

## ANALYSE DES STRUCTURES AVEC L'EFFET DE LA FLEXIBILITE DES PLANCHERS.

Fouad Kehila<sup>1</sup>, Ali Zerzour<sup>2</sup>,

1) Maître de recherche, centre de génie para-sismique CGS

2) Maître de conférence, Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics

### 1. INTRODUCTION

En général, la structure d'un bâtiment peut être considérée comme constituée de plusieurs systèmes verticaux liés par des diaphragmes horizontaux. L'analyse de la structure est plus rapide si les diaphragmes peuvent être considérés comme rigides. Les logiciels d'analyse des structures, assimilent un diaphragme rigide pour la modélisation des planchers. La rigidité de flexion du plancher est généralement ignorée dans l'analyse. Cette prétention peut être raisonnable pour l'analyse de certains types de structure, cependant, les planchers peuvent avoir une influence significative sur la réponse latérale des structures. Si la rigidité de flexion des planchers est totalement ignorée, la rigidité latérale peut être sensiblement sous-estimée. En réalité, et afin d'inclure la rigidité de flexion des planchers, la dalle doit être modélisée avec des éléments finis plats.

L'analyse des structures avec différents types de diaphragme (diaphragme rigide et diaphragme flexible), des structures en voiles et en portiques ainsi que des structures mixtes. Le logiciel d'éléments finis Midas/Gen est utilisé pour cette modélisation.

Les résultats obtenus tel que les réponses sismiques des structures ainsi que les déplacements, les périodes de vibrations et les efforts tranchant à la base montrent la différence de l'assimilation du type de diaphragme plancher.

### MOTS CLÉS

diaphragme, plancher rigide, plancher flexible, rigidité de flexion des planchers

### 2. Analyse d'effet de diaphragme

Une des avancées modernes dans le génie civil et qui a eu le plus grand impact dans la pratique, est celle de traiter la structure en entier. Il y a peu d'années, dans la pratique, l'emphase était d'étudier les éléments individuellement, ou dans des groupes limités, faisant plus tard des approximations brutes de la réponse pour l'ensemble de ces éléments.

Cette pratique est encore reflétée dans beaucoup de code. Le chapitre 8 de ACI 318 - 02 est un bon exemple.

Dans la conception parasismique l'accouplement des déplacements latéraux des armatures parallèles à chaque étage et la possibilité d'avoir des effets de torsion de structure, ce qui a réglé le souci pendant beaucoup de décennies.

Le code SEAOC de l'association structurale ingénieurs de la Californie de 1959, recommande les conditions

de la force latérale incluses dans l'annexe de Blume, Newmark et Corning pionnier 1961, (**Recommended Lateral Force Requirements included as an Appendix of Blume, Newmark and Corning pioneer 1961 book on design of multistory reinforced concrete buildings for earthquake motions [Blume et. al. 1961]**), inclut l'exigence de la nécessité de distribuer le l'effort tranchant d'étage, et les forces de cisaillement associé aux moments de torsion, aux éléments de résistance latéraux proportionnellement à leur rigidité à travers l'action de diaphragme.

Plusieurs méthodes et programmes informatiques ont été développés pour l'analyse des systèmes de bâtiment dans lesquels tout le nombre d'inconnus est réduit par quelques prétentions. En plus de ces méthodes, les programmes machine 3D généralisés sont également disponibles. Dans cette section, un examen de ces méthodes et programmes informatiques de modélisations des structures en utilisant les systèmes tridimensionnels est passé en revue.

Au début des années 70, avec les développements en informatique, plusieurs programmes informatiques ont été conçus pour l'analyse du type de bâtiment de structures. Le programme TABS, qui a été développé par

Wilson et Dovey en 1972, est un exemple de tels programmes. Dans la première version de TABS, une structure tridimensionnelle est réduite à une série de trames rectangulaires planaires et chaque trame est traitée comme structure indépendante. La matrice structurale de rigidité est formée dans la prétention que toutes les trames sont reliées à chaque niveau de plancher par un diaphragme, qui est rigide dans son propre plan. Dans le programme, les chargements transversaux sont transférés aux poteaux et voiles par ces diaphragmes rigides de plancher. En plus de trois degrés de liberté à chaque niveau de plancher (translation dans x et y et rotation de y autour de l'axe vertical), dans les poteaux et voiles il y a déplacement vertical supplémentaire et une rotation. Après le programme TABS, ont été suivis de TABS 80, de TABS 90, et d'ETABS.

Les premières versions, désignées sous le nom des pseudo programmes 3-D, sont limitées à des applications et ne donnent pas des résultats adéquats, particulièrement dans l'analyse transversale de chargement.

Une série de programmes structuraux généralisés d'analyse a été développée par le même groupe. SAP et SOLID SAP sont les deux programmes d'éléments finis pour l'analyse tridimensionnelle des structures. Ils ont été suivis de SAPIV, de SAP90 et de SAP2000. Pour modéliser les membres des systèmes structuraux, deux types différents d'éléments sont disponibles dans SAP : élément FRAME et élément SHELL.

Tous les deux ont été dérivés par formulation d'éléments finis. SAP90 et SAP2000 sont largement répandus dans des bureaux d'études pour l'analyse et la conception des structures.

Une autre méthode dans le domaine des analyses

tridimensionnelle des structures en voiles avec trois degrés de liberté à chaque plancher. Elle consiste à dériver la matrice structurale de rigidité pour un mur typique de cisaillement et à employer la prétention rigide de plancher. Dans cette méthode proposée, le système réduit est résolu en utilisant la méthode de rigidité. La fig.01, montre le nombre de degrés de liberté réduits au plancher pour une structure à un niveau.

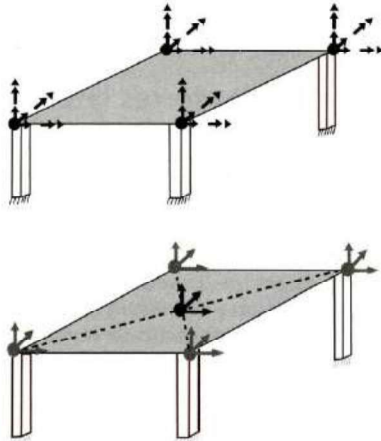


Figure (01) : Réduction du nombre de DDL

### 3. Prétention du diaphragme rigide

Une des prétentions les plus importantes dans cette étude est la prétention du plancher rigide une prétention commune qui simplifie le problème de manière significative et réduit le temps de calcul. La prétention de diaphragme rigide est basée sur la rigidité des planchers dans leur propre plan. Les mesures sur le terrain sur un grand nombre de structures ont vérifié que les déformations dans leurs plan pour les planchers sont petites comparées aux déplacements horizontaux d'inter-étage. Avec l'utilisation des diaphragmes rigides de plancher, les chargements transversaux horizontaux agissant aux niveaux de plancher sont directement transférés aux éléments structuraux verticaux (les poteaux et voiles). Ceci a comme conséquence trois degrés de déplacement de liberté à chaque niveau de plancher (translations dans deux directions et rotations orthogonales de la direction verticale), et des déplacements dans le plan du diaphragme peuvent être exprimés en termes de ces déplacements.

Pour une modélisation raisonnable de diaphragme rigide, est de définir un noeud de maître à chaque plancher, ayant trois degrés de liberté (deux translations et une rotation), le noeud principal est situé au centre de gravité de chaque plancher. Tous les autres noeuds sur ce plancher s'appellent les noeuds esclaves et se composent de trois déplacements (translation dans la direction x, translation dans la direction y et rotation au tour de la direction z) peuvent être représentés en utilisant les déplacements du noeud principal et de la distance au noeud principal comme dans les équations suivantes :

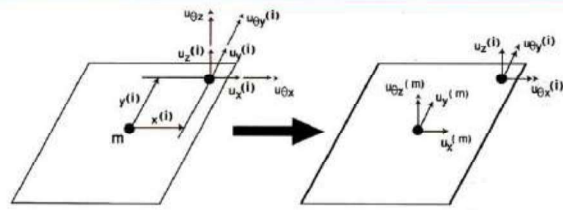


Figure (02) : Noeud maître -> Noeud esclave

Comme illustré sur la fig.03, quand la structure est soumise à une charge latérale et la rigidité dans le plan du plancher est sensiblement plus grande que la rigidité horizontale des poteaux, les déformations dans le plan du plancher peuvent être ignorées.

En conséquence, les valeurs  $\delta_1$  et  $\delta_2$  peuvent être considérées égales.

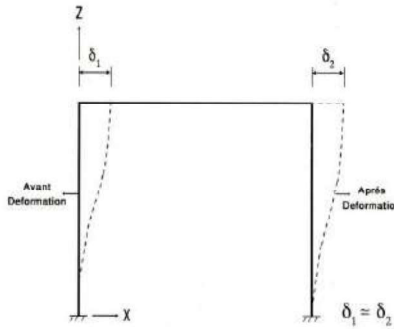
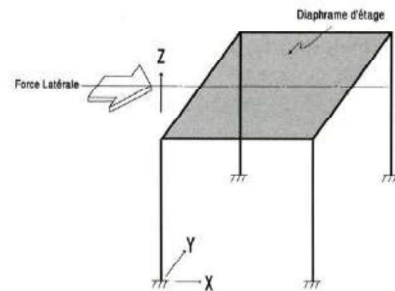


Figure (03) : Les déformations dans le plan du plancher

Quand une structure à un étage, comme illustrée sur la fig.04, est soumise à moment de torsion dans la direction verticale et la rigidité dans le plan du plancher est sensiblement plus grand que la rigidité horizontale des poteaux, le diaphragme entier du plancher sera tourné  $\Phi$ , où  $\Phi = \Phi_1 = \Phi_2 = \Phi_3 = \Phi_4$ .

En conséquence, les quatre degrés de liberté peuvent être réduits à un seul degré de liberté.

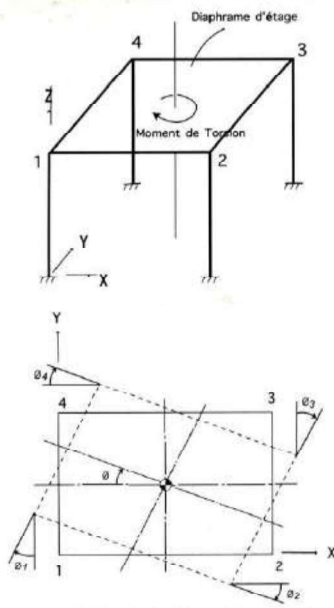


Figure (04) : Rotation du plancher

La fig.05 montre un processus dans lequel un total de 24 (6x4) degrés de liberté sont réduits à 15 degrés de liberté.

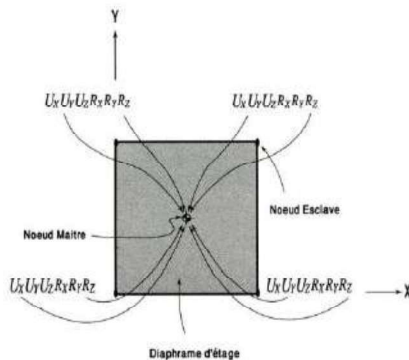
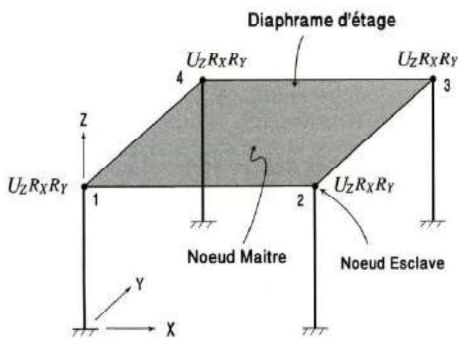


Figure (05) : Réduction de degrés de liberté pour le diaphragme de plancher avec rigidité significative dans son plan.



- $U_x$  : Déplacement dans la X- direction au noeud correspondant.
- $U_y$  : Déplacement dans la Y- direction au noeud correspondant.
- $U_z$  : Déplacement dans la Z- direction au noeud correspondant.
- $R_x$  : Rotation l'axe des abscisses au noeud correspondant.
- $R_y$  : Rotation l'axe des ordonnées au noeud correspondant.
- $R_z$  : Rotation au l'axe Z au noeud correspondant.

**4. Distribution des forces latérales**

Pour être considéré comme diaphragme, un système de plancher doit pouvoir transmettre les forces latérales aux murs de cisaillement sans excéder une déflexion qui causerait une destruction à n'importe quel élément vertical. L'action réussie d'un diaphragme exige également qu'elle soit correctement attachée dans les murs de support de cisaillement. La conception devrait assurer la liaison à la jointure entre les éléments structuraux horizontaux et verticaux du bâtiment.

Des diaphragmes peuvent être considérés comme analogues aux poutres horizontales.

La rigidité d'un diaphragme horizontal affecte la distribution des forces latérales dans les murs de cisaillement. Aucun diaphragme n'est infiniment rigide ou flexible. Cependant, pour l'analyse, les diaphragmes peuvent être classifiés dans trois groupes : rigide, semi-rigide ou semi flexible, et flexible.

Des diaphragmes peuvent être construits avec différents matériaux tels que le béton, le bois ou l'acier dans diverses formes. Les combinaisons de tels matériaux sont également possibles. Quand le diaphragme se compose des unités telles que le contre-plaqué, les planches de béton préfabriqué ou tablier métallique, ses caractéristiques dépendent, largement, des attachements d'une unité à l'autre et aux membres de support. De tels attachements doivent résister à des efforts de cisaillement dus aux actions de translation et de rotation internes.

**\* Diaphragme rigide**

On admet qu'un diaphragme rigide distribue les forces horizontales aux éléments de résistance verticaux proportionnellement aux rigidités relatives de ces éléments (fig. 06).

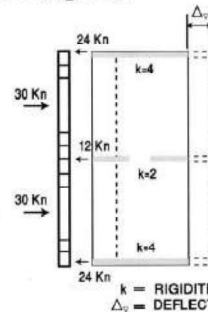


Figure (06) : Distribution des forces latérales (diaphragme rigide)

**\* Diaphragmes semi rigides ou semi flexibles**

Les diaphragmes semi rigides ou semi flexibles sont des diaphragmes qui guident de manière significative sous la charge, mais ont la rigidité suffisante pour distribuer une partie de la charge aux éléments verticaux proportionnellement aux rigidités de ces éléments. L'action est analogue à une poutre continue de rigidité appréciable sur le rendement des appuis (fig. 07). Les réactions de diaphragme dépendent de la rigidité relative du diaphragme et des éléments de résistance verticaux.

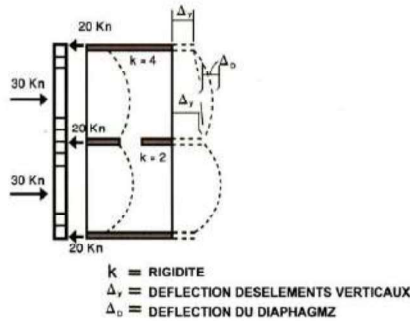


Figure (07) : Distribution des forces latérales (diaphragme semi rigide)

**\* Diaphragme flexible**

Un diaphragme flexible est analogue à une poutre ou à des séries continues de poutres simples, la distribution des forces latérales aux éléments de résistance verticaux est proportionnelle aux surfaces tributaires.

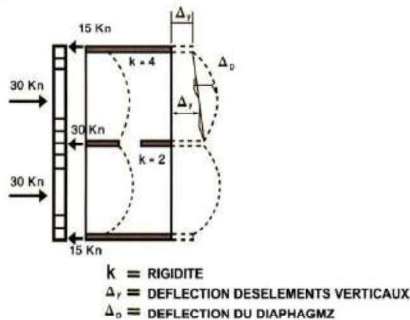


Figure (08) : Distribution des forces latérales (diaphragme flexible)

**5. Conception des diaphragmes dans les codes parasismiques**

La conception des diaphragmes contenus dans les codes UBC-97, ASCE 7-95, IBC et RPA 99 sont semblables mais varient dans le degré de détails.

Ces codes contiennent une clause qui limite la déviation dans leurs plans pour les diaphragmes d'étage.

La déviation dans le plan de diaphragmes calculée n'exécède pas la déviation des éléments attachés afin de maintenir l'intégralité structurale.

La section 1630.6 du code uniforme de bâtiment UBC1997 déclare que des «diaphragmes seront considérés flexibles dans le but de distribution de la force sismique et du moment de torsion où la déformation

latérale maximum du diaphragme est plus de deux fois la dérive moyenne d'étage.» Ainsi, l'état de code peut être exprimé en utilisant l'équation (1).

$$1997\text{UBC} : \frac{\text{Déformation maximal latérale dediaphragme}}{\text{Dérive moyenne d'étage}} > 2 \quad (1)$$

Ce rapport peut être déterminé comme déplacement latéral dans le plan du diaphragme lui-même sous la charge latérale relativement à la dérive d'étage des éléments de résistance (murs) sous la charge tributaire latérale équivalente. Il devrait également noter que la «dérive d'étage» est le déplacement latéral d'un niveau relativement au niveau ci-dessus ou ci-dessous.

**6. Exemples numériques**

**6.1 Description des structures**

Les structures analysées dans cet exemple sont : structure en voile avec une variation des étages de 5, 10 et 15 montrée sur la (fig. 09), l'autre structure est en portique avec les mêmes dimensions en plan et la même variation d'étage.

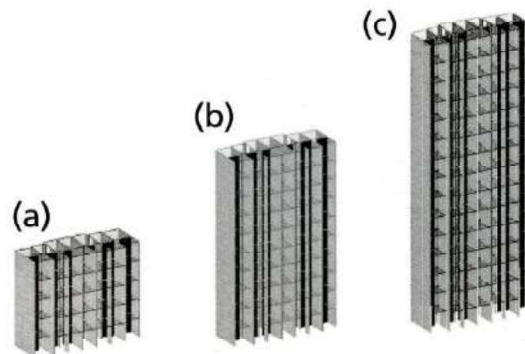
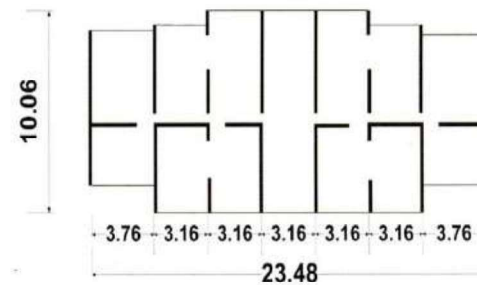


Figure (09) : Dimension en plan de la structure en voile

**6.2 Choix du logiciel d'analyse**

Le logiciel utilisé pour l'analyse des différentes structures est le logiciel MIDAS/Gen, ce logiciel est un logiciel d'éléments finis, et peut modéliser tout type de plancher.

Pour la modélisation des planchers rigides, l'élément (Rigid Diaphragm SLAB) est utilisé pour l'analyse, cette

## STRUCTURES

modélisation inclut 3 DDL pour chaque plancher. La fig.09 montre le modèle de la structure en 15 étages avec des diaphragmes rigides dans le logiciel MIDAS/Gen.

Pour la modélisation des planchers flexibles, l'élément (Plate) est employé pour l'analyse, cette modélisation inclut l'effet de flexibilité des dalles.

### \* Structure en Voile

La structure en voile à une dimension de 23,48m en longueur et 10,06m en largeur. L'épaisseur des voiles longitudinaux est de 16cm et des voiles transversaux est de 20cm.

La dalle pleine a une épaisseur de 20 cm.

Dans une analyse conventionnelle avec les logiciels tels que ETABS, SAP2000, MIDAS/GEN, la dalle du plancher est généralement modélisée avec un diaphragme rigide montrée sur la (fig.10) qui représente chaque plancher par trois (03) degrés de liberté.

Pour inclure l'effet de la dalle dans l'analyse, les dalles du plancher doivent être modélisées comme illustré dans la (fig.10) en subdivisant la dalle en plusieurs éléments Plaques.

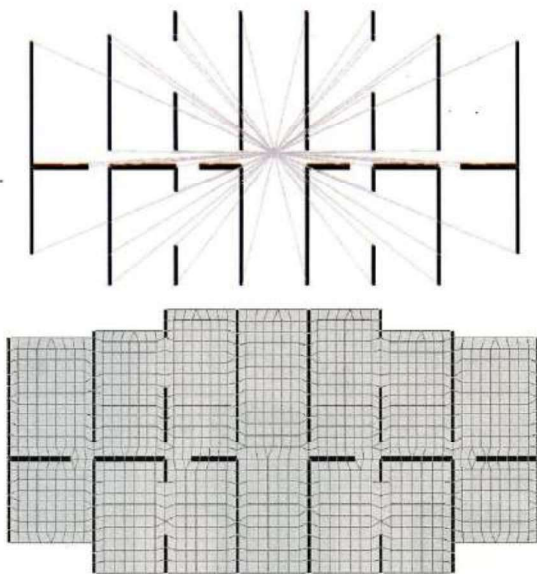


Figure (10) : Modélisation plancher rigide - plancher flexible (structure en voile)

### \* Structure en portique

La structure en portique à une dimension de 23,48m en longueur et 10,06m en largeur, les dimensions des poteaux, poutres et dalles sont montrée dans le tableau 01.

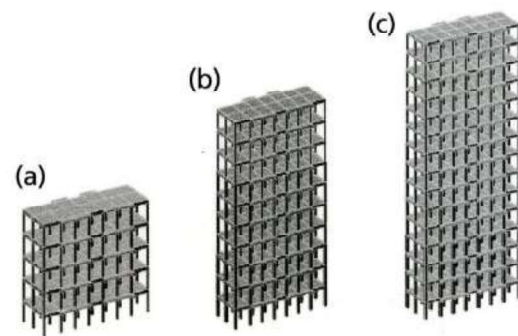
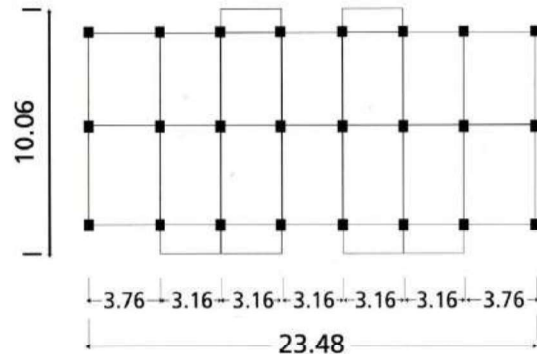


Figure (11) : Dimension en plan de la structure en portique

Etage	Poteaux (b×h) cm	Poutres (b×h) cm	Dalles (e) cm
1-4	70×70	35×45	20
5-8	60×60	35×45	20
9-12	50×50	35×45	20
13-15	40×40	35×45	20

Tableau (01) : Dimensions des éléments pour la structure en portique

La modélisation des planchers rigides et flexibles et la même que celle des voiles et ils sont montrées dans la fig. (12)

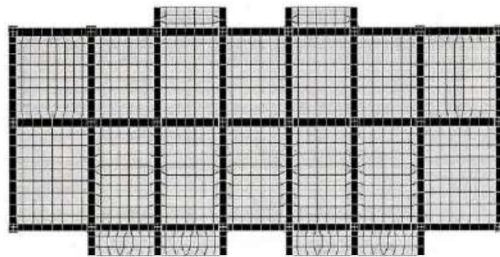
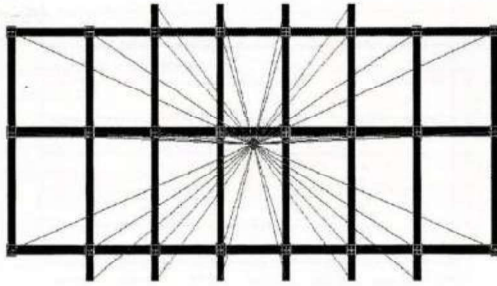


Figure (12) : Modélisation plancher rigide- plancher flexible (structure en portique)

### 6.3 Réponses sismiques des différentes structures

Une analyse du spectre de réponse a été analysée avec les structures en voiles et en portiques pour étudier l'effet de la flexibilité des planchers sur la réponse sismique.

Dans ces analyses, deux modèles ont été employés pour chaque type de plan. Le premier modèle emploie des diaphragmes rigides (procédé conventionnel) comprenant la rigidité de flexion des plancher, alors que le deuxième modèle emploie des éléments plaque pour présenter la rigidité de flexion des plancher. Trois types de plan ont été analysés avec les structures 5, 10 et 15 étages.

Le spectre de réponse RPA 99 a été employé dans cette étude. Dans la conception de l'exemple le type de sol, zone sismique, groupe d'usage et facteur de comportement (S3, ZONE III, Groupe d'usage 2 et  $R = 4$ ) (fig.13), notons que pour la structures en portiques seuls le facteur de comportement change  $R=5$  (fig.13)

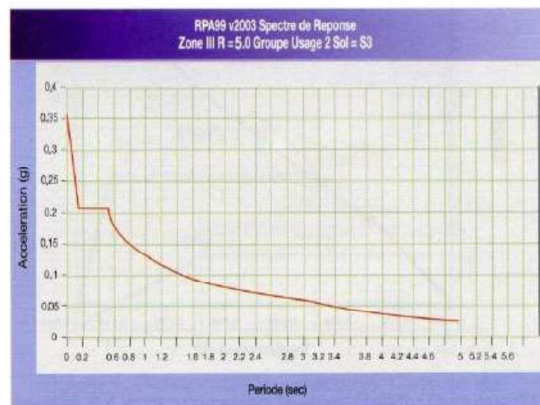
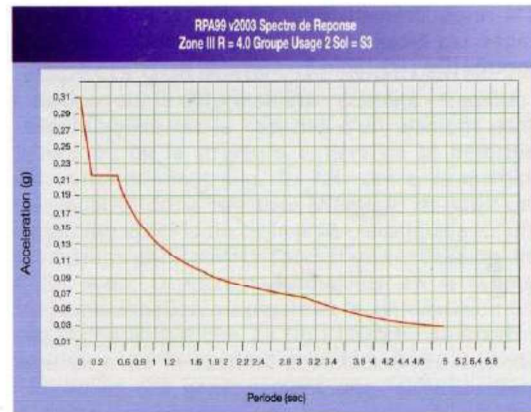


Figure (13) : Spectre de réponse (structure en voiles/ structure en portiques)

### 6.4 Les déplacements latéraux

Les déplacements latéraux de l'analyse spectrale dans la direction transversale sont montrés dans les (fig.14, 15, 16) pour les structures 5, 10 et 15 étages respectivement. Dans tous les cas, les déplacements latéraux sont réduits quand la rigidité de flexion des planchers est incluse dans l'analyse. Dans les structures en portiques, les déplacements des planchers sont proches pour les structures 5, 10 et 15 étages respectivement comme illustré dans les (fig.3.28, 3.29, 3.30). Les effets sont plus significatifs, cependant, en structures en voile. les

déplacements avec plancher rigide montrent l'influence la plus significative de l'effet du plancher flexible. Le déplacement de la structure en voile de 15 étages avec celle du portique a été réduit de seulement 7.5 % quand la rigidité de flexion est considérée. Les déplacements des structures en voiles ont été réduits, de 48%, 66% et 71% respectivement pour les structures de 5,10 et 15 étages. Les détails de réduction des déplacements sont montrés dans les tableaux suivants :

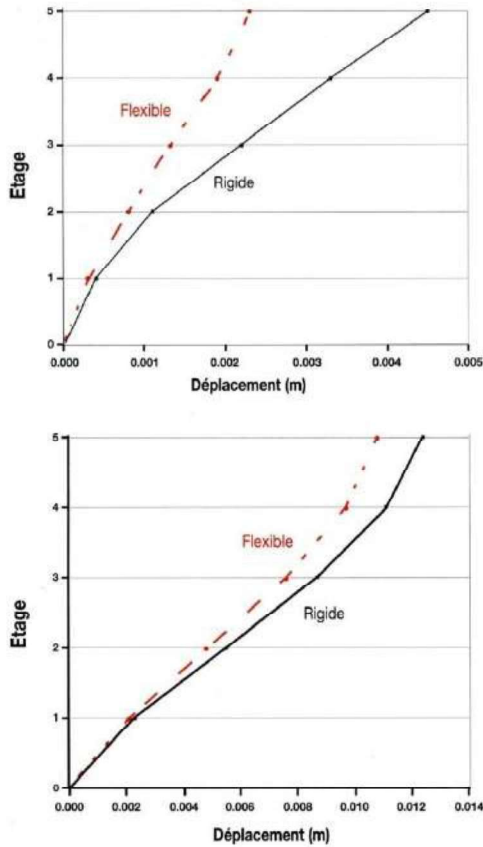


Figure (14) : Déplacement de la structure à 5 étages (Voiles – Portiques)

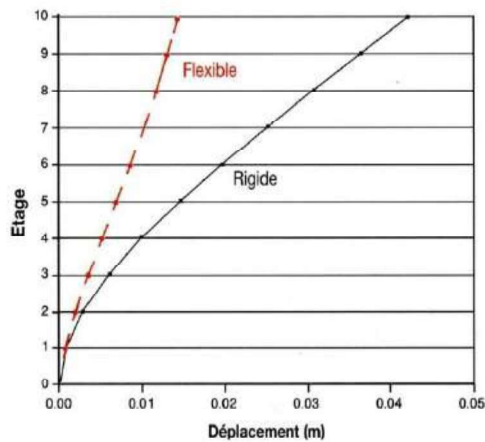


Figure (15) : Déplacement de la structure à 10 étages (Voiles – Portiques)

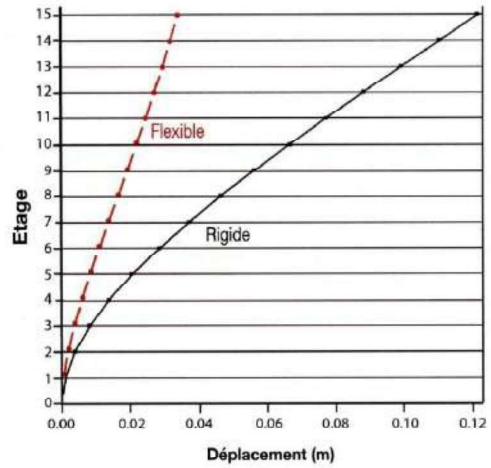


Figure (16) : Déplacement de la structure à 15 étages (Voiles – Portiques)

Pour ce qui est des accélérations, les modèles avec des diaphragmes rigides ont de longues périodes et ainsi des accélérations moins que ceux des modèles avec des diaphragmes flexibles, comme montré dans la fig.17. Par conséquent, si la rigidité de flexion des planchers est ignorée, les efforts tranchants à la base peuvent être sous-estimés.

Quoique la différence dans les périodes soit petite, la différence dans les accélérations devient grande dans la région plus courte de période, parce que la pente du spectre de réponse est raide dans cette région. Comme montré dans le tableau 02, les efforts tranchants à la base des modèles avec des diaphragmes rigides sont inférieurs à ceux de diaphragmes flexibles, afin d'obtenir des résultats plus précis, il est important d'inclure la rigidité de flexion des plancher afin de traduire le comportement réel d'un bâtiment.

Type de Plan	Voile		Portique	
	V rigide	V flexible	V rigide	V flexible
5 étages	1552,007	1655,259	1352,271	1433,359
10 étages	2135,197	3069,234	1853,541	2210,516
15 étages	2879,271	3876,085	2452,847	3128,714

Tableau (02) : Effort tranchant calculé par le spectre de réponse pour les différentes structures (en KN)

6.5 Périodes normales de vibration

Des périodes de vibrations sont montrées dans les (fig.18, 19, 20) et ce pour les structures de 5,10 et 15 étages. Ils prouvent que dans tous les cas la période de vibration est plus courte quand la flexibilité des planchers est incluse. Les effets de plancher sont plus apparents dans les structures en voiles. Les différences entre les périodes sont plus significatives dans le premier mode qui est le mode le plus important pour la réponse sismique d'une structure.

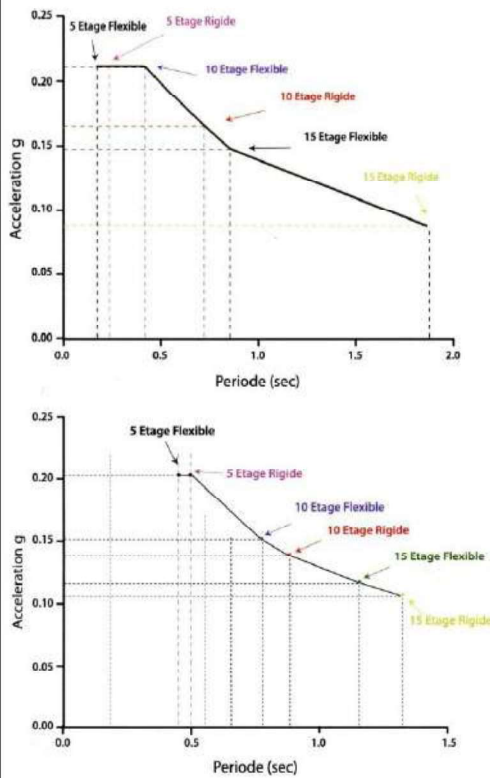


Figure (17) : Différence des accélérations pour les différents modèles (structure en voile/portique)

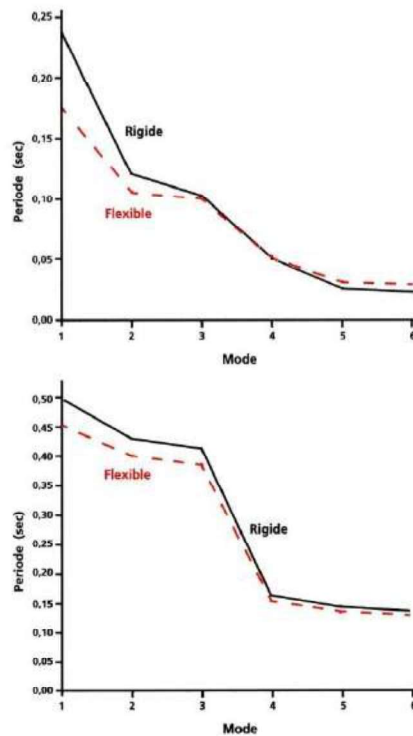


Figure (18) : Période de vibration pour la structure à 5 étages (Voiles - Portiques)



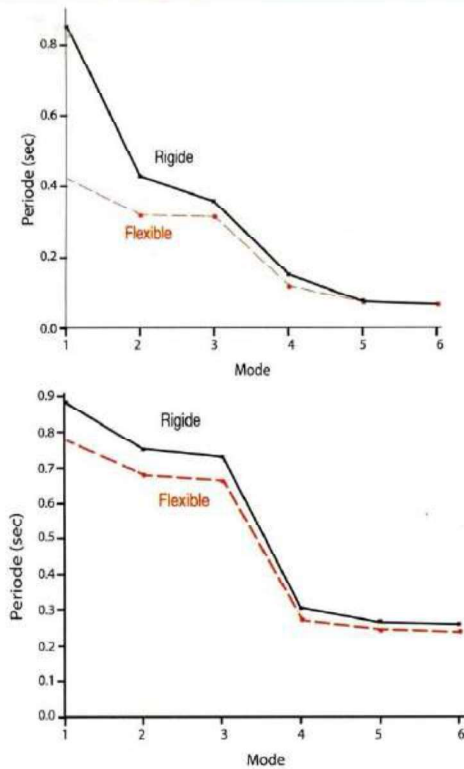


Figure (19) : Période de vibration pour la structure à 10 étages (Voiles – Portiques)

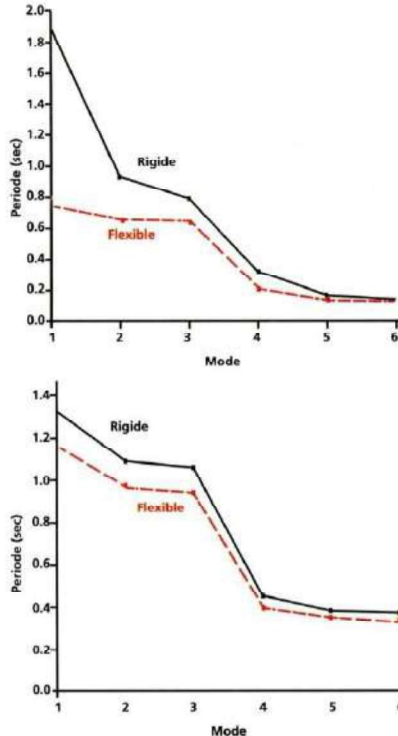


Figure (20) : Période de vibration pour la structure à 15 étages (Voiles – Portiques)

6.6 Temps d’analyses des structures

Les tableaux 03 et 04 montrent le temps d’analyses pour les différents structures en voiles et portiques avec différents plancher rigide et flexible, remarquons que l’analyse avec des diaphragmes flexibles prend un temps plus de celle avec des diaphragmes rigides parce que les diaphragmes flexibles prend en considérations tous les DDL de la structure.

		Nombre de DDL	Temps d’analyse (s)		Temps total en (sec)
			Analyse de spectre de réponse	Analyse de mode propres	
5 étages	Rigide	735	1,25	0,22	2,52
	flexible	11400	51,96	11,35	105,5
10 étages	Rigide	1470	0,69	0,56	1,98
	flexible	22800	133,05	35,73	338,03
15 étages	Rigide	2205	3,22	1,03	6,98
	flexible	34200	269,08	51,01	857,33

Tableau (03) : Temps d’analyses pour les structures en voiles.

		Nombre de DDL	Temps d’analyse (s)		Temps total en (sec)
			Analyse de spectre de réponse	Analyse de modes propres	
5 étages	Rigide	525	0.59	0.11	1.28
	Flexible	10140	34.12	5.83	65.60
10 étages	Rigide	1050	1.24	1.36	3.71
	Flexible	20280	62.78	13.28	179.25
15 étages	Rigide	1575	3.80	1.02	8.32
	Flexible	30420	151.61	18.68	449.11

Tableau (04) : Temps d’analyses pour les structure en portiques.

7. Conclusion

Dans cette étude, l’effet de la flexibilité des planchers a été introduit dans les analyses ainsi que la modélisation des diaphragmes rigides et flexibles.

De cette étude on peut tirer les conclusions suivantes:

- Pour bien présenter au mieux le comportement dynamiques des structures, la rigidité de la flexion des dalles doit être considérée;
- La dalle du plancher, doit être subdivisée en plusieurs éléments « plats » afin d’inclure l’effet de la flexibilité du plancher.

## Bibliographie

- Jain, S. K., and Jennings, P. C. (1985). "Analytical models for the low rise buildings with flexible floor diaphragms." *Earthquake Eng.Struct. Dyn.*, 13-2, 225–241.
- Ju, S. H., and Lin, M. C. (1999). "Comparisons of building analyses assuming rigid or flexible floors." *J. Struct. Eng.*, 125-1, 25–31.
- Uniform Building Code UBC 1997 "Uniform building code." Int.Conf. of Building Officials, Whittier, Calif.
- Dong-Guen Lee, Hyun-Su Kim and Min Hah Chun, "Efficient seismic analysis of high-rise building structures with the effects of floor slabs " *Engineering Structures* Volume 24, Issue 5, May 2002, Pages 613-623
- Hyun-Su Kim , Dong-Guen Lee , and Chee Kyeong Kim , "Efficient three-dimensional seismic analysis of a high-rise building structure with shear walls " *Engineering Structures* Volume 27, Issue 6, May 2005, Pages 963-976
- Boppana, R.R., and Naeim, F., «Modeling of Floor Diaphragms in Concrete Shear Wall Buildings,» *Concrete International, Design & Construction, ACI*, July, 1985.
- H.W. Lee and Y.G. Park. MIDAS/GENw — the most intelligent design & analysis system, MIDAS Information Technology Co.