

MODÉLISATION ET ÉTUDE DE L'ISOLATION SISMIQUE D'UNE STRUCTURE EN BÉTON ARMÉ

MODELING AND STUDY OF SEISMIC ISOLATION OF BUILDINGS

S. HAMOUCHE¹, A. SEGHIR¹, M. KADRI²

¹ Université A. MIRA, Bejaia, Algérie, e-mail : sabiha_hamouche@hotmail.com

¹ Université A. MIRA, Bejaia, Algérie, e-mail : abdelghani.seghir@univ-bejaia.dz

² Université de Boumerdes, Algérie, e-mail : dzkad@yahoo.fr

RÉSUMÉ

Afin de réduire ou d'atténuer l'énergie transmise par le séisme à la structure, des systèmes d'isolation sismique à la base ont été développés ces dernières années. L'objectif de cette étude est de montrer l'efficacité de l'isolation sismique pour une structure en béton armé à huit niveaux qui a été endommagée par le séisme de Boumerdes en 2003. Les accélérations, les déplacements et l'effort tranchant à la base subit par la structure, telle qu'elle a été conçue sans isolation, ont été calculés et comparés avec ceux qu'elle aurait dû subir si elle a été isolée. Les résultats obtenus montrent que les structures dotées de l'isolation sismique permettent de réduire les accélérations et les déplacements inter-étage. Une structure isolée se comporte presque comme un corps rigide. De plus, une étude numérique permettant de définir un facteur de réduction d'efforts tranchant dû à l'isolation sismique a été menée, un facteur d'une valeur de 5 a été obtenu dans la présente étude.

MOTS-CLÉS : *Isolation sismique, Séisme, Appuis parasismiques, Modélisation numérique, Réponse sismique, Dissipation d'énergie.*

ABSTRACT

In order to reduce or attenuate the energy transmitted by the earthquake to a structure, seismic base isolation systems are developed these last years. The objective of this study is to show the effectiveness of the seismic isolation for a reinforced concrete structure of eight levels which has been damaged by the 2003 Boumerdes earthquake. Accelerations, displacements and base shear endured by the structure, as it was designed without isolation, are computed and compared to those which would be developed if the structure had been isolated. The results obtained show that structures equipped with the seismic isolation make it possible to reduce accelerations and displacements inter-story. Isolated structure behaves like a rigid body. Moreover a numerical study defining a reduction factor of the base shear levels by using seismic isolation was carried out; a factor of value 5 was obtained in the present study.

KEYWORDS: *Seismic isolation, Earthquake, Rubber supports, Modeling, Seismic response, Energy dissipation.*

1. Introduction

L'analyse dynamique des structures soumises aux actions sismiques constitue un domaine actif de recherche et revêt un intérêt particulier dans les pays de forte sismicité comme l'Algérie. Les séismes de Chlef de 1980 (magnitude 7.3) et celui de Boumerdès de 2003 (magnitude 6.8) montrent à quel point est exposé le nord algérien.

Le mouvement du sol est transmis aux constructions par l'intermédiaire de leurs fondations, donc si le sol pouvait se déplacer sans entraîner les ouvrages, les efforts induits pourraient être fortement réduits. Dans ce contexte, l'idée de disposer entre le sol et les bâtiments un filtre, permettant de dissiper le maximum d'énergie, s'est développée sous l'appellation d'isolation sismique [4,12,13].

Contrairement à la méthode classique qui a pour principe d'augmenter la rigidité de la structure, l'isolation sismique est basée sur le concept de la grande souplesse horizontale, qui consiste à découpler le mouvement de la structure de celui du sol dans le but de réduire les forces qui lui sont transmises [4,10,11,14].

L'objectif de ce travail est de montrer l'efficacité de l'isolation sismique, pour une structure en béton armé à huit niveaux endommagée par le séisme de Boumerdès. Dans un premier temps, on présente les détails de dimensionnement selon l'UBC de l'isolateur utilisé pour la structure. Ensuite, on modélise la structure en question avec et sans isolation. Finalement, on termine le travail par une étude paramétrique permettant de définir un facteur de réduction d'efforts.

2. Présentation de la structure

La structure est un bâtiment en béton armé de huit niveaux de forme en plan rectangulaire de $8 \times 20 \text{ m}^2$ comportant cinq travées suivant un côté et deux travées suivant l'autre côté. Les poutres sont de $30 \times 40 \text{ cm}^2$ de section, les poteaux du RDC sont de $60 \times 60 \text{ cm}^2$ et la hauteur d'étage est de 3.06 m.

La figure 1 montre une vue globale de la structure et son modèle 3D, la figure 2 représente la vue en plan de l'étage courant et la figure 3 montre quelques dommages subits par la structure.

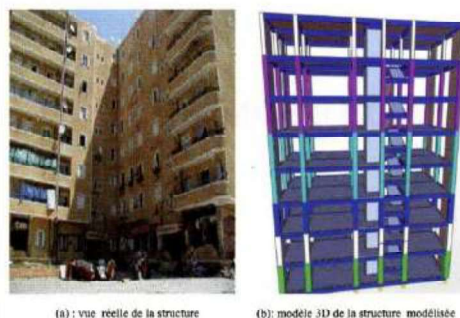


Figure 1 : Photo de la vue globale de la structure

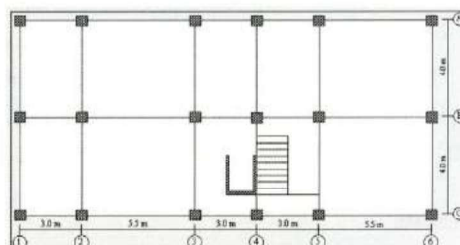


Figure 2 : Vue en plan de la structure



Figure 3 : Dommages subis par la structure

3. Description du système d'isolation

Le type d'isolateur sismique qui a été choisi pour cette étude est l'appui en élastomère à amortissement élevé (High-Damping Rubber Systems). Ce type d'appui est constitué de matériaux légèrement déformables appelés élastomère. Le matériau peut être naturel tel que le caoutchouc ou synthétique comme le néoprène, disposé sous forme de couches séparées par des plaques d'acier nommées frettes [1,2,3,5,6,14].

Le système d'isolation consiste en 22 appuis en caoutchouc à amortissement élevé (18 poteaux + 4 appuis pour l'ascenseur), placés d'une façon concentrique sous chaque poteau. La fig.4.a donne une schématisation de l'isolateur choisi et ses dimensions.

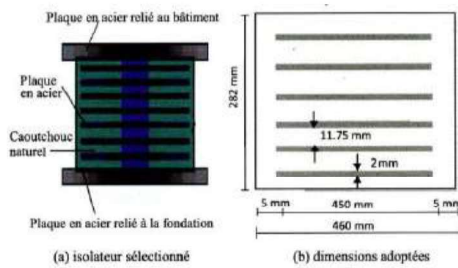


Figure 4 : Représentation de l'isolateur sélectionné et les dimensions de conception finales

4. Méthode de dimensionnement

Le règlement parasismique algérien (RPA) n'inclut pas encore le calcul des isolateurs sismiques, à cet effet, nous utilisons le règlement UBC 97 [9], le FEMA [8] et nous nous référons à Kelly et Nacim [12]. Un ensemble de facteurs permettant le dimensionnement des isolateurs est utilisé, le tableau 1 donne les valeurs adoptées pour l'isolateur choisi.

Tableau 1 : Facteurs de dimensionnement de l'isolateur.

Zone 2a : coefficient de zone sismique Z	0.15
Le type de profil de sol	S _E
Le type de la faille	A
Distance épiscoptrale	≈ 7 km
Le coefficient M _M	1.646
Facteur dépendant de la proximité de la faille, N _a	1.30
Facteur dépendant de la proximité de la faille, N _v	1.61
Coefficient sismique, C _A	0.3
Coefficient sismique, C _V	0.5
Coefficient sismique, C _{VD}	0.34
Coefficient sismique, C _{VM}	0.95
Coefficient d'amortissement B _D et B _M	1.35

Pour la conception préliminaire, on considère que le système d'isolation devrait fournir des périodes d'isolation effectives de : TD = 2.5 sec et TM = 2.7 sec, ces périodes sont définies comme suit :

$$T_D = 2\pi \sqrt{\frac{W}{k_D g}} \quad \text{et} \quad T_M = 2\pi \sqrt{\frac{W}{k_M g}}$$

Avec le poids du bâtiment estimé à W = 16000 KN, les valeurs des rigidités minimale et maximale totales sont :

$$k_{D,tot} = 10291,77 \text{ KN/m} \quad \text{et} \quad k_{M,tot} = 8823,53 \text{ KN/m}$$

Ce qui donne pour chacun des 22 isolateurs

$$k_D = 467,80 \text{ KN/m}$$

et

$$k_M = 401,07 \text{ KN/m}$$

Les déplacements minimal D_D et maximal D_M sont donnés en fonction de deux paramètres C_{VD} et C_{VM}, calculés à partir des facteurs de dimensionnement du tableau 1, leurs valeurs sont C_{VD}=0.34 et C_{VM}=0.95. Les expressions des deux déplacements sont :

$$D_D = \frac{g}{4\pi^2} \frac{C_{VD} T_D}{B_D}$$

et

$$D_M = \frac{g}{4\pi^2} \frac{C_{VM} T_M}{B_M} \text{ m.}$$

ce qui donne : D_D = 0,23 m et D_M = 0,47 m.

L'épaisseur minimale des couches d'élastomère est :

$$t_r = \frac{D_D}{\gamma_{max}} = 0,153 \text{ m}$$

on prend t_r = 20 cm.

L'expression de la rigidité horizontale étant :

$$K_H = \frac{GA}{t_r}$$

ce qui donne une section A de 0,1403 m² en prenant K_H=k_D. Soit un diamètre Φ=0,45m pour un isolateur circulaire.

Le nombre de couches d'élastomère se détermine à l'aide d'un facteur de forme :

$$S = \frac{\Phi}{4t}$$

tel que 5 ≤ S ≤ 30. Il est régulièrement fixé à 10, d'où l'épaisseur d'une plaque d'élastomère de t = 11 mm.

Soit 17 couches séparées par 16 plaques d'acier de 2 mm d'épaisseur.

Les deux plaques d'extrémités ont généralement une épaisseur de 25 mm et un diamètre légèrement supérieur à celui de l'élastomère, souvent 5 mm de plus. D'où la hauteur totale de l'isolateur de 288 mm. Les dimensions finales sont schématisées sur la fig.4(b).

L'énergie que peut dissiper cet isolateur est donnée par :

$$W_D = 2\pi K_H D^2 B_{eff}$$

B_{eff} est un amortissement qui prend une valeur de 15%.

La force limite Q que peut subir l'isolateur dans le domaine élastique est donnée par l'expression suivante :

$$Q = \frac{W_D}{4D}$$

Sa valeur après tout calcul fait est $Q = 25,37$ KN. Au delà de cette limite élastique, la rigidité de l'appui décroît, elle peut être considérée constante égale à un pourcentage de K_H , comme dans le cas du modèle bilinéaire usuel. Son expression est donnée comme suite :

$$K_p = K_H - \frac{Q}{D}$$

Ce qui donne une valeur $K_p = 357,63$ KN/m.

La rigidité effective élastique K_E de l'appui est estimée à $10K_p$. Ainsi dans la modélisation, on peut considérer chaque appui comme un ressort à comportement élasto-plastique parfait (EPP), dont les deux rigidités sont K_E et K_p .

5. Comparaison et discussion des résultats de la modélisation de la structure.

La structure est idéalisée en utilisant deux modèles numériques avec le logiciel SAP2000. Le premier modèle est encastré à la base, le deuxième introduit des ressorts à comportement bilinéaire sous chaque poteau. En premier lieu, on s'intéresse aux périodes propres, ensuite on utilisera pour l'étude de la réponse sismique, les composantes transversales de l'enregistrement de Dar-El-Beida du séisme de Boumerdès de 2003. Les vingt-cinq premières secondes de l'enregistrement sont présentées sur la Fig. 5 suivante.

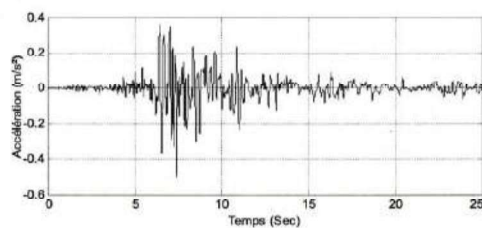


Figure 5 : Accélérogramme de Dar el Beida

5. 1. Périodes propres :

Les périodes obtenues pour les deux modèles sont présentées dans le tableau 2.

Tableau 2 : Périodes de la structure avec et sans le système de l'isolation

Mode	Période en sec	
	Structure isolée	Structure conventionnelle
1	1.73683	0.72691
2	1.33938	0.62436
3	0.83922	0.55595
4	0.40033	0.24881
5	0.35175	0.19413
6	0.02203	0.17306
7	0.01262	0.14208
8	0.01227	0.10276

Ces résultats montrent que les périodes correspondant au modèle isolé sont augmentées en moyenne de 58%. L'isolation à la base a pour effet d'assouplir le bâtiment, ce qui réduit l'accélération spectrale de calcul du RPA.

5. 2. Accélérations et déplacements

Les réponses maximales en accélérations et déplacements des différents niveaux pour les deux modèles encastré et isolé sont présentées sur le tableau 3.

Tableau 3 : Accélération et déplacement maximaux - cas de la composante transversale

Niveau	Structure encastrée		Structure isolée	
	Accélération maximale m/s²	Déplacement maximale cm	Accélération maximale m/s²	Déplacement maximale cm
8	11.17	5.00	5.31	14.82
7	9.17	4.54	5.27	14.55
6	7.35	4.06	5.22	14.26
5	7.42	3.42	5.16	13.94
4	7.76	2.70	5.10	13.60
3	6.56	1.89	5.04	13.24
2	4.32	1.11	4.97	12.86
1	1.69	0.40	4.91	12.47
0			4.84	12.10

La comparaison de ces résultats nous montre que le système d'isolation a fait diminuer l'accélération du dernier niveau de moitié (50.13%) et augmenter son déplacement total de 82.68% .

Les figures 6 et 7 suivantes présentent la variation des déplacements et des accélérations en fonction du niveau d'étage, pour les deux cas de modèle encastré et isolé. Le déplacement du corps rigide subit par la structure dans le cas où elle est isolée se voit clairement sur la figure 7.

En termes de déplacements relatifs, on voit bien que l'isolation sismique réduit énormément les déformations réelles du bâtiment. Le déplacement relatif par rapport au niveau zéro diminue de 5 cm à 2,7 cm au dernier niveau.

Le tableau 4 donne les valeurs des déplacements relatifs inter-étage pour les deux modèles. Il est clair que plus on monte en niveau plus l'écart est important. Du point de vue règlement, il devient facile de satisfaire les recommandations concernant les déplacements inter-étages et les effets P- Δ , il faudra cependant faire plus attention au joint sismique.

Tableau 4 : Déplacements inter étages en (cm) de la structure isolée et encastrée

Niveau	Structure encastrée	Structure isolée
8	0.27	0.46
7	0.29	1.48
6	0.32	0.63
5	0.34	0.72
4	0.36	0.81
3	0.38	0.79
2	0.39	0.71
1	0.37	0.40

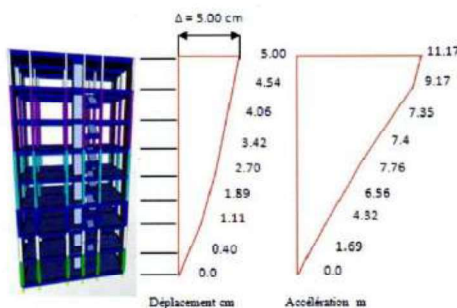


Figure 6 : Déplacement et accélération suivant la direction transversale de la structure encastrée

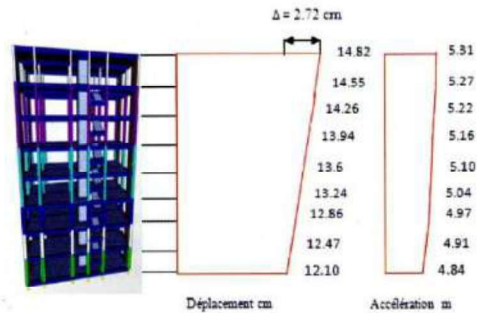


Figure 7 : Déplacement et accélération suivant la direction transversale de la structure isolée

5. 3. Effort de cisaillement dans les poteaux

Dans cette partie de l'étude, on s'intéresse à l'effort tranchant subit par les poteaux. On rapporte particulièrement dans le tableau 5 les valeurs au pied du poteau C5 qui a subi des dommages montrés sur la photo (b) de la figure 3.

Tableau 5 : Effort de cisaillement du poteau C5

Niveau	Structure encastrée	Structure isolée
Effort de cisaillement (KN)	259	50.80

On remarque que si le bâtiment a été équipé d'isolateur sismique, ce poteau aurait subi un effort tranchant 5 fois plus faible. En conséquence, la construction aurait pu résister au séisme avec très peu de dommage. En outre, en cas des répliques sismiques, la structure isolée demeure presque intacte après chaque secousse et reste tout à fait apte à résister à une autre.

5. 4. Facteur de réductions d'efforts

Finalement, on clôture cette étude en introduisant un facteur de réduction d'effort qui permet de ramener l'effort de cisaillement du modèle isolé à celui encastré à la base. Ce facteur donne les niveaux d'accélération maximales que peuvent subir les structures isolées par rapport à ceux pour lesquels sont calculées les structures courantes.

Pour cela, on excite le modèle de la structure isolée avec l'accélérogramme du séisme de Dar-el-Beida, après amplification en le multipliant par un facteur (R) qu'on fait augmenter jusqu'à ce que la réponse donne le même effort tranchant que celui de la structure encastrée.

En pratique, à cause du comportement non linéaire des appuis introduits dans le modèle isolé, on commence par calculer un premier rapport entre efforts qu'on note R_1 et qu'on utilise pour amplifier l'accélérogramme et recalculer le nouvel effort tranchant. Une seconde valeur de coefficient R_2 est ensuite évaluée de la même manière. On répète la procédure pour des valeurs successives R_3, R_4, \dots , jusqu'à convergence. Le tableau 6 montre les valeurs trouvées pour quatre itérations. La valeur $R=4.7$ peut être considérée acceptable pour ce cas traité.

Tableau 6 : Facteur de réduction d'effort

R	Effort de cisaillement (KN)	
R1	0.1933	19.82
R2	2.5259	141.6
R3	4.6201	253.7
R4	4.7166	259

6. Conclusion

Les techniques parasismiques modernes représentent un excellent, et souvent économique, système pour réaliser une protection sismique efficace des structures nouvelles et existantes. L'isolation sismique à la base améliore considérablement la protection des bâtiments pour deux raisons essentielles : La réduction de la déformation des éléments structuraux et l'atténuation des accélérations transmises à la structure. La première permet une réduction de la quantité de matériaux dans la superstructure et la seconde, limite le risque de dommages pour le contenu, particulièrement important lorsqu'il s'agit d'équipements fragiles qui doivent rester opérationnel pendant et après un séisme.

Grâce aux isolateurs parasismiques, un niveau potentiellement élevé de protection des bâtiments par rapport aux techniques conventionnelles peut être atteint avec, en plus, la réalisation d'économies sur les coûts du projet.

Références bibliographiques

- [1] Acar, E., Comparison of design specifications for seismically isolated buildings, These of Master, the graduate school of natural and applied sciences of Middle East technical University, february 2006.
- [2] Ben Mekki, O., Amortissement semi-actif des structures flexibles, Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Mai 2006.
- [3] Bungale, S. and Taranath, Ph., Wind and earthquake resistant buildings structural analysis and design., Los Angeles, California, Octobre 2004.
- [4] Franklin, Y., Hongping, J. And Kangyu, L., Smart structures: innovative systems for seismic response control, Taylor & Francis Group, London et New York, 2008.
- [5] Filiatrault, A., Eléments de génie parasismique et de calcul dynamique des structures, Edition de l'école polytechnique de Montréal, 1996.
- [6] FEMA-302 Applied Technology Council, NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures, chapitre 13, Building Seismic Safety Council, Washington D.C., 1997.
- [7] FEMA-451 Applied Technology Council, NEHRP recommended provisions: design examples, chapter 11, Building Seismic Safety Council Washington, D.C, August 2006.
- [8] FEMA-450 Applied Technology Council, NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures, Part 1- Provisions, prepared by the Building Seismic, chapitre 13, Safety Council of the National Institute of Building Sciences, 2003.
- [9] International Conference of Building Officials (ICBO), Earthquake Regulations for Seismic-Isolated structures, Uniform building Code, chapitre 16, Whittier, CA, 1997.
- [10] Kelly, T and S.E., Base isolation of structures, Holmes Consulting Group Ltd, New Zealand, Design guidelines July 2001.
- [11] Lapointe, E., An investigation of the principles and practices of seismic isolation in bridge structures, Thèse of Master, Submitted to the Department of Civil and Environmental Engineering, May, 2004.
- [12] Nacim, F. and Kelly, J., Design of seismic isolated structure: from theory to practice, John Wiley & Sons Inc., New York, 1999.
- [13] Mayes, L. and Naeim, F., design of structures with seismic isolation. Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley. Simon, F., Nove, N. and Murat, Aléas sismiques, codes du bâtiment et opinions d'atténuation des risques pour les immeubles canadiens, Département de génie civil, Université d'ottawa (ontario), Canada. 2001.