

INFLUENCE DE LA DEFORMABILITE DES DIAPHRAGMES HORIZONTAUX, DANS LEUR PLAN, SUR LA REPARTITION DES CHARGES SISMIQUES AUX ELEMENTS DE CONTREVENTEMENT

N. Djilali, A. Ouazir, A. Benanane, A. Bouhaloufa

*LMPC – Département de génie civil, Université de Mostaganem
Nacera09@yahoo.fr, abouhaloufa@yahoo.fr*

Résumé :

Le plancher est un élément structurel très important du bâtiment car l'ensemble de ses fonctionnements a une influence décisive sur la stabilité de la structure. Il agit comme un diaphragme horizontal qui assure la transmission et la répartition des charges horizontales entre les éléments participant au contreventement et, par delà, aux fondations. Cette fonction dépend de leur comportement et leur rigidité aux forces horizontales.

Dans le cadre de cette étude, la déformabilité du plancher dans leur plan est examinée, sous l'effet des actions sismiques horizontales. Les sollicitations retenues ont pour objet d'apporter la connaissance du comportement dynamique du plancher et connaître l'influence de sa déformabilité dans le plan sur la distribution des charges sismiques horizontales aux éléments verticaux de contreventement. Ainsi, les questions suivantes sont étudiées : quels sont les principaux paramètres structurels conceptuels influençant le comportement dynamique du plancher ? Quelles sont les limites qui doivent établir pour la prise en compte de son influence sur la répartition des forces horizontales.

L'étude de la déformabilité du plancher est conduite afin d'identifier les paramètres dominants de leur comportement dynamique.

Pour viser l'extension aux multiples paramètres constructifs avec l'aide des logiciels basés sur la méthode des éléments finis, les analyses dynamiques des diaphragmes sont obtenues au moyen de la simulation numérique.

Enfin, les résultats trouvés sont affinés, en vue de l'établissement dans le guide algérien de conception (RPA) et d'une aide de dimensionnement.

Mots clés : Diaphragme, déformabilité, rigidité, contreventement, distribution horizontale des charges sismiques.

1. Introduction

Dans les bâtiments, les planchers jouent un rôle très important dans le comportement sismique d'ensemble de la structure. Ils agissent comme des diaphragmes horizontaux qui collectent les forces d'inertie et les transmettent aux éléments structuraux verticaux et rendent ces éléments solidaires pour résister à l'action sismique horizontale.

En Algérie, on assiste ces dernières années à une accélération de la construction de logements, d'équipements collectifs et de constructions industrielles. Mais, depuis le séisme de Boumerdes, les structures en portiques ont montré leur limite et leur inefficacité vis-à-vis des actions sismiques. Pour atténuer le risque de catastrophes éventuelles, le Règlement Parasismique Algérien (RPA), modifié en 2003, préconise l'emploi des voiles en béton armé, comme systèmes de contreventement. A cela s'ajoutent les constructions préfabriquées où tous les éléments porteurs et de contreventement sont des voiles en béton armé. Ce changement de mode de construction devrait inciter les ingénieurs en structures à accorder une attention particulière quant à l'hypothèse émise et jamais vérifiée à savoir, la rigidité des planchers. En effet, si cette dernière est notoirement admise lorsque les systèmes de contreventement sont constitués par des portiques ; il faut s'assurer par conséquent, dans le cas des voiles, de cette rigidité en cas de formes non compactes ou très allongées en plan des diaphragmes horizontaux et surtout en présence d'ouvertures importantes dans ces derniers (cages d'escaliers, d'ascenseurs et trémies diverses) car la répartition des efforts sismiques peut s'éloigner de celle correspondant à un diaphragme infiniment rigide.

En effet, il est évident que la réponse d'une structure aux actions horizontales dépend fortement du comportement du plancher. Ce dernier est influencé par plusieurs paramètres : la forme, le type de matériau et la densité des ouvertures.

Il est généralement reconnu que la modélisation du comportement des planchers non rigides est bien plus complexe que celle des planchers rigides. Depuis de nombreuses années, les méthodes de calcul élastique simplifiées ont été quasi systématiquement utilisées dans le dimensionnement des structures basées sur des modèles brochettes, par masses concentrées et raideurs équivalentes, puisqu'elles sont faciles à mettre en œuvre et bien assimilées par l'ingénieur. Cependant, cette approche ne peut fournir qu'une compréhension limitée du comportement sismique réel, la réponse linéaire d'une structure ayant des planchers flexibles sous l'action sismique en termes de déplacement, étant largement inexplorée. Pour pallier ces inconvénients, certains règlements parasismiques (européen ou américain), recommandent l'utilisation de méthodes spécifiques basées sur le principe des éléments finis qui pourraient donner de bonnes indications sur le comportement sismique de la structure. L'utilisation de codes de calculs basés sur la méthode des éléments finis s'impose donc dans notre travail pour essayer de se rapprocher du comportement réel des diaphragmes non rigides.

2. Facteurs influant la rigidité des planchers dans leur plan

Lorsque l'on dimensionne une structure pour résister au tremblement de terre majeur, on doit prendre, entre autres, en considération, tous les paramètres influant directement la rigidité des planchers, qui occupent une place prépondérante dans la stabilité de structure.

2.1. Forme du plancher

Une bonne conception parasismique d'une structure, nous demande une attention particulière quant à la forme du bâtiment. On doit rechercher les formes les plus simples et plus régulières qui permettent d'augmenter la rigidité du plancher par limitation des déformations provoquées par la concentration des contraintes.

On peut trouver cette simplicité de forme dans les sections qui sont symétriques selon les deux axes orthogonaux en plan. Par exemple, les plans carrés ou proches du carré conviennent très bien puisqu'ils présentent des rigidités similaires dans les deux directions principales. Par contre, les planchers composés de plusieurs pans perpendiculaires présentent des raideurs flexionnelles très différentes vis-à-vis des actions sismiques dans les deux directions principales horizontales. Il en résulte des périodes propres différentes des deux ailes perpendiculaires. Elles tendent alors à vibrer très différemment l'une de l'autre. D'où la création de problèmes dus à la torsion et de concentration des contraintes à la jonction de ces ailes.

Il faut songer aussi à l'allongement du plancher pour transmettre les efforts. A ce titre, les planchers ayant de forme très allongés ne peuvent pas convenir puisqu'ils présentent des dommages très importants dus à phénomène de « coup de fouet » a leurs extrémités.

2.2. Type de matériau constituant le plancher

Un autre aspect qui entre en jeu est celui de la nature du plancher et plus particulièrement sa rigidité en plan. En effet, les planchers en bois ne peuvent pas distribuer les efforts dus à une torsion induite par des déplacements des éléments verticaux en béton ou en maçonnerie puisque ces éléments structuraux sont construits par des matériaux différents ayant des rigidités différentes. On peut dire alors que les planchers en contreplaqué sur solives en bois ou en métal se comportent comme rigides dans les structures en bois ou en charpente métallique, respectivement. Mais ils sont flexibles lorsqu'ils sont utilisés dans les structures en béton qui possèdent des rigidités supérieures. Et seuls les planchers en béton armé peuvent former une sorte de diaphragme rigide dans leur plan puisqu'ils sont capables de distribuer correctement les efforts appliqués aux éléments verticaux.

2.3. Epaisseur de la dalle

Il convient de noter que le plancher doit présenter une épaisseur suffisante et armée dans les deux directions pour bien distribuer la totalité des efforts aux éléments structuraux verticaux.

2.4. Efficacité de la solidarisation des éléments constituant le plancher

L'effet du diaphragme est obtenu alors grâce aux assemblages adéquats entre le plancher et les éléments de contreventement verticaux de la structure.

Par exemple, les dalles formées d'éléments préfabriqués sont généralement insuffisantes pour assurer cette fonction de diaphragme à moins que les éléments soient solidarisés par une couche épaisse en béton armé coulée sur place.

2.5. Importance des ouvertures

L'existence des trémies d'escaliers, d'ascenseurs, trous pour les gaines de fumées ou ventilations dans le plancher peut causer des concentrations de contraintes autour des discontinuités et une réduction de la rigidité du plancher qui peut également influencer fortement la répartition des efforts horizontaux dans les éléments de contreventement.

L'existence des ouvertures situées au milieu des planchers peut causer de séparation des bielles en deux parties et avec l'augmentation de ses dimensions, les bielles sont rejetées vers l'extérieur de la surface du plancher.

Si les ouvertures sont disposées dans ou près des angles de plancher, cette situation peut créer des dommages graves puisqu'elles se trouvent dans les zones des bielles. Par conséquent, on peut dire que les ouvertures ont des influences sur le fonctionnement des planchers qui jouent le rôle de diaphragmes, non seulement de par leurs dimensions mais aussi par leur position relative dans le plan des planchers.

2.6. Rapport entre la rigidité du diaphragme et celle des éléments verticaux

Pour que la fonction du diaphragme soit assurée correctement, la rigidité des éléments verticaux de contreventement ne doit pas être très importante comparée à la rigidité du plancher de la même structure.

On ramène souvent la rigidité des planchers dans leurs plans. Suivant la valeur de rigidité du plancher, on peut classer ce dernier en trois types :

- rigide si la déformation du diaphragme est insignifiante comparée à celle des éléments verticaux ;
 - flexible lorsque la déformation du diaphragme est sensiblement grande par rapport à celle des éléments verticaux ;
 - et semi rigide lorsque les déformations du diaphragme et des éléments verticaux sont de même ordre.
- Si la rigidité du diaphragme dans son propre plan est suffisamment grande relativement à la rigidité des éléments verticaux, l'effort tranchant dans n'importe quel niveau doit être distribué aux éléments verticaux proportionnellement à la rigidité latérale de ces derniers et donnée par la formule suivante :

$$F_{in} = \frac{F}{\sum K_{in}} K_{in} \pm \frac{K_{in} \cdot r_i}{K_{an}} \cdot F \cdot e_{nk}$$

- Par contre Si la rigidité du diaphragme dans son propre plan est suffisamment petite relativement à la rigidité des éléments verticaux, les planchers répartissent les efforts proportionnellement à la section des murs. Dans ce cas, l'effort est déterminé par la formule

$$\text{suivante : } F_{in} = \frac{F}{\sum S_{in}} S_{in}$$

- Et si les rigidités de ces deux éléments porteurs sont commensurables, la répartition des efforts nécessite un outil informatique basé sur la méthode des éléments finis.

La question qui se pose donc : A partir de quelles limites, la modélisation des planchers soit obligatoire ?

Pour répondre à cette question, le seul moyen qui reste c'est la simulation numérique basée sur la méthode des éléments finis. Ainsi, les planchers sont modélisés de deux manières :

1. En masse concentrée, donc considéré comme rigide ;
2. En type coque, c'est avec sa flexibilité en plan effective.

Ensuite, une comparaison sera effectuée, entre ces deux cas de figure, concernant :

1. Les déformabilités du plancher et des éléments de contreventement verticaux.
2. Les efforts tranchants dans les éléments de contreventement verticaux. Lesdits efforts déterminés par la méthode des éléments finis nous permettent d'établir des limites à partir desquelles l'hypothèse de diaphragmes n'est plus satisfaite.

3. Conclusion

1. Un plancher, avec les mêmes caractéristiques géométriques et mécaniques, peut être rigide ou flexible selon le règlement utilisé et on a affaire parfois à des déformations très petites, deux ou trois zéros après la virgule. Ceci a pour effet de rendre l'interprétation des résultats difficiles. Mais pour pallier à cet inconvénient, la comparaison des efforts tranchants dans les éléments de contreventement, pour les différentes modélisations, constitue une méthode efficace.
2. la déformabilité des planchers décroît avec l'augmentation du nombre d'étages. Ainsi, le problème de rigidité des diaphragmes horizontaux concerne davantage les structures basses, d'un ou deux niveaux.

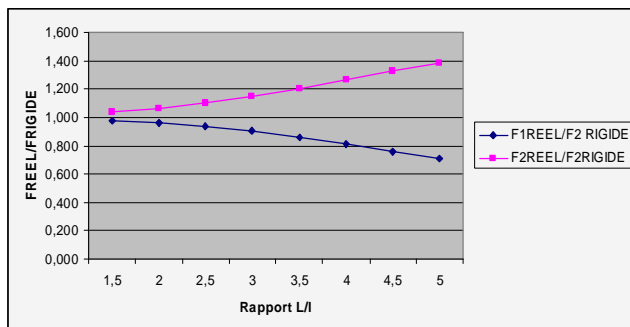


Schéma 1: Diagramme des efforts aux murs voiles en fonction de ratio du plancher. (Structure à un seul étage).

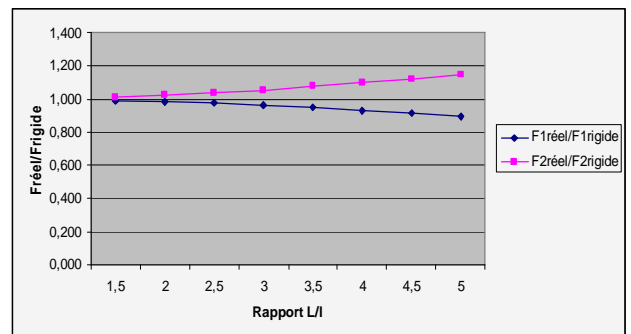


Schéma 2: Diagramme des efforts aux murs voiles en fonction de ratio du plancher. (Structure à deux étages).

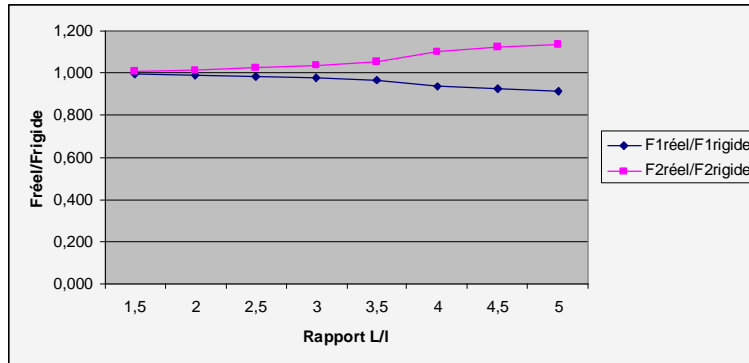


Schéma 3: Diagramme des efforts aux murs voiles en fonction de ratio du plancher.
 (Structure à trois étages).

3. Le rapport (L/I) concerne la longueur et la largeur du plancher dans sa totalité et non pas la distance entre appuis.

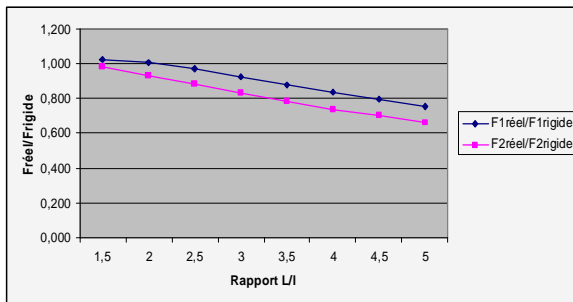


Schéma 4: Diagramme des efforts aux murs voiles en fonction de ratio du plancher.
 (Structure à un seul étage, une seule travée).

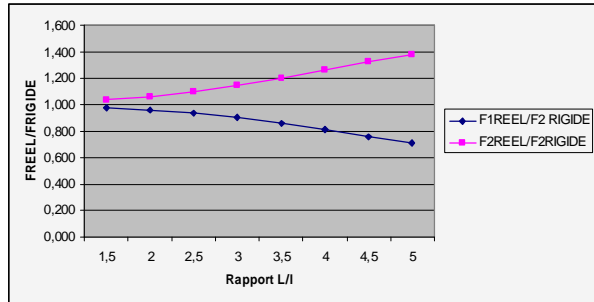


Schéma 5: Diagramme des efforts aux murs voiles en fonction de ratio du plancher.
 (Structure à un seul étage, deux travées).

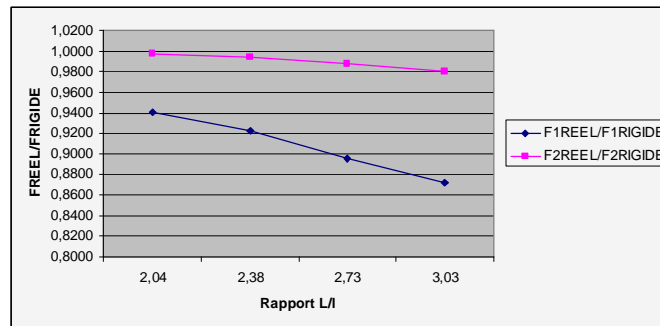


Schéma 6: Diagramme des efforts aux murs voiles en fonction de ratio du plancher.
 (Structure à plusieurs travées).

4. la position des ouvertures à proximité des éléments de contreventement constitue les cas le plus défavorable. À surface égale, une seule ouverture fragilise davantage la rigidité d'un plancher, dans son plan, que plusieurs petites ouvertures ensemble. Ainsi, on note que la proportion des ouvertures, toutes configurations et positions confondues, commence à être significative à partir de 10%. Cette proportion correspond à l'emplacement des ouvertures à proximité des éléments de contreventement. Pour des emplacements plus favorables, milieu d'un plancher, cette proportion peut atteindre les 20%.

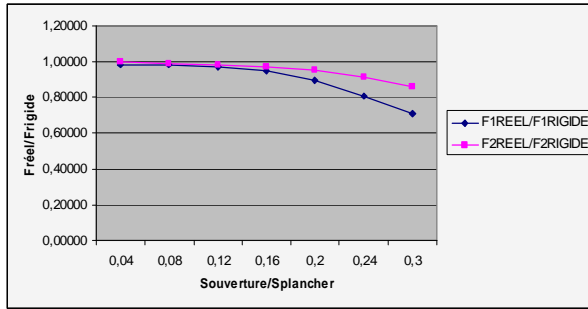


Schéma 7: Diagramme des efforts aux murs voiles en fonction de la surface de l'ouverture existante dans le milieu du plancher (Structure à un seul étage, une seule travée).

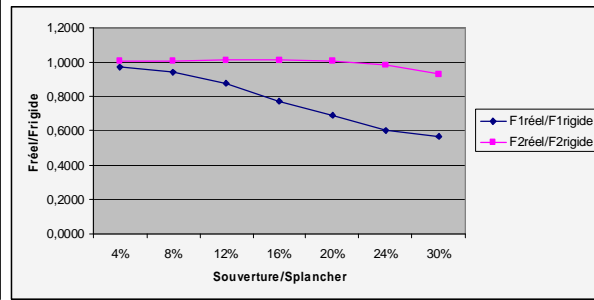
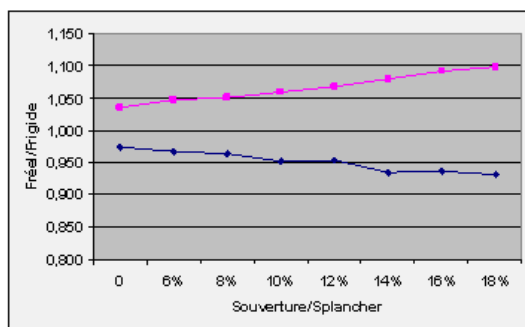
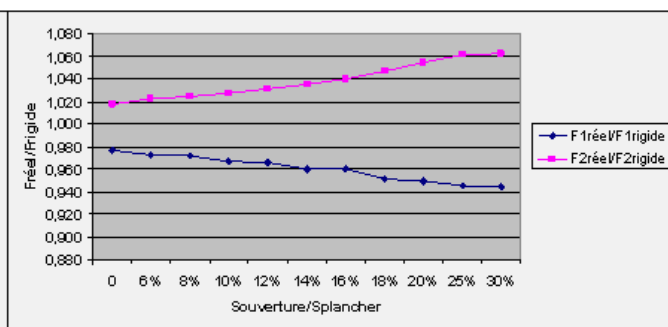


Schéma 8: Diagramme des efforts aux murs voiles en fonction de la surface de l'ouverture existante dans le coin du plancher. (Structure à un seul étage, une seule travée).



Plancher à deux ouvertures

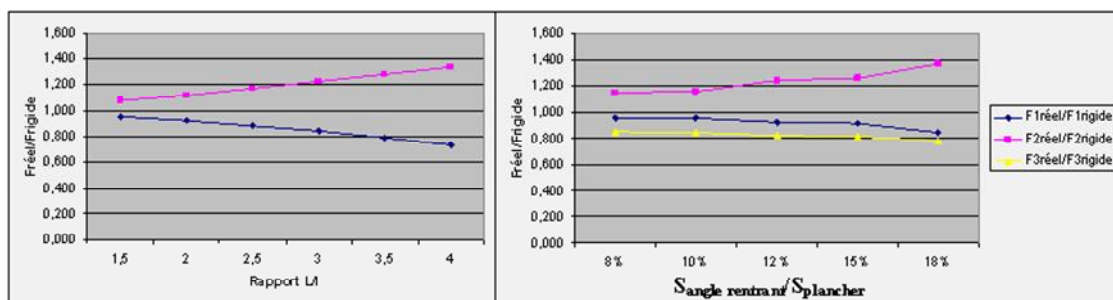


Plancher à quatre ouvertures

Schéma 9: Diagramme des efforts aux murs voiles en fonction de la surface des ouvertures existantes dans les cotés du plancher (Structure à deux travées).

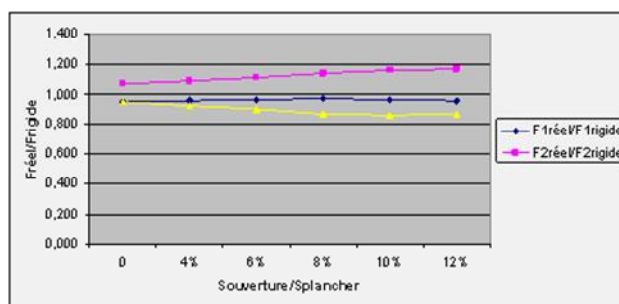
5. Il est très difficile de déterminer une épaisseur de plancher à partir de laquelle celui-ci devient semi-rigide ou flexible. Car cela dépend de l'élançement du plancher aussi. La modélisation des planchers avec leur flexibilité effective est recommandée au-delà des seuils établis ci-dessous :

- Si la longueur d'un plancher est de 2.5 fois sa largeur.
- Si la surface des ouvertures dans un plancher, situées à proximité des éléments de contreventement, dépasse 10% de sa surface totale.
- Si la surface des angles rentrants représente plus de 10 % de la surface totale du plancher.
- Si la structure est dite rigide, c'est-à-dire le déplacement de la structure très petit. C'est le cas par exemple de la présence de plusieurs voiles, notamment le cas des constructions, avec des voiles en béton armé, préfabriquées. Autrement dit, lorsqu'on estime que les déformations dans les éléments de contreventements verticaux et dans le plancher sont commensurables.
- Les plus petites valeurs des épaisseurs des planchers à corps creux suivant les normes algériennes sont prises respectivement 16 cm et 4 cm. L'analyse faite concernant ce type de planchers nous donne des résultats différents évoqués plus haut.



Selon le ratio du plancher

Selon la surface d'un angle rentrant



Selon la surface de l'ouverture existante dans le coin du plancher

Schéma 10: Diagramme des efforts aux murs voiles en fonction de ratio et surface de l'ouverture
 ($e_{\text{corps creux}} = 16 + 4 \text{ cm}$).

Cela nous renseigne qu'un plancher à corps creux est rigide, le ratio de la longueur et la largeur du plancher est inférieur à 2, le rapport entre la surface des angles rentrants et la surface du plancher concerné est inférieur à 8%. Et si le pourcentage d'ouverture dans un plancher n'excède 6% de la surface totale du plancher.

Références :

- Victor DAVIDOVICI « Formulaire du béton armé », volume 2 : constructions, (éditions du moniteur) Paris, 1995.
- Jean Pierre MOUGIN « Béton armé », BAEL 91 et DTU associés.
- Naeim FARZED "The seismic design handbook", deuxième édition, copyrighted material, 31 mars 2001.
- Guide CP-MI Antilles « Construction parasismique des maisons individuelles aux Antilles », Recommandations AFPS tome IV, Ministère de l'environnement et de l'équipement, Paris, 2001.
- D. K. Bull "Understanding the complexities of Designing Diaphragms in Buildings for Earthquakes" Symposium to celebrate the lifetime contributions of professor's emeriti Tom Paulay and Bob Park, Christchurch New Zealand, 2003.
- CENTRE NATIONAL DE RECHERCHE APPLIQUEE EN GENIE-PARASISMIQUE « REGLES PARASISMIQUES ALGERIENNES RPA 99 / VERSION 2003 ».
- AFNOR (Association Française de Normalisation Eurocode 8) : Calcul des structures pour leur résistance aux séismes —Partie 1 : Règles générales, actions sismiques et règles pour les bâtiments NF EN 1998-1 Septembre 2005.
- International Code Council: INTERNATIONAL BUILDING CODE®First Printing: January 2006.
- Building Seismic Safety Council (BSSC): National Institute of Building Sciences NEHRP RECOMMENDED PROVISIONS FOR SEISMIC REGULATIONS FOR NEW BUILDINGS AND OTHER STRUCTURES Part 2: Commentary (FEMA 303) 1997 Edition.
- Building Seismic Safety Council (BSSC): National Institute of Building Sciences NEHRP Recommended Provisions For Seismic Regulations For New Buildings And Other Structures (Fema 450) Part 1: Provisions 2003édition.

Federal Emergency Management Agency Prestandard And Commentary For The Seismic Rehabilitation Of Buildings Fema 356 / November 2000.
Recommendations of a NZSEE Study Group on Earthquake Risk Buildings, "New Zealand of society for earthquake engineering" Assessment and Improvement of the Structural Performance of Buildings in Earthquakes, June 2006.
Dhiman Basu and Sudhir K. Jain "Seismic Analysis of Asymmetric Buildings with Flexible Floor Diaphragms". JOURNAL OF STRUCTURAL ENGINEERING © ASCE / AUGUST 2004 / 1169.
Jocelyn Paquette, Michel Bruneau, M.ASCE and Svetlana Brzev "Seismic Testing of Repaired Unreinforced Masonry Building having Flexible Diaphragm». JOURNAL OF STRUCTURAL ENGINEERING © ASCE / OCTOBER 2004 / 1487.
L. Sarkissian, K. Khalili Jahromi and S.M. Zahrai "Impact of Joists Direction on the Diaphragm Behaviour of Composite Floor Systems" JSEE: Spring 2006, Vol. 8, No. 1 / 29.
Can C. Simsir "Influence of Diaphragm Flexibility on the Out-of-Plane Dynamic Response of Unreinforced Masonry Walls". September 15, 2004, Department of Civil & Environmental Engineering University of Illinois at Urbana-Champaign.
Sang-Cheol Kim, Donald W. White "Linear static analysis of low-rise buildings with flexible diaphragms using the structural separation method", School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA 30332-0355, USA, Received 7 April 2003; received in revised form 8 July 2003; accepted 21 August 2003.
Arturo Tena-Colunga and Daniel P.Abrams, members, ASCE "Seismic behaviour of structures with flexible diaphragms", journal of structural engineering/July 1996/439.
CAPRA Alain et DAVIDOVICI Victor « Calcul dynamique des structures en zones sismiques » Deuxième édition, EYROLLES, 61, Boulevard Saint Germain, 75005 Paris 1982.
Victor DAVIDOVICI « La construction en zone sismique », le monitor Paris 1989.
André FILIATRAULT « Eléments de génie parasismique et de calcul dynamique des structures », éditions de l'école polytechnique de Montréal, 1996.

Notation :

F : Effort sismique total agissant au niveau de nème étage ;
 K_{in} : Rigidité du ième élément vertical au niveau de nème étage ;
 $\sum K_{in}$: Rigidité totale au niveau de nème étage ;
 r_i : Distance entre le centre de rigidité de nème niveau et le ième élément ;
 enk : Distance entre le centre de rigidité de nème niveau et le centre de masse du kème niveau ;
 K_{an} : Rigidité angulaire de la construction au nème niveau ;
 F : Effort sismique total agissant au niveau de nème étage ;
 S_{in} : Surface des charges appartenant au ième élément vertical au niveau de nème étage ;
 $\sum S_{in}$: Surface des charges totale au niveau de nème étage ;
 F_1 : Effort de mur le plus rigide ;
 F_2 : Effort de mur le moins rigide ;
 F_3 : Effort de mur rigidité moyen ;
 $F_{réel}$: Effort tranchant aux murs adjacent au plancher modélisé avec sa flexibilité dans leur plan ;
 F_{rigide} : Effort tranchant aux murs adjacent au plancher résultant de l'hypothèse du plancher rigide ;
 L : longueur du plancher ;
 L : largeur du plancher ;
 $S_{ouverture}$: Surface de l'ouverture ;
 $S_{plancher}$: Surface du plancher ;
 $S_{angle\ rentrant}$: Surface de l'angle rentrant.