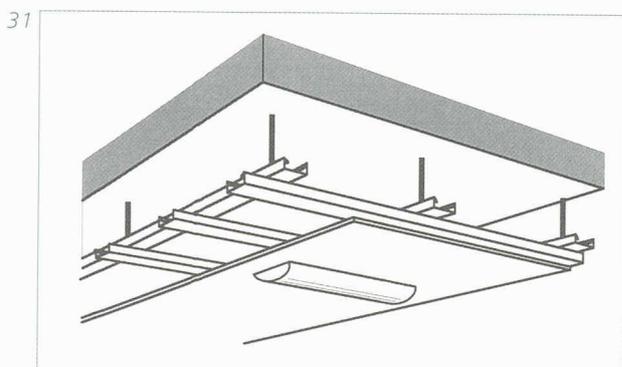
Appuis

Si la construction comporte des appuis mobiles, une longueur d'appui minimale b_{min} (normes) est à prévoir, tandis que les appuis fixes appellent la mise en place de goujons solides. De plus, dans les zones d'appuis en particulier, les poutres doivent être assurées contre les risques de déversement latéral.

Faux plafonds

Il arrive fréquemment que des faux plafonds et des systèmes d'éclairage tombent et mettent ainsi des vies humaines en danger. Des revêtements de plafond, qui ne sont maintenus que par de minces fils, par exemple, peuvent représenter un grand risque. Des luminaires mal fixés ou simplement vissés dans le plafond peuvent également tomber.

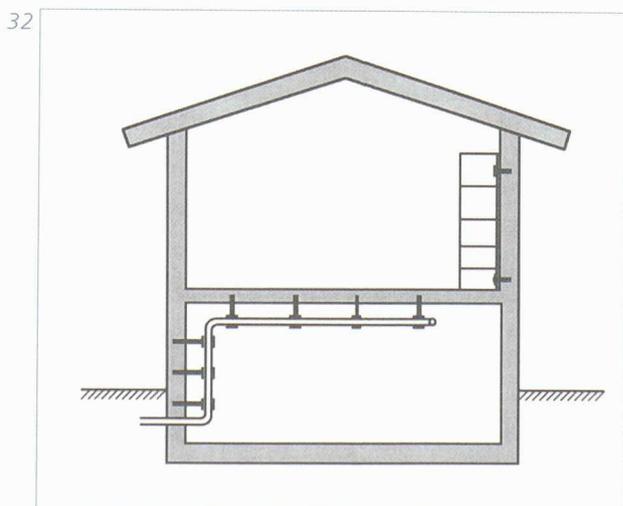
Principe (fig. 31): bien fixer les faux plafonds et les systèmes d'éclairage!



Installations et équipements

La sécurité des installations et des équipements est particulièrement importante dans les infrastructures vitales en cas de catastrophe, telles que les hôpitaux, les casernes de pompiers, les centrales de commande, qui doivent rester opérationnelles même lors de graves tremblements de terre (classe d'ouvrage CO III selon SIA160). Par exemple, les conduites et les armoires doivent être fixées de façon adéquate.

Principe (fig. 32): assurer les installations et les équipements!



Conclusions

Pour la conception parasismique de bâtiments, il est très important que l'ingénieur civil et l'architecte travaillent en étroite collaboration dès le début du projet. Ainsi, des surcoûts notables et des adaptations ultérieures, toujours insuffisantes, peuvent souvent être évités. Des principes de base importants et simples doivent être pris en considération dès la conception des structures porteuses et lors du choix des éléments non-porteurs (cloisons intermédiaires, façades). Pour les calculs et le dimensionnement, l'ingénieur civil doit adopter des méthodes modernes, par exemple le dimensionnement en capacité basé sur les déformations. En observant ces règles, la sécurité parasismique des bâtiments des régions à sismicité modérée sera en général obtenue sans surcoûts importants.

Références:

- [1] Bundesamt für Zivilschutz: «Katastrophen und Notlagen in der Schweiz, eine vergleichende Übersicht (KATANOS)». Bern, 1995
- [2] Schweizerischer Pool für Erdbebenversicherung: «Erdbebenszenarien Schweiz». Untersuchungsbericht, Bern 1988. Kurzfassung im 10. Geschäftsbericht, Bern 1988
- [3] BACHMANN H., DARBRE G.R., DEICHMANN N., KOLLER M.G., STUDER J.A., TINIĆ S., TISSIÈRES P., WENK T., WIELAND M., ZWICKY P.: «Mesures à prendre par les autorités, les Hautes écoles, l'industrie et le public pour la sécurité parasismique des ouvrages en Suisse». Documentation SGEB/SIA D0150, Société Suisse des ingénieurs et des architectes, Zurich, 1998
- [4] PAULAY T., BACHMANN H., MOSER K.: «Erdbebenbemessung von Stahlbetonhochbauten». Birkhäuser Verlag Basel, Boston, Berlin, 1990
- [5] PAULAY T., PRIESTLEY M.J.N.: «Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings», John Wiley & Sons, Inc., New York, 1992
- [6] BACHMANN H.: «Erdbebensicherung von Bauwerken». Birkhäuser Verlag Basel, Boston, Berlin, 1995
- [7] STUDER J., KOLLER M.: «Bodendynamik», 2. Auflage. Springer Verlag Berlin, Heidelberg, 1997
- [8] WENK T., LACAVE C., PETER K.: «Adana-Ceyhan, Turquie, séisme du 27 juin 1998», *Ingénieurs et architectes suisses*, N° 21, 1998 (tiré à part Nr. 0021, Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, November 1998)
- [9] STUDER J. et al: «Erdbeben in der Westtürkei vom 17. August 1999», *Schweizer Ingenieur und Architekt* Nr 43, 1999
- [10] ZIMMERLI B., SCHWARTZ J., SCHWEGLER G.: «Mauerwerk - Bemessung und Konstruktion», Birkhäuser Verlag Basel, Boston, Berlin, 1999