

**CAHIER DES MODULES DE CONFÉRENCE
POUR LES ÉCOLES D'ARCHITECTURE**

CONFÉRENCES : BÉTON, ARCHITECTURE, PERFORMANCES ET APPLICATIONS



Vue de Shinjuku, Tôkyô, Photo M. Zacek

BÉTON ET CONSTRUCTION PARASISMIQUE

CIM *béton*

CENTRE D'INFORMATION SUR
LE CIMENT ET SES APPLICATIONS





BÉTON ET CONSTRUCTION PARASISMIQUE

Sommaire

Introduction	4
Comportement dynamique des constructions sous séisme	6
Conception architecturale parasismique	8
Construction parasismique	14
Conclusions	21
Glossaire	22

Introduction

Pertinence de la protection parasismique des bâtiments

Chaque année, les tremblements de terre prélèvent leur lot de victimes: des centaines, des milliers ou parfois des centaines de milliers de morts, habitations et lieux de travail détruits, régression économique de la région touchée. Le phénomène est suffisamment grave pour justifier des mesures de prévention. Or la construction parasismique constitue la seule protection efficace, car plus de 90 % des pertes en vies humaines sont dues à l'effon-

drement de bâtiments. Si les tremblements de terre sont inévitables, l'effondrement des constructions ne l'est pas. Il est tout à fait possible de concevoir et de réaliser des ouvrages sûrs. Cependant, nous le verrons plus loin, la protection à 100 % des bâtiments n'est pas imposée par les textes réglementaires.

La France est-elle sismique ?

Ces dernières années, la France a été épargnée par les séismes meurtriers. Notre pays reste cependant exposé au risque sismique; celui-ci est suffisamment important pour ne pas être sous-estimé. La connaissance historique des séismes en France remonte à 1 000 ans. Sur cette période, la métropole et l'outre-mer ont connu des séismes très destructeurs. En métropole, de nombreux tremblements de terre d'intensité macrosismique VIII à IX se sont produits: dans les Pyrénées en 1428, 1660, 1817 et 1967, à la frontière suisse (Bâle) en 1356, 1775 et 1885, dans les Alpes-Maritimes en 1887, près d'Aix-en-Provence en 1909, etc. Ces intensités correspondent à l'effondrement partiel ou total des constructions en maçonnerie. La carte de sismicité historique de la figure 1 montre les principaux épïcêtres depuis 1 000 ans.

Rappelons que l'intensité macrosismique exprime l'importance des effets sismiques sur l'homme, les ouvrages et les sites naturels, indépendamment de la puissance du séisme (de sa magnitude). Ces effets sont évalués selon une échelle conventionnelle comportant douze degrés, indiqués par des chiffres romains. En Europe, on utilise l'échelle EMS (European Macroseismic Scale). On considère que les charges sismiques sur les constructions sont multipliées par deux lorsque l'intensité macrosismique augmente d'un degré.



Fig. 1 - Sismicité historique de la France

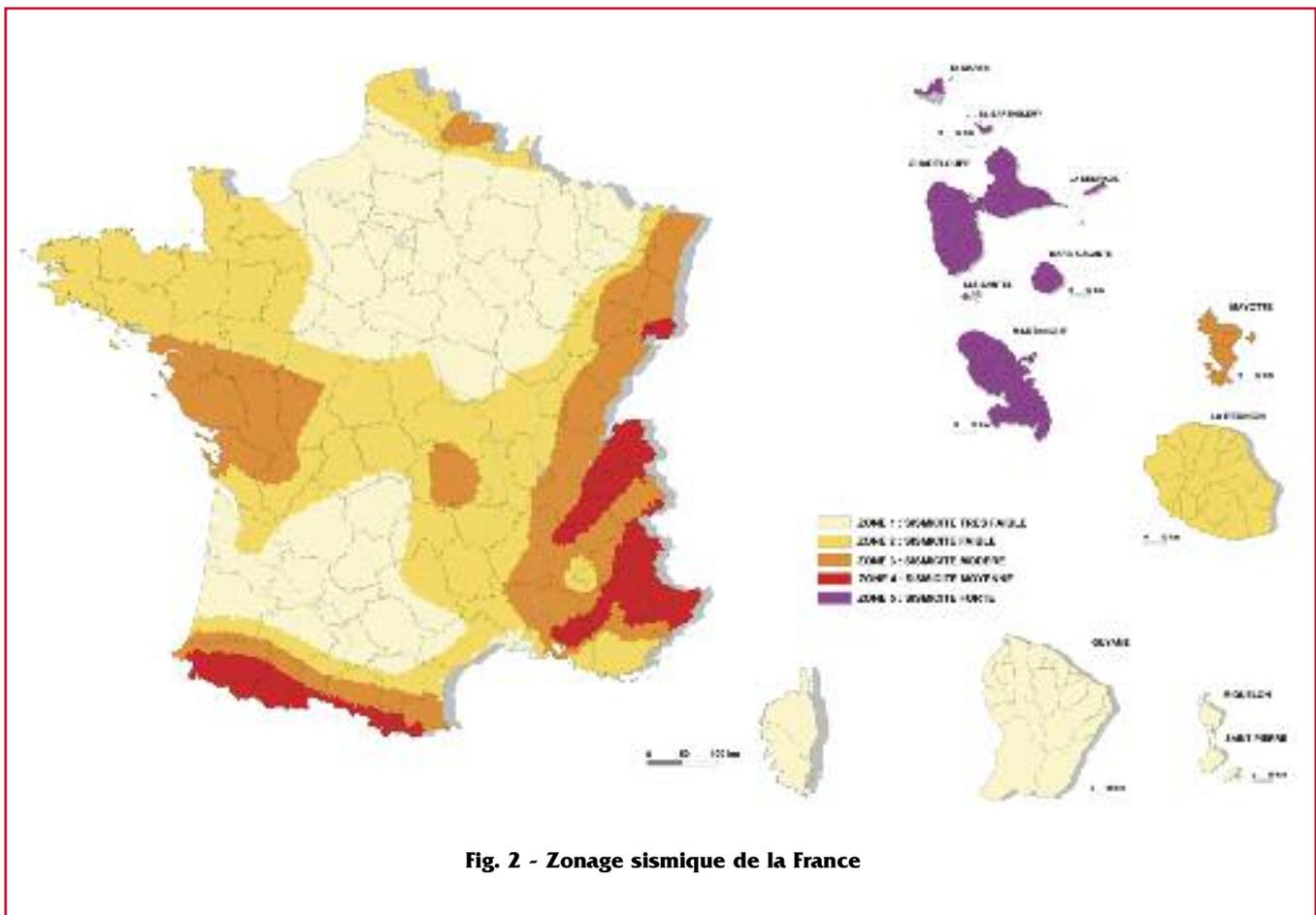


Fig. 2 - Zonage sismique de la France

La magnitude, appelée dans les médias « degré sur l'échelle de Richter », est une grandeur calculée (et non déterminée par une échelle comportant des degrés) qui caractérise la puissance des séismes à leur foyer, indépendamment des dommages aux constructions qu'ils peuvent entraîner. Pour une même magnitude, ces dommages diminuent avec la profondeur du foyer (les séismes superficiels sont les plus meurtriers) et avec la distance des constructions de l'épicentre du tremblement de terre. Les magnitudes les plus grandes connues ont dépassé 9. Lorsque la magnitude s'élève de 1, la puissance du séisme est multipliée par 32 environ. Cela signifie qu'elle double chaque fois que la magnitude croît de 0,2.

Il n'y a pas de corrélation générale entre la magnitude et l'intensité macrosismique. En effet, un séisme de magnitude moyenne peut avoir une intensité élevée si son foyer est peu profond et situé dans une zone où le bâti est ancien et vulnérable. A contrario, un séisme de forte magnitude mais profond ou déclenché sous la mer peut n'entraîner que des dégâts nuls ou négligeables. Cependant, une corrélation locale peut être établie.

Le niveau minimal exigé de protection parasismique augmente avec la sismicité de la zone dans laquelle est située la construction et avec sa catégorie d'importance (par exemple, la protection des hôpitaux est plus élevée que celle des maisons individuelles). Le zonage réglementaire français distingue cinq zones par ordre croissant de sismicité (fig. 2). Un arrêté précise, pour chaque zone, le mouvement du sol à prendre en compte dans le dimensionnement des constructions aux séismes, donc le niveau minimal de protection.

Le zonage est basé sur l'aléa sismique régional, qui est défini comme la probabilité qu'au cours d'une période de temps considérée (un an, cent ans, mille ans...) une secousse sismique atteigne ou dépasse, sur un site donné, une certaine intensité : intensité macrosismique, accélération maximale du sol, etc. L'évaluation de l'aléa sismique constitue donc une prévision sismique (et non pas une prédiction) portant sur le lieu, la fréquence d'occurrence et l'intensité maximale des séismes futurs, sans toutefois en estimer la date.

Comportement dynamique des constructions sous séisme

Lors des tremblements de terre, les constructions subissent des oscillations horizontales, verticales, et de torsion. Ces oscillations sont provoquées par des mouvements du sol d'assise, qui imposent donc aux ouvrages des déformations et non par des forces extérieures. Pour les besoins du calcul, des forces d'inertie (charges sismiques) sont associées aux déformations imposées (fig. 3).

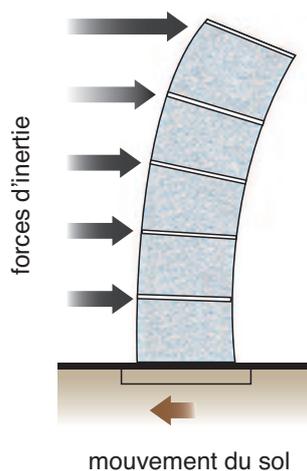


Fig. 3 - Forces d'inertie constituant des charges sismiques

Oscillations horizontales

Ces oscillations sont relativement mal supportées par les constructions, plus particulièrement lorsque celles-ci entrent en résonance avec le sol. Bien que les constructions soient contreventées (ou auto-contreventées) pour résister au vent, vis-à-vis des tremblements de terre, ce contreventement s'avère souvent insuffisant (le séisme est « dimensionnant »). Il doit donc être renforcé.

Dans le cas de la résonance avec le sol, les amplitudes d'oscillation de la construction sont très

importantes et provoquent souvent l'effondrement de l'ouvrage. La résonance se produit lorsque les oscillations libres d'une construction ont une fréquence proche de celles du sol. Ses amplitudes d'oscillation s'accroissent alors d'une manière considérable, à l'instar d'une balançoire mise en mouvement par des impulsions d'une fréquence précise. Les dommages dus à la résonance sont souvent très importants (fig. 5).

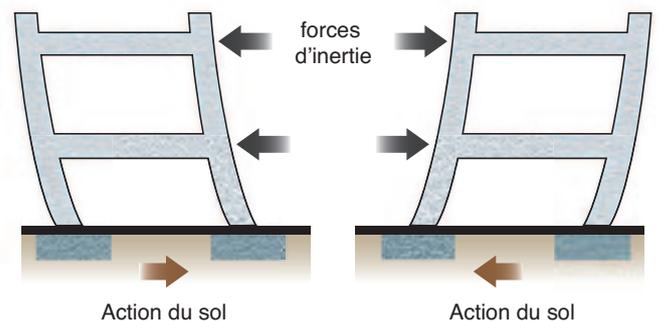


Fig. 4 - Oscillations horizontales



Fig. 5 - Dommages dus à la résonance du bâtiment avec le sol (séisme de Kobé, 1995)

Oscillations verticales

Ces oscillations sont bien supportées par les constructions, car celles-ci sont conçues pour résister aux charges gravitaires, qui sont verticales. Seuls les éléments pouvant subir des déformations verticales importantes en raison de leur flexibilité sont assez vulnérables : poutres de grandes portées et balcons présentant un porte-à-faux de plus de deux mètres, plus particulièrement lorsqu'ils sont lourds (fig. 7) ou portent une jardinière à leur extrémité.

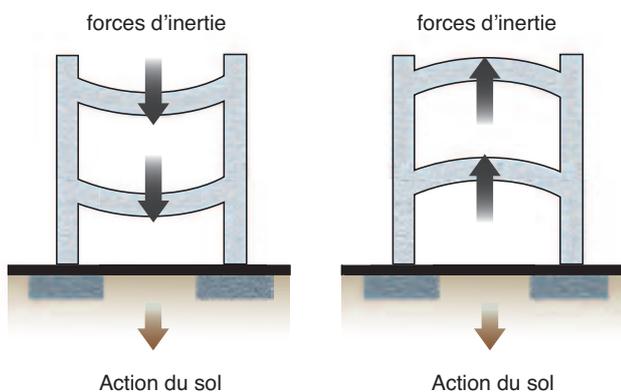


Fig. 6 - Oscillations verticales



Fig. 7 - Rupture de porte-à-faux (séisme de San Fernando, Californie 1971)

Oscillations de torsion

Les oscillations de torsion sont dues à la « mauvaise » conception des constructions, car le sol ne tourbillonne pas. Lors des séismes, les parties plus déformables des ouvrages vrillent autour des parties plus rigides. Ce phénomène est expliqué plus loin.

Les bâtiments supportent très mal les oscillations de torsion. Il s'agit d'un des phénomènes les plus destructeurs (fig. 9).

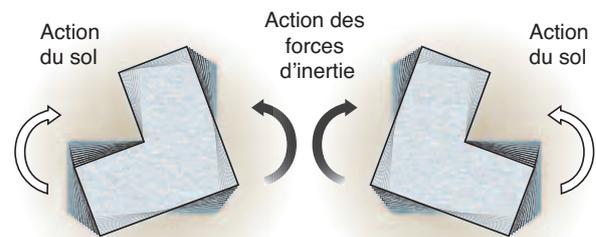


Fig. 8 - Oscillations de torsion



Fig. 9 - Effondrement dû à la torsion (séisme de Taïwan 1999)

Conception architecturale parasismique

La manière dont oscillent les bâtiments exposés à un séisme dépend de l'architecture du système porteur, qui est étroitement lié à la forme du bâtiment, à la disposition des éléments lourds et rigides comme les murs ou autres éléments participant au contreventement, ainsi qu'au choix du matériau de structure (maçonnerie, béton, acier, bois) dont dépend l'amortissement des mouvements oscillatoires. Le fait de placer un mur, un poteau, un escalier ou une ouverture à un endroit plutôt qu'à un autre peut modifier considérablement le comportement d'une construction soumise à un tremblement de terre.

Tous ces éléments participent de la conception architecturale et relèvent donc du parti architectural recherché, dont le choix est opéré dès l'esquisse. L'application de la norme parasismique a pour but de conférer aux ouvrages un certain niveau de protection vis-à-vis de cette action, qu'elle soit optimisée ou non par la conception. L'architecte joue donc un rôle important dans la protection parasismique des bâtiments. Il devrait revendiquer ce rôle et le faire-valoir auprès des maîtres d'ouvrage.

La protection réglementaire n'est pas totale. La norme parasismique vise « une probabilité raisonnablement faible d'effondrements ou de désordres structuraux majeurs » sous les actions sismiques de calcul qui, en plus, sont inférieures au séisme maximal plausible. L'application de la norme ne garantit donc pas l'absence de dommages graves en cas de séisme destructeur. Ainsi, des bâtiments conformes à la norme parasismique se sont effondrés (fig. 10).

Les dommages graves sont heureusement rares lorsque les règles parasismiques sont appliquées. Cependant, les maîtres d'ouvrage sont libres d'opter pour une protection supérieure aux obligations réglementaires. Mais la fiabilité d'une construction dont l'architecture est conçue sans tenir compte des effets des séismes peut être considérablement



Fig. 10 - Effondrement d'un bâtiment conforme aux règles parasismiques (séisme de Northridge, Californie 1994)

réduite. *A contrario*, une architecture adéquate permet de sauvegarder les bâtiments, car elle optimise leur comportement dynamique.

En outre, si l'architecture ne favorise pas la résistance aux séismes, le coût de la protection réglementaire peut être élevé. Le comportement dynamique défavorable « coûte cher ». Les paragraphes suivants montrent les principales conséquences d'une architecture inadéquate.

Oscillations asynchrones des différentes parties du bâtiment

Lorsque le plan du bâtiment est en forme de L, T ou X sans joints de dilatation ou de tassement, ou si l'ouvrage présente des étages en retrait, ses diverses parties oscillent d'une manière non synchronisée, allant parfois dans des sens contraires

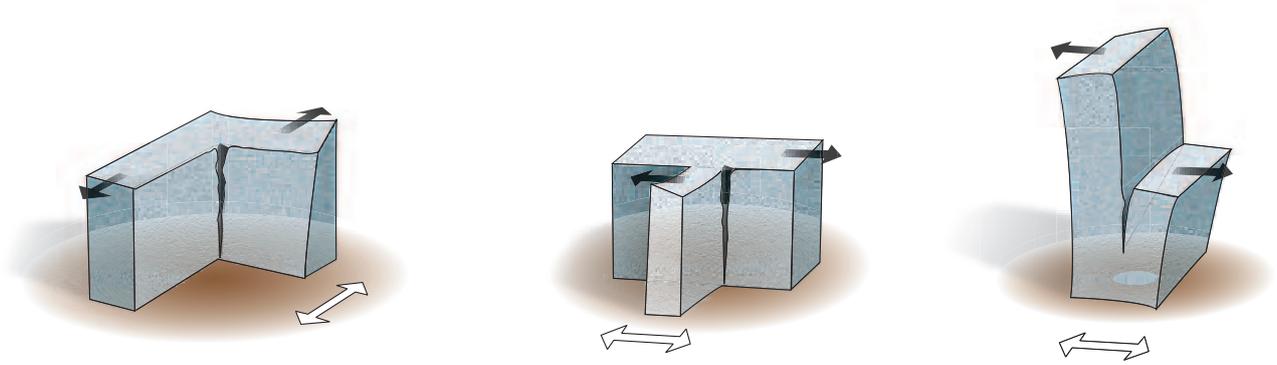


Fig. 11 - Oscillations asynchrones (différentielles) en plan et en élévation

les unes par rapport aux autres (fig. 11). Dans les angles rentrants à la jonction des ailes ou de toute partie ayant une rigidité différente (au droit des volumes en retrait ou en saillie), les dommages sismiques sont souvent importants (fig. 12) et les constructions s'effondrent parfois.



Fig. 12 - Dommages dus à des oscillations différentielles en plan et en élévation (séisme de Kobé, Japon 1995)

Quatre types de solutions permettent de supprimer, ou du moins de limiter, ces phénomènes.

a) Fractionnement du bâtiment en bloc de forme rectangulaire. Ce fractionnement s'effectue au moyen de joints de séparation vides de tout matériau, appelés joints sismiques. La solution convient surtout dans les cas où des joints de dilatation thermique ou des joints de tassement différentiel (de rupture) sont nécessaires. Créer des joints spécifiquement pour des raisons parasismiques est coûteux et difficilement envisageable pour les bâtiments-tours, car la largeur des joints doit être suffisante pour prévenir l'entrechoquement des blocs

contigus. Cet entrechoquement peut entraîner des dommages graves, allant jusqu'à l'effondrement (fig. 13). Dans le cas des immeubles de grande hauteur, la largeur minimale du joint peut atteindre plusieurs dizaines de centimètres. Lorsque les blocs contigus font partie d'une même propriété, à chaque niveau, l'Eurocode 8 exige une largeur de joint au moins égale à la somme quadratique des déplacements (racine carrée de la somme des carrés des déplacements) des planchers hauts du niveau. Si les planchers des blocs adjacents sont à la même hauteur, la largeur minimale du joint peut être réduite par un coefficient de 0,7. L'Eurocode 8 ne précise pas de valeur « plancher » pour la largeur des joints sismiques, mais il est recommandé d'adopter comme minimales les largeurs exigées par les règles antérieures: 4 cm en zones 2 et 3, et 6 cm en zones 4 et 5.

Les joints devraient être vides de tout matériau. Même le polystyrène, habituellement utilisé pour les remplir, transmet les chocs (fig. 13, photo ci-dessous).



Fig. 13 - Dommages dus à l'entrechoquement de blocs contigus (séismes de Boumerdès, Algérie 2003 et de Tokachi-Oki, Japon 1968)

b) Compensation de l'asymétrie de la forme du plan par une répartition symétrique de la rigidité de la structure, car *in fine*, c'est celle-ci qui assure la résistance du bâtiment aux séismes. Les zones potentiellement flexibles (de plus faible largeur ou profondeur) peuvent être raidies par des éléments de contreventement (fig. 14).



Fig. 14 - Pignons rigidifiés par des éléments de contreventement

c) Variation progressive de la largeur du bâtiment. Cette solution n'empêche pas les oscillations différentielles, mais limite considérablement leurs effets, car les angles rentrants, où se concentrent les contraintes, sont supprimés (fig. 15).



Fig. 15 - Variation progressive de la rigidité horizontale des niveaux

d) Isolation parasismique, qui consiste à faire porter la construction par des appareils d'appui souples, appelés aussi « isolateurs » (fig. 16). Les déformations provoquées par les tremblements de terre se concentrent dans ce cas au niveau des appuis et la construction oscille comme une boîte quasi rigide, donc sans dommages structuraux.



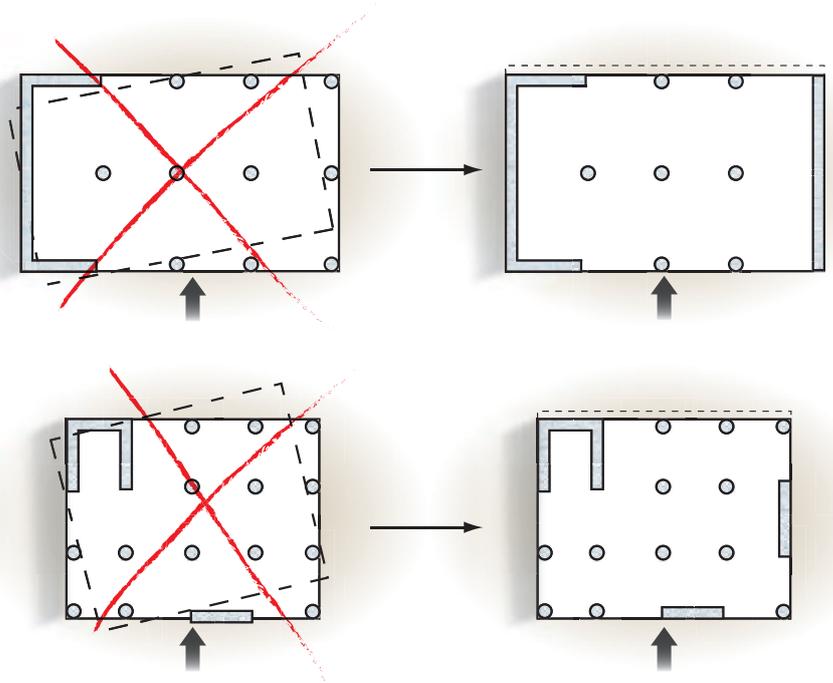
Fig. 16 - Constructions isolées à la base

Torsion du bâtiment

Lorsque les éléments rigides d'un ou plusieurs niveaux (murs ou autres éléments participant au contreventement) sont répartis d'une manière asymétrique par rapport à leur centre de gravité, les séismes soumettent ces niveaux à une torsion d'ensemble qui produit des effets très destructeurs (fig. 17 gauche). Il est donc impératif de les disposer de manière à assurer, dans chaque direction principale, une répartition symétrique de la rigidité par rapport à l'axe passant par le centre de gravité des planchers (qui constituent les éléments les plus massifs). Il convient de considérer la symétrie



Fig. 17 - Dommages dus à la torsion du rez-de-chaussée d'un immeuble (séisme de Tokachi-Oki, Japon 1968) et exemples d'une répartition correcte des éléments rigides.



séparément dans chaque direction car, généralement, un élément qui contrevente dans une direction ne contrevent pas dans une autre (fig. 17 droite).

Effet de « niveau souple »

Les séismes imposent aux constructions des déformations (et non pas des charges externes comme le vent). Lorsqu'un niveau est significativement moins rigide que les autres (30 % de différence suffisent), il est appelé « niveau souple ». Les déformations des bâtiments provoquées par les séismes sont concentrées sur ces niveaux. Si elles deviennent importantes, ce qui se produit lors de séismes forts ou moyens, la structure ne peut les tolérer. Une conséquence fréquente est l'écrasement du niveau (fig. 18).

L'effet de « niveau souple » se produit généralement en rez-de-chaussée d'immeubles, principalement pour deux raisons. D'une part, les rez-de-chaussée comportent souvent de vastes locaux sans cloisons, une façade vitrée ou de nombreuses ouvertures. D'autre part, leur hauteur est souvent plus grande que celle des autres niveaux. Or la rigidité latérale des éléments verticaux décroît proportionnellement au cube de leur hauteur. Lorsqu'on double la hauteur d'un poteau, à section égale, sa rigidité est divisée par 8.



Fig. 18 - Dommages aux rez-de-chaussée « souples » (séismes de Kobé, Japon 1995 et de Tokachi-Oki, Japon 1968)

Quatre types de solutions permettent d'éviter l'effet de niveau souple tout en conservant de grands locaux et la « transparence » des façades.

a) Placer au moins deux murs en béton armé ou palées de stabilité en acier (fig. 19) dans chaque direction principale, d'une manière symétrique pour éviter la torsion d'ensemble sous charges



Fig. 19 - Contreventement ayant pour but d'augmenter la rigidité horizontale du rez-de-chaussée

horizontales. Ces éléments peuvent être situés en façade (solution plus efficace), ou à l'intérieur, formant par exemple un ou plusieurs noyaux rigides.

b) Augmenter progressivement vers le haut la rigidité des éléments porteurs verticaux (fig. 20). Cette solution peut prévenir l'écrasement du niveau souple, sans toutefois empêcher certains dommages en cas de séisme fort.

c) Prévoir une structure de même rigidité à tous les niveaux (fig. 21). Cela suppose l'emploi de cloisons et de façades légères, afin de ne pas limiter la déformabilité de certains poteaux.

d) Utiliser l'isolation parasismique. Le niveau des isolateurs est beaucoup plus souple que le niveau dit « souple ». Par conséquent, les déformations imposées par le séisme s'y concentrent, épargnant

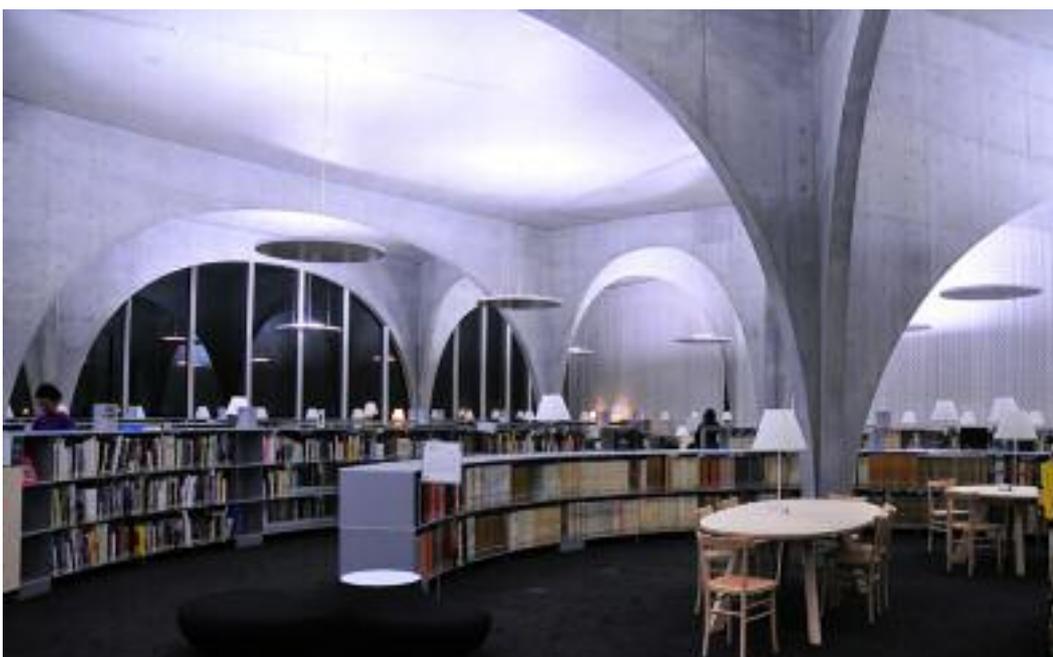


Fig. 20 - Variation progressive de la rigidité des porteurs verticaux



Fig. 21 - Structure de même rigidité horizontale à tous les niveaux

la superstructure. Les isolateurs sont conçus pour supporter de grandes déformations, ce qui n'est pas le cas du bâtiment.

Effet de « poteau court »

Les efforts horizontaux dus aux séismes se distribuent sur les éléments de structure verticaux en proportion de leur rigidité latérale. Si, dans une structure en portiques, certains poteaux sont plus courts (comme ceux du vide sanitaire) ou si leur capacité de déformation est réduite par la présence d'allèges en maçonnerie, de paliers d'escalier intermédiaires, de mezzanines, de rampes ou d'autres éléments, ils sont beaucoup plus rigides que les autres poteaux. Ils sont donc beaucoup plus sollicités et peuvent être détruits par cisaillement. On parle de l'effet de « poteau court » (fig. 22). Pour l'éviter, on peut opter pour un système contreventé, par exemple en plaçant des voiles en béton armé en façade (fig. 23.1) ou à l'intérieur du bâtiment ou, dans le cas des allèges, en utilisant des éléments industrialisés légers, possédant une faible rigidité (fig. 23.2).



Fig. 22 - Dommages dus à l'effet de poteau court (séismes d'El Asnam, Algérie 1980 et de Chi-Chi, Taïwan 1999)

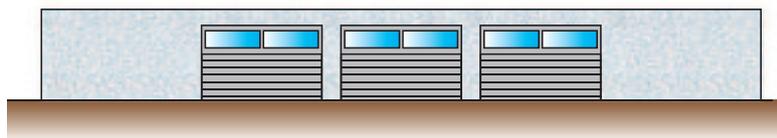


Fig. 23.1

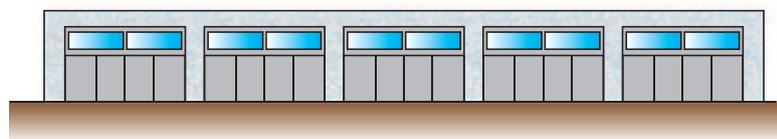


Fig. 23.2

Fig. 23 - Solutions supprimant ou limitant l'effet de poteau court

Construction parasismique

Constructions en maçonnerie de blocs de béton

Lors des séismes violents, la destruction des bâtiments en maçonnerie non conçus pour résister aux secousses (maçonnerie non chaînée) est très fréquente (fig. 24). De nombreuses victimes sont à déplorer dans ce type de constructions. En effet, la résistance des joints de mortier à la traction et au cisaillement est faible. En cas de secousses, ces joints se disloquent.



Fig. 24 - Dislocation des maçonneries lors des séismes d'Italie de 2009 et 2002



Dans un premier temps, les panneaux de maçonnerie sont fissurés diagonalement (fig. 25), car sous l'action des forces horizontales, ils ont tendance à prendre la forme d'un parallélogramme, dont une diagonale est tendue et l'autre comprimée. La



Fig. 25 - Fissures diagonales dans les panneaux de maçonnerie (séismes de Guadeloupe, 2004 et d'Italie, 2009)

maçonnerie résistant mal à la traction, elle se fissure perpendiculairement à la diagonale tendue. Lorsque le sens de la secousse s'inverse, l'autre diagonale se fissure de la même manière.

Les ouvertures dans les panneaux de maçonnerie constituent des zones faibles, dans lesquelles la fissuration est souvent initiée. Les fissures partent des angles des ouvertures, car les contraintes y sont plus élevées. La chute de pans de maçonnerie est ensuite rapide (fig. 26).



Fig. 26 - Dislocation des murs à partir de baies non encadrées, (séismes d'Anchorage, Alaska 1964 et de San Fernando, Californie 1967)

Afin de prévenir ou retarder la dislocation de la maçonnerie, celle-ci doit être confinée par des chaînages en béton armé, constituant un « squelette » en trois dimensions. La construction ne devrait présenter aucun bord libre en maçonnerie. Tous les murs structuraux et non structuraux doivent être confinés par des chaînages et encadrements d'ouvertures en béton armé. Cependant, la norme parasismique tolère le non-encadrement des ouvertures de petites dimensions.

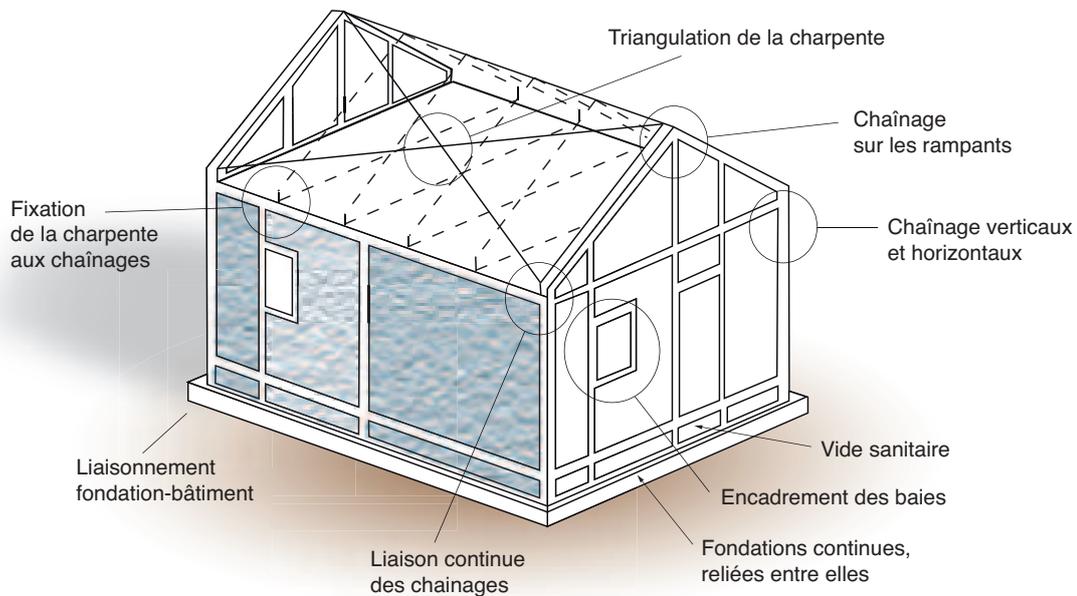


Fig. 27 - Dispositions parasismiques pour une maison individuelle

On doit prévoir (fig. 27 et 28) :

- des chaînages horizontaux au niveau de tous les planchers et des fondations ;
- des chaînages de couronnement sur les bords supérieurs libres des murs (pignons, acrotères, garde-corps, etc.) ;
- des chaînages verticaux dans les angles, sur les bords des trumeaux de contreventement et tous les 5 m dans les murs longs ; ils doivent être ancrés dans les fondations ;
- l'encadrement des ouvertures, relié dans certains cas aux chaînages horizontaux.

Les chaînages doivent être mécaniquement continus ; leur résistance ne doit pas être interrompue. À cet effet, à leurs extrémités, la continuité des armatures longitudinales doit être assurée par un recouvrement de 60 diamètres (selon l'Eurocode 8). Il est donc interdit de juxtaposer simplement des armatures de chaînages façonnées en usine. L'ajout de barres ou de boucles (barres pliées en forme de U) de continuité est nécessaire. L'ancrage dans les fondations des chaînages verticaux est obligatoire, notamment lorsqu'ils encadrent des trumeaux de contreventement, qui assurent la stabilité de la construction vis-à-vis des charges horizontales.

Les éléments utilisés pour les maçonneries en zone sismique doivent répondre à des caractéristiques minimales. Les blocs creux, d'une épaisseur minimale brute de 20 cm, doivent comporter une paroi intermédiaire parallèle au mur (fig. 29). L'épaisseur minimale brute des blocs pleins est de 15 cm.



Fig. 28 - Exemples de réalisation de maisons en maçonnerie chaînée (Martinique)

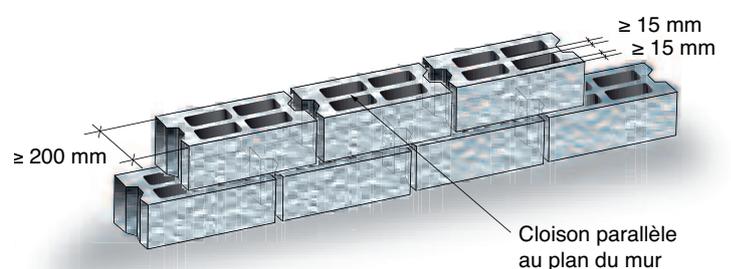


Fig. 29 - Caractéristiques minimales des blocs creux admis en zone sismique



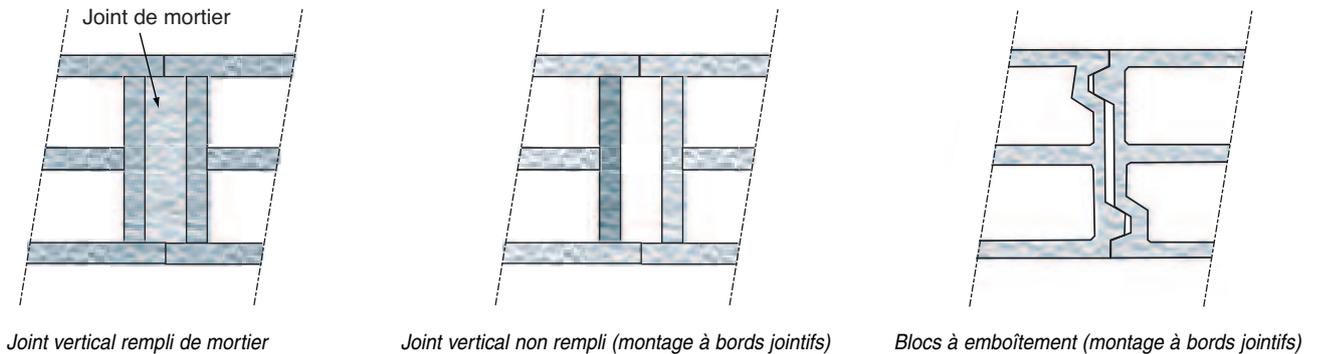


Fig. 30 - Dispositions pour les joints verticaux

La mise en œuvre des maçonneries peut être réalisée avec un mortier classique ou au mortier-colle. Les joints entièrement remplis sont admis sans restriction. Contrairement aux règles précédentes (PS 92), l'Eurocode 8 admet les joints verticaux non remplis (fig. 30). Dans ce cas, une procédure de validation du mode de pose est requise.

Pour assurer le confinement des ouvrages en console verticale (acrotères et garde-corps en maçonnerie), un chaînage de couronnement armé de 2 barres HA ainsi que des chaînages verticaux à entraxe ≤ 3 m, armés de 4 barres HA sont requis.

En l'absence de confinement, l'éclatement des garde-corps et acrotères en maçonnerie est fréquent (fig. 31).



Fig. 31 - Chute partielle d'un acrotère sans chaînages verticaux et chute totale d'un acrotère sans couronnement (séisme du Chili, 1960).

Les cloisons en maçonnerie doivent respecter des dispositions similaires à celles requises pour les murs porteurs. Elles doivent être solidaires de la sous-face du plancher supérieur et raidies par des chaînages verticaux ou par des murs ou cloisons perpendiculaires, distants de 5 m au plus. La figure 32 montre l'effondrement de cloisons sans chaînages verticaux ni autres raidisseurs.



Fig. 32 - Éclatement de cloisons en maçonnerie, (séismes d'El Asnam et de Boumerdès, Algérie 1980 et 2003)

Les souches de cheminée en maçonnerie sont particulièrement vulnérables aux séismes. Leur effondrement en cas de tremblement de terre est fréquent (fig. 33). Lors du séisme d'Annecy en 1996, plus de 600 souches de cheminée ont été projetées dans la rue, écrasant les voitures en stationnement le long des trottoirs.

La stabilité des souches est considérée comme assurée si elles sont situées à moins d'un mètre du faitage et ne le dépassent pas de plus de 50 cm. Dans les autres cas, il est nécessaire de les stabiliser par haubanage, corsetage, etc.



Fig. 33 - Chute de souches non stabilisées (séisme d'Alaska, 1964 et de Coalinga, États-Unis 1983)

Constructions en béton armé

La résistance aux séismes est davantage une question de système porteur (architecture, dispositions constructives, dimensionnement) que de matériau, mais le béton armé permet la réalisation de systèmes efficaces vis-à-vis des charges sismiques. Cependant, certaines constructions en béton armé réalisées selon les méthodes propres aux zones non sismiques peuvent subir, sous l'effet des séismes, des dommages importants puisque le béton armé, de manière habituelle, éclate lors des secousses. Un excellent comportement sous séisme est obtenu en confinant le béton par une armature appropriée.

Ainsi, des bâtiments de grande hauteur en béton armé ont pu être réalisés dans des zones de forte sismicité (fig. 34).

Constructions en voiles coulés en place

Le choix d'une structure en voiles de béton ou béton armé est déjà « parasismique ». Même réalisées selon les règles de construction propres aux zones non sismiques, ces structures ne s'effondrent pas, en général, sous l'effet d'un tremblement de terre. L'immeuble de la figure 35, dont la structure est en voiles porteurs, a subi un séisme de magnitude 8,3 (ce qui le classe parmi les tremblements de terre les plus violents). Or les dommages occasionnés par ce séisme étaient facilement réparables.

Fig. 35 - Immeuble en voiles de béton armé après le séisme d'Anchorage (Alaska, 1964) de magnitude 8,3.



Même endommagés, les voiles continuent à porter les planchers (fig. 36 gauche). Or l'effondrement des planchers est la première cause de décès lors des tremblements de terre. L'immeuble sur la figure 36 droite n'a subi que des dommages légers lors du séisme de Kobé en 1995, dans une zone où pourtant près de 6 000 personnes ont péri.



Fig. 36 - Voiles en béton et béton armé : même endommagés, ils préviennent l'effondrement des planchers



Fig. 34 - Immeubles de grande hauteur à Tokyo, zone de forte sismicité

Les voiles se comportent comme des poutres verticales. Par conséquent, lorsqu'ils sont élancés, les charges horizontales les sollicitent en flexion (composée avec la compression due aux charges gravitaires). Les bords des voiles sont donc davantage sollicités que leur milieu (qui correspond à l'axe neutre de la poutre), d'autant plus que la construction est élevée. Il est donc nécessaire de renforcer ces bords par des chaînages ou poteaux intégrés dans les voiles. Un élément de rive (retour) aux extrémités, qui conduit à ne pas placer les fenêtres contre les voiles, améliore leur résistance aux séismes (fig. 37 gauche).

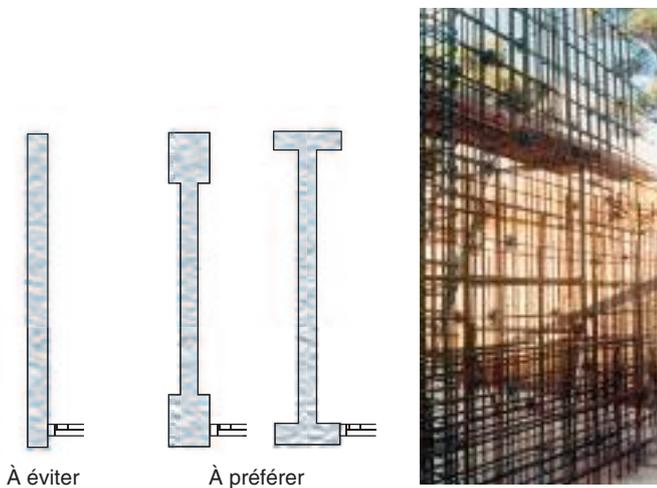


Fig. 37 - Éléments de rive des voiles et exemple d'armature d'un voile comprenant un poteau intégré à son extrémité.

Paradoxalement, les structures en voiles couplés par des allèges en béton armé ont un meilleur comportement sous séisme que les voiles non percés. En effet, la stratégie de protection adoptée dans les règles parasismiques consiste à autoriser, lors des séismes majeurs, des dommages permanents « bien placés », afin de favoriser la dissipation de l'énergie des oscillations. Lorsqu'un voile ne comporte pas de percements, ces dommages sont localisés à sa base, ce qui peut le rendre économiquement irréparable. Par contre, dans le cas des voiles couplés, les allèges jouent le rôle de « fusible », au sein duquel l'énergie se dissipe, épargnant les voiles porteurs (fig. 38 gauche). Or les allèges sont facilement réparables. Afin d'optimiser la dissipation d'énergie dans les allèges, l'Eurocode 8

exige une armature spécifique (fig. 38 droite). L'absence d'une telle armature a donné lieu à une rupture de type « fragile » dans le cas de l'immeuble montré sur la figure 38 gauche. Elle a néanmoins permis de préserver les voiles porteurs.

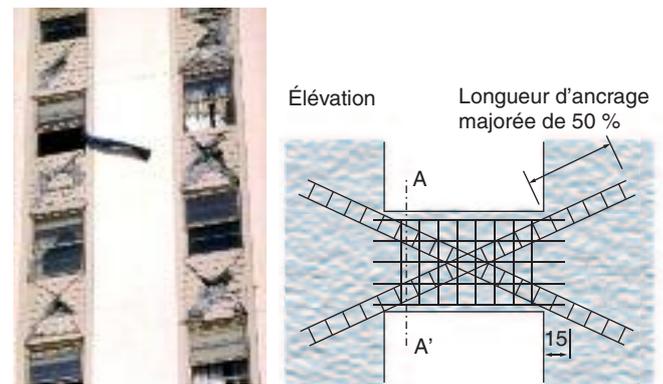


Fig. 38 - Voiles couplés par des allèges

Ossature en poteaux et poutres coulés en place

Les ossatures en poteaux et poutres en béton armé ont été, par le passé, l'un des systèmes les plus meurtriers en cas de séisme, car pour résister aux secousses, le béton des poteaux et des poutres nécessite un confinement renforcé, non pratiqué avant la mise en place des règles parasismiques. En l'absence d'un tel confinement, l'ossature peut se disloquer facilement, d'où des effondrements spectaculaires (fig. 39).



Fig. 39 - Effondrement des ossatures en béton armé non confiné (séismes d'Izmit, Turquie 1999 et de Boumerdès, Algérie 2003)

En revanche, correctement armées (confinées), les ossatures en béton armé montrent un comportement satisfaisant. Le confinement du béton a pour but d'assurer, entre autres, un comportement ductile des ouvrages. Les structures ductiles peuvent se déformer notablement avant de rompre. En outre, les déformations « plastiques », qui caractérisent la ductilité, ne sont pas instantanées et dissipent une quantité importante d'énergie, qui n'est plus « réinjectée » dans les oscillations. La figure 40 montre d'un côté un comportement fragile, caractérisé par des ruptures brusques, instantanées, et de l'autre un comportement ductile, c'est-à-dire la déformation plastique de l'ossature. Celle-ci permet d'éviter la rupture des poteaux de façade, verticale à l'origine. La construction s'est effondrée en raison d'une rupture fragile, par effet de poteau court des poteaux intérieurs portant une rampe (non visibles sur la photo), qui a réduit leur déformabilité.

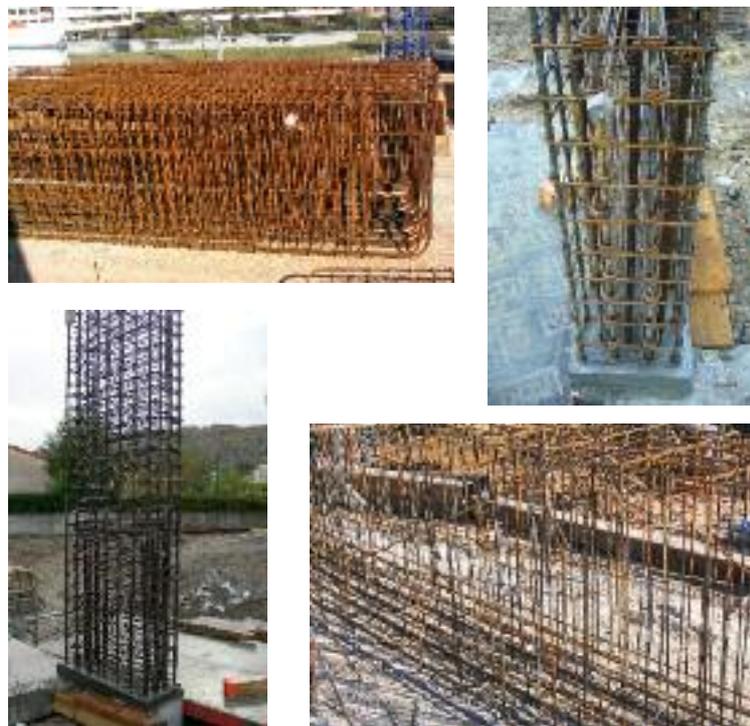


Fig. 41 - Armature de confinement des poutres et des poteaux



Fig. 40 - Comparaison d'un comportement fragile (rupture instantanée) d'une ossature non confinée et du comportement ductile (plastique) d'une ossature confinée. L'effondrement de cette dernière construction est dû à une erreur de conception et non d'exécution : effet de poteau court à l'intérieur du bâtiment (séismes de Spitak, Arménie 1988 et de Northridge, Californie 1994)

Pour assurer le confinement du béton, l'armature doit constituer une « grille » à maille fine permettant de maintenir le béton à l'intérieur de l'élément structural. En outre, les cadres, épingles ou étriers doivent maintenir individuellement les armatures longitudinales afin de s'opposer à leur flambement (fig. 41).

Lorsque le béton n'est pas confiné, les endroits les plus sollicités (extrémités des poteaux et des poutres, ainsi que les nœuds), appelés « zones critiques », éclatent en premier (fig. 42). Si le séisme se poursuit, l'effondrement de l'ouvrage est inévitable.

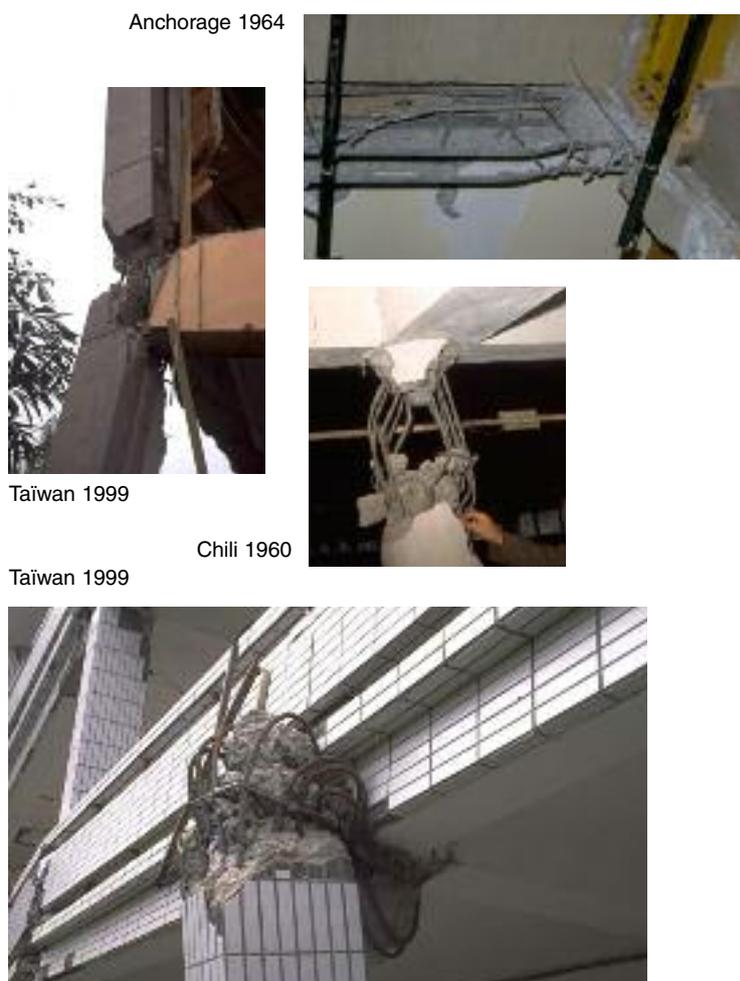


Fig. 42 - Éclatement des zones critiques dans les poutres, poteaux et nœuds

Lorsque la structure principale est en portiques, il convient de respecter le principe « poteau fort-poutre faible ». Les poutres doivent posséder une résistance ultime inférieure à celle des poteaux et des nœuds. Le but est de localiser les dommages sismiques structuraux acceptés (rotules plastiques) dans les poutres, facilement réparables, et de prévenir leur apparition dans les poteaux ou les nœuds, qui assurent la stabilité du bâtiment.

L'architecture de « poutres-allèges » ne permet pas de respecter ce principe. Les poteaux étant moins résistants, ils peuvent subir des dommages allant jusqu'à l'effondrement (fig. 43). Si on souhaite conserver l'architecture de « poutres-allèges » en zone sismique, le contreventement du bâtiment doit être assuré par des voiles et non par effet de portique.



Fig. 43 - Non-respect du principe « poteau fort - poutre faible » (séismes de Tokachi-Oki, Japon 1968 et d'Izmit, Turquie 1999)

Par ailleurs, il est conseillé de ne pas avoir recours aux panneaux de remplissage en maçonnerie qui, traditionnellement non fixés en partie haute faute de pouvoir introduire correctement du mortier sous la poutre, éclatent rapidement en cas d'action sismique violente, ce qui entraîne souvent l'instabilité de la construction. La figure 44 montre une telle situation. Les panneaux du rez-de-chaussée éclatent les premiers, car les charges horizontales sont en général les plus grandes au niveau inférieur (cas d'une console verticale, dont la zone la plus

sollicitée est l'encastrement), et le transforment en « niveau souple », dont la vulnérabilité a été exposée plus haut.



Fig. 44 - Éclatement des panneaux de remplissage en maçonnerie (séisme de Boumerdès, Algérie 2003)

Si une liaison efficace peut être assurée, le comportement de la structure devient favorable.

Des dispositions destinées à prévenir l'éclatement des panneaux peuvent être prises, mais elles ne sont pas courantes (fig. 45).



Fig. 45 - Raidisseurs en béton armé destinés à prévenir ou retarder l'éclatement des panneaux de remplissage en maçonnerie (à gauche: après le séisme du Mexique, 1985)

Systemes mixtes à ossature et voiles

Dans le cas des systemes mixtes, aussi bien les voiles que les portiques participent à la résistance aux charges horizontales. Dans un premier temps, en raison de leur rigidité, les voiles reprennent la presque totalité de ces charges. Après l'apparition de zones plastifiées dans les voiles, une plus grande part des charges se reporte sur les portiques qui, si les dispositions constructives des règles parasismiques sont respectées, possèdent une grande capacité à dissiper l'énergie des oscillations. En outre, les déformations des voiles sont minimales en pied de la structure, où celles des portiques sont maximales. Au sommet de l'ouvrage, c'est le contraire (fig. 46 droite). L'interaction des voiles et des portiques est donc très favorable, à condition toutefois que les assemblages poutre-voile soient ductiles et acceptent donc une certaine déformation avant la rupture.

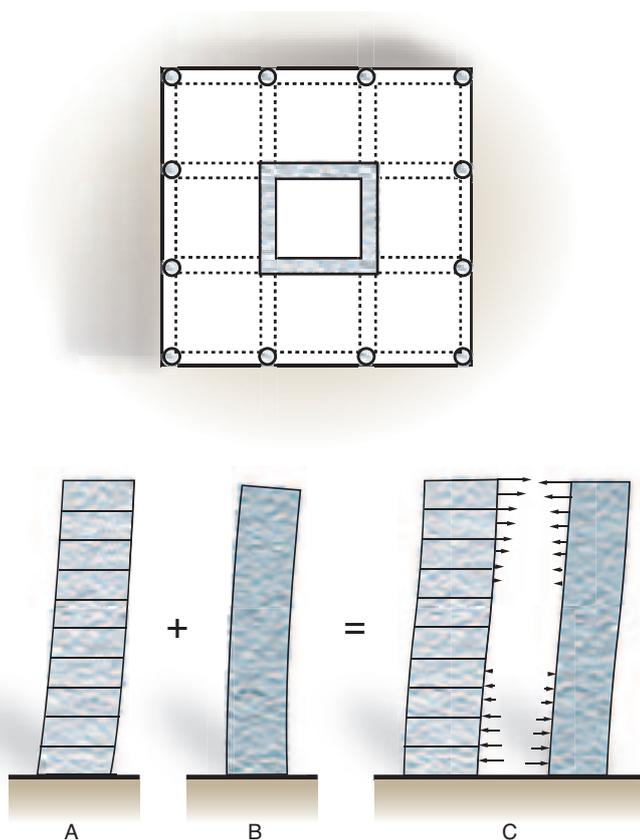


Fig. 46 - Comportement sous charges horizontales du système mixte à ossature et voiles

Conclusions

La conception parasismique d'un bâtiment, ou plus généralement d'un ouvrage, consiste à opter pour une architecture qui lui confère un bon comportement lorsqu'il est exposé à un tremblement de terre. Sont concernés: forme d'ensemble du bâtiment et choix du système porteur, ainsi que son organisation en plan et en élévation, donc sa configuration et la disposition des éléments de la structure principale (murs, poteaux, escaliers, etc...). Ces éléments participent nécessairement de l'architecture et relèvent donc du parti architectural recherché, dont le choix est opéré dès l'esquisse.

Pour un séisme donné, l'importance des oscillations auxquelles un bâtiment sera soumis, ainsi que leur nature, dépendent entièrement de son architecture. En cas de conception inadéquate, ces oscillations peuvent être très préjudiciables: torsion de l'ouvrage, oscillations asynchrones de ses différentes parties, concentrations des déformations sur certaines zones, etc. L'architecture d'un ouvrage détermine donc l'action sismique à laquelle il sera exposé lors d'un séisme. Or, elle n'est pas réglementée. La norme parasismique, quant à elle, a pour but de conférer aux ouvrages un certain niveau de protection vis-à-vis de cette action, qu'elle soit optimisée ou non par la conception. L'application de la norme ne garantit pas l'absence de dommages graves en cas de séisme destructeur. Or l'architecte doit à son client un ouvrage qui présente toutes les garanties de confort et de sécurité, un ouvrage « sur mesure ». Il ne doit envisager aucun échec.

La norme parasismique impose le respect de dispositions constructives spécifiques. Nous avons vu que dans le cas des constructions en maçonnerie et en béton armé, il s'agit essentiellement d'assurer le confinement des éléments structuraux et non structuraux comme les cloisons, acrotères, etc. Il apparaît ainsi que la résistance aux séismes est davantage une question de système porteur (architecture, dispositions constructives, dimensionnement) que de matériau.

Mais le béton armé, de par sa nature, autorise la conception et la réalisation de structures efficaces vis-à-vis des tremblements de terre.

Glossaire

Aléa sismique - Probabilité qu'au cours d'une période de temps considérée (un an, cent ans, mille ans...) une secousse sismique atteigne ou dépasse, sur un site donné, une certaine intensité : intensité macrosismique, accélération maximale du sol, etc. L'aléa sismique est établi à deux niveaux : à l'échelle régionale (considérant que le sol est un rocher horizontal) et à l'échelle locale (tenant compte des caractéristiques du site et de la présence éventuelle de failles).

Conception architecturale parasismique - Choix de la forme d'ensemble du bâtiment, de ses éléments, de son système porteur, ainsi que de son organisation en plan et en élévation (disposition des murs, poteaux, escaliers, etc...), permettant de minimiser l'impact des séismes auxquels il sera exposé et d'améliorer son comportement lors des secousses sismiques.

Confinement (de murs en maçonnerie) - Mise en place de chaînages horizontaux et verticaux en périphérie et à l'intérieur des murs, ne laissant subsister aucun bord libre en maçonnerie.

Confinement (d'un poteau ou d'une poutre en béton armé) - Mise en place d'armatures longitudinales (barres) et transversales (cadres, épingles ou cerces) à faible espacement, destinées à prévenir l'éjection du béton lors des secousses sismiques.

Contrainte - Tension interne dans un matériau provoquée par l'action des charges. En général, son intensité varie d'un point à l'autre.

Contreventement - Ensemble d'éléments de construction assurant la stabilité et la rigidité d'un bâtiment vis-à-vis des forces horizontales engendrées par le vent, les séismes ou autres causes. Il comprend des diaphragmes et des éléments verticaux (contreventement vertical).

Contreventement vertical (élément de) - Élément assurant la stabilité d'une file de poteaux ou de murs (perpendiculairement à leur plan). Il peut être constitué par un mur, par un portique ou par une travée triangulée.

Déformations plastiques - Déformations irréversibles des éléments constructifs réalisés en matériaux ductiles (voir « Ductilité »). Ce type de déformation se produit au-delà de la limite d'élasticité (voir ce terme) d'un élément et retarde sa rupture.

Diaphragme - Ouvrage plan horizontal (plancher) ou incliné (versant de toiture) possédant une rigidité suffisante pour transmettre les charges horizontales sur les éléments verticaux de contreventement.

Dispositions constructives parasismiques - Dispositions spécifiques visant à ancrer les éléments constructifs dans leur support, à les solidariser mécaniquement et à leur conférer une bonne ductilité.

Ductilité - Capacité d'un matériau, et par extension celle d'un élément ou d'une structure, à subir avant rupture des déformations plastiques (voir ce terme), sans perte significative de résistance.

Échelle macrosismique d'intensité - Échelle conventionnelle permettant de mesurer l'intensité macrosismique d'un séisme (voir ce terme). En Europe, on utilise actuellement l'échelle EMS 92 (European Macroseismic Scale), comportant 12 degrés, dérivée de l'échelle MSK 64.

Épicentre (d'un séisme) - Point de la surface du globe situé à la verticale du foyer d'un séisme.

Faille - Fracture de l'écorce terrestre, provoquée par un glissement relatif de compartiments rocheux.

Foyer (d'un séisme) - Lieu de l'écorce terrestre où est amorcée la rupture des roches qui est à l'origine du tremblement de terre. Il est également appelé « hypocentre ».

Intensité macrosismique (d'un séisme) - Importance des effets sur l'homme, les constructions et l'environnement, observés sur un site donné. Étant donné que les effets sismiques diminuent avec la distance à l'épicentre, l'intensité épicentrale est en général la plus élevée. L'intensité est déterminée par référence à une échelle conventionnelle dite « échelle macrosismique d'intensité » (voir ce terme).

Isolateur parasismique - Appuis spécial placé entre une structure (ou un équipement) et ses fondations pour réduire l'amplitude des déformations qu'elle subit lors d'un séisme. Les secousses du sol ne sont transmises à l'ouvrage que partiellement.

Limite d'élasticité ou limite élastique - intensité de la contrainte (voir ce terme) à laquelle se produit la rupture des matériaux fragiles ou au-delà de laquelle apparaissent des déformations irréversibles des matériaux ductiles (non fragiles).

Magnitude d'un séisme - Mesure de la puissance du séisme considérée à son foyer. Elle est généralement calculée à partir de l'amplitude des secousses du sol et augmente avec l'étendue de la rupture de la faille qui a déclenché le séisme. Dans les médias, elle est en général appelée « degré sur l'échelle de Richter ».

Portique - Structure composée de poteaux et de poutres rigidement liés ensemble. L'angle qu'ils forment est donc conservé même lorsqu'ils sont déformés sous l'action de charges. Par opposition, les poteaux et les poutres articulés, dont l'angle peut varier lors des déformations, forment des cadres non rigides.

Résonance (d'un bâtiment avec le sol) - Oscillation en phase d'un bâtiment et de son sol d'assise. La résonance a pour conséquence une importante et rapide augmentation de l'amplitude des oscillations. Il s'agit d'un phénomène très destructeur.

Risque sismique - Probabilité, pour une période de référence, de pertes de biens, d'activités de production et de vies humaines, exprimée en coût ou en pourcentage. Il peut être évalué pour un ouvrage, une commune ou une région.

Rotule plastique - Zone plastifiée d'un élément de structure (poteau, poutre, voile...). Au-delà d'un seuil de sollicitation, une telle zone se comporte comme une rotule mécanique, autorisant la rotation sur son axe des autres parties de l'élément.

Séisme - Secousse plus ou moins violente du sol, due le plus souvent à la rupture d'une faille, activée par les lents mouvements tectoniques qui animent en permanence la croûte terrestre. Cette rupture émet des ondes qui, en se propageant, font vibrer le sol horizontalement et verticalement.

Zonage sismique - Division d'un territoire en zones en fonction de sa sismicité. On distingue le « zonage physique » dont les limites des zones sont déterminées en fonction de l'aléa sismique, et le « zonage réglementaire », issu du zonage physique, dont les limites suivent le découpage administratif du territoire en communes.

Zone critique - Endroit d'une structure où sont principalement concentrées les sollicitations d'origine sismique. Au-delà de la limite d'élasticité, la zone aura un comportement ductile (voir « Ductilité ») ou subira une rupture fragile, qui est à éviter.

Crédit photographique

BRGM [1, 2, 24G] - CERIB [30] - Hadj Hamou A. [fig. 22G]
Jacquet G. [37D] - Michel C. [27, 28D] - Miyamoto R. [36D]
NISEE Berkeley [7, 9, 10, 22D, 26, 31, 33, 35, 36G, 38G, 40D, 42,
43D] - Poursoulis G. [24D, 25D] - Weliachew B. [5, 12, 18G]
Wenk T. [19D] - Zacek M. [14, 15, 16, 17D, 19G, 23, 28G, 29D,
34, 41, 4 D, 46G - Droits réservés [13, 17 G, 18D, 20, 21, 25G,
32, 39, 40G, 43G, 44, 45G, 46D.

Auteur

Milan Zacek

Couverture

Minibus

Mise en page et réalisation

Amprincipe Paris
R.C.S. Paris B 389 103 805

CIM *Béton*

CENTRE D'INFORMATION SUR LE CIMENT ET SES APPLICATIONS

7, place de la Défense • 92974 Paris-la-Défense Cedex • Tél. : 01 55 23 01 00 • Fax : 01 55 23 01 10
E-mail : centrinfo@cimbeton.net • internet : www.infociments.fr



ÉCOLE FRANÇAISE DU BÉTON

7, place de La Défense
92974 Paris-La-Défense CEDEX