



NRC Publications Archive Archives des publications du CNRC

Lignes Directrices pour la Protection Parasismique des Structures de Bâtiments Existants

This publication could be one of several versions: author's original, accepted manuscript or the publisher's version. /
La version de cette publication peut être l'une des suivantes : la version prépublication de l'auteur, la version acceptée du manuscrit ou la version de l'éditeur.

NRC Publications Record / Notice d'Archives des publications de CNRC:

<https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/object/?id=fa150768-8924-4110-8f62-f85d637c6e25>

<https://publications-cnrc.canada.ca/fra/voir/objet/?id=fa150768-8924-4110-8f62-f85d637c6e25>

Access and use of this website and the material on it are subject to the Terms and Conditions set forth at

<https://nrc-publications.canada.ca/eng/copyright>

READ THESE TERMS AND CONDITIONS CAREFULLY BEFORE USING THIS WEBSITE.

L'accès à ce site Web et l'utilisation de son contenu sont assujettis aux conditions présentées dans le site

<https://publications-cnrc.canada.ca/fra/droits>

LISEZ CES CONDITIONS ATTENTIVEMENT AVANT D'UTILISER CE SITE WEB.

Questions? Contact the NRC Publications Archive team at

PublicationsArchive-ArchivesPublications@nrc-cnrc.gc.ca. If you wish to email the authors directly, please see the first page of the publication for their contact information.

Vous avez des questions? Nous pouvons vous aider. Pour communiquer directement avec un auteur, consultez la première page de la revue dans laquelle son article a été publié afin de trouver ses coordonnées. Si vous n'arrivez pas à les repérer, communiquez avec nous à PublicationsArchive-ArchivesPublications@nrc-cnrc.gc.ca.



National Research
Council Canada

Conseil national de
recherches Canada

Canada



Conseil national
de recherches Canada

National Research
Council Canada

CNRC-NRC

Lignes directrices pour la protection parasismique des structures de bâtiments existants

Lignes directrices pour la protection parasismique des structures de bâtiments existants

Préparé par :
Institut de recherche en construction
Conseil national de recherches du Canada

Financé par :
Travaux publics et Services gouvernementaux Canada
British Columbia Buildings Corporation
Société canadienne d'hypothèques et de logement
Institut de recherche en construction

© Conseil national de recherches Canada
Décembre 1995
ISBN 0-660-95131-2
NRCC 38857F

AVIS

Les présentes Lignes directrices ont été préparées par l'Institut de recherche en construction (IRC) à l'intention des organismes énumérés ci-dessus. Avec l'accord de ces organismes, ces Lignes directrices sont offertes aux personnes ou organisations qui désirent les consulter à titre d'information ou pour examen. Il ne faut pas conclure cependant que ces Lignes directrices visent à remplacer ou à annuler les règlements de construction en vigueur. L'IRC ainsi que les organismes parrains n'assument aucune responsabilité quant à l'usage qui sera fait de ce document.

Préface

Résumé

Les présentes Lignes directrices renferment des renseignements et des conseils sur la protection parasismique des structures de bâtiments existants et sont destinées aux ingénieurs en charpentes. Elles ont été conçues pour s'harmoniser avec les *Lignes directrices pour l'évaluation sismique des bâtiments existants*¹ et le *Manuel de sélection des bâtiments en vue de leur évaluation sismique*², deux documents qui se rapportent au Code national du bâtiment du Canada 1990³.

Dans ces Lignes directrices, on décrit les techniques classiques employées pour augmenter la résistance sismique des structures et on examine la valeur relative de chacune en regard des objectifs de protection parasismique qui sont visés et des principaux facteurs, structuraux et autres, qui déterminent le choix d'une méthode et la planification des travaux. Le document renferme aussi une description des nouveaux procédés utilisés pour renforcer les structures, par exemple les dispositifs d'amortissement, et renvoie à des ouvrages plus détaillés sur le sujet. Il ne présente toutefois aucune technique pour renforcer les éléments non structuraux du bâtiment.

Contexte

Les Lignes directrices s'inspirent du *NEHRP Handbook of Techniques for Seismic Rehabilitation of Existing Buildings*⁴ mais le contenu a été réorganisé et considérablement abrégé. Par ailleurs, le présent document renferme beaucoup plus d'indications sur les techniques innovatrices que le manuel du NEHRP.

La première version de ces Lignes directrices a été élaborée avec le soutien de Travaux publics et Services gouvernementaux Canada. En se fondant sur les commentaires formulés, on a l'améliorée et on a publié le document revu avec l'appui de la B. C. Buildings Corporation et de la Société canadienne d'hypothèques et de logement.

Les présentes Lignes directrices ont été préparées par :

D.E. Allen, responsable IRC/CNRC, Ottawa (Ont.)

avec la collaboration de :

L. Bell CWMM, Vancouver (C.-B.)

S. Cherry Université de la Colombie-Britannique, Vancouver (C.-B.)

F. Knoll Nicolet Chartrand Knoll Ltée, Montréal (Qué.)

R. Lo Klohn Crippen Consultants Ltd., Richmond (C.-B.)

J.H. Rainer IRC/CNRC, Ottawa (Ont.)

Nous remercions le personnel de la division de génie hydroélectrique de B.C. Hydro, qui a accepté de revoir la version préliminaire du document, ainsi que les particuliers et les entreprises qui nous ont fait parvenir leurs commentaires.

Table des matières

1. INTRODUCTION.....1	5. TECHNIQUES SPÉCIALES DE PROTECTION29
1.1 But des Lignes directrices.....1	5.1 Ajout de dispositifs d'amortissement29
1.2 Portée et limites.....1	5.2 Isolation à la base.....32
1.3 Comment utiliser les Lignes directrices1	5.3 Plastiques et ciments renforcés à la fibre de verre et enrobages.....34
2. DÉFICIENCES SISMIQUES DES STRUCTURES DE BÂTIMENTS3	6. TECHNIQUES DE PROTECTION - FONDACTIONS37
2.1 Discontinuité et redondance.....3	6.1 Techniques classiques de protection des fondations38
2.2 Résistance et ductilité insuffisantes ..3	6.2 Stabilisation des sols.....40
2.3 Manque de rigidité et bâtiments adjacents4	
2.4 Irrégularités et transfert de charge4	
3. PRINCIPES DE PROTECTION PARASISMIQUE5	BIBLIOGRAPHIE.....45
3.1 Objectifs de la protection.....5	ANNEXE A : LISTE DE CONTRÔLE DES TECHNIQUES DE PROTECTION PARASISMIQUE.....47
3.2 Techniques classiques de protection ..5	
3.3 Techniques spéciales de protection...7	
3.4 Facteurs à considérer dans le choix d'une technique de protection.....7	
3.4.1 Considérations structurales7	
3.4.2 Autres considérations.....10	
3.5 Critères de conception et essai de dispositifs spéciaux11	
4. TECHNIQUES CLASSIQUES DE PROTECTION13	
4.1 Ajout de murs travaillant en cisaillement, de contreventements ou d'ossatures résistant aux moments13	
4.2 Protection des ossatures résistant aux moments15	
4.3 Protection d'une ossature contreventée18	
4.4 Protection des murs travaillant en cisaillement19	
4.5 Protection des diaphragmes existants.....23	
4.6 Protection des supports latéraux de murs et de parapets.....27	

Chapitre 1

Introduction

1.1 But des Lignes directrices

Au Canada, bon nombre des bâtiments situés dans des zones sismiques ont été construits à une époque où l'on n'était pas encore en mesure d'évaluer la résistance aux séismes. Nombre de ces édifices seraient jugés non sécuritaires aux termes des codes actuels. En outre, les exigences des codes s'appliquant essentiellement à la conception de nouveaux bâtiments et non à l'évaluation des bâtiments existants, les travaux de modernisation peuvent entraîner des coûts très élevés et diminuer la valeur patrimoniale des bâtiments. Le CNRC a donc élaboré des *Lignes directrices pour l'évaluation sismique des bâtiments existants*¹, qui renferment des méthodes spécialement conçues pour l'évaluation de ces bâtiments.

Ces Lignes directrices devraient aider les ingénieurs à concevoir les détails de protection au moyen de techniques qui permettront le mieux de corriger les faiblesses identifiées lors de l'évaluation menée selon les lignes directrices pour l'évaluation sismique. Les techniques décrites ici comprennent les méthodes classiques employées dans le passé ainsi que des procédés spéciaux récemment mis au point, comme l'ajout de dispositifs d'amortissement et l'isolation à la base. On discutera de la valeur relative des diverses techniques, en regard des principes techniques de sismologie, de la résistance sismique observée, des méthodes de construction employées et des coûts.

1.2 Portée et limites

Ces Lignes directrices contiennent une description et une évaluation des avantages respectifs des diverses techniques de protection parasismique applicables aux bâtiments jugés défaillants. Elles ne sont pas conçues pour la réfection des bâtiments endommagés par des séismes, bien que certaines des techniques présentées ici puissent être utiles pour ce genre de travaux. Les descriptions générales de ces techniques sont accompagnées de croquis qui en illustrent le schéma de fonctionnement. Les Lignes directrices ne contiennent pas de critères particuliers de conception, pas de détails précis pouvant être appliqués directement, pas plus que des recommandations spécifiques quant aux dispositifs à utiliser.

1.3 Comment utiliser les Lignes directrices

Il est recommandé de lire d'abord le document depuis le début. Il peut ensuite être utile de consulter l'annexe A, qui renferme des listes de contrôle pour chaque technique de rénovation et chaque grand système structural. Les techniques de rénovation sont décrites plus en détail aux chapitres 4 à 6, les pages et figures correspondantes étant indiquées dans la liste de contrôle de l'annexe A (constituée de tableaux). La valeur relative de chaque technique est établie en fonction des objectifs et des principes de protection parasismique énoncés au chapitre 3. Au chapitre 2, on passe en revue les types de déficiences sismiques observées dans les bâtiments existants.

La rénovation de bâtiments existants comporte davantage d'incertitudes et de contraintes que la conception de bâtiments neufs. Il faut donc faire preuve de beaucoup de jugement lors de la conception des détails et du choix des techniques à employer. Par ailleurs, la protection parasismique étant une forme d'intervention relativement récente, les nouvelles techniques préconisées en sont encore à divers stades de mise au point. *C'est pourquoi ces Lignes directrices mettent davantage l'accent sur les principes, l'expérience et l'accès à l'information que sur des exigences et des critères précis.*

Chapitre 2

Déficiences sismiques des structures de bâtiments

Le choix des techniques qui seront employées pour la protection parasismique des structures dépend des déficiences sismiques du bâtiment considéré. On trouvera à l'annexe C des *Lignes directrices pour l'évaluation sismique des bâtiments existants*¹ une liste type de 123 faiblesses potentielles. Pour les besoins du présent document, on regroupera ces faiblesses en catégories plus générales :

- Discontinuité et redondance
- Résistance insuffisante et ductilité
- Manque de rigidité et bâtiments adjacents
- Irrégularités et transfert des charges

Ces catégories peuvent être décomposées en fonction de faiblesses particulières, comme l'indiquent les tableaux A1 à A6 de l'annexe A. On décrira ces déficiences plus en détail au chapitre 3, c'est-à-dire dans l'énoncé des principes de protection parasismique.

2.1 Discontinuité et redondance

Si l'ossature n'est pas systématiquement reliée, elle tendra à se désassembler au cours d'un séisme de forte intensité. L'expérience a montré que la déficience la plus grave, c'est-à-dire celle qui entraîne l'effondrement progressif du bâtiment, est la liaison insuffisante des éléments en maçonnerie ou préfabriqués (murs, poteaux, poutres, dalles) aux diaphragmes et entre eux. On peut aussi observer des problèmes de discontinuité dans les diaphragmes (notamment en bois ou en béton préfabriqué), en particulier autour des ouvertures, ainsi que dans les systèmes qui interrelient les murs travaillant en cisaillement (tirants et éléments d'assemblage entre les ossatures et les murs de remplissage).

La redondance est une autre propriété de l'ossature qui, comme il a été démontré lors de séismes, contribue à prévenir les défaillances. Lorsqu'on parle de redondance, on n'entend pas uniquement la résistance accrue de l'ossature aux charges latérales (plusieurs ossatures et murs travaillant en cisaillement) mais aussi sa capacité de résister à des charges verticales après la défaillance localisée d'un composant, par exemple un mur travaillant en cisaillement. La redondance n'offre pas que des avantages, surtout si les éléments redondants sont fragiles, aspect qui sera examiné ci-après.

2.2 Résistance et ductilité insuffisantes

La sûreté d'un bâtiment, ainsi que la limitation des dommages à la structure, dépend dans une large mesure de la tenue de la structure lorsqu'elle est soumise à des forces sismiques importantes. La sûreté n'est pas seulement fonction de la résistance de la structure mais aussi de sa réponse à des surcharges cycliques, c'est-à-dire de sa ductilité, de sa capacité d'absorber l'énergie et de sa rigidité. Dans le cas des ossatures résistantes aux moments, la sécurité du bâtiment dépend aussi de la résistance des ossatures aux charges verticales qui s'exercent dans une configuration altérée (l'effet P-delta). La plupart des énoncés d'évaluation présentés dans les lignes directrices pour l'évaluation sismique¹ portent sur ces propriétés.

La ductilité sous des surcharges cycliques constitue un facteur important mais la protection ne permet pas toujours de conférer ce comportement aux structures existantes. On peut toutefois obtenir de bons résultats en modifiant la structure au moyen de diverses techniques, comme il est indiqué au chapitre 3.

2.3 Manque de rigidité et bâtiments adjacents

L'expérience a montré que la rigidité latérale d'une structure verticale est un facteur prépondérant dans la prévention des défaillances qui présentent un danger pour la vie et comportent des risques de dommages matériels. Il est donc essentiel de tenir compte de la rigidité latérale lorsqu'on décide de protéger des bâtiments situés dans des zones de sismicité moyenne à élevée. Cet aspect est moins important dans le cas de bâtiments construits dans des zones de faible sismicité, car les déplacements causés par les mouvements du sol y sont beaucoup moins marqués.

Il faut également s'assurer que la rigidité en plan des diaphragmes horizontaux (platelages en bois ou en métal) est suffisante pour prévenir une défaillance due à l'instabilité des murs en maçonnerie dans les zones de sismicité élevée. Cette caractéristique est abordée dans l'annexe A des lignes directrices pour l'évaluation sismique¹.

Il est aussi important que la rigidité latérale des éléments verticaux, y compris les composants architecturaux du bâtiment, soit uniforme. La charge étant généralement transmise aux éléments rigides, ceux-ci tendent à céder les premiers, tandis que les éléments flexibles ne sont appelés à supporter une charge importante qu'après défaillance des éléments rigides. Si, dans ces conditions, une partie du bâtiment perd son support vertical, un effondrement progressif risque de se produire.

La rigidité latérale de la structure verticale intervient aussi lorsqu'il y a collision de deux bâtiments adjacents ou de deux parties adjacentes d'un même bâtiment séparées par des joints mobiles. Un bâtiment élevé dont l'ossature résiste aux moments sera flexible et peut entrer en collision avec un bâtiment adjacent plus bas doté d'une ossature rigide. Les dommages peuvent être très importants, en particulier si les étages des deux bâtiments ne sont pas au même niveau. Des impacts similaires peuvent aussi se produire à l'intérieur d'un bâtiment si les éléments lourds ne sont pas supportés latéralement par la structure.

2.4 Irrégularités et transfert de charge

Une asymétrie dans la géométrie des éléments structuraux résistant aux charges latérales ou dans la masse du bâtiment peut induire des moments de torsion élevés lors d'un séisme. Des variations brusques de rigidité ou la présence de discontinuités, tant dans les éléments horizontaux que verticaux, peuvent engendrer des forces ou des déformations importantes en certains points des éléments et entraîner une défaillance localisée. Parmi les irrégularités qui induisent des forces localisées importantes, mentionnons :

- les façades ouvertes (boutiques, garages, etc.) et les ouvertures dans les murs extérieurs au niveau du sol
- les poteaux qui supportent des murs travaillant en cisaillement
- les poteaux courts en béton faisant partie d'une ossature résistant aux moments (p. ex. en raison de murs de remplissage partiels)
- les murs travaillant en cisaillement ou les contreventements décalés d'étage en étage.

Les façades ouvertes constituent en fait des étages non rigides et ont été à l'origine de nombreux effondrements lors de récents séismes. Les poteaux qui supportent des murs travaillant en cisaillement peuvent être soumis à de grandes forces de renversement, et les poteaux courts en béton, qui doivent résister à des forces latérales élevées, cèdent par rupture fragile en cisaillement. Le décentrement des murs de cisaillement ou des contreventements peut exercer d'importantes forces localisées sur le diaphragme.

Chapitre 3

Principes de protection parasismique

3.1 Objectifs de la protection

Une fois que la réhabilitation d'un bâtiment est jugée nécessaire pour des raisons de sécurité ou autres (p. ex. remise en état après sinistre), il faut établir un certain nombre d'objectifs, dont la sécurité des personnes, avant de choisir des techniques de rénovation et de concevoir les détails. Ces objectifs sont les suivants :

- 1) sécurité des personnes
- 2) protection des éléments et du contenu du bâtiment (limitation des dommages)
- 3) perturbation minimale des activités à l'intérieur du bâtiment pendant les travaux
- 4) fonctionnement normal du bâtiment après les travaux
- 5) préservation de l'aspect et de la valeur patrimoniale du bâtiment
- 6) exécution des travaux au moindre coût.

Les objectifs 3) à 6) sont généralement interreliés en ce sens qu'ils visent à une *modification minimale de la structure*, dans la mesure où les objectifs de protection des personnes et de limitation des dommages sont atteints. La portée de cette *intervention minimale* variera considérablement selon le bâtiment considéré et constituera essentiellement un exercice pragmatique exigeant une étroite collaboration entre l'ingénieur, l'architecte, le propriétaire et les entrepreneurs. Dans le présent chapitre, on résumera d'abord les techniques qui peuvent être employées lors de ces travaux de protection; on abordera ensuite les principes qui guideront l'ingénieur dans le choix d'une technique de rénovation et la conception des détails.

3.2 Techniques classiques de protection

Les techniques classiques de protection ne nécessitent ni dispositifs spéciaux ni nouveaux matériaux. Les techniques de base suivantes sont actuellement employées pour la protection parasismique des bâtiments :

Nouveaux murs travaillant en cisaillement. Ceux-ci comprennent les murs en béton armé, en maçonnerie armée, à ossature en bois revêtue de contreplaqué, ainsi que les murs en tôle d'acier travaillant en cisaillement. De préférence, les nouveaux murs travaillant en cisaillement seront placés entre les poteaux existants et reliés à ceux-ci, non seulement pour des raisons d'efficacité structurale mais aussi parce qu'en procédant de cette façon, on évite souvent d'avoir à mettre en place de nouvelles fondations. On peut ériger de nouveaux murs travaillant en cisaillement pour réduire l'effort de torsion ou l'effet d'autres forces engendrées par certaines irrégularités, ainsi que pour augmenter la résistance et la rigidité de la structure existante.

Nouveaux contreventements. Ces ouvrages peuvent être réalisés en acier, en bois ou, parfois, en béton armé. Les nouveaux contreventements seront généralement exécutés dans le plan vertical, mais ils peuvent aussi être horizontaux. Tout comme les murs travaillant en cisaillement, les contreventements seront de préférence placés entre les ossatures existantes et pourront servir à réduire l'effort de torsion et d'autres forces engendrées par les irrégularités de la structure, ainsi qu'à augmenter la résistance et la rigidité de la structure verticale ou des diaphragmes. Une nouvelle technique, qui sera décrite plus en détail à la section 5.1, consiste à incorporer des dispositifs spéciaux d'amortissement dans les nouveaux contreventements.

Éléments de remplissage. Les systèmes ci-dessus, qui servent à réaliser de nouveaux murs travaillant en cisaillement, peuvent aussi être utilisés pour obturer des ouvertures inutilisées dans des murs ou des diaphragmes existants. Les éléments de remplissage augmentent la rigidité de même que la résistance de ces murs ou diaphragmes. Il faut toutefois s'assurer que les éléments d'ossature adjacents possèdent la résistance voulue.

Recouvrements et enduits. Les recouvrements peuvent être faits de béton coulé en place (gunite, chapes, etc.) ou de contreplaqué. On peut aussi utiliser des ciments et des enduits avec armature en treillis, ainsi que des plastiques armés de fibre de verre (voir la section 5.3) pour protéger les éléments fragiles, par exemple les carreaux creux en terre cuite ou les poteaux en béton. Ces recouvrements augmentent la résistance et la rigidité des murs travaillant en cisaillement ainsi que des diaphragmes, et ils peuvent servir à relier entre eux des éléments différents pour assurer l'intégrité de la structure.

Renforcement des éléments d'ossature. Cette technique consiste à ajouter des composants qui augmenteront la résistance ou la rigidité des éléments existants ou bien ajouteront à leur ductilité. À cette fin, on peut utiliser différentes méthodes. On peut renforcer la maçonnerie existante (blocs creux ou évidage de la maçonnerie en brique) en réalisant un enrobage de béton armé ou en utilisant des tôles d'acier ou des plastiques armés de fibre de verre et un contreventement latéral pour réduire la longueur de flambage. Il est parfois plus économique et plus rapide de remplacer les éléments existants, par exemple lorsqu'on rénove des systèmes de contreventement. Dans d'autres cas, il est préférable de renforcer les composants existants, notamment s'il s'agit d'un élément porteur en maçonnerie creuse. Outre qu'elle augmente la résistance des éléments, cette technique peut améliorer la ductilité de la structure en modifiant le mécanisme de défaillance, par exemple en rendant les poteaux en béton armé plus résistants que les poutres.

Armature des joints. Il s'agit ici de transformer les assemblages travaillant en cisaillement en assemblages résistants aux moments, de renforcer les liaisons des contreventements, de sorte que le fléchissement des éléments protège les joints contre une rupture fragile, et de clouer des revêtements en bois ou de souder le platelage en métal pour renforcer les diaphragmes. L'armature des joints est une technique qui permet d'accroître la résistance de la structure ainsi que sa ductilité en modifiant le mécanisme de défaillance.

Ancrages et ligatures. Cette technique consiste à ancrer les murs au diaphragme plancher ou toit afin de transmettre à la structure verticale l'effort de cisaillement du diaphragme. On peut aussi ancrer la structure verticale aux fondations. Les dispositifs d'ancrage ajoutent à l'intégrité de la structure et sont généralement le moyen le plus efficace et le plus économique d'assurer la protection des personnes.

On se servira aussi de ces dispositifs pour interconnecter des bâtiments adjacents ou des parties d'un même bâtiment, de sorte qu'ils se comportent comme un tout solidaire, et prévenir les collisions et les impacts répétés. La mise en place de tirants verticaux à travers les planchers et d'entures entre les éléments diaphragmes (p. ex. au niveau des angles saillants ou entre les poutres à l'emplacement des éléments d'appui) ajoute également à l'intégrité de la structure.

Les structures faites d'éléments préfabriqués n'ont pas eu une performance satisfaisante lors des récents séismes, surtout en raison de la défaillance des assemblages et du mouvement relatif des éléments préfabriqués à l'endroit des joints. Pour remédier à ce problème, on peut augmenter la résistance et la rigidité des ligatures.

Membrures et collecteurs. La membrure est un élément ininterrompu placé le long du bord extérieur du diaphragme. Elle agit comme une bride et résiste au moment induit par le diaphragme. Le collecteur est un élément incorporé dans le diaphragme qui capte l'effort de cisaillement exercé sur le diaphragme et le transmet à la structure verticale. Les membrures et les collecteurs relient ensemble les diaphragmes et transmettent à la structure verticale les forces qui agissent sur ceux-ci. Dans certains cas, des chapes en béton armé, un recouvrement en contreplaqué ou des fermes en acier peuvent remplir efficacement cette fonction. Les collecteurs sont parfois appelés « contre-fiches ».

Fondations. La rénovation des fondations est généralement coûteuse et devrait, dans la mesure du possible, être évitée, sauf si l'expérience montre que la défaillance des fondations entraînerait des conséquences graves en cas de liquéfaction, de glissements ou de rupture des pieux. Pour ce qui est de l'évaluation des fondations, consulter les lignes directrices pour l'évaluation sismique¹. On peut employer différentes techniques pour stabiliser les sols liquéfiables, les argiles sensibles, les sols de faible portance ou les fondations construites sur une pente.

Il peut être nécessaire de remplacer ou de prolonger les fondations de sorte qu'elles puissent résister aux nouvelles charges dues à la pesanteur ou aux importantes forces de renversement engendrées par de nouveaux murs travaillant en cisaillement ou contreventements. Les techniques classiques de protection comprennent l'ajout de pieux et l'élargissement des semelles existantes, mais il est généralement plus simple de mettre en place de nouvelles fondations à quelque distance des fondations existantes. L'ancrage des fondations dans le sol ou le roc est un moyen efficace et économique de contrer les forces de renversement, tant au moment de la rénovation des semelles existantes que de la mise en place de nouvelles semelles.

3.3 Techniques spéciales de protection

On a récemment mis au point un certain nombre de techniques qui font intervenir des dispositifs spéciaux ou de nouveaux matériaux et qui, pour la plupart, devraient se répandre rapidement. Certaines de ces techniques sont abordées au chapitre 5 des présentes Lignes directrices, notamment :

Dispositifs d'amortissement. Cette technique consiste à réduire les déplacements et les forces dynamiques à l'intérieur du bâtiment par l'adjonction de dispositifs capables de dissiper l'énergie aux endroits où il y a mouvement différentiel des étages. Ces dispositifs convertissent l'énergie cinétique en chaleur par glissement, fléchissement ou écoulement laminaire. Cette technique, qui se révèle particulièrement efficace dans la rénovation de bâtiments dotés d'une structure flexible, par exemple une ossature résistant aux moments, est généralement complétée par la mise en place d'un contreventement ou d'un bardage rigide et résistant.

Isolation à la base. Cette technique consiste à réduire au minimum la transmission des mouvements sismiques du sol au bâtiment en installant des dispositifs d'isolation qui ont une tenue flexible en cisaillement ou opposent un glissement à ces forces lorsqu'ils sont placés à la base du bâtiment. Il en résulte une diminution considérable des accélérations et des forces qui s'exercent sur le bâtiment, en particulier dans le cas de bâtiments rigides construits sur un sol résistant.

Enduits et ciments armés de fibre de verre et enrobages. Ces procédés comprennent l'application d'enduits composites faits de ciment ou de résine époxyde et armés de fibre de verre sur la maçonnerie existante pour en augmenter la résistance au cisaillement et aux forces latérales, ainsi que sur les poteaux en béton pour en assurer le confinement et en améliorer la ductilité.

3.4 Facteurs à considérer dans le choix d'une technique de protection

Les objectifs énoncés à la section 3.1 constituent les critères à partir desquels on choisira la technique de protection qui permettra de réduire les interventions au minimum. Les indications suivantes devraient faciliter la tâche de l'ingénieur car elles portent sur les considérations structurales liées à la sismicité et au comportement structural ainsi que sur d'autres aspects ayant trait au processus de protection, aux effets des travaux de rénovation sur le fonctionnement et l'aspect du bâtiment ainsi qu'aux coûts.

3.4.1 Considérations structurales

Sismicité. Les mouvements du sol correspondant à un séisme de calcul dépendent non seulement de la zone sismique considérée mais aussi des conditions locales du sol. Les sols meubles atténuent les mouvements du roc à haute fréquence mais amplifient considérablement les mouvements liés à de basses fréquences, ce qui peut engendrer un phénomène de résonance si la fréquence propre de la structure du bâtiment se rapproche de la fréquence excitatrice. Dans ce qui suit, la sismicité, exprimée en fonction de la zone sismique et de la vitesse, Z_v , devra, dans le cas des bâtiments construits sur un sol meuble, être considérée comme supérieure à la valeur prescrite dans le CNB.

Dans les zones de faible sismicité (Z_v de 2 ou moins), on se préoccupe surtout d'assurer l'intégrité de la structure, en particulier l'ancrage des murs en maçonnerie aux diaphragmes et le support latéral des parapets, des panneaux préfabriqués et des cloisons en maçonnerie. Dans ces conditions, les techniques les plus couramment employées seront celles qui visent à renforcer les ancrages et le support latéral.

Dans les zones de sismicité moyenne à élevée ($Z_v > 2$), la gamme des faiblesses potentielles de la structure est nettement plus étendue. Il faut considérer non seulement les problèmes d'intégrité mais aussi le manque de résistance, de ductilité et de rigidité, de même que les irrégularités de la structure. Il arrive souvent que ces faiblesses se manifestent simultanément. Ainsi, on observe fréquemment une corrélation entre un effort de torsion élevé, une résistance insuffisante et un mouvement excessif, découlant d'irrégularités dans la structure du bâtiment; cette particularité sera abordée ci-après.

Irrégularités. Les irrégularités les plus graves sont les étages non rigides ou faibles et l'asymétrie, qui induisent des efforts importants de torsion. Les courts poteaux intégrés aux ossatures en béton et les discontinuités dans la structure verticale, par exemple un mur travaillant en cisaillement qui est décentré, peuvent aussi être considérés comme des irrégularités critiques. La technique qui permet d'éliminer le plus efficacement ce type de déficience consiste à atténuer les irrégularités en améliorant le trajet de charge. À cette fin, on ajoute de nouveaux composants aux endroits faibles ou peu rigides (voir la figure 3.1) ou en retirant certains composants non structuraux rigides qui induisent des forces importantes dans des composants fragiles, comme les courts poteaux en béton. La meilleure technique, par exemple l'érection de nouveaux murs travaillant en cisaillement ou de contreventements, ne sera pas toujours acceptable en raison de la disposition particulière, de la fonction, de la valeur esthétique ou du caractère patrimonial du bâtiment.

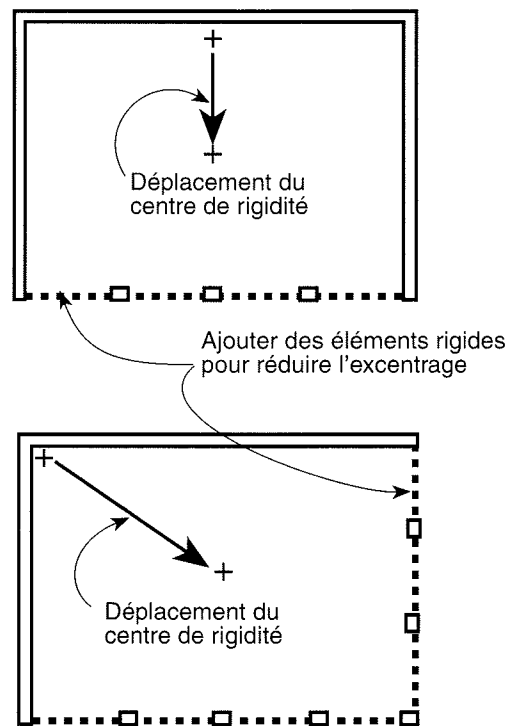


Figure 3-1. Amélioration d'une structure pour réduire la torsion

On peut généralement résoudre les problèmes posés par certaines irrégularités, tels les décrochements dans la structure verticale, les angles rentrants ou le décentrage des diaphragmes dans les maisons à mi-étages, en utilisant des techniques de renforcement (liaisons, entures, recouvrements, etc.) aux endroits critiques. Les diaphragmes peuvent nécessiter un renforcement localisé pour résister aux grands efforts tranchants imposés par des murs travaillant en cisaillement qui sont décalés d'étage en étage.

Bien entendu, si l'on apporte des changements majeurs à la structure verticale, il faudra analyser de nouveau la résistance du bâtiment. Si les centres de rigidité et les centres de masse demeurent fortement décalés d'étage en étage, il faudra procéder à une analyse dynamique pour déterminer les forces exercées sur les divers éléments, comme l'exige le Code national du bâtiment du Canada³. Les analyses dynamiques des structures composées d'ossatures en bois d'oeuvre, en maçonnerie ou en béton préfabriqué peuvent cependant se révéler peu fiables si elles ne sont pas conçues pour mesurer les propriétés dynamiques de la structure du bâtiment.

Compatibilité. Ce terme désigne la capacité des éléments parallèles de la structure verticale à travailler ensemble pour former un système qui aura une bonne tenue en cas de séisme. Ainsi, une ossature résistante aux moments qui est très ductile mais flexible n'est pas compatible avec un mur travaillant en cisaillement qui est rigide et fragile. La mise en place d'un tel mur comme deuxième ligne de défense n'empêchera pas un effondrement si les murs travaillant en cisaillement, qui doivent supporter les charges dues à la pesanteur, cèdent brusquement sous les secousses sismiques.

Une solution acceptable consiste à créer un système protégé contre les déformations qui nuisent à l'intégrité des murs, par exemple en incorporant des éléments suffisamment résistants et rigides. À cette fin, on peut procéder de différentes manières : en renforçant les murs de façon qu'ils puissent résister aux forces qui leur sont transmises, en augmentant leur déformabilité ou en incorporant des éléments indépendants mais suffisamment rigides.

Les nouveaux éléments structuraux intégrés à la structure existante tendent toutefois à transmettre de grandes forces localisées aux matériaux en place. Il faut donc veiller à bien concevoir ce transfert de forces en calculant avec soin les détails des assemblages.

Ces différents aspects de la compatibilité s'appliquent aussi aux recouvrements, qui peuvent présenter des mouvements différentiels imputables au retrait, à la température et parfois au fluage.

Fondations. La rénovation des fondations est ordinairement coûteuse et, selon le taux d'occupation et l'usage du bâtiment, peut également occasionner bien des désagréments. Il est souvent possible de protéger la structure du bâtiment sans toucher aux fondations, en particulier dans les zones de sismicité faible à moyenne.

L'un des principaux inconvénients liés à l'érection de nouveaux murs travaillant en cisaillement ou de contreventements est que ceux-ci peuvent nécessiter la mise en place de nouvelles fondations. Pour éliminer ou réduire au minimum les travaux de rénovation des fondations que pourraient exiger ces nouveaux murs ou contreventements, on peut incorporer ceux-ci dans les ossatures structurales existantes. On peut aussi installer des dispositifs d'amortissement dans la structure pour réduire les forces sismiques qui s'exercent dans les fondations.

Le soulèvement des fondations est souvent considéré comme une déficience mais il n'est généralement pas nécessaire de la corriger. Dans les lignes directrices pour l'évaluation sismique¹, l'absence d'ancrage aux fondations n'est pas considérée comme une déficience dans les zones de faible sismicité. La gravité de cette faiblesse dépend de l'ampleur du soulèvement et des dommages que ce mouvement risque d'entraîner. En fait, le soulèvement des fondations peut dans certains cas être jugé souhaitable, comme on l'expliquera à la rubrique « Comportement du système ».

Une autre manière d'éviter la rénovation des fondations consiste à augmenter la longueur des murs travaillant en cisaillement ou à multiplier les contreventements, en particulier aux étages inférieurs. Ainsi, on peut se servir de grandes longueurs d'un mur en bois existant pour obtenir, après clouage et ancrage, un mur travaillant en cisaillement; de toute façon, ces surfaces doivent ordinairement faire l'objet de travaux généraux d'amélioration architecturale.

Comportement du système. Qu'il s'agisse de concevoir de nouvelles structures ou de planifier des travaux de modernisation, il faut réaliser un système qui, soumis à des charges sismiques, aura à la fois une *action combinée* et un *mode de défaillance contrôlé*.

On obtient une *action combinée* en mettant en place de nouveaux éléments dont l'action viendra s'ajouter à celle des éléments existants pour éliminer les déficiences de la structure. Ainsi, on corrigera un défaut d'intégrité en réalisant de nouvelles liaisons ou en améliorant les assemblages existants. La mise en place de nouveaux éléments qui ajoutent à la rigidité de la structure existante contribuera à prévenir l'endommagement des composants fragiles, comme la maçonnerie non armée.

On obtient un *mode de défaillance contrôlé* en réalisant une structure qui fléchira plutôt que de se fracturer, ce qui empêchera l'effondrement progressif du bâtiment. Au moment d'évaluer l'efficacité du *mode de défaillance contrôlé*, il est utile de vérifier la tenue de la structure améliorée sous des charges latérales croissantes et d'établir une séquence des modes de rupture pour divers composants (fléchissement, fluage, rupture, soulèvement, etc.).

L'isolation à la base et l'ajout de dispositifs d'amortissement reposent sur le concept de la défaillance contrôlée, tout comme le mécanisme de rupture ductile stable en flexion dans le cas des poutres, contrairement à un mécanisme de rupture fragile instable dans le cas des poteaux. Pour cette même raison, un mécanisme de balancement à l'intérieur des murs en maçonnerie est préférable à une rupture fragile en cisaillement. De la même manière, il vaut mieux permettre un soulèvement à la base des murs de béton travaillant en cisaillement pour prévenir une rupture soudaine en cisaillement ou en compression, en particulier si les murs qui travaillent en cisaillement sont fragiles, ce qui est souvent le cas dans les bâtiments anciens.

La mesure de la fiabilité d'un mode de défaillance contrôlé est fonction des déplacements engendrés et des dommages qui en découlent. On peut estimer ces déplacements en se servant des déformations élastiques produites par les forces sismiques données dans le CNB (avant application du facteur de réduction R) combinées à des valeurs de rigidité réalistes pour les éléments résistants de la structure.

Limitation des dommages. Il peut être nécessaire de limiter les dommages aux éléments non structuraux et au contenu du bâtiment pour garantir la sécurité des personnes (chute d'éléments, obstruction des sorties), protéger les investissements ou maintenir la fonctionnalité d'un bâtiment après un séisme. Il est donc important de considérer cet aspect au moment de choisir une technique de protection.

L'ancrage des éléments du bâtiment à la structure principale est l'une des méthodes employées pour limiter les dommages. Cette ligne directrice se limite à l'ancrage et au support des murs (structuraux ou non) et des parapets.

On peut aussi prévenir les déplacements de la structure (p. ex. les glissements d'étages) au-delà des valeurs tolérées par les éléments non structuraux ainsi que réduire l'effet de l'accélération du sol sur le bâtiment (qui peut endommager les équipements spéciaux ou les objets de valeur) à l'aide de techniques particulières de protection, par exemple l'isolation à la base et l'ajout de dispositifs d'amortissement.

3.4.2 Autres considérations

Outre la sûreté et l'aptitude à l'usage de la structure, d'autres aspects ont une incidence importante sur le choix des techniques de rénovation et la conception des détails.

Accessibilité. Il faut déterminer s'il est possible d'accéder au bâtiment pour y exécuter des travaux de rénovation, notamment la réparation et le remplacement des éléments et des matériaux, qui peuvent nécessiter l'utilisation d'échafauds, de grues ou autres équipements volumineux, et s'il est possible d'exécuter ces travaux à l'intérieur de l'espace disponible. Les difficultés d'accès influent directement sur les techniques de protection employées et les coûts. Comme les fondations sont les éléments les moins accessibles de la structure, donc les plus coûteuses à rénover, il faudra dans ce cas éviter de leur toucher.

Perturbation des activités.

L'impossibilité d'utiliser et d'occuper le bâtiment pendant les travaux de rénovation est un autre facteur à considérer si le bâtiment demeure en service durant cette période. Il est donc préférable d'intégrer la protection parasismique à des travaux majeurs de rénovation, de préférence lorsque le bâtiment est inoccupé. Il n'est cependant pas toujours possible de procéder ainsi; il faut alors exécuter les travaux par étapes en déplaçant les occupants et les activités et en accomplissant les travaux en dehors des heures de bureau. La perturbation des activités normales pendant une longue période et dans l'ensemble du bâtiment devient un facteur déterminant dans le choix des techniques de protection et la conception des détails.

Il faut en outre prendre toute les précautions qui s'imposent pour éviter que les étincelles produites lors des travaux ne causent un incendie.

Fonction du bâtiment. La mise en place de nouveaux éléments structuraux, par exemple des murs travaillant en cisaillement ou des contreventements, peut modifier la configuration (voies de circulation), l'éclairage naturel ou d'autres caractéristiques liées à l'usage du bâtiment. C'est pourquoi, en certains endroits, il vaut mieux ériger des ossatures résistant aux moments que des murs travaillant en cisaillement. Il ne faut pas oublier non plus que la pose de recouvrements épais, par exemple des chapes en béton, augmente l'élévation des planchers, et qu'il faut alors modifier en conséquence les escaliers, les portes, les ascenseurs, etc.

Valeur esthétique. Certains procédés de rénovation donnent des résultats inacceptables sur le plan esthétique (voir par exemple la figure 4.5). Les contreventements diagonaux peuvent produire un effet similaire; dans certains endroits, par exemple sur la façade d'un magasin, il est préférable de mettre en place des murs travaillant en cisaillement. Il faut toutefois veiller à ce que les éléments soient suffisamment rigides pour empêcher la constitution d'un étage non rigide qui produira des déplacements de torsion importants.

Valeur patrimoniale. La protection parasismique d'édifices uniques ou à caractère patrimonial peut présenter des défis de taille. Pour conserver à un bâtiment sa valeur patrimoniale, il faut en *modifier le moins possible la structure*, lorsque les éléments et les matériaux de valeur sont relativement peu altérés ou ont subi une altération qui n'est pas incompatible avec le caractère patrimonial du bâtiment et n'en diminue pas la valeur. Cette façon de procéder demande souvent que l'on apporte beaucoup de soin à la conception des détails. Bien entendu, ce genre d'intervention doit permettre d'atteindre les objectifs de protection des personnes, de limitation des dommages et de coût énoncés à la section 3.1.

Au moment de choisir une technique de protection et de concevoir les détails, la valeur patrimoniale est l'un des premiers aspects que l'on doit considérer, en étroite collaboration avec l'architecte, le propriétaire et des professionnels ou organisations spécialisés, par exemple les responsables du Programme de protection du patrimoine mis sur pied par Travaux publics et Services gouvernementaux Canada.

Coûts. Il peut être beaucoup plus coûteux de procéder à la protection parasismique de structures existantes que de réaliser une nouvelle structure résistant aux séismes. Il est parfois possible de réduire ces coûts en utilisant une technique qui n'éliminera qu'un certain nombre de déficiences, ou en mettant en place de nouveaux éléments structuraux qui viendront renforcer l'action des éléments existants. On peut aussi limiter les coûts en choisissant des techniques qui permettent de protéger le bâtiment sans qu'il soit nécessaire de rénover les fondations ou de modifier en profondeur les éléments structuraux.

3.5 Critères de conception et essai de dispositifs spéciaux

Les présentes Lignes directrices ne renferment pas d'exigences précises en matière de protection; elles ne contiennent donc ni critères de conception structurale ni dispositions relatives à l'essai et à l'entretien des dispositifs spéciaux. Aux États-Unis, on travaille actuellement à un grand projet (communément appelé ATC-33) qui aboutira, d'ici 1997, à l'élaboration d'exigences et de critères précis qui pourraient ensuite être adaptés aux pratiques canadiennes. Dans l'intervalle, on peut appliquer les critères énoncés dans les *Lignes directrices pour l'évaluation sismique des bâtiments existants*¹ pour déterminer si un bâtiment doit ou non faire l'objet d'une protection parasismique. Il faudra toutefois porter à 1,0, au moment de la planification des travaux, le facteur de réduction de 0,6 prescrit dans ces lignes directrices, sauf dans les cas où un facteur de réduction plus rigoureux est justifié (risques pour la sécurité des personnes, coûts, limitation des dommages, valeur patrimoniale). Généralement, l'application de facteurs de réduction de charge peut être remplacée par une démarche plus efficace consistant à accomplir les travaux par étapes en se fondant sur la réduction des risques et les coûts. Pour plus de précisions sur les critères de conception et l'essai des dispositifs spéciaux, consulter les documents suivants :

- 1) Pour la protection de bâtiments existants à murs porteurs en maçonnerie non armée, voir l'annexe A des *Lignes directrices pour l'évaluation sismique des bâtiments existants*¹.
- 2) Pour la mise en place de dispositifs d'amortissement et l'isolation par la base, voir le document intitulé *NEHRP Recommended Provisions for the Development of Seismic Regulations for New Buildings*⁵, ainsi que la dernière version du CNB⁴ et des normes de la CSA⁶⁻⁹ (voir aussi les sections 5.1 et 5.2).

Dans le cas des fondations, il est possible d'améliorer la résistance du sol aux forces sismiques de courte durée, conformément aux recommandations des *Lignes directrices pour l'évaluation sismique des bâtiments existants*¹.

Chapitre 4

Techniques classiques de protection

Les techniques classiques de protection parasismique comprennent les méthodes courantes de renforcement, qui consistent : à ajouter des éléments d'assemblage (ancrages, clous, soudures, boulons, tenons, entures, etc.) entre les éléments structuraux existants; à intégrer de nouveaux éléments (éléments d'ossature, de recouvrement, de remplissage) aux éléments existants; à construire de nouveaux sous-systèmes, par exemple des murs travaillant en cisaillement, des contreventements ou des pieux, et à les relier à la structure existante. Une autre technique traditionnelle, que nous n'aborderons pas dans le présent chapitre, consiste à supprimer un ou plusieurs des étages supérieurs pour ramener les forces sismiques qui s'exercent sur le bâtiment à un seuil sécuritaire. Ces techniques de renforcement font appel aux méthodes courantes de construction. Les techniques qui exigent l'utilisation de dispositifs spéciaux ou de nouveaux matériaux, par exemple l'ajout de dispositifs d'amortissement, l'isolation à la base et les enduits de ciment ou de plastique armé de fibre de verre, sont abordées au chapitre 5. Les procédés employés pour rénover les fondations sont décrits au chapitre 6.

On trouvera dans le présent chapitre une brève description des techniques qui peuvent être employées pour protéger la structure d'un bâtiment, ainsi qu'un exposé de leurs avantages relatifs en regard des objectifs et des principes énoncés au chapitre 3.

Les détails montrés aux figures 4-1 à 4-16 sont généraux et ne visent qu'à illustrer des principes. Chaque détail doit être conçu en fonction des conditions réelles d'application.

Il faut apporter le plus grand soin à la conception des détails et s'assurer qu'ils forment des trajets de charge appropriés. En général, on recommande l'utilisation de grands couvre-joints, de longues soudures d'angle ou de montages à plusieurs ancrages pour prévenir l'apparition de forces concentrées à l'interface des éléments existants et des nouveaux.

Au moment de planifier les rénovations, il faut veiller à maintenir l'équilibre structural, car la mise en oeuvre d'une solution inappropriée peut modifier les caractéristiques parasismiques du bâtiment. Ainsi, le fait de remplir de béton un platelage en acier pour en augmenter la résistance peut aussi accroître les charges dues à la pesanteur et les forces qui s'exercent dans certains éléments verticaux, car le diaphragme est alors beaucoup plus rigide.

4.1 Ajout de murs travaillant en cisaillement, de contreventements ou d'ossatures résistant aux moments

Les nouveaux murs travaillant en cisaillement peuvent être en béton armé, en acier ou en maçonnerie armée, ou être formés de contreplaqué sur poteaux. Les nouveaux contreventements sont généralement en acier mais ils peuvent aussi être en bois d'oeuvre. Les nouvelles ossatures résistant aux moments sont le plus souvent en acier ou en béton armé. Ces systèmes peuvent être mis en place dans le bâtiment, sous forme de contreventements ou de murs intérieurs ou extérieurs (voir les figures 4-1a et b), ou encore à l'extérieur du bâtiment, où ils joueront le rôle de contreforts (voir la figure 4-1c). L'avantage des contreforts extérieurs réside dans le fait que la plus grande partie des travaux peut être exécutée de l'extérieur, ce qui réduit au minimum la perturbation des activités et les dommages aux revêtements de finition intérieurs, à l'équipement, etc.

Les nouveaux murs travaillant en cisaillement ou contreventements seront situés de préférence dans le prolongement des fondations, sinon il faudra peut-être rénover les diaphragmes aux endroits où les murs travaillant en cisaillement et les contreventements sont décalés d'étage en étage.

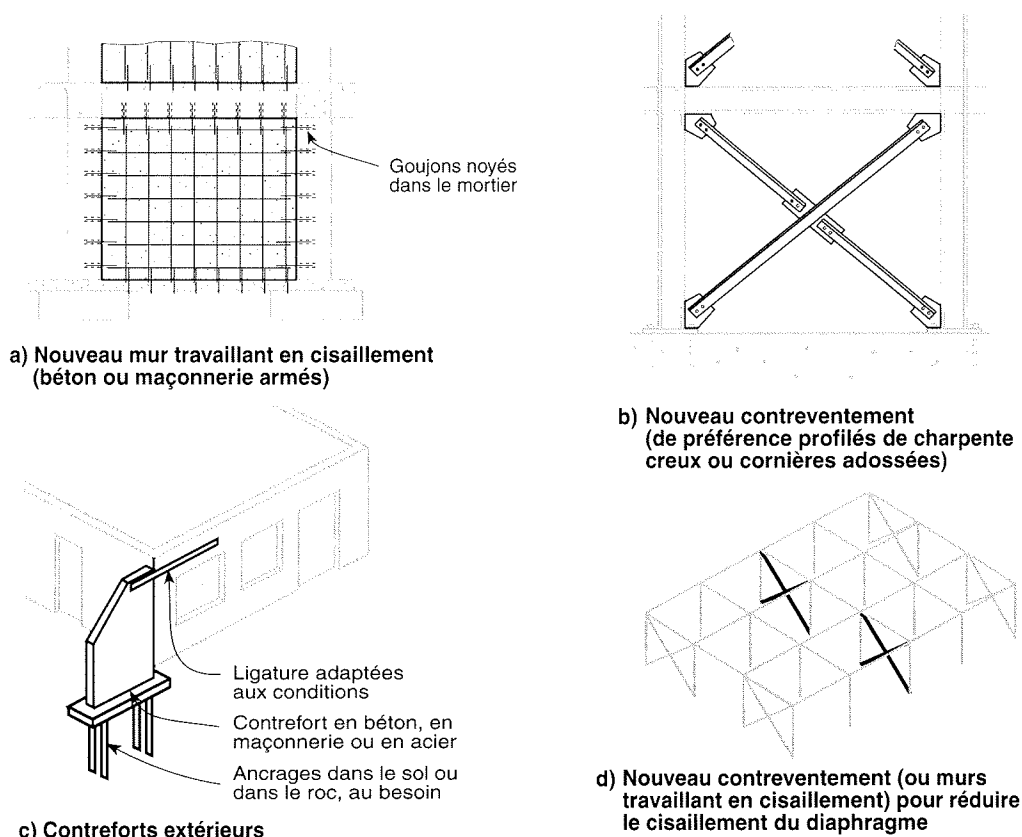


Figure 4-1. Nouveaux murs travaillant en cisaillement ou contreventements

Choix d'un système. Il vaut généralement mieux choisir un nouveau système qui soit compatible avec le système structural existant. Dans les présentes Lignes directrices, la compatibilité désigne ordinairement la compatibilité de réponse charge-déplacement sous une charge horizontale. Ainsi, une nouvelle ossature résistant aux moments et ductile n'est pas compatible avec un mur travaillant en cisaillement qui est fragile. Si le nouveau système se situe dans la même ligne de résistance qu'un système existant ou entre deux systèmes existants semblables reliés par un diaphragme rigide, les systèmes ancien et nouveau sont essentiellement parallèles et devraient, dans la mesure du possible, être compatibles. La compatibilité est moins importante lorsqu'un système rigide est ductile ou si les deux systèmes incompatibles n'agissent pas en parallèle.

De nouvelles ossatures résistant aux moments ou de nouveaux contreventements excentriques seront davantage compatibles avec les ossatures résistant aux moments qui sont en place et, en l'absence de mouvement, ils peuvent être plus efficaces et plus économiques, en particulier si l'on peut

accéder à la structure de l'intérieur. Lorsqu'on songe à ériger de nouvelles ossatures résistant aux moments dans un local existant, il faut considérer la difficulté de manoeuvre de longues poutres dans un espace restreint.

Emplacement. L'emplacement des nouveaux murs travaillant en cisaillement ou des contreventements est une décision importante qui repose sur des considérations structurales ou non structurales.

Les facteurs structuraux dont il faut tenir compte au moment de choisir l'emplacement de nouveaux murs de cisaillement comprennent la symétrie de la structure (effets de torsion), la rénovation éventuelle des fondations, la nécessité d'employer de nouveaux collecteurs ou éléments d'assemblage pour transmettre l'effort tranchant qui s'exerce sur le diaphragme aux nouveaux murs travaillant en cisaillement ou aux contreventements, ainsi que la flexibilité ou la rigidité du diaphragme horizontal. Il est parfois difficile de déterminer ce dernier point; dans ce cas, les deux hypothèses devraient être considérées.

On peut atténuer considérablement les forces sismiques dues aux irrégularités, par exemple les torsions ou le décentrement des éléments de la structure verticale, en choisissant avec soin l'emplacement des nouveaux éléments. Il est possible de réduire les efforts tranchants qu'induisent les secousses sismiques dans les diaphragmes en ajoutant de nouvelles lignes de support latéral, comme l'indique la figure 4-1d.

Parce qu'il est ordinairement coûteux de rénover les fondations, il est préférable de tirer parti des fondations existantes en plaçant les nouveaux murs travaillant en cisaillement ou contreventements à l'intérieur des ossatures existantes ou en utilisant des contreventements légers plutôt que de lourds murs travaillant en cisaillement. Pour réduire les risques de soulèvement et éviter de rénover les fondations, il est parfois avantageux de disposer les contreventements ou les murs travaillant en cisaillement en différents endroits dans un même plan, de manière à prévenir l'apparition d'importants moments de renversement au même endroit. S'il est absolument nécessaire de protéger les fondations, il est alors préférable de placer les nouveaux murs travaillant en cisaillement ou contreventements à une certaine distance des fondations existantes (à l'intérieur ou à l'extérieur du bâtiment), car il est souvent plus facile de mettre en place de nouvelles fondations que de rénover les fondations existantes.

Parmi les facteurs non structuraux qui influent sur le choix de l'emplacement, il faut notamment déterminer si le bâtiment doit demeurer en service pendant la durée des travaux, évaluer les effets de nouveaux murs travaillant en cisaillement ou contreventements sur la fonctionnalité (disposition, éclairage naturel), sur la valeur esthétique et sur le caractère patrimonial du bâtiment. Dans le cas des bâtiments à usage spécial, par exemple les hôpitaux, la perturbation des activités peut devenir un problème majeur et doit être réduite au strict minimum; on peut alors décider de placer les murs travaillant en cisaillement ou les contreventements à l'extérieur du bâtiment, ou dans certains cas, à l'intérieur de nouveaux ajouts au bâtiment. Si, en revanche, le caractère patrimonial du bâtiment doit être préservé, il faudra le plus souvent ériger les murs travaillant en cisaillement ou les contreventements dans des endroits peut visibles à l'intérieur du bâtiment. Les nouveaux éléments peuvent aussi faire obstacle à l'usage fonctionnel du bâtiment et nuire à son aspect et à son éclairage naturel. Cependant, des murs de béton travaillant en cisaillement ou des contreforts bien conçus peuvent comporter d'assez grandes ouvertures.

Il faut donc déterminer l'emplacement des nouveaux murs travaillant en cisaillement ou contreventements en étroite collaboration avec l'architecte et le propriétaire.

On peut se servir d'ossatures en acier pour former un squelette externe qui transmettra aux fondations les forces qui s'exercent sur les diaphragmes. Lorsqu'on met en place de telles ossatures, il faut tenir compte des contraintes d'entretien; il est donc important de choisir des formes appropriées, par exemple des éléments tubulaires ou des profilés carrés creux qui favoriseront le drainage. Il ne faut pas non plus négliger la sûreté du bâtiment, car certaines configurations peuvent faciliter l'escalade.

En résumé, on devrait envisager la mise en place de nouveaux murs travaillant en cisaillement ou contreventements, surtout lorsque le bâtiment existant présente les déficiences suivantes :

- Étages non rigides
- Effort de torsion important
- Glissement des étages supérieurs
- Déformation par chocs
- Maçonnerie ou autres composants sensibles aux glissements d'étage.

4.2 Protection des ossatures résistant aux moments

Dans les zones de sismicité moyenne à élevée, il est souvent plus efficace d'incorporer de nouveaux murs travaillant en cisaillement ou des contreventements aux ossatures existantes que de rénover les ossatures résistant aux moments, bien que ce dernier procédé puisse être efficace dans le cas de bâtiments de faible hauteur, en particulier s'il permet d'éviter de rénover les fondations et si la structure est facilement accessible.

Parmi les techniques classiques employées pour rénover les ossatures résistant aux moments, mentionnons les suivantes.

Ossatures en acier résistant aux moments :

- Plaques de recouvrement, cornières de fixation et éléments raidisseurs (fig. 4-2)
- Couvre-joints, poutres en K
- Enrobage en béton armé (fig. 4-3a)
- Chemisage en acier (fig. 4-3b)
- Contreventement latéral des brides non supportées

Ossatures en béton résistant aux moments :

- Chemisage en acier (fig. 4-3b)
- Enrobage en béton armé (fig. 4-3a) ou en plastique renforcé de fibre de verre (chap. 5)
- Réparation des assemblages préfabriqués.

Les ossatures en acier résistant aux moments sont généralement les plus faciles à protéger mais, si on a recours au soudage, il faut s'assurer que l'acier existant peut être soudé. Lors de récents séismes, on a observé des ruptures fragiles à l'emplacement des soudures, ce qui donne à penser qu'il peut être préférable de réaliser des assemblages boulonnés plutôt que des assemblages soudés. Les ossatures en béton armé et préfabriqué sont plus difficiles à protéger, surtout parce que les détails déficients de renforcement ou d'assemblage posent un problème quasi insurmontable.

Les ossatures résistant aux moments qui comportent un mur de remplissage en maçonnerie demandent une attention particulière. En raison de la rigidité du mur de remplissage, ces systèmes agissent comme des murs travaillant en cisaillement et doivent résister à des forces importantes. Une rupture peut se produire si :

- le mur de remplissage ne présente pas une bonne stabilité latérale;
- le mur de remplissage est écrasé ou fissuré sous l'effet de grandes forces s'exerçant dans le même plan;
- les poteaux de l'ossature cèdent en cisaillement ou en traction.

Les trois stratégies de protection préconisées pour les ossatures avec murs de remplissage sont les suivantes :

- 1) faire en sorte que le mur de remplissage et l'ossature agissent effectivement comme un mur de cisaillement (voir la section 4.4);
- 2) isoler l'ossature en ménageant des vides et en incorporant des matériaux résilients, tout en assurant la stabilité latérale du mur de remplissage;
- 3) intégrer de nouveaux murs de cisaillement ou des contreventements pour augmenter la rigidité de la structure et la résistance du mur de remplissage, tout en veillant à ce que celui-ci ait une stabilité latérale suffisante.

L'efficacité de la première stratégie tient à la résistance des murs de remplissage et celle de la seconde, à la résistance de l'ossature; quant à la troisième stratégie, elle devrait permettre de corriger les deux types de déficiences. La stabilité latérale du mur de remplissage est assurée par contact direct avec l'ossature sur tout le périmètre, grâce à des supports latéraux placés en partie supérieure (voir la figure 4-16b), à des montants intermédiaires ou à un écran de cimentation réalisé à l'aide d'enduits à armature en treillis ou de ciments renforcés de fibre de verre (voir la section 5.3). Les murs de remplissage peuvent aussi être remplacés par d'autres matériaux.

Si une paroi de mur extérieur en maçonnerie se trouve à l'extérieur du périmètre de l'ossature, cette paroi peut présenter une certaine désagrégation au niveau du joint vertical. Dans bon nombre de murs en maçonnerie à plusieurs parois, les liaisons entre les parois sont insuffisantes (absence de boutisses ou de joints verticaux). Il faut tenir compte de cette déficience lors de la mise au point d'une technique de protection.

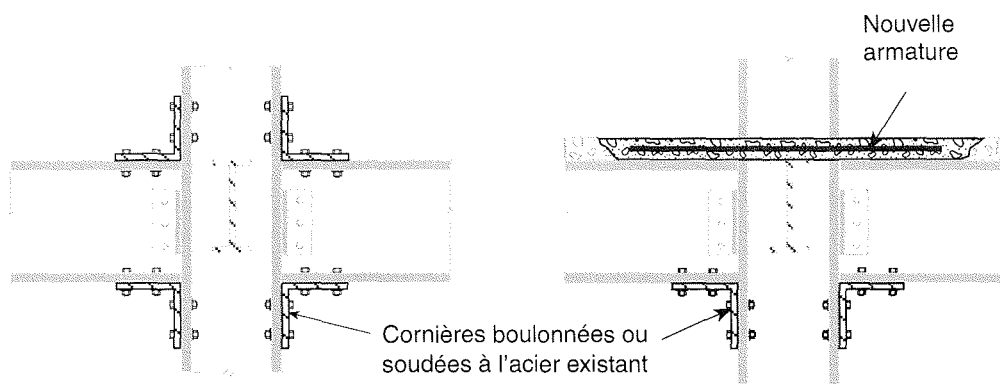
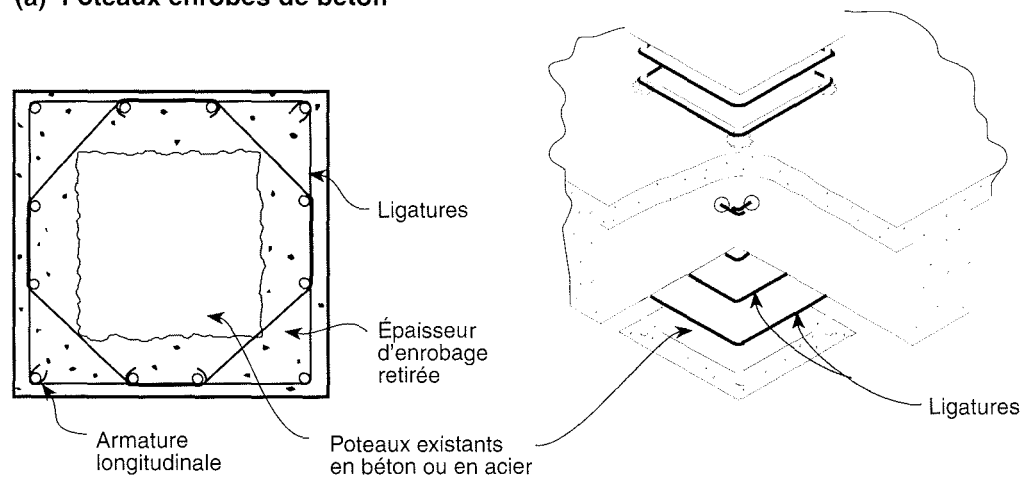


Figure 4-2. Assemblages, nouveaux ou améliorés, résistants aux moments

(a) Poteaux enrobés de béton



(b) Chemisage d'acier

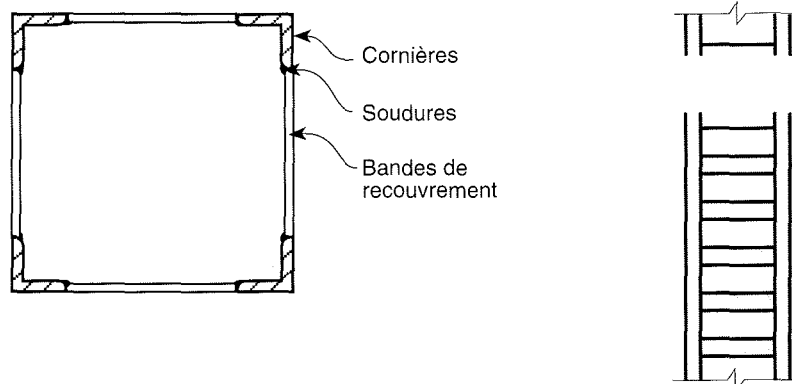


Figure 4-3. Enrobage ou chemisage des éléments existants

4.3 Protection d'une ossature contreventée

Les ossatures contreventées existantes sont ordinairement en acier mais elles peuvent aussi être en bois. Les différents types d'ossatures contreventées sont illustrés à la figure 4-4. Les ossatures à contreventement diagonal sont surtout typiques des anciens bâtiments : le contreventement peut être assuré par des tiges de tension flexibles (qui ne travaillent qu'en traction) ou par des éléments rigides qui travaillent à la fois en compression et en traction. Les contreventements diagonaux rigides qui sont reliés en leurs points d'intersection présentent généralement un comportement ductile pendant un séisme. Cependant, les contreventements diagonaux qui ne travaillent qu'en tension affichent une tenue insuffisante en raison de l'élongation par fluage et du claquage des barres distendues. Parmi les autres types de contreventements représentés à la figure 4-4, mentionnons la poutre en K et le contreventement en V ou en V inversé, qui ont une performance beaucoup moins bonne que les contreventements diagonaux rigides. En effet, le flambage en compression d'un contreventement peut induire d'importantes forces non équilibrées perpendiculairement au poteau ou à la poutre, à la jonction des contreventements. On a mis au point un nouveau type de contreventement excentrique qui a un comportement sismique extrêmement ductile. Ce type de contreventement est examiné à la section 5.1.

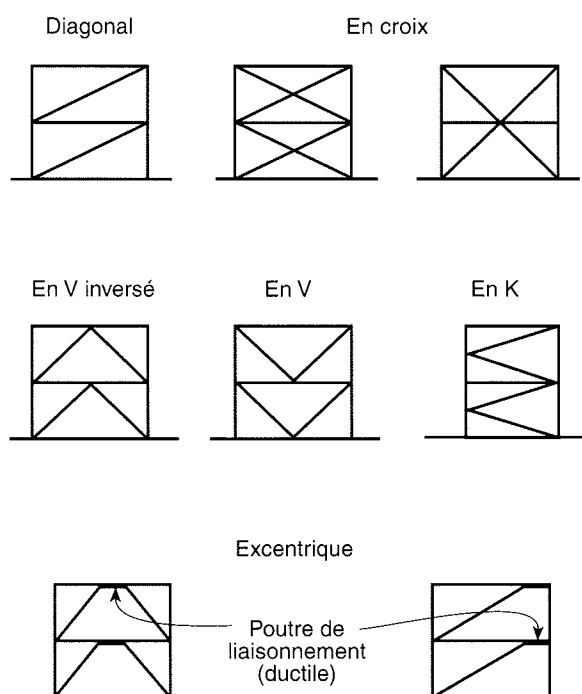


Figure 4-4. Types de contreventement

Les déficiences les plus souvent observées dans les ossatures contreventées existantes sont le manque de résistance et de ductilité des assemblages ou des éléments du système de contreventement (y compris les poteaux et les poutres), la configuration inefficace du système de contreventement et un mouvement excessif dans les zones de sismicité élevée.

Il existe deux stratégies de protection. On peut protéger le système de contreventement existant ou ajouter de nouveaux contreventements ou des murs travaillant en cisaillement. Les deux méthodes doivent être évaluées à la lumière des objectifs et des principes énoncés au chapitre 3.

Dans le cas de bâtiments de plus de trois étages situés dans des zones de sismicité moyenne à élevée, il faudrait envisager le remplacement des contreventements travaillant uniquement en traction par un autre système.

Voici quelques techniques classiques pour protéger des ossatures contreventées :

- renforcement ou remplacement des liaisons
- renforcement ou remplacement des éléments
- remplacement des contreventements existants par un système plus efficace (fig. 4-1b)
- protection de l'ancrage à la fondation.

Le choix d'une technique dépendra de l'accessibilité et de la configuration du contreventement; les contreventements en K, en V ou en V inversé peuvent être difficiles à renforcer et doivent, dans certains cas, être remplacés par un autre type de contreventement.

Il est parfois malaisé de protéger des contreventements en bois, et les éléments fortement fissurés doivent être remplacés. La ductilité des contreventements en bois est régie par les détails d'assemblage, et l'on obtient souvent les meilleurs résultats en réalisant des assemblages qui confèrent à la structure un comportement ductile.

4.4 Protection des murs travaillant en cisaillement

On trouve généralement dans les bâtiments existants quatre types de murs travaillant en cisaillement : en béton ou maçonnerie armés, en béton préfabriqué, en maçonnerie non armée et à ossature à colombages revêtue de contreplaqué. La tenue de ces murs varie considérablement. Ce sont les murs à revêtement en bois et les murs en béton ou maçonnerie armés qui donnent les meilleurs résultats, le béton préfabriqué étant légèrement moins performant, la maçonnerie creuse ou en blocs donnant des résultats plutôt médiocres et les carreaux d'argile creux non armés se classant au tout dernier rang en raison de leur friabilité.

Étant donné que l'érection de nouveaux murs travaillant en cisaillement nécessite souvent la mise en oeuvre de nouvelles fondations, il est parfois préférable d'améliorer la résistance et la ductilité des murs existants. Cependant, lorsque le bâtiment comporte d'importantes irrégularités qui nuisent au transfert efficace des charges et entraînent des efforts élevés de torsion, il vaut mieux envisager la mise en place de nouveaux murs ou de contreventements.

Voici quelques techniques classiques pour la protection des murs de cisaillement existants :

Béton ou maçonnerie armés :

- Murs de remplissage (fig. 4-5)
- Chapes en béton armé (fig. 4-6a)
- Cuirassement métallique ou recouvrement des contreventements
- Poutres d'accouplement
- Post-tension

Béton préfabriqué :

- Murs de remplissage (fig. 4-5)
- Chapes en béton armé (fig. 4-6a)
- Renforcement des assemblages
- Pilastres/poteaux
- Tirants

Maçonnerie non armée :

- Chapes de béton armé (fig. 4-6a)
- Renforcement des éléments verticaux (fig. 4-7)
- Pilastres/poteaux
- Enduits ou ciments à armature en treillis ou renforcés de fibre de verre
- Remplacement

Bois :

- Clouage supplémentaire
- Recouvrements en contreplaqué ou en panneaux de copeaux étroits (fig. 4-6b)
- Tirants et ancrages métalliques.

Éléments de remplissage (béton ou maçonnerie armés)

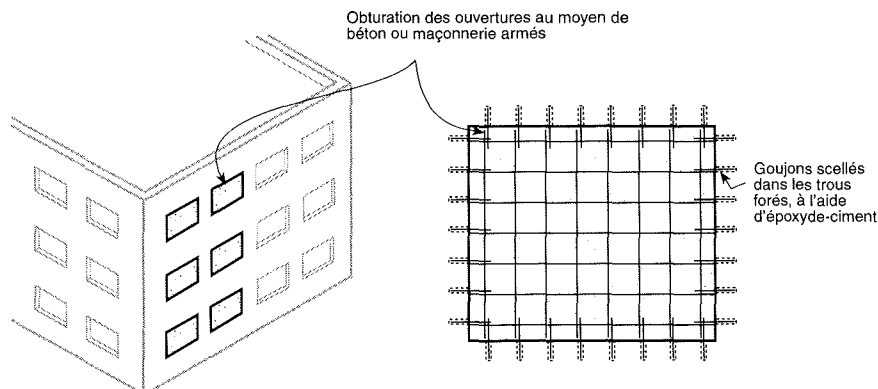


Figure 4-5. Éléments de remplissage (verticaux)

(a) Recouvrement en béton armé

(b) Recouvrement en contreplaqué

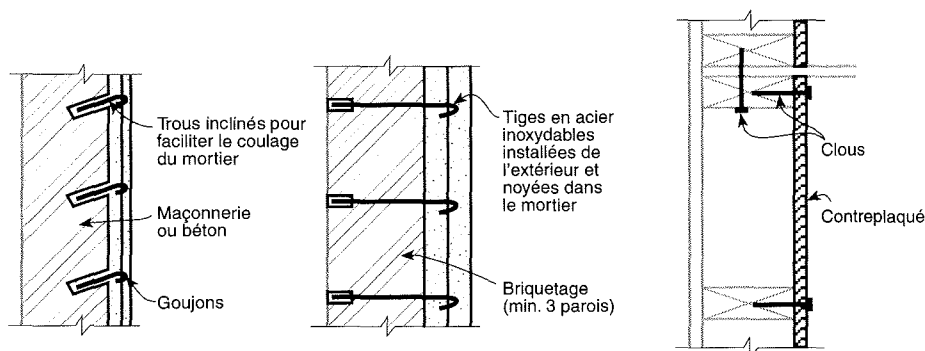
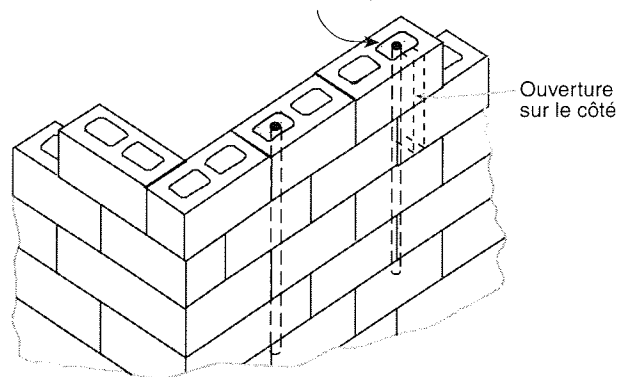


Figure 4-6. Recouvrements (verticaux)

(a) Maçonnerie de blocs

Barres insérées directement dans l'ouverture supérieure ou glissées à travers une ouverture découpée sur le côté



(b) Évidage d'une maçonnerie de brique

Maçonnerie évidée et dotée de barres d'armature noyées dans le mortier

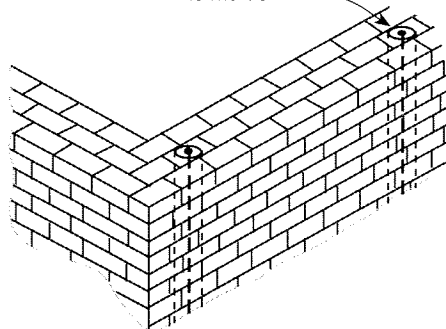
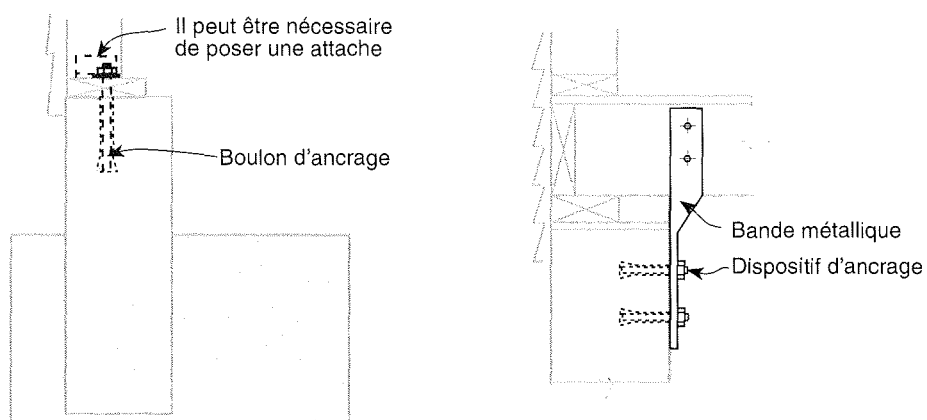


Figure 4-7. Armature de la maçonnerie existante

(a) Ancrage aux fondations – Ossature en bois



(b) Tirants verticaux – Ossature en bois

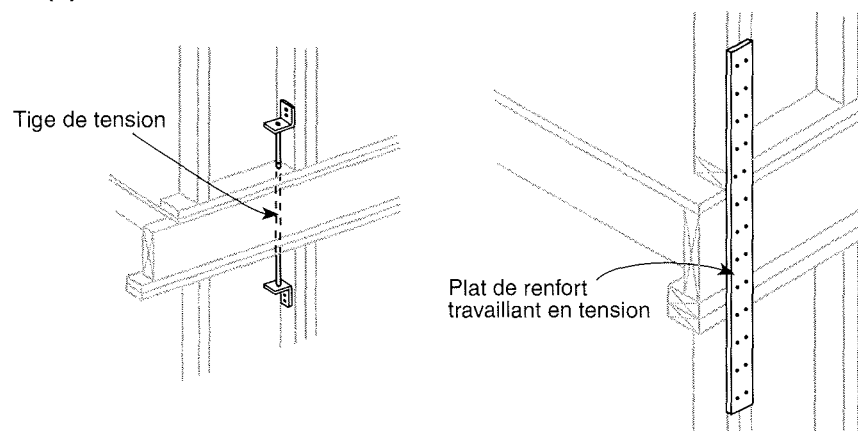


Figure 4-8. Tirants verticaux et ancrage

Les murs de remplissage sont souvent économiques mais ils peuvent être inacceptables pour des raisons esthétiques. Les recouvrements et enduits peuvent être plus discrets s'ils sont appliqués de l'extérieur, mais si l'on doit préserver le caractère patrimonial ou l'aspect du bâtiment, il faut généralement les appliquer de l'intérieur ou sur les murs intérieurs travaillant en cisaillement. Les chapes en béton augmentent la résistance au cisaillement et fournissent un support latéral à la maçonnerie existante, mais ce procédé peut nécessiter la rénovation des fondations. La mise en place de poutres d'accouplement entre des murs travaillant en cisaillement qui présentent un comportement ductile est parfois avantageuse, car non seulement ces éléments réduisent-ils les forces de renversement qui s'exercent dans les murs mais ils améliorent aussi la ductilité globale de l'assemblage. Il faut porter une attention particulière aux effets possibles d'un mouvement différentiel entre les nouveaux recouvrements ou murs de remplissage et les murs travaillant en cisaillement, par exemple l'apparition de fissures de retrait et de cambrures.

Il faut assurer la continuité du mur travaillant en cisaillement en réalisant un trajet de charge ininterrompu en cisaillement, en traction et en compression. On peut renforcer les murs en béton qui présentent une faiblesse localisée en ajoutant des tenons en béton ou en boulonnant les éléments d'ossature en acier. Pour augmenter la résistance des liaisons existantes, on peut aussi ancrer les murs de cisaillement aux fondations à l'aide de tirants et les transformer ainsi en porte-à-faux verticaux, ou réaliser de nouveaux assemblages qui transmettront les efforts tranchants. Il peut être nécessaire de mettre en place des tirants, des entures et des liaisons capables de répartir les efforts tranchants dans les murs en bois travaillant en cisaillement, en particulier s'il s'agit de murs de faible largeur; il n'est cependant pas toujours nécessaire d'utiliser des tirants dans le cas de longs murs à colombages et à revêtement en bois travaillant en cisaillement.

On peut augmenter la résistance des murs en blocs de béton aux forces qui s'exercent en plan et hors plan en plaçant une armature verticale dans les alvéoles (fig. 4-7a). On retire le béton de la poutre de liaisonnement du toit, puis on fait passer par l'ouverture remplie de mortier une barre d'armature qui est ensuite ancrée aux fondations. Il est également possible d'ouvrir à la scie les éléments situés près du sommet de chaque étage et d'y introduire des barres d'armature. Les alvéoles ainsi armées sont ensuite remplies de béton. Le cas échéant, il faut découper avec soin les poutres de liaisonnement intermédiaires. L'avantage de ce procédé est que les travaux peuvent être exécutés de l'extérieur. Bien que la façade puisse conserver quelques traces de cette remise en état, elle est généralement recouverte d'un pare-air, d'un isolant et d'un nouveau revêtement de finition. On peut appliquer la même technique aux ouvrages de maçonnerie en brique (d'une épaisseur d'au moins 300 mm); il s'agit alors de forer des alvéoles verticales de 100 mm de diamètre dans la maçonnerie, de placer des barres d'armature dans les alvéoles et de remplir celles-ci de mortier (fig. 4-7b). Cette technique permet d'accroître la stabilité latérale et la résistance au balancement des murs de faible épaisseur. Dans les deux méthodes, les armatures peuvent être postcontraintes.

Il est aussi possible de protéger un mur en maçonnerie non armée par l'application de crépis renforcés de fibre de verre (voir le chapitre 5) et la mise en place d'un recouvrement de béton armé; dans ce dernier cas, on peut retirer la paroi extérieure pour réduire le poids et l'encombrement du mur.

4.5 Protection des diaphragmes existants

Les diaphragmes existants posent généralement un problème dans les zones de sismicité moyenne à élevée; cependant, le simple transfert de l'effort tranchant du diaphragme à la structure verticale peut être difficile à réaliser dans les zones de faible sismicité. Les séismes passés montrent que la rupture du diaphragme découlait le plus souvent de la défaillance des éléments d'assemblage que de la faiblesse du diaphragme lui-même.

Les deux types de diaphragmes les plus courants sont les diaphragmes flexibles, formés d'un platelage en bois ou en métal, et les diaphragmes rigides, comme les dalles en béton, les platelages en métal remplis de béton ou les structures de planchers à contreventements horizontaux. Les diaphragmes rigides transmettent les forces d'inertie des étages à la structure verticale, en fonction de la rigidité relative des éléments verticaux. Les diaphragmes flexibles tendent à se comporter comme des poutres placées entre des supports latéraux et ils transmettent les forces d'inertie des étages aux supports latéraux. Dans les zones de sismicité élevée, les diaphragmes risquent de subir des déformations excessives qui peuvent entraîner l'effondrement des murs en maçonnerie (voir l'annexe A des lignes directrices pour l'évaluation sismique¹).

Les diaphragmes agissent comme des poutres horizontales tant en flexion qu'en cisaillement. Il est donc important d'en assurer l'intégrité. À cette fin, on peut utiliser des barres de liaison ou des membrures continues près du périmètre, des entures ou des armatures au niveau des angles rentrants, ainsi que des collecteurs qui transmettront à la structure verticale les efforts tranchants qui s'exercent sur le diaphragme.

Voici quelques techniques classiques pour protéger les diaphragmes existants :

Diaphragmes en bois d'oeuvre :

- Clouage, agrafage des diaphragmes existants
- Recouvrement de contreplaqué (fig. 4-9a)
- Murs de refend (voir annexe A des lignes directrices pour l'évaluation sismique¹)
- Entures/entretoises pour membrures, collecteurs (fig. 4-12 et 4-14)
- Nouvelles membrures, nouveaux collecteurs

Platelages diaphragmes en acier :

- Soudage
- Recouvrement de béton armé (fig. 4-9b)
- Contreventements en acier (fig. 4-10)
- Boulons de cisaillement, boulons d'ancrage, goujons pour le transfert de l'effort tranchant (fig. 4-11)
- Membrures et éléments d'ossature en acier (fig. 4-11)

Diaphragmes à contreventements en acier :

- Remplacement, armature ou adjonction d'éléments d'ossature ou d'assemblage
- Contreventement secondaire
- Platelage en acier ou recouvrement de béton armé avec boulons de cisaillement (fig. 4-9b)

Diaphragmes en béton :

- Recouvrement en béton armé (fig. 4-9c)
- Ouvertures aux murs de remplissage;
- Ajout de goujons pour le transfert de l'effort tranchant (fig. 4-9c et 4-13)
- Mise en place de collecteurs sous les diaphragmes
- Nouvelles membrures, nouveaux éléments d'ossature (fig. 4-13 et 4-14).

Il est ordinairement plus économique de protéger les couvertures diaphragmes en bois en travaillant la face supérieure plutôt que de placer des contreventements ou du contreplaqué sur la sous-face. En effet, les travaux exécutés sur la sous-face peuvent être gênés par les installations mécaniques et électriques, le réseau d'extincteurs automatiques et les systèmes architecturaux. Cependant, il est parfois plus économique de protéger les platelages diaphragmes en acier en installant sur la sous-face des contreventements horizontaux.

Le coût des travaux et la mesure dans laquelle l'usage du bâtiment est perturbé dépendent largement de l'accessibilité des composants à protéger (enlèvement et remplacement des éléments non structuraux, par exemple les planchers et les cloisons) et de la superficie de l'aire de plancher à modifier. Les chapes en béton armé présentent l'inconvénient d'augmenter l'élévation du plancher (ce qui nécessite un ajustement des escaliers, des portes, etc.), les charges permanentes et, dans certains cas, l'effort de torsion lié aux diaphragmes rigides.

Il est parfois possible de se dispenser de modifier considérablement le diaphragme en ajoutant des murs travaillant en cisaillement ou des contreventements verticaux (voir la fig. 4.1).

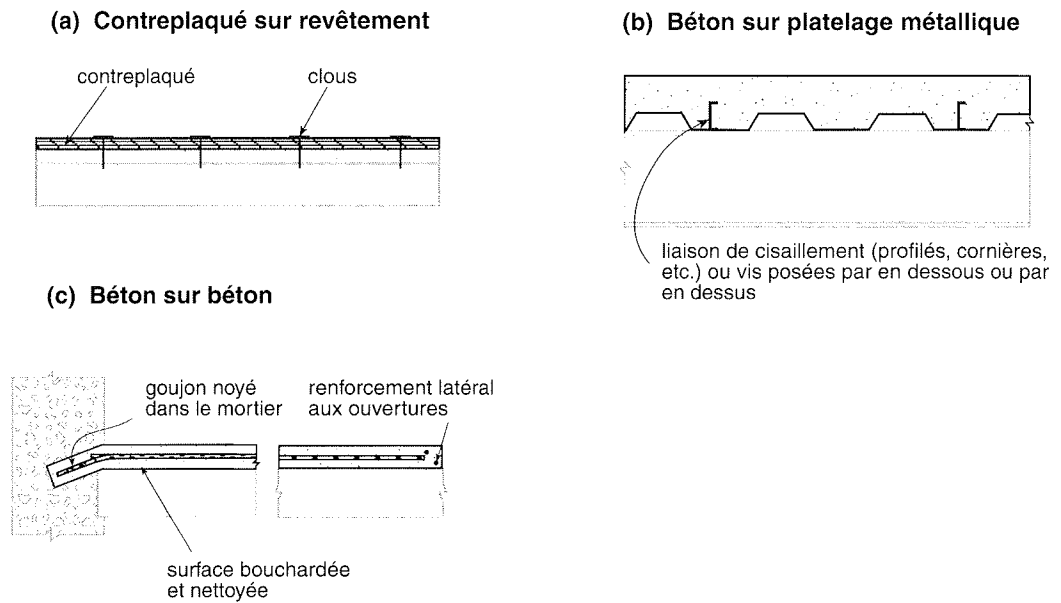
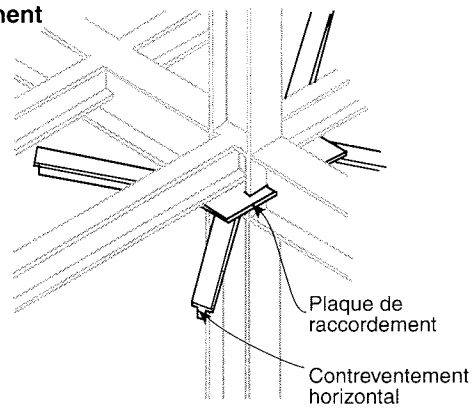


Figure 4-9. Recouvrements pour diaphragmes

(a) Nouveau contreventement pour ossature en acier



(b) Nouveau contreventement pour solives reposant sur des murs de béton ou de maçonnerie

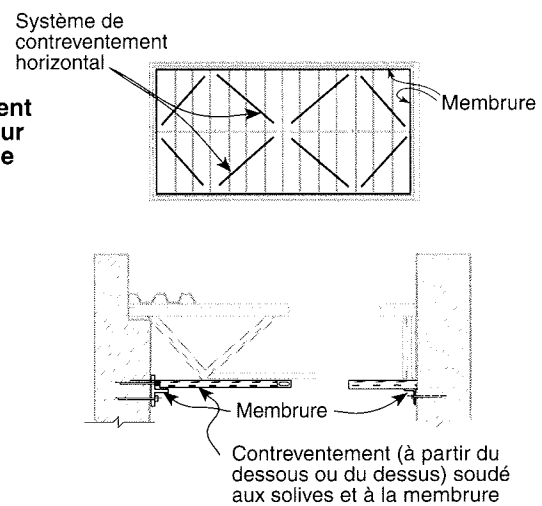


Figure 4-10. Contreventement des diaphragmes

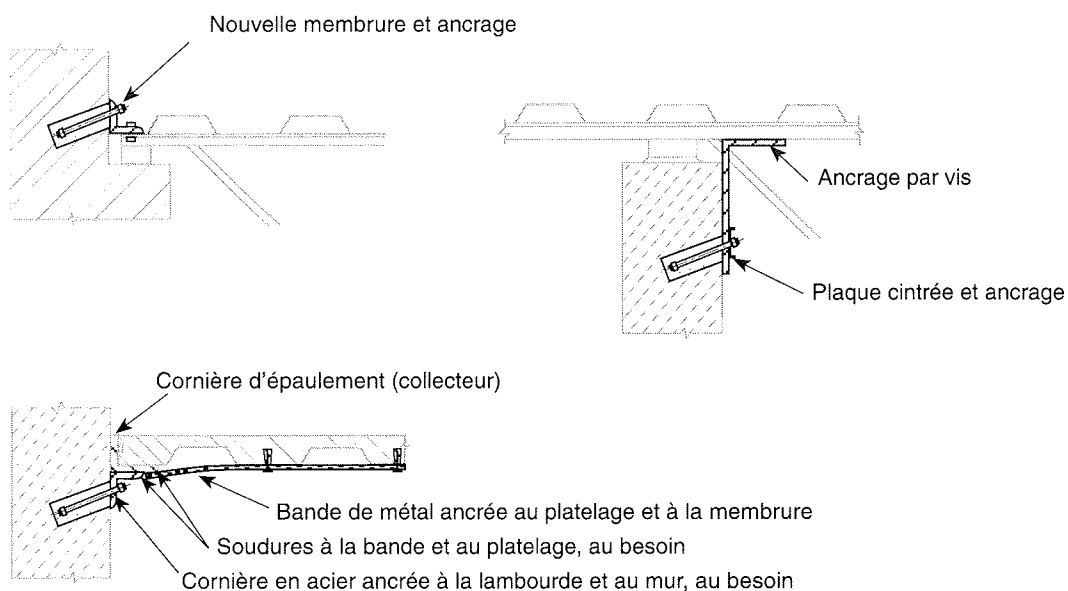


Figure 4-11. Transmission de l'effort tranchant et membrures (platelages métalliques diaphragmes)

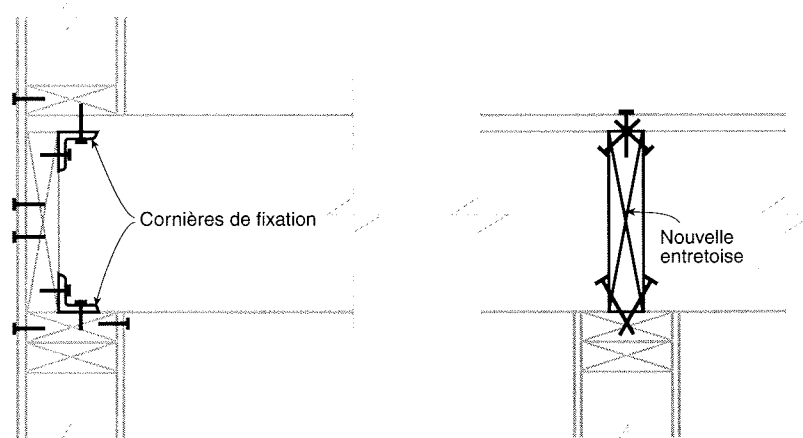


Figure 4-12. Transmission de l'effort tranchant et membrures (diaphragme en bois)

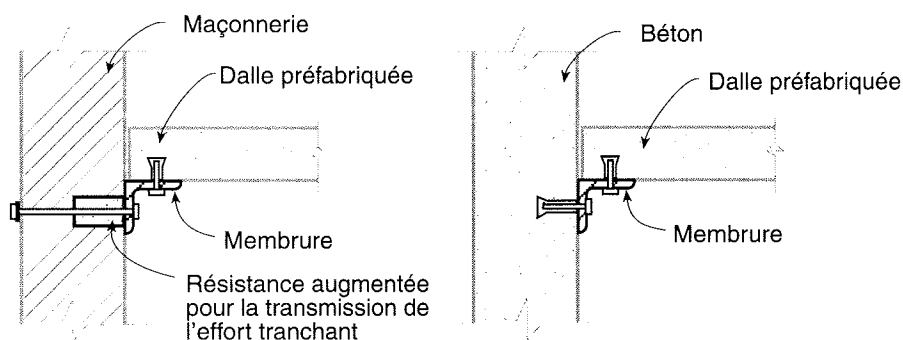
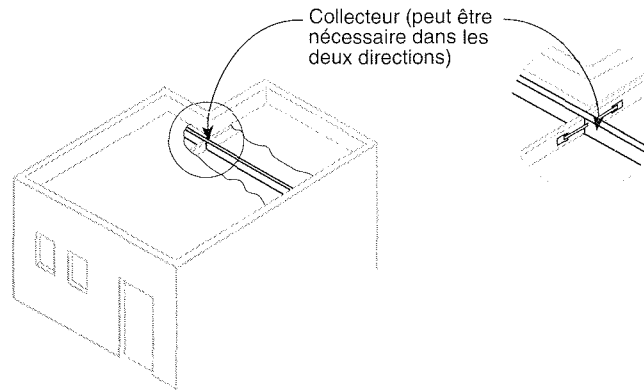
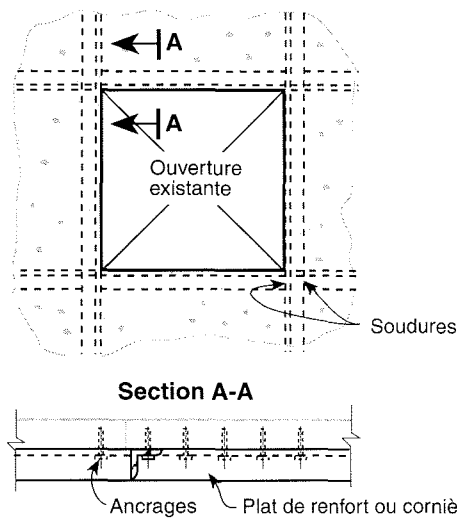


Figure 4-13. Transmission de l'effort tranchant et membrures (diaphragmes en béton)

(a) Collecteur dans un diaphragme en bois



(b) Renforcement d'une ouverture



(c) Enture de poutre en lamellé-collé

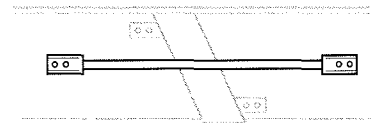


Figure 4-14. Collecteur et entures pour diaphragmes

4.6 Protection des supports latéraux de murs et de parapets

Dans les bâtiments existants, l'ancrage insuffisant des murs et la présence de parapets non supportés ayant un rapport d'élancement élevé sont les plus notables des déficiences qui présentent un danger pour la vie. Généralement, la correction de ces déficiences coûte beaucoup moins cher et cause nettement moins de désagréments que la rénovation des autres éléments de la structure du bâtiment.

Il faut considérer tant les murs non porteurs que les murs porteurs. Les cloisons en maçonnerie non armée et à colombages sont souvent construites le long des voies d'évacuation et peuvent supporter des plafonds et d'autres éléments non structuraux.

Les techniques employées pour l'ancrage et le support latéral des murs et des parapets sont relativement simples, mais il faut s'assurer que les détails sont conçus pour faciliter le transfert des charges et que les travaux sont correctement exécutés. Ainsi, il faut éviter de réaliser des liaisons qui sont tributaires de la tension perpendiculaire au grain des éléments en bois qui relient le dispositif d'ancrage au diaphragme. Par ailleurs, lorsque les éléments qui assurent le support latéral en partie supérieure d'un mur interdisent la déflexion verticale de la structure sus-jacente, celle-ci doit alors agir comme un mur porteur.

Voici quelques techniques pour rénover les supports latéraux des murs et des parapets :

Murs extérieurs en maçonnerie ou en béton :

- Boulons d'ancrage (fig. 4-11, 4-13 et 4-15)
- Goujons noyés (fig. 4-9c et 4-13)
- Recouvrements (fig. 4-6a) ou murs de retenue

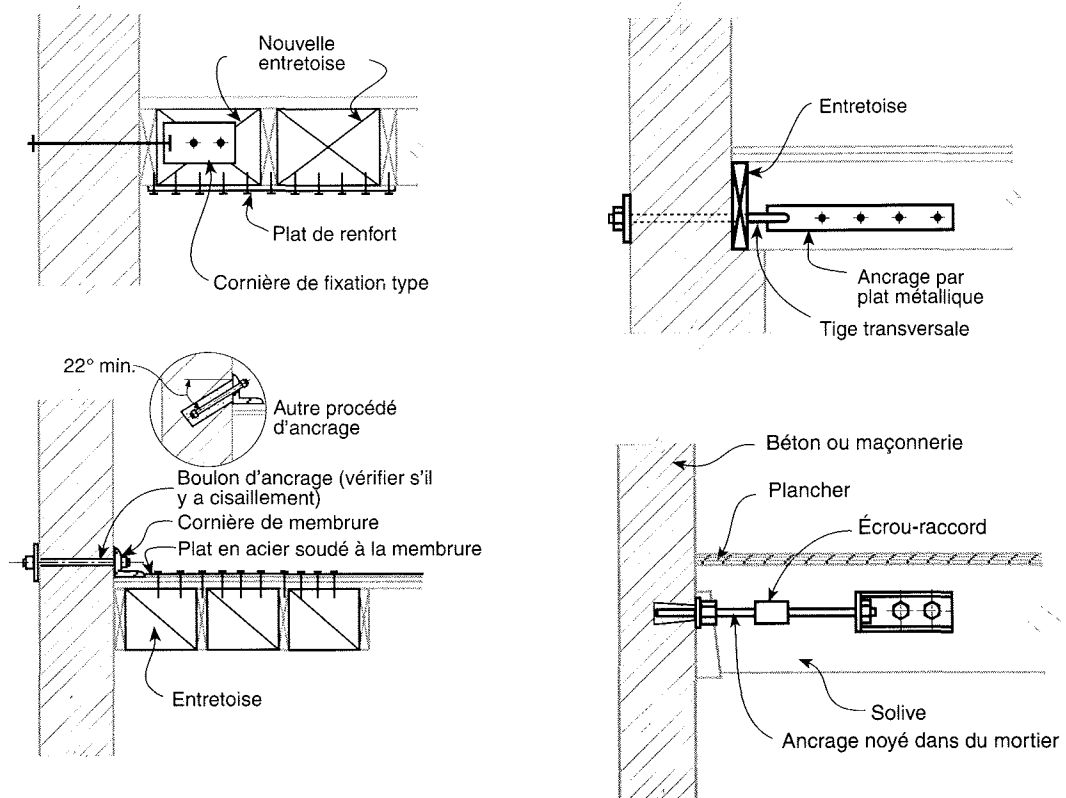


Figure 4-15. Appui latéral des murs extérieurs

Murs-rideaux extérieurs :

- Éléments d'assemblage qui autorisent le gauchissement oblique

Parapets en maçonnerie et autres éléments en saillie :

- Contreventement et ancrage (fig. 4-16a)
- Réduction de la hauteur du parapet

Placages :

- Dispositifs d'ancrage pour placages

Cloisons :

- Supports latéraux (fig. 4-16b)
- Recouvrements ou murs de retenue.

Comme on recherche toujours un comportement ductile, il vaut mieux utiliser un plus grand nombre de dispositifs d'ancrage de petite taille que des dispositifs plus gros à intervalles distants.

Pour réduire au minimum les désagréments causés par les travaux, il est recommandé de procéder à l'ancrage des murs extérieurs depuis l'extérieur. Les travaux devront être exécutés de l'intérieur lorsque les composants à rénover sont inaccessibles de l'extérieur ou aux endroits où l'aspect des dispositifs d'ancrage est inacceptable.

Dans de nombreux cas, il est nécessaire non seulement de rénover les assemblages mais aussi de corriger les déficiences du mur proprement dit. Ainsi, les murs en maçonnerie non armée peuvent exiger le support supplémentaire d'une armature verticale (fig. 4-6a) ou un renforcement à la jonction des poteaux et des poutres.

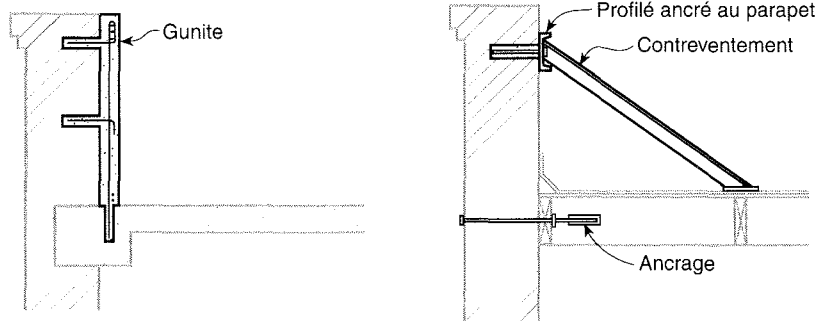
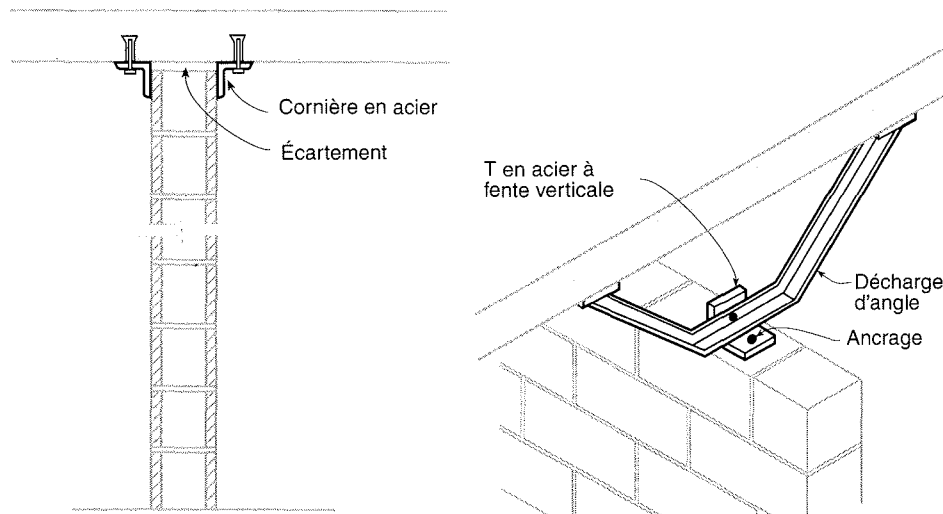
(a) Appui de parapet en maçonnerie**(b) Cloisons en maçonnerie**

Figure 4-16. Appui latéral des parapets et des cloisons

Chapitre 5

Techniques spéciales de protection

Le présent chapitre donne des indications sur trois nouvelles techniques de protection : l'ajout de dispositifs d'amortissement, l'isolation par la base et l'application d'enduits et de ciments renforcés à la fibre de verre. Il renvoie aussi aux méthodes employées pour l'évaluation des bâtiments qui comportent des dispositifs spéciaux d'amortissement et d'isolation. Ces techniques et ces dispositifs sont relativement nouveaux et en sont encore à divers stade de mise au point. Par conséquent, les indications fournies ici sont surtout qualitatives, et il faudra faire appel à des experts-conseils pour obtenir des précisions.

Ce chapitre comporte des renvois à des documents plus détaillés sur chacune des techniques spéciales abordées.

5.1 Ajout de dispositifs d'amortissement

Il est bien connu qu'un comportement structural non élastique dissipe l'énergie sismique captée par la structure du bâtiment. Les forces latérales de calcul auxquelles la structure doit résister sont donc réduites. Le CNB tient compte de ce phénomène en préconisant l'application d'un facteur de réduction R dont la valeur se situe entre 1 et 4, la valeur la plus élevée correspondant à la plus forte dissipation d'énergie. Le comportement inélastique de la structure n'est pas le seul facteur de dissipation de l'énergie. Cette dissipation peut aussi résulter de la déformation inélastique des éléments non structuraux du bâtiment et du frottement de glissement entre ces éléments. Dans les critères d'évaluation applicables aux bâtiments en maçonnerie non armée (annexe A des lignes directrices pour l'évaluation sismique¹), on tient compte de cette forme de dissipation liée à la réponse inélastique des diaphragmes et des cloisons en bois.

On peut incorporer dans un bâtiment des dispositifs supplémentaires d'amortissement qui en atténuent la réponse dynamique en éliminant la plus grande partie de l'énergie transmise à la structure par les secousses sismiques. Lorsque ces dispositifs sont correctement mis en place, la protection parasismique ne repose plus, comme par le passé, sur la ductilité des principaux éléments structuraux mais sur la dissipation de l'énergie par ces dispositifs. Ils contribuent à protéger le bâtiment contre des dommages importants ou un effondrement en empêchant tout effet de résonance et en réduisant ainsi la déformation inélastique de la structure.

En ajoutant des dispositifs d'amortissement, on réduit l'amplification dynamique des mouvements sismiques du sol à l'intérieur du bâtiment, et en particulier le mouvement différentiel des étages. Si toutefois la structure existante présente une forte rigidité latérale (p. ex. un mur travaillant en cisaillement) et une grande fragilité, les dispositifs ne peuvent généralement pas fournir un travail utile suffisant pour réduire les dommages au bâtiment. Si la structure offre une bonne flexibilité latérale (p. ex. une ossature résistant aux moments), les dispositifs peuvent alors fournir le travail nécessaire pour réduire considérablement le mouvement différentiel des étages qui se produit inévitablement au cours d'un séisme, et prévenir en partie les dommages au bâtiment. Si par ailleurs des murs de remplissage rigides et fragiles sont reliés à une structure flexible, ces murs agiront comme des murs fragiles travaillant en cisaillement et céderont avant que les dispositifs n'aient pu fournir un travail efficace. Il faut alors détailler les murs de remplissage et les panneaux rigides de manière à permettre un glissement d'étage ou, s'ils sont suffisamment résistants, relier ces murs à l'ossature au moyen de dispositifs d'amortissement pour qu'ils participent à la dissipation de l'énergie.

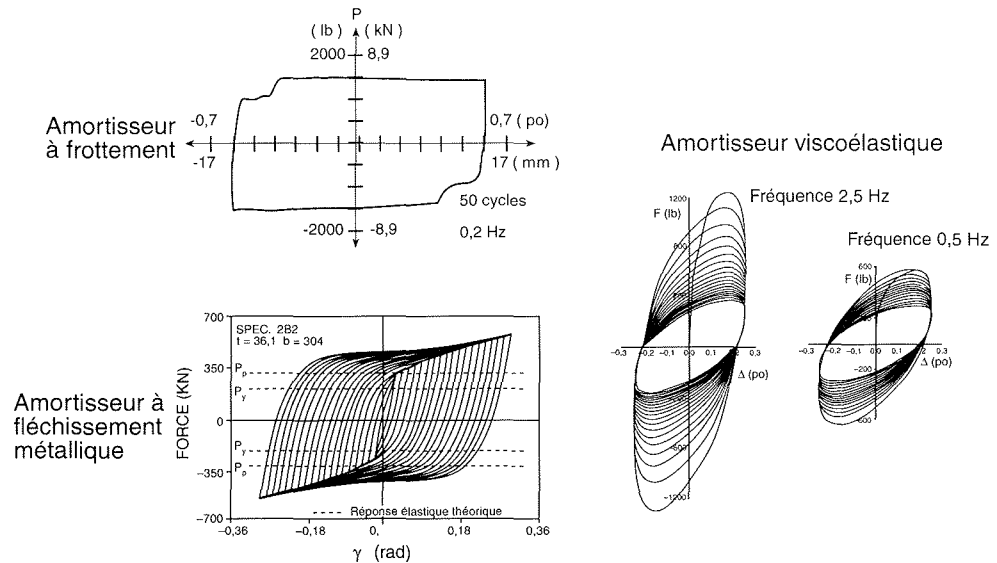


Figure 5-1. Courbes d'hystérésis des amortisseurs (EERI, 1993 - p. 459; CTA, 1993 - p. 461, 532)

On a récemment employé ces dispositifs d'amortissement pour la protection parasismique de nombreux bâtiments au Canada, aux États-Unis, au Japon, au Mexique et dans d'autres pays. Dans ce type de rénovation, il n'est pas nécessaire de modifier les fondations, ce qui constitue un avantage incontestable. Les dispositifs d'amortissement sont ordinairement incorporés au contreventement, nouveau ou existant, de la structure du bâtiment, dans les assemblages, entre les panneaux non structuraux et la structure ou à tout autre endroit où des secousses sismiques produiront des mouvements différentiels.

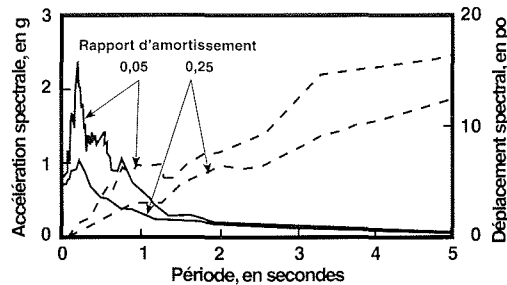
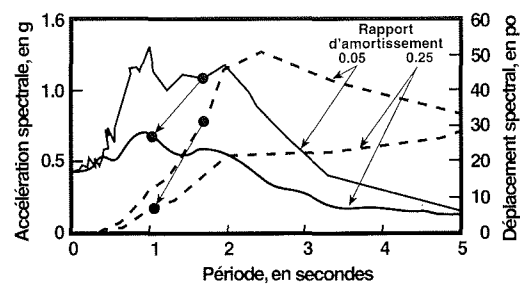
Les dispositifs d'amortissement fonctionnent selon trois principes : le frottement, le fléchissement métallique et la viscosité ou viscoélasticité. Les différents types et leurs applications sont décrits dans *Passive Energy Dissipation*¹⁰ et *Proceedings of Seminar on Seismic Isolation*¹¹. Les courbes d'essai d'hystérésis représentées à la figure 5-1 donnent une indication du pouvoir de dissipation de l'énergie qu'ont ces dispositifs.

Les contreventements excentriques abordés à l'annexe D de la norme S16.16 de la CSA dissipent aussi l'énergie, mais comme ces éléments font partie intégrante de la structure, ils n'ajoutent pas à la capacité de dissipation et ne sont pas faciles à remplacer.

Il est important d'éprouver les dispositifs d'amortissement avant de les mettre en place afin de s'assurer qu'ils se comportent comme prévu. Il faut aussi veiller à ce qu'ils continuent de remplir correctement leur fonction pendant toute la vie utile du bâtiment.

Principes de conception et analyse.

On peut se faire une idée générale de l'incidence d'un amortissement supplémentaire sur la réponse de la structure en examinant le spectre de réponse sismique pour un amortissement normal (seuil critique de 5 p. 100) et un amortissement supplémentaire (seuil critique de 25 p. 100 environ), comme l'indique la figure 5-2 pour deux cas types. La figure 5-2 montre que si l'on rénove une structure sans en modifier la période, l'atténuation de la réponse est égale à la différence entre les valeurs minimale et maximale du spectre de réponse correspondant à la fréquence fondamentale du bâtiment. Cependant, comme les dispositifs d'amortissement augmentent la rigidité du bâtiment, ils tendent donc à en réduire la période T , en plus d'en accroître la résistance aux vibrations. Ils offrent donc deux avantages : ils atténuent l'amplification dynamique à la fréquence propre du bâtiment en apportant un amortissement supplémentaire, et ils réduisent le déplacement en écourtant la période. Cette double action ne se traduit pas nécessairement par une diminution de l'effort tranchant à la base, mais la protection n'en est pas pour autant réduite, car les dispositifs d'amortissement contreventés absorbent une partie de la charge latérale. La figure 5-2b montre qu'un accroissement de la rigidité latérale et de l'amortissement a un effet particulièrement bénéfique sur les structures érigées sur un sol meuble.

(a) Séisme survenu au Chili en 1985
(Enregistrement de Lollleo - Sol résistant)(b) Séisme survenu à Loma Prieta
(Enregistrement de Santa Cruz - Sol meuble)Figure 5-2. Exemples de spectres de réponse sismique pour l'accélération et le déplacement
(EERI, 1993 - p. 629)

— — — — — Accélération spectrale — — — — — déplacement spectral

Pour fonctionner correctement, les dispositifs supplémentaires d'amortissement doivent être placés aux endroits du bâtiment où le mouvement différentiel des étages est important. Pour assurer la stabilité de la structure, il faut en augmenter la résistance latérale proportionnellement aux déplacements. Il est donc important que le système structural, à l'exception des dispositifs d'amortissement, demeure relativement élastique, lors d'un séisme de calcul. Il peut être nécessaire de recourir à des techniques classiques pour renforcer certains éléments structuraux, comme les poteaux des étages inférieurs qui doivent résister aux charges extra-axiales imposées par les nouveaux dispositifs de contreventement. Cependant, compte tenu de l'amortissement supplémentaire, ces charges seront vraisemblablement plus faibles que celles qui résultent uniquement de la présence des nouveaux contreventements.

Les dispositifs et leur emplacement doivent être choisis pour assurer une dissipation maximale de l'énergie¹², de manière à réduire au minimum le mouvement différentiel des étages et à prévenir la production de forces excessives, en particulier celles qui nécessiteraient la mise en oeuvre de nouvelles fondations, de nouveaux assemblages et collecteurs, etc. Il est beaucoup plus difficile de planifier des travaux de rénovation qui font intervenir l'ajout de dispositifs d'amortissement que des travaux de protection classiques. Dans certains cas, toutefois, ils permettent de réduire sensiblement les coûts et les désagréments.

Les exigences précises applicables à la conception de systèmes de bâtiment comportant des dispositifs d'amortissement ainsi qu'à l'essai et à l'entretien des dispositifs sont en cours de mise au point. Les exigences provisoires régissant l'emploi de cette technique dans les nouveaux bâtiments sont contenues dans les *NHERP Recommended Provisions*⁵; bon nombre de ces exigences s'appliquent également aux bâtiments existants. Dans les *NHERP Recommended Provisions*⁵, on prévoit l'analyse statique des bâtiments dans certaines conditions, notamment ceux qui comportent des dispositifs fonctionnant sur le principe de la viscosité ou de la viscoélasticité. Dans les autres cas, il faut procéder à des analyses dynamiques qui font appel à la méthode du spectre de réponse ou, plus généralement, à une analyse non linéaire en fonction du temps. Cette dernière méthode est prescrite dans les *NHERP Recommended Provisions*⁵ pour les dispositifs fonctionnant par frottement ou fléchissement, ou là où la réponse de la structure à un séisme de calcul sera essentiellement non linéaire.

On trouvera dans *Passive Energy Dissipation*¹⁰ et *Proceedings of Seminar on Seismic Isolation*¹¹ une description d'un certain nombre d'applications.

5.2 Isolation à la base

Cette technique consiste à dissocier le bâtiment de ses fondations et à lui permettre de flotter sur des éléments flexibles. L'isolation à la base restreint la quantité d'énergie transmise au bâtiment par les secousses sismiques. Cette méthode offre une double protection. Tout d'abord, les dispositifs d'isolation réduisent la rigidité latérale globale du bâtiment et portent, par conséquent, sa période de vibration propre hors de la plage des périodes correspondant à une concentration maximale de l'énergie sismique. La plus grande partie de l'énergie sismique n'est donc pas transmise au bâtiment. En deuxième lieu, en dissipant l'énergie, les dispositifs d'isolation empêchent l'effet de résonance qui pourrait se produire si la fréquence naturelle du bâtiment était maintenue. Ces dispositifs doivent toutefois être suffisamment rigides pour prévenir une oscillation excessive du bâtiment sous les surcharges dues au vent.

La période fondamentale d'un bâtiment isolé doit être de beaucoup supérieure à celle d'un bâtiment équivalent non isolé et aux périodes prédominantes de vibration du sol. Autrement, les mouvements sismiques de périodes longues correspondant à la période fondamentale latérale du bâtiment seront amplifiés. C'est pourquoi l'isolation par la base n'est généralement pas recommandée pour les bâtiments érigés sur des sols très meubles (p. ex. à Mexico) ou les bâtiments de grande hauteur non isolés dont la fréquence latérale propre se rapproche de celle de la masse d'un bâtiment qui repose sur des dispositifs d'isolation. Pour réduire l'amplitude de ces mouvements à basse fréquence, le système d'isolation à la base doit dissiper l'énergie, le plus souvent dans un rapport d'amortissement équivalent de 0,10 à 0,20.

Ces considérations deviennent évidentes lorsqu'on compare les spectres de réponse présentés à la figure 5-3 pour un bâtiment rigide ($T = 0,5$ s) et un bâtiment très flexible ($T = 2$ s), pour un sol dense et un sol meuble.

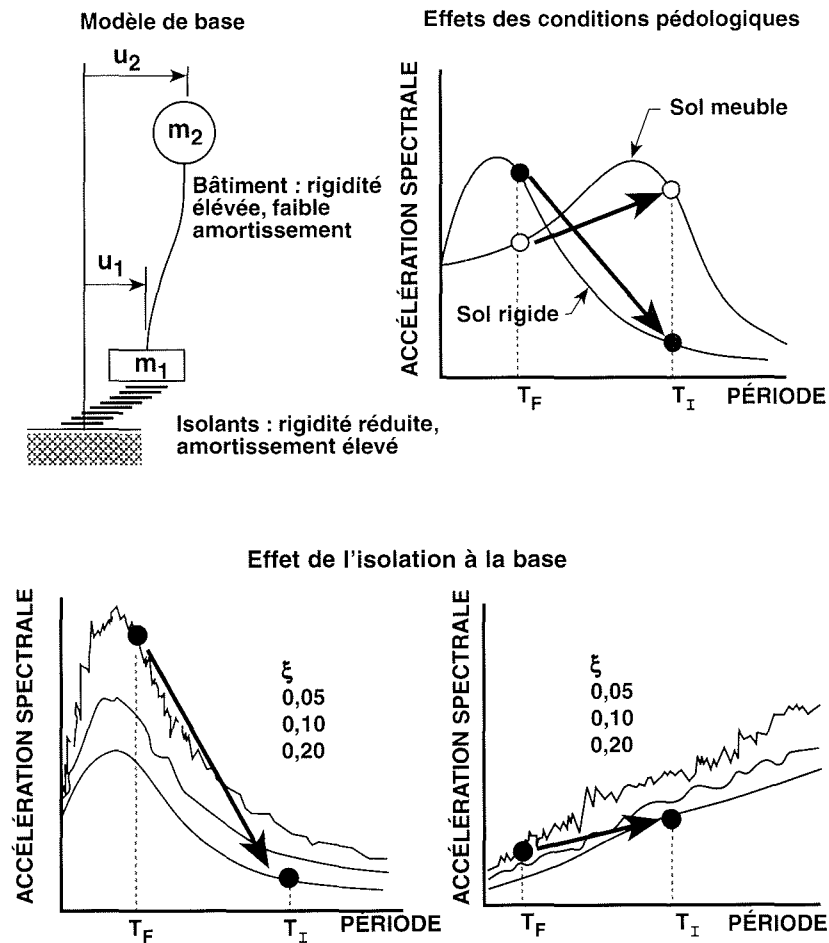


Figure 5-3. Effet de l'isolation à la base (CTA, 1993 - p. 118, 119)

Lors d'un séisme, de grands déplacements latéraux se produisent au-dessus des dispositifs d'isolation placés à la base du bâtiment. Il faut donc prévoir des joints mobiles dans les ouvrages et installations situés à la périphérie du bâtiment (canalisations, trottoirs, etc.). Il faut également prévoir une distance suffisante entre le bâtiment isolé et les bâtiments adjacents. Étant donné que l'isolation par la base demande des travaux importants de rénovation des fondations, cette technique n'est généralement considérée économiquement viable que dans le cas de bâtiments à usage spécial ou d'édifices à caractère patrimonial construits dans des zones de sismicité moyenne à élevée.

L'un des avantages que présente l'isolation à la base est que cette technique réduit sensiblement l'effet de l'accélération du sol sur le bâtiment; comme le risque de dommages au bâtiment et à son contenu est plus faible, le bâtiment demeurera vraisemblablement plus fonctionnel pendant et après un séisme. L'isolation par la base protège aussi le contenu du bâtiment, par exemple les instruments, les ordinateurs et les objets précieux conservés dans les musées. Dans les zones de sismicité élevée, il peut toutefois être nécessaire de procéder également à des améliorations plus classiques. Il faut en outre considérer que la mise en place de dispositifs d'isolation au niveau des fondations peut avoir un effet moins marqué sur l'usage du bâtiment que les techniques classiques de protection.

À l'heure actuelle, il existe trois grands types de dispositifs d'isolation : en élastomère, à glissement et hybrides. Les plus répandus sont constitués d'épais coussins en élastomère stratifiés de tôles d'acier et contenant un caoutchouc à pouvoir d'amortissement élevé ou une âme en plomb favorisant la dissipation de l'énergie. Les dispositifs qui fonctionnent par glissement ont aussi été utilisés en Amérique du Nord. Dans les systèmes hybrides, l'action des dispositifs à glissement est combinée à celle des dispositifs en élastomère. Les *Proceedings of Seminar on Seismic Isolation*¹¹ fournissent des renseignements plus détaillés sur ces dispositifs.

Un système d'isolation par la base devrait conférer une plus grande résistance aux déplacements plus importants et permettre ainsi au bâtiment de revenir à sa position d'origine après un séisme.

Les exigences applicables aux bâtiments isolés ainsi qu'à l'essai et à l'entretien des dispositifs d'isolation contenues dans les *NHERP Recommended Provisions*⁵ visent les nouveaux bâtiments, mais bon nombre pourraient aussi s'appliquer aux bâtiments existants. Ce document présente trois méthodes d'essai plus ou moins complexes et répandues : une méthode d'analyse statique, une méthode d'analyse spectrale et une méthode d'analyse dynamique en fonction du temps. Ces méthodes permettent d'évaluer le bâtiment en fonction de différents facteurs, notamment les conditions du sol, la proximité de failles actives, la sismicité, la période fondamentale du bâtiment, les irrégularités du bâtiment et les propriétés du système d'isolation.

On trouvera d'autres renseignements, notamment la description d'un certain nombre d'applications, dans *An Introduction to Seismic Isolation*¹³, *Proceedings of Seminar of Seismic Isolation*¹¹, *Proceedings of a Seminar and Workshop on Base Isolation and Passive Energy Dissipation*¹³ et *Seismic Retrofit of Historical Buildings Conference Workshop*¹⁵.

5.3 Plastiques et ciments renforcés à la fibre de verre et enrobages

La fibre de verre a été utilisée pendant de nombreuses années pour la rénovation des bateaux en bois. Les plastiques et les ciments renforcés à la fibre de verre contenant du verre, du carbone et d'autres matériaux sont aujourd'hui employés pour la protection parasismique des bâtiments. On applique des ciments renforcés sur les murs en maçonnerie et on enrobe les poteaux en béton et les éléments architecturaux en terre cuite.

Murs et cloisons en maçonnerie.

Les ciments à la fibre de verre qui servent à renforcer les éléments en maçonnerie sont largement utilisés en Nouvelle-Zélande et en Australie dans les travaux de protection parasismique¹⁶. Ce procédé de recouvrement (voir la figure 5-4) augmente la résistance en plan et hors plan des murs en maçonnerie¹⁷. Il consiste à appliquer une ou plusieurs épaisseurs, selon le degré de résistance recherché, d'une armature en treillis possédant une très haute résistance à la traction, enrobée d'un enduit à la fibre de verre. On peut ainsi renforcer un mur sur un seul côté ou sur les deux côtés. Il peut être nécessaire de renforcer les extrémités des murs travaillant en cisaillement à l'aide d'éléments en acier noyés dans un enduit plus épais. Les fabricants ont mis au point certains détails spéciaux pour assurer la continuité des éléments et relier les murs aux planchers et aux toits.

Enrobage des poteaux en béton.

Les enduits en plastique à la fibre de verre sont actuellement utilisés pour protéger la résistance parasismique des poteaux dans bon nombre de ponts et de bâtiments aux États-Unis^{18,19}. On enroule autour du poteau de larges bandes de monotextile tissé enduites de résine époxyde à la fibre de verre qui durcira en place (figure 5-5). On peut faire subir à cette enveloppe une post-contrainte circonférentielle en injectant du mortier sous pression dans une membrane située entre le revêtement et le poteau. La post-contrainte a pour effet de confiner le poteau de béton de manière à prévenir la rupture de l'armature aux points de chevauchement critiques à proximité des joints et à accroître la résistance au cisaillement du poteau pour favoriser un comportement ductile en flexion. La rigidité latérale du poteau entre les deux étages n'augmente pas sensiblement (une telle rigidité forcerait le poteau à résister à de plus grandes charges sismiques) parce que l'enveloppe offre une résistance beaucoup plus élevée dans sa circonférence que dans le sens de la longueur. Dans les cas où une contrainte de confinement n'est pas nécessaire, on peut utiliser un enrobage à la fibre de verre sans post-contrainte pour augmenter la résistance au cisaillement et obtenir une tenue ductile en flexion. Pour plus de renseignements, voir *Fibre Wraps Migrate East*¹⁹. On étudie actuellement un autre procédé qui fait intervenir l'application d'enduits plastiques à la fibre de verre sur la maçonnerie existante.

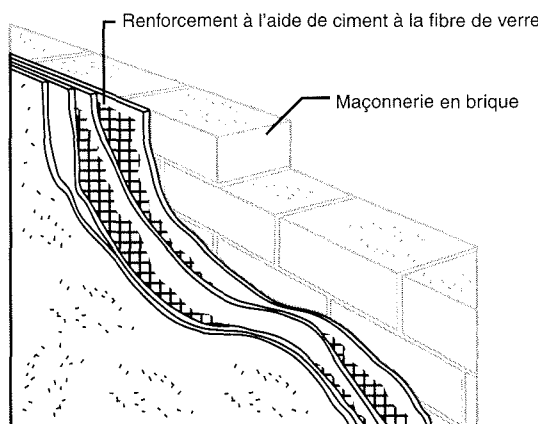


Figure 5-4. Renforcement des murs de maçonnerie à l'aide de ciment à la fibre de verre

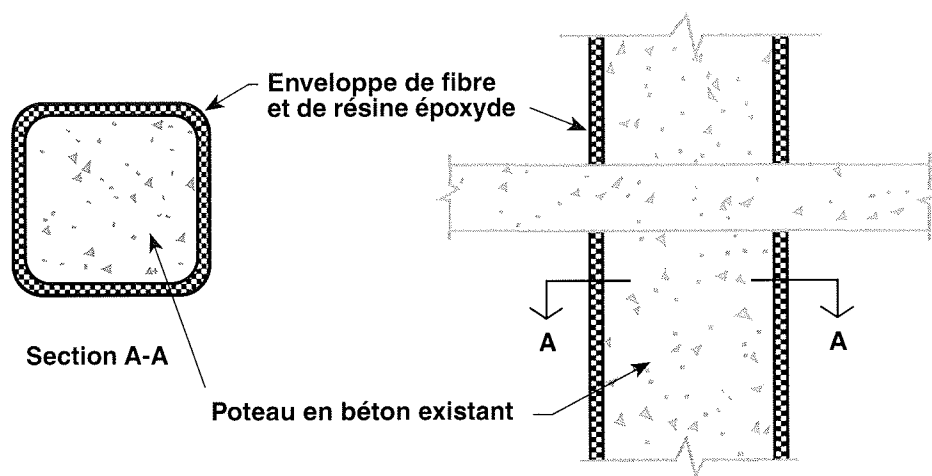


Figure 5-5. Enrobage des poteaux en béton à l'aide de plastique renforcé de fibre

Chapitre 6

Techniques de protection – Fondations

Dans le passé, peu d'accidents de fondations sont survenus sur des terrains plats à sol résistant. De tels accidents se sont produits lorsque les sols sous-jacents étaient sableux, saturés et peu denses, ou qu'ils comportaient des argiles sensibles très meubles ou quand les fondations se trouvaient dans des pentes raides.

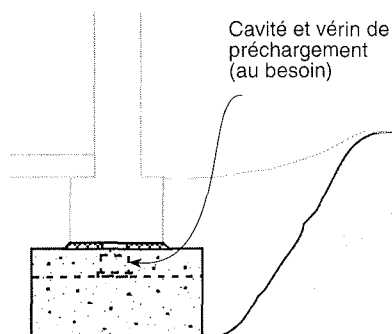
Il est recommandé de consulter un ingénieur en géotechnique ou un géologue lorsque le bâtiment à protéger est construit sur un sol meuble ou lâche ou sur un site géologique présentant des dangers sismiques.

Le coût de protection des fondations est généralement élevé en raison des difficultés que présente l'accès à ces structures. Il est cependant nécessaire de consolider les fondations pour accroître la résistance du bâtiment aux charges dues à la pesanteur et aux forces sismiques dans les situations suivantes :

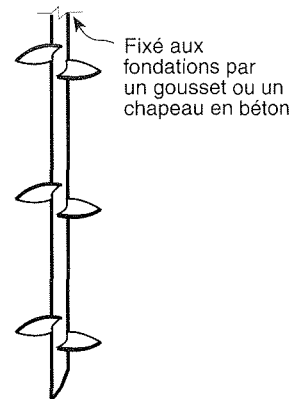
- 1) lorsqu'il faut mettre en oeuvre de nouvelles fondations pour supporter les éléments verticaux ajoutés au cours des travaux de protection du bâtiment;
- 2) lorsqu'il faut accroître la capacité portante et la résistance au soulèvement et aux charges latérales des fondations existantes;
- 3) lorsqu'il faut renforcer les liaisons entre les fondations et les éléments verticaux;
- 4) lorsqu'il faut empêcher toute perte de résistance du sol (p. ex. par stabilisation du sol);
- 5) lorsqu'il faut isoler la base.

Pour atteindre les objectifs 1) et 2), on applique généralement les techniques classiques de protection décrites à la section 6.1 ou les techniques de stabilisation des sols abordées à la section 6.2. Pour atteindre l'objectif 3), on emploie ordinairement les techniques présentées aux sections 4.2, 4.4 et 6.1. La réalisation de l'objectif 4) exige généralement l'application des techniques de stabilisation des sols de la section 6.2. On atteint l'objectif 5) en se servant des techniques classiques présentées à la section 6.1 et des dispositifs spéciaux décrits à la section 5.2.

(a) Reprise en sous-oeuvre d'une semelle existante



(b) Transmission de la charge de la semelle existante à un sous-sol résistant au moyen d'ancrage de sol



(c) Ajout d'un buton et de puits de soutien forés sur une semelle continue existante

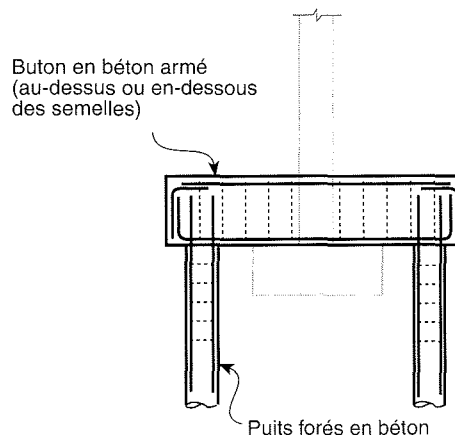


Figure 6-1. Protection classique des fondations

6.1 Techniques classiques de protection des fondations

La protection parasismique de la superstructure peut nécessiter le renforcement des fondations, surtout si l'on érige de nouveaux murs travaillant en cisaillement ou de nouveaux contreventements. Les fondations doivent pouvoir absorber les charges supplémentaires dues à la pesanteur ainsi que les efforts de cisaillement et les forces de renversement induites par les secousses sismiques. Il faut ordinairement accroître la capacité portante admissible des fondations pour protéger le bâtiment contre les forces sismiques de courte durée.

Techniques : Les semelles continues (filantes) et les semelles de répartition existantes peuvent être soumises à des taux de travail excessifs et même à des forces de soulèvement. Les techniques qui permettent de prémunir le bâtiment contre de telles forces comprennent :

- la reprise en sous-oeuvre des semelles existantes de manière que les semelles améliorées prennent appui sur un sous-sol résistant (fig. 6-1a)
- l'ajout d'ancrages de sol (fig. 6-1b), de puits de soutien forés ou de pieux (fig. 6-1c)
- l'accroissement du nombre d'éléments porteurs verticaux que comporte la superstructure.

Les fondations sur pieux peuvent être soumises à des efforts excessifs de traction et de compression découlant de la combinaison des forces sismiques et des charges dues à la pesanteur. La résistance de ces fondations aux forces latérales peut également être insuffisante pour permettre la transmission au sous-sol des efforts tranchants exercés sur les structures de liaison et les pieux. On peut accroître la résistance d'une fondation sur pieux en :

- enfonçant des pieux supplémentaires et en élargissant la structure de liaison existante
- reliant les structures de liaison à l'aide de poutres de rigidité afin de favoriser la redistribution des charges.

Il arrive parfois que la résistance aux moments des radiers soit insuffisante pour leur permettre de supporter la charge combinée des forces dues à la pesanteur et des forces de renversement. On peut éliminer cette faiblesse à l'aide d'une pièce de béton armé à élargissement localisé, par exemple un chapiteau de poteau inversé.

Pour empêcher que les efforts tranchants induits par les secousses sismiques n'endommagent les fondations, on peut accroître la résistance passive du sol en installant des poutres périphériques et des poutres de rigidité ou des joints de cisaillement qui se prolongent jusqu'au sol sous-jacent. On peut également utiliser ces éléments pour relier les semelles et redistribuer les forces. On peut aussi se servir d'ancrages, de puits forés et de pieux creux.

Dans le cas de bâtiments construits sur une pente raide, les poteaux et les puits doivent être conçus pour résister aux charges sismiques, et les fondations doivent reposer sur un sol stable. Les pieux utilisés dans les fondations des bâtiments érigés au-dessus de l'eau, le long de la rive d'une baie ou d'un cours d'eau, doivent offrir une résistance latérale adéquate.

Valeur relative : Les méthodes classiques comme celles qui sont illustrées à la figure 6-1 peuvent être efficaces dans certaines applications. Comme les travaux de protection des fondations coûtent souvent très cher et entraînent des perturbations considérables, il est recommandé d'envisager d'autres techniques comme la stabilisation des sols et l'ajout d'éléments résistant aux forces verticales (murs travaillant en cisaillement, contreventements ou contreforts). Il ne convient ordinairement pas de reprendre en sous-œuvre les semelles existantes lorsque le bâtiment prend appui sur une mince croûte d'argile reposant sur des sols liquéfiables (p. ex. certains bâtiments de Richmond, en Colombie-Britannique – Voir *Earthquake Design in the Fraser Delta*²⁰).

Bien que le soulèvement des fondations ne pose pas toujours un problème (voir la section 3.4.2), on peut au besoin accroître la résistance au soulèvement d'une fondation existante en ajoutant des ancres de sol, des puits forés ou des pieux. Cette méthode ne peut être appliquée, cependant, que si les fondations sont accessibles et si le dégagement vertical à l'intérieur du bâtiment est suffisant. Une solution de remplacement consiste à mettre en place des éléments supplémentaires résistant aux charges verticales afin de répartir les forces de renversement entre les autres éléments verticaux, ou à relier les semelles adjacentes à l'aide de poutres en béton armé de manière à mettre leur résistance en commun.

Lorsqu'on ajoute des pieux supplémentaires à une fondation sur pieux, il peut arriver que la structure de liaison ne distribue pas efficacement les charges aux nouveaux pieux. Il faut alors étayer le poteau et remplacer la structure de liaison par une nouvelle structure qui intègre les nouveaux pieux. Il est ordinairement plus économique et plus efficace d'utiliser des poutres de rigidité de forte épaisseur pour distribuer une partie de la charge des pieux aux structures de liaison adjacentes qui peuvent encore offrir la résistance nécessaire, plutôt que de mettre en place de nouveaux pieux.

6.2 Stabilisation des sols

Les bâtiments peuvent subir des dommages lorsque le sol soumis aux forces sismiques s'affaisse pour l'une ou l'autre des raisons suivantes : perte de résistance du sol due à l'accumulation de la pression interstitielle dynamique, liquéfaction, dispersion latérale du sol, mouvements horizontaux ou verticaux excessifs du terrain dus au tassement des dépôts de sol naturel ou du matériau de remblai, instabilité des pentes et mouvements de failles. On trouve des directives pour l'évaluation de ces facteurs au chapitre 10 des lignes directrices pour l'évaluation sismique¹ et dans le Manuel canadien d'ingénierie des fondations²¹. Le maintien de la stabilité des pentes dans divers milieux géologiques et topographiques constitue essentiellement un problème géotechnique et n'est donc pas abordé dans le présent document. Il est généralement recommandé de retenir les services d'un ingénieur en géotechnique compétent, qui aidera le propriétaire ou l'ingénieur en construction à évaluer les aspects géotechniques du projet.

On décrit ci-dessous les diverses techniques de stabilisation des sols utilisées pour empêcher une perte de résistance du sol à la suite d'un séisme et on donne des indications générales sur l'application de ces méthodes.

Des techniques de stabilisation des sols ont été mises au point pour de nombreuses applications géotechniques, notamment la protection du terrain, la réfection des fondations, l'endiguement des eaux souterraines, le support des excavations et la lutte antipollution. On trouvera les études détaillées les plus récentes et un certain nombre d'applications pratiques de ces techniques dans les documents suivants : *Soil Improvement: History, Capabilities and Outlook*²², *Soil Improvement: State-of-the-art*²³, *Improvement of Liquefiable Foundation Conditions*²⁴, *Soil Improvement: Ten Year Update*²⁵ et *Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics*²⁶. Le choix de la technique la plus efficace et économique pour un projet donné dépend de nombreux facteurs, dont les caractéristiques du site et du terrain, la granulométrie du sous-sol, les effets du projet sur le milieu, les bâtiments adjacents et le coût. On combine souvent plusieurs techniques pour optimiser le plan de remise en état. On peut vérifier l'efficacité de ce plan en effectuant des essais des sols sur le terrain ou en procédant à des essais de chargement en vraie grandeur. La mise au point de nouvelles technologies et la découverte de nouvelles applications assurent le perfectionnement continu de ces techniques.

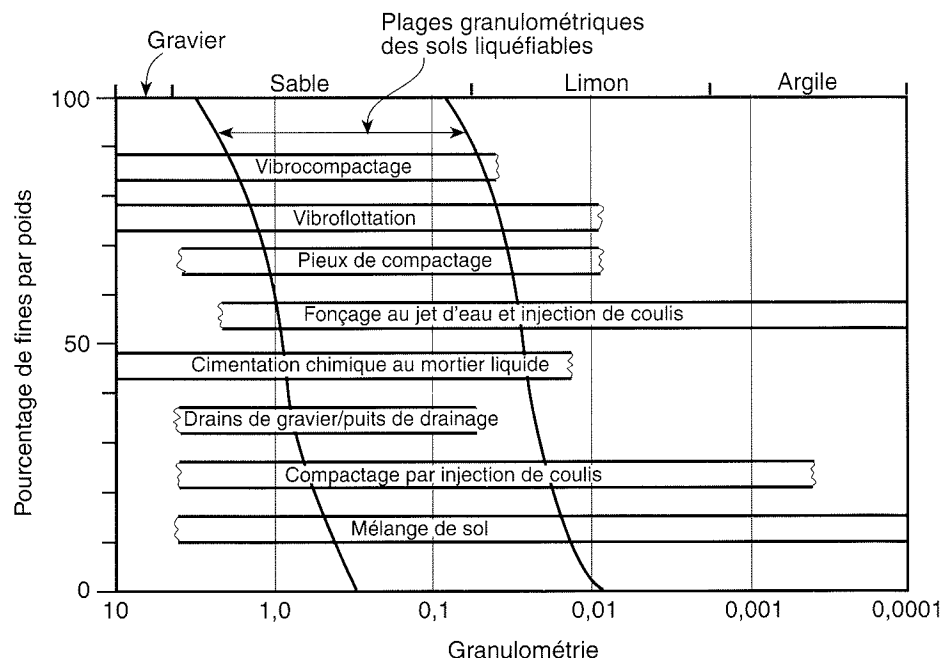


Figure 6-2. Plages granulométriques applicables aux diverses méthodes de stabilisation des sols

Tableau 6-1. Techniques de stabilisation des sols applicables aux bâtiments existants

Technique	Protection recherchée			
	Densification	Renforcement	Consolidation	Drainage
Cimentation chimique			Y	
Compactage par injection de coulis	Y	Y		
Micropieux		Y		
Puits de drainage				Y
Fonçage au jet d'eau et injection de coulis		Y		
Mélange de sol		Y		
Vibrocompactage	Y			
Vibroflottation	Y			
Pieux de compactage	Y			

Les plages granulométriques des sous-sols liquéfiables, essentiellement visées par les techniques de stabilisation des sols, sont indiquées à la figure 6-2. Il est souvent difficile, cependant, d'appliquer ces techniques à la protection de structures et de fondations existantes lorsque :

- l'accès aux fondations est limité ou le dégagement vertical ne permet pas l'utilisation de l'équipement de construction nécessaire;
- les structures existantes ne peuvent subir de fortes vibrations ou des interventions majeures;
- les travaux ne doivent pas gêner l'usage normal du bâtiment et des zones adjacentes;
- seuls des essais et des vérifications sur place permettent de s'assurer de la qualité des travaux de stabilisation des sols.

On énumère au tableau 6-1 les techniques de stabilisation des sols applicables à la protection parasismique des sols de fondation existants, ainsi que les fonctions de chacune de ces méthodes dans les travaux de protection des sols. Ces fonctions comprennent :

- la densification des sols lâches ou le renforcement des sols peu résistants situés sous des structures existantes ou dans les zones adjacentes d'un terrain incliné;
- la reprise en sous-œuvre et le renforcement du sous-sol sur lequel reposent les fondations existantes;
- la protection du sous-sol en vue de la mise en place de nouvelles fondations;
- le drainage des sous-sols pour prévenir l'élévation de la pression interstitielle à la suite d'un séisme.

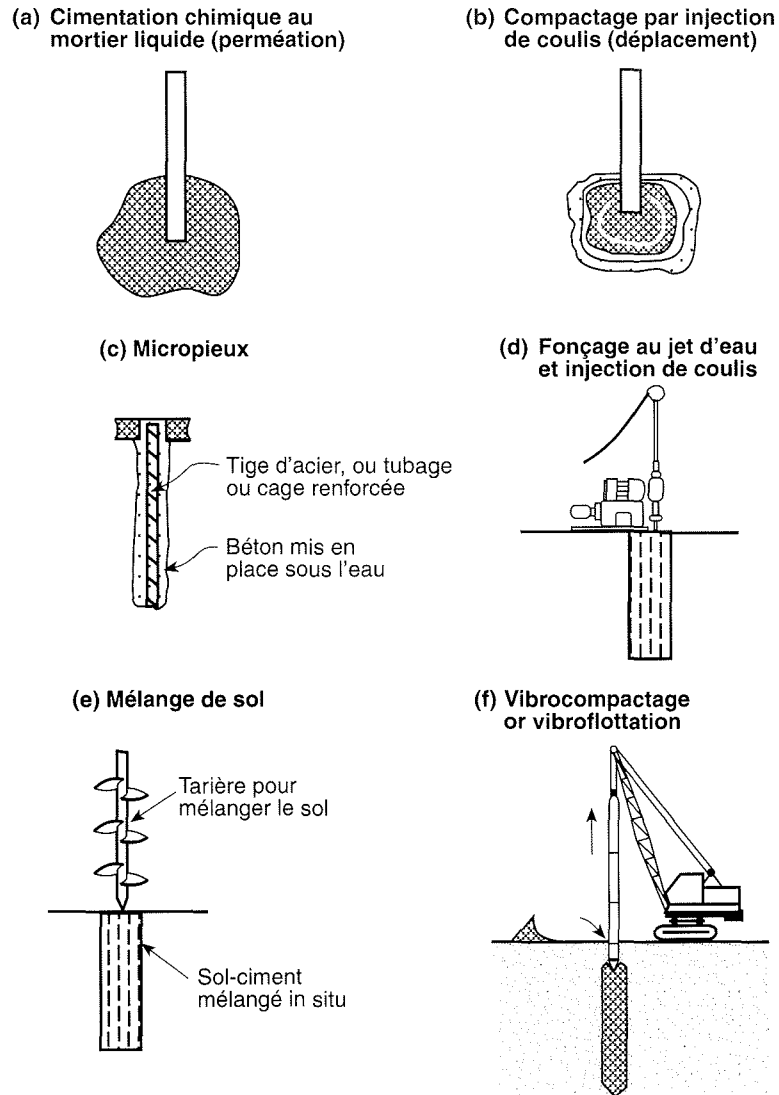


Figure 6-3. Stabilisation des sols, micropieux

Certaines techniques s'emploient facilement à l'intérieur d'un bâtiment existant, notamment la cimentation chimique au mortier liquide, le compactage par injection de coulis, les puits de drainage et les micropieux. En revanche, lorsqu'on utilise des méthodes comme les micropieux ou le fonçage au jet d'eau et l'injection de coulis, il faut parfois forer des trous depuis l'extérieur du bâtiment. D'autres techniques, comme le mélange de sol, le vibrocompactage et les pieux de compactage, nécessitent des équipements qui ne peuvent en général être utilisés dans un espace clos. Lorsqu'on adopte l'une ou l'autre de ces techniques, il est essentiel de choisir avec soin des entrepreneurs spécialisés compétents et chevronnés et d'établir un programme rigoureux de contrôle de la qualité des travaux de construction.

Pour stabiliser un sol par *cimentation chimique* au mortier liquide (fig. 6-3a), on injecte dans les interstices du sol une solution de deux produits chimiques ou plus qui formeront des précipités solides ou des masses gréseuses. Cette méthode, qui repose sur la perméation du mortier, est efficace dans les sols pulvérulents propres. Le *compactage par injection de coulis* (fig. 6-3b), en revanche, consiste à injecter sous pression un coulis présentant un faible affaissement pour augmenter par déplacement la masse volumique du sol. On peut appliquer cette méthode à presque tous les types de sol, pour renforcer le sous-sol de faible portance situé sous les semelles existantes. Il faut toutefois surveiller attentivement tout signe de soulèvement des fondations.

Les *micropieux*, dont le diamètre ne dépasse guère 300 mm, sont placés dans des trous de forage et noyés dans le mortier (fig. 6-3c). Ils peuvent être mis en place au moyen d'équipement relativement peu volumineux dans des espaces clos qui ne sont pas accessibles au matériel de battage classique. Ils servent à transmettre les charges aux matériaux compétents et peuvent offrir une bonne résistance en compression, en traction et en cisaillement. On peut également recourir à cette méthode pour stabiliser une pente.

Pour réduire ou empêcher le développement d'une pression interstitielle dynamique dans les sous-sols, on peut mettre en place des *drains de gravier verticaux*, ou *puits de drainage*, à la périphérie ou à l'intérieur des structures. Correctement installés, les drains de gravier préviendront la liquéfaction du sol en empêchant toute élévation excessive de la pression interstitielle sous l'effet des secousses sismiques. Les puits de drainage peuvent aussi comporter des dispositifs de rabattement de nappe qui amèneront le niveau de la nappe souterraine en deçà de la zone du sous-sol susceptible de se liquéfier.

Le *fonçage au jet d'eau et l'injection de coulis* (fig. 6-3d) est une méthode qui utilise des jets d'eau à haute vitesse pour découper et soulever une couche de sol superficielle de manière à créer une cavité dans laquelle le coulis de ciment est ensuite injecté. Cette technique, qui permet de former des poteaux sol-ciment à partir de presque tous les sols, est utile pour la reprise en sous-oeuvre ou le renforcement de fondations existantes. Une autre méthode, le *mélange de sol* (fig. 6-3e), permet d'obtenir des résultats semblables; on utilise dans ce cas plusieurs tarières ou une tarière de fort diamètre pour incorporer au sol une quantité définie de mortier de ciment et former des poteaux sol-ciment. Cette dernière technique nécessite toutefois l'utilisation d'une grue ou d'un appareil de forage assez volumineux.

Le *vibrocompactage* consiste à faire pénétrer une sonde vibrante dans le sol pour augmenter la compacité des sols granulaires contenant moins de 20 p. 100 de particules fines de silt et d'argile (fig. 6-3f). La *vibroflottation* fait aussi intervenir un puissant générateur de vibrations qui permet à la fois de compacter le sol et de mettre en place des poteaux de gravier ou de pierre compacté. Dans les sols de plus faible granulométrie, les poteaux de pierres ont pour rôle de renforcer la masse du sol. Les pieux de compactage augmentent la masse volumique des sous-sols granulaires en déplaçant le sol situé sur le pourtour des pieux foncés. Cependant, en raison de la taille de la grue ou de l'appareil de forage qui doivent être utilisés, ces techniques sont surtout employées pour améliorer l'état d'un sol en pente autour des bâtiments existants afin de réduire le plus possible l'incidence des déformations du sol environnant sur le bâtiment.

Bibliographie

1. Institut de recherche en construction, Lignes directrices pour l'évaluation sismique des bâtiments existants. Conseil national de recherches du Canada, Ottawa (Ontario), 1993, 163 p. (NRCC 36941F).
2. Institut de recherche en construction, Manuel de sélection des bâtiments en vue de leur évaluation sismique. Conseil national de recherches du Canada, Ottawa (Ontario), 1993, 90 p. (NRCC 36943F).
3. Comité associé du Code national du bâtiment, Code national du bâtiment du Canada 1990. Conseil national de recherches du Canada, Ottawa (Ontario), 446 p. (CNRC 30620).
4. Federal Emergency Management Agency, NEHRP Handbook of Techniques for Seismic Rehabilitation of Existing Buildings. Report FEMA-172, Washington, D.C., 1992.
5. Federal Emergency Management Agency, "Provisions." Part 1 of NEHRP Recommended Provisions for the Development of Seismic Regulations for New Buildings. Report FEMA-95 (2 vol.), Washington, D.C., 1991.
6. Norme CAN/CSA S16.1-M89, Limit States Design of Steel Structures. Association canadienne de normalisation, Rexdale (Ontario), 1989.
7. Norme CAN/CSA-O86.1-M89, Engineering Design in Wood (Limit States Design). Association canadienne de normalisation, Rexdale (Ontario), 1989.
8. Norme CAN3-A23.3-M84, Design of Concrete Structures for Buildings. Association canadienne de normalisation, Rexdale (Ontario), 1984.
9. Norme CAN3-S304-M84, Calcul de la maçonnerie pour les bâtiments. Association canadienne de normalisation, Rexdale (Ontario), 1984.
10. Hanson, R.D., dir. de publ., Passive Energy Dissipation. Earthquake Spectra 9 (1993), 319-636.
11. Passive Energy Dissipation and Active Control. In: Seminar on Seismic Isolation (2 vol.), Applied Technology Council ATC 17-1, mars 1993.
12. Cherry, S. et A Filiatrault, Seismic Response Control of Buildings Using Friction Dampers. Earthquake Spectra 9 (1993), 447-466.
13. Skinner, R.E., W.N. Robinson et G.H. McVerry, An Introduction to Seismic Isolation. John Wiley & Sons, New York, N.Y., 1993.
14. Base Isolation and Passive Energy Dissipation. Proc. of seminar and workshop, Applied Technology Council ATC 17. Mars 1986.
15. Look, D.W., dir. de publ., The Seismic Retrofit of Historical Buildings. Proc. of conference and workshop, Assoc. for Preservation Technology (Western Chapter). San Francisco, CA, 1991.
16. Refits Prepare Buildings for Earth Tremors. Architecture NZ (mai-juin 1993), 102-103.
17. Smith, A.H., T.W. Robertson et D.J.A. Hamp, POLYPLAST - A Plaster Strengthening System for Masonry Walls. In: Transactions of the Inst. of Prof. Engineers, Nouvelle-Zélande, 20 (nov. 1993), 1-9.
18. Seismic Retrofit Cuts Installation Costs. Better Roads 63 (mai 1993), 20-22.
19. ASCE, Fibre Wraps Migrate East. Civil Engineering, 64 (juillet 1994), 7, p. 11.
20. Earthquake Design in the Fraser Delta. Task Force Report. Department of Civil Engineering, Univ. of British Columbia, Vancouver, B.C., 1991.
21. Société canadienne de géotechnique, Manuel canadien d'ingénierie des fondations. 3^e éd., BiTech Publishers, 528 p., 1992.
22. ASCE, Soil Improvement: History, Capabilities and Outlook. Geotechnical

Engineering Division, ASCE, 1978.

23. Mitchell, J.K., Soil Improvement: State-of-the-Art. Actes de la 10^e conférence internationale sur la mécanique des sols et les travaux de fondation, vol. 4, Stockholm, Suède, 1981.
24. Ledbetter, R.H., Improvements of Liquefiable Foundation Conditions Beneath Existing Structures. Department of the Army, U.S. Army Corps of Engineers, Technical Report REMR-GT-2, 1985.
25. Welsh, J.P., dir. de publ., Soil Improvement - A Ten Year Update. ASCE, Geotechnical Special Publication No. 12, 1987.
26. Borden, R.H., R.D. Holtz et I. Juran, dir. de publ., Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics. Actes de la conf. tenue par la Division de géotechnique de l'ASCE, Louisiane, 25-28 févr. 1992.

Lectures complémentaires

Institut canadien de la tôle d'acier pour le bâtiment, Diaphragm Action of Cellular Steel Floor and Roof Deck Construction. Bulletin d'information n° 3, Willowdale (Ontario), 1972.

Comité associé du Code national du bâtiment, Supplément du Code national du bâtiment du Canada 1990. Conseil national de recherches du Canada, Ottawa (Ontario), 1990, 275 p. (CNRC 30630).

Annexe A

Liste de contrôle des techniques de protection parasismique

La présente annexe renferme une liste de contrôle des techniques actuellement utilisées pour protéger les bâtiments qui présentent certaines faiblesses au point de vue de la résistance aux séismes. Cette liste est divisée en tableaux regroupant les techniques qui s'appliquent à chaque sous-système de la structure existante du bâtiment :

Les techniques sont énumérées par catégories (éléments de remplissage, recouvrements, liaisons, nouveaux murs ou contreventements, collecteurs, etc.). On donne, aux chapitres 4 à 6, une description plus détaillée des techniques précises (clouage,

enrobages de béton, recouvrement de contreplaqué, détails d'ancrage, etc.) applicables à chaque catégorie, ainsi qu'une indication de leur valeur relative au regard des principes énoncés au chapitre 3. Pour faciliter la consultation, on indique aux tableaux A1 à A6 le numéro des pages et des figures des chapitres 4 à 6 dans lesquelles sont présentées les diverses catégories de techniques. Pour rattacher les défauts énumérés aux tableaux A1 à A6 à ceux que peuvent révéler l'application des Lignes directrices pour l'évaluation sismique des bâtiments existants¹, il faut se référer au chapitre 2.

Tableau A1. Ossatures résistant aux moments (acier, béton)

Faiblesse	Technique de protection			
	Renforcement des liaisons ou des ancrages* p. 15-17 Fig. 4-2	Renforcement des éléments* p. 15-17 Fig. 4-3	Nouveaux murs, remplissages ou contreventements p. 13-15 Fig. 4-1	Amortissement supplémentaire ou isolation à la base p. 29-33
Glissement		Y	Y	Y
Résistance des liaisons	Y		Y	Y
Résistance/ductilité des éléments		Y	Y	Y
Poteaux en béton courts			Y	Y
Défaillance des remplissages			Y	Y
Soulèvement	Y		Y	

* Pour connaître les techniques précises, voir la p. 15.

Tableau A2. Ossatures contreventées (acier, béton, bois)

Faiblesse	Technique de protection			
	Renforcement des liaisons ou des ancrages* p. 18	Renforcement des éléments* p. 18	Nouveaux murs ou contreventements p. 13-15 Fig. 4-1	Amortissement supplémentaire ou isolation à la base p. 29-33
Torsion			Y	Y
Résistance des éléments		Y	Y	Y
Résistance des liaisons	Y		Y	Y
Soulèvement	Y		Y	

* Pour connaître les techniques précises, voir la p. 18.

Tableau A3. Murs travaillant en cisaillement (béton, maçonnerie, bois)

Faiblesse	Technique de protection				
	Remplissages*	Recouvrements*	Armature, tirants et ancrages*	Nouveaux murs ou contreventements	Isolation à la base
	p. 18-22 Fig. 4-5	p. 18-22 Fig. 4-6	p. 18-22 Fig. 4-7, 4-8	p. 13-15 Fig. 4-1	p. 32-33
Torsion	Y			Y	Y
Résistance	Y	Y		Y	Y
Support latéral (voir tableau A5)			Y		Y
Poutres d'accouplement	Y		Y	Y	
Liaisons panneau-panneau (béton préfabriqué)		Y	Y		
Murs de fondation nains		Y			
Soulèvement			Y	Y	

* Pour connaître les techniques précises, voir la p. 19.

Tableau A4. Diaphragmes (béton, acier, bois)

Faiblesse	Technique de protection				
	Recouvrements*†	Contreventement horizontal*	Collecteurs, entures, membrures*	Renforcement des liaisons*	Nouveaux murs** ou contreventements verticaux
	p. 23-24 Fig. 4-9	p. 23-24 Fig. 4-10	p. 23-26 Fig. 4-11 à 4-14	p. 23-26 Fig. 4-11 à 4-14	p. 13-15 Fig. 4-1
Résistance aux efforts de cisaillement	Y	Y			Y
Glissement horizontal	Y	Y			Y
Transmission des efforts de cisaillement	Y	Y	Y	Y	Y
Intégrité	Y	Y	Y	Y	

* Pour connaître les techniques précises, voir la p. 23.

† Comprend le clouage ou le soudage des platelages existants à la structure.

** Comprend les cloisons de refend qui agissent comme amortisseurs.

Tableau A5. Support latéral des murs (maçonnerie, béton préfabriqué)

Faiblesse	Technique de protection			
	Ancrages, liaisons* p. 27-28 Fig. 4-15, 4-16	Contreventement localisé* p. 27-28 Fig. 4-16	Recouvrements* p. 18-22 Fig. 4-6	Armatures verticales p. 19-22 Fig. 4-7
Ancrage insuffisant	Y	Y		
Rapport d'élanement élevé		Y	Y	Y

* Pour connaître les techniques précises, voir les p. 19, 27 et 28.

Tableau A6. Fondations (béton, maçonnerie, bois)

Faiblesse	Technique de protection		
	Stabilisation du sol p. 40-43 Fig. 6-2, 6-3	Nouveaux pieux ou puits p. 38-39 Fig. 6-1	Nouvelles semelles p. 38-39 Fig. 6-1
Résistance des éléments		Y	Y
Tassement	Y		Y
Liquéfaction	Y		
Glissements	Y		

Canada