

ETUDE DE LA REPONSE SISMIQUE DES MURS DE CONTREVENTEMENT EN BETON ARME REHABILITES PAR DES MATERIAUX COMPOSITES

R. Yeghnem ^{***}, S. A. Meftah ^{**}, A. Tounsi ^{**} et E. Adda Bedia ^{**}
I. Mechab ^{**}, A. H. Belahdj ^{**}

** Université Dr. Tahar Moulay de Saida - Département de Génie Civil et Hydraulique
BP 138, Cité Ennasr, Saida, Algérie, yeghnemreda2000@yahoo.fr*

*** Laboratoire des Matériaux et Hydrologie, Université Djillali Liabés de Sidi Bel Abbés, Algérie*

RESUME.

L'intensité des forces sismiques agissant sur un bâtiment lors d'un séisme est conditionnée non seulement par les caractéristiques du mouvement sismique, mais aussi par la rigidité de la structure sollicitée. Le comportement d'un élément mur est complexe puisqu'il dépend à la fois de son élancement, de la disposition en plan de l'ensemble des murs, de l'importance des charges verticales et de la forme de sa section. De ce point de vue, il est généralement reconnu que la modélisation du comportement des murs en béton armé est bien plus complexe que celle des éléments linéaires (poutres et poteaux).

La maintenance de ces éléments consiste à les protéger, aboutissant ainsi à une meilleure étanchéité ou limitant d'éventuelles fissurations. Parmi les techniques disponibles, l'une des plus efficaces, est la réhabilitation par l'utilisation des matériaux composites.

Le présent travail traite une étude du comportement des murs de contreventement en béton armé, réhabilités par des matériaux composites d'une part, et des plaques en acier d'autre part, sous sollicitations sismiques. Des séismes de fortes accélérations (El Centro, Hachinohe et San Fernando) étaient testés. Les divers résultats numériques obtenus sont discutés et les facteurs essentiels influençant la réponse sismique des murs en béton armé réhabilités sont mis en relief. Des perspectives sont en cours d'étude.

MOTS-CLES. Séisme, murs en béton armé réhabilités, éléments finis, matériaux composites, lois de mélange.

1. Introduction

Les structures de bâtiments peuvent subir d'importants endommagements, qui sont dus aux effets de la corrosion engendrée par l'agressivité atmosphérique, ainsi que par des forces sismiques qui s'avèrent très destructrices. En plus des méthodes de réhabilitation traditionnelles (chemisage, gainage et injection d'une résine) souvent employées en Algérie à la suite de chaque séisme comme procédés de confortement, l'utilisation des plaques en matériaux composites doit être développée, compte tenu des avantages que procure ce type de renforcement.

L'analyse dynamique des structures en béton armé telles que les poutres, poteaux et planchers renforcés par des matériaux composites a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche (S. Benyoucef et al., 2006), (A. Tounsi., 2006). Cependant, peu de travaux dans ce domaine ont traité les murs de contreventement en béton armé (A. Balsamo et al., 2005), (S. A. Meftah et al., 2006), (H.S. Shen et al., 2003), (S.A. Meftah et al., 2008).

2. Analyse des murs de contreventement par éléments finis

De nos jours, la méthode des éléments finis est devenue un outil indispensable dans l'analyse des structures en béton armé. Dans cette étude, deux éléments existants, nommés respectivement : l'élément CHEUNG et l'élément KWAN (A. Coull et al., 1972), (A. Coull et al., 1983), (M. Albiges et al., 1982), (M.M. Coin et al., 1971) ont été utilisés. La combinaison de ces deux éléments a mené à un modèle satisfaisant certains critères. La figure 1 illustre l'élément de KWAN simplifié.

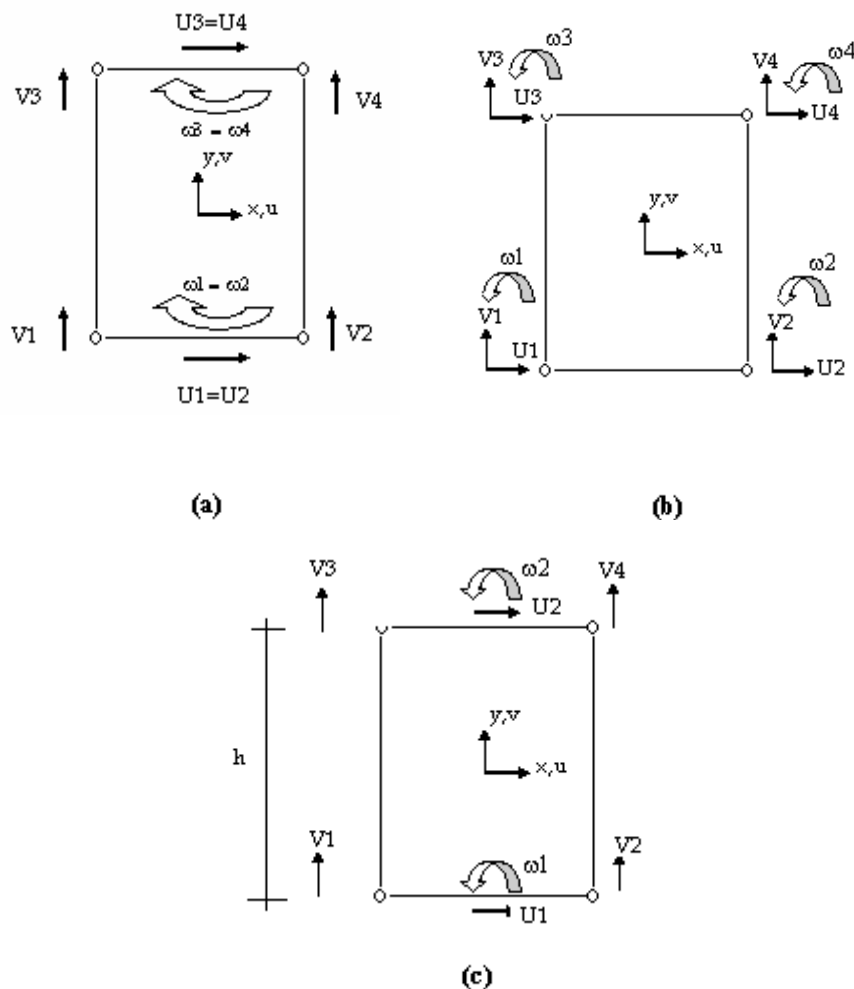


Figure1. (a) Elément simplifié avec des déformations latérales négligées
 (b) Elément original 12 DDL (c) Elément de KWAN simplifié (A. Mcleod, 1969)

En exploitant les translations et les rotations nodales de l'élément (A. McLeod, 1969), on peut obtenir, en fonction des degrés de liberté, les expressions suivantes pour un repère orthonormé :

$$u = u_1 \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{3}{2} \left(\frac{y}{h} \right) + 2 \left(\frac{y}{h} \right)^3 \right) + w_1 h \cdot \left(-\frac{1}{8} + \frac{1}{4} \left(\frac{y}{h} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{y}{h} \right)^2 - \left(\frac{y}{h} \right)^3 \right) + \quad [1]$$

$$u_2 \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{3}{2} \left(\frac{y}{h} \right) - 2 \left(\frac{y}{h} \right)^3 \right) + w_2 h \cdot \left(\frac{1}{8} + \frac{1}{4} \left(\frac{y}{h} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{y}{h} \right)^2 - \left(\frac{y}{h} \right)^3 \right)$$

$$v = v_1 \left(\frac{1}{2} - \frac{x}{b} \right) \left(\frac{1}{2} - \frac{y}{h} \right) + v_2 \left(\frac{1}{2} + \frac{x}{b} \right) \left(\frac{1}{2} - \frac{y}{h} \right) + v_3 \left(\frac{1}{2} - \frac{x}{b} \right) \left(\frac{1}{2} + \frac{y}{h} \right) + \quad [2]$$

$$v_4 \left(\frac{1}{2} + \frac{x}{b} \right) \left(\frac{1}{2} + \frac{y}{h} \right) + \left(\frac{6}{h} \cdot (u_1 - u_2) - 3 \cdot (w_1 + w_2) \right) \cdot \left(\frac{1}{4} - \left(\frac{y}{h} \right)^2 \right) \cdot \left(\frac{x}{2} - \frac{b}{4} \right)$$

3. Théorie et solutions

3.1 Détermination de la matrice de rigidité du mur en béton armé renforcé

Se basant sur les déplacements (horizontal et vertical) de l'élément de KWAN tel qu'indiqué par les équations [1] et [2] il est possible de déterminer la matrice de rigidité du mur voile renforcé par des plaques en matériau composite en calculant l'énergie de déformation de l'élément (mur+adhésif+composite)(figure 2).

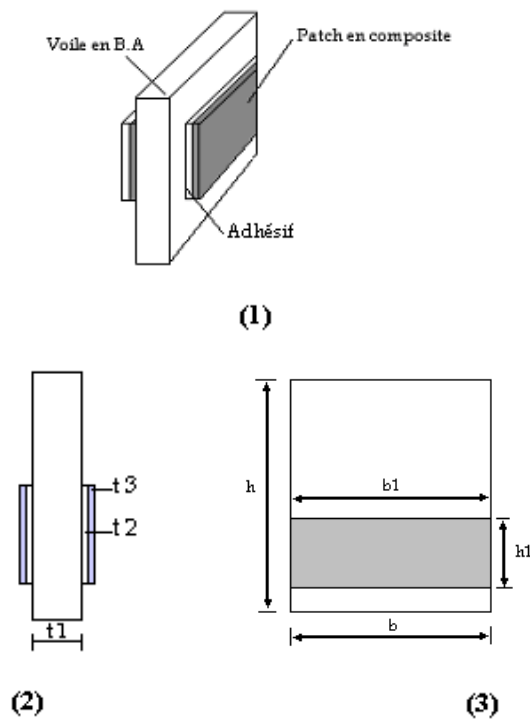


Figure 2. Perspective d'emplacement des plaques composites
 (1) Emplacement des patches, (2) Vue de face, (3) Vue latérale

Cette énergie due aux effets de flexion et de cisaillement vaut :

$$U^e = U_F^e + U_c^e \quad [3]$$

Où U_f^e et U_c^e respectivement les énergies de déformation dues à la flexion et au cisaillement sont écrites en fonction des déformations du mur de contreventement.

Considérons l'énergie de déformation due à l'effet de flexion, notée U_f^e ; elle vaut :

$$U_f^e = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \int_{vol} E_y^{(i)} (e_y)^2 dvol_{(i)} \quad [4]$$

Tel que :

$$e_y = \frac{dv}{dy} \quad [5]$$

L'expression de l'énergie de déformation due à l'effet de cisaillement peut être écrite comme suit :

$$U_c^e = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \int_{vol} G_{xy} (g_y)^2 dvol_{(i)} \quad [6]$$

Tel que :

$$g_y = \frac{du}{dy} + \frac{dv}{dx} \quad [7]$$

Où $E_y^{(i)}$ et $G_{xy}^{(i)}$ ($i=1..3$) sont les modules d'élasticité dans la direction y et les modules de cisaillement du mur de contreventement, de l'adhésif et du composite. Comme illustré sur la figure 2.

Pour chaque élément mur, l'énergie de déformation s'écrit :

$$U^e = \frac{1}{2} d_e^t K_w d_e \quad [8]$$

Où le vecteur de déplacement nodal est donné par :

$$d_e = \left\{ u_1, w_1, v_1, v_2, u_2, w_2, v_3, v_4 \right\} \quad [9]$$

Pour la matrice de rigidité K_w , elle est déterminée par une formulation des éléments finis standards (K.J. Bathe, 1996).

3.2 Calcul en vibrations libres

Le calcul en vibrations libres en utilisant l'hypothèse des masses concentrées à chaque niveau du bâtiment. Ceci conduit à adopter des matrices masses diagonales. Les forces d'inertie considérées se limitent aux composantes latérales et verticales en raison de leurs importances comparées à celles de rotation.

La matrice masse pour un tel système s'écrit sous la forme suivante :

$$[M] = \text{diag}[m_1, m_2, m_3, \dots, m_{n-1}, m_n] \quad [10]$$

Où: m_i ($i=1,2,..n$) sont les masses concentrées à chaque niveau le long de la hauteur de la structure et n le nombre des masses concentrées.

Le calcul de toute structure en vibration libre et en particulier les murs voiles consiste à trouver les valeurs propres λ_i et les vecteurs propres associés $\{u_i\}$ vérifiant la relation matricielle suivante :

$$[K]\{u_i\} = I^2 [M]\{\ddot{u}_i\} \quad [11]$$

$[K]$ et $[M]$ sont respectivement les matrices de rigidité et de masses globales obtenues par les assemblages des matrices élémentaires.

3.3 Système d'équations de mouvement

L'équation matricielle générale de mouvement peut être écrite sous la forme :

$$[M]\ddot{U}(t) + [C]\dot{U}(t) + [K]U(t) = P(t) \quad [12]$$

Où: $[M]$, $[C]$ et $[K]$ désignent respectivement les matrices masse, d'amortissement et de rigidité.

$U(t)$, $\dot{U}(t)$ et $\ddot{U}(t)$: respectivement les vecteurs de déplacement, de vitesse et d'accélération.

$P(t)$: Vecteur des forces extérieures.

La matrice d'amortissement est calculée par la méthode de Rayleigh par :

$$[C] = a_1 [M] + a_2 [K] \quad [13]$$

Avec :

$$a_1 = \xi \frac{2I_j I_p}{I_j + I_p} \quad \text{et} \quad a_2 = \xi \frac{2}{I_j + I_p} \quad [14]$$

ξ : facteur d'amortissement du système (5%)

λ_j et λ_p sont les fréquences propres déterminées par la résolution de l'équation du système non amorti :

$$|[K] - I^2 [M]| = 0 \quad [15]$$

Par l'utilisation de la méthode d'intégration pas à pas de Newmark β , on a résolu l'équation du mouvement. Les paramètres β et γ de la méthode d'intégration étaient pris respectivement égaux à $\frac{1}{4}$ et $\frac{1}{2}$.

4. Données du modèle étudié

De nombreux exemples sont présentés pour valider les résultats de la présente méthode. Ces résultats seront comparés à ceux du modèle de référence (modèle non renforcé). Les paramètres géométriques des structures contreventées par des murs en béton armé sont donnés dans le tableau 1.

Modèles de structures	Dimensions			
	Hauteur totale H (m)	Hauteur d'étage (m)	Largeur du mur (m)	Epaisseur du mur (m)
20 étages	60	3	18	0.50
25 étages	95	3.8	14	0.30

Tableau 1. Dimensions des structures étudiées

Tandis que les paramètres mécaniques des matériaux utilisés sont présentés dans le tableau 2.

Tableau 2. Paramètres mécaniques des matériaux utilisés

Matériaux	Propriétés mécaniques		
	Module de Young (MPa)	Module de cisaillement (MPa)	Coefficient de Poisson
Béton	$30.10^3 (E_i)$	12712	0.18
Adhésif	3000	1112	0.35
époxyde	3445	1275	0.35
Glass	50.10^3	5000	0.28
Carbone	140.10^3	5000	0.22
Acier	200.10^3	76923	0.30

5. Accélérographes des séismes record

En général, les séismes se différencient par leurs accélérations pouvant influencer le comportement des structures. Dans notre étude (R. Yeghneim et al., 2009), pour mener l'étude dynamique, trois excitations sismiques ont été choisies : El-Centro, Hachinohe et San Fernando, dont les accélérographes sont données par la figure 12.

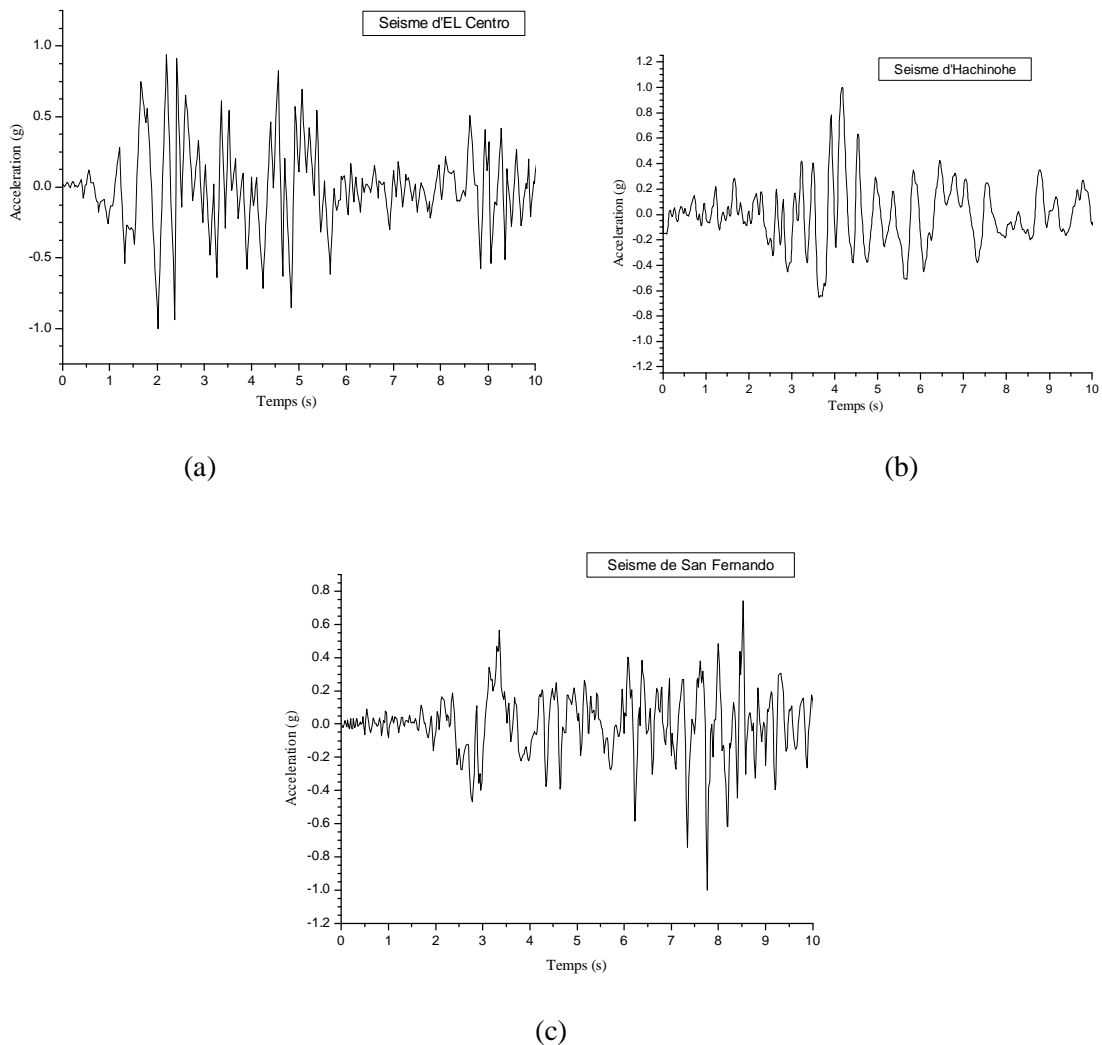


Figure 3. Accélérographes des séismes
 (a) El Centro ; (b) Hachinohe et (c) San Fernando

5. Etude paramétrique

En premier lieu, les déplacements maximaux au sommet (m) des différents types de voiles renforcés par CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic), GFRP (Glass Fiber Reinforced Plastic) et des plaques en acier sont comparées à celles du modèle non renforcé (modèle de référence), sous les divers séismes choisis (El Centro, Hachinohe et San Fernando). Les résultats des déplacements sont portés sur le graphe 4.

En second, les déplacements maximaux au sommet (m) d'un seul type de mur renforcé par CFRP sont étudiés. Ce modèle est comparé à celui du modèle non renforcé (modèle de référence), sous les divers séismes choisis (El Centro, Hachinohe et San Fernando), en gardant l'épaisseur de la plaque $t_3=0,006$ m, on constate l'effet de la surface renforcée par rapport à la surface totale du mur de refend. Les résultats des déplacements sont portés sur le graphe 5.

En dernier lieu, un voile renforcé par CFRP est étudié. En gardant le ratio $sp/st=0,2$, on détermine l'effet de l'épaisseur de renforcement sur les déflexions du mur. Les résultats des déplacements sont portés sur le graphe 6.

Avec :

sp : surface du mur de contreventement renforcé

st : surface du mur de contreventement total.

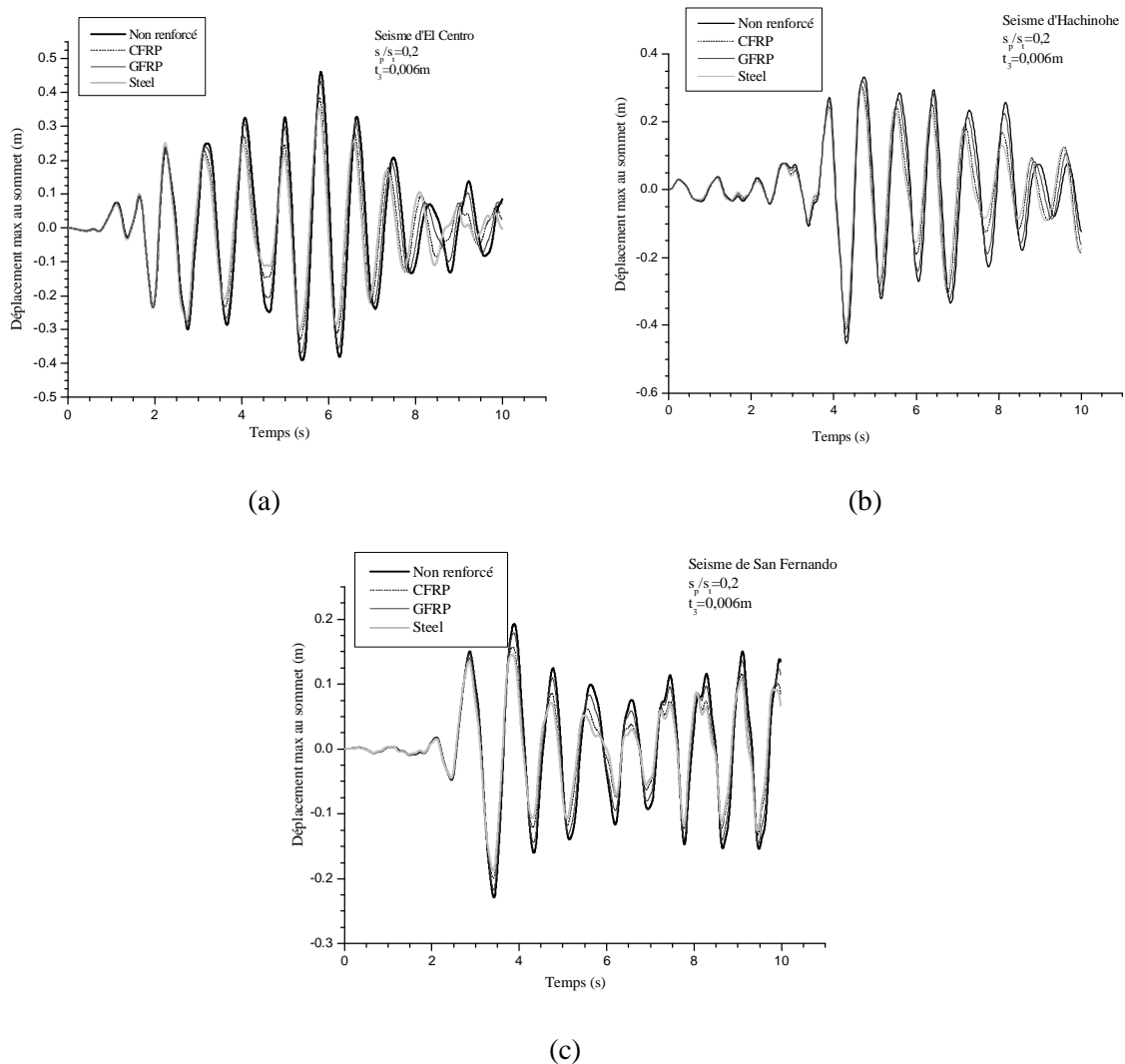


Figure 4. Effet du type de renforcement sur les déplacements au sommet
(a) El Centro ; (b) Hachinohe ; (c) San Fernando

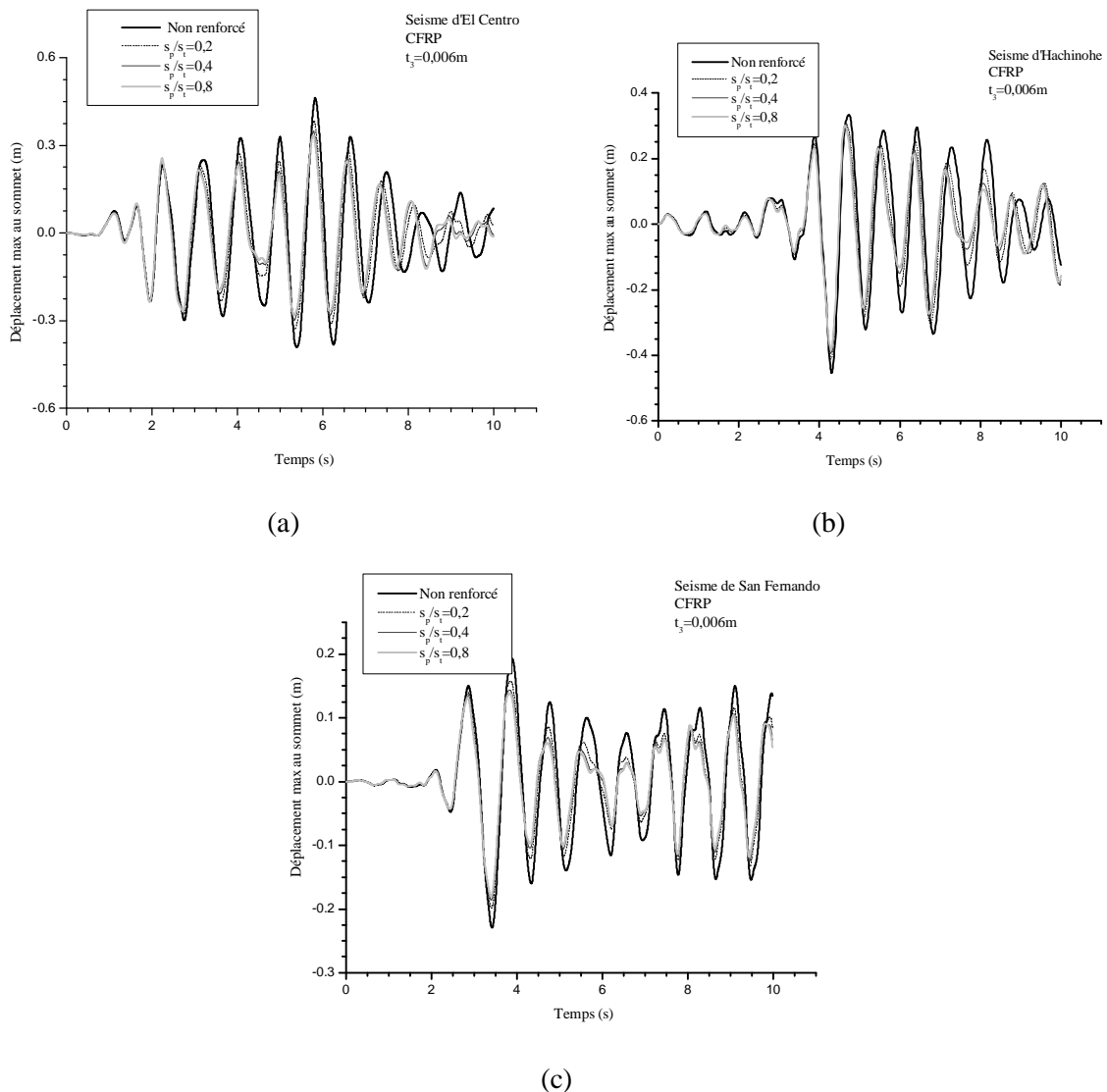


Figure 5. Effet du ratio s_p/s_t sur les déplacements au sommet
(a) El Centro ; (b) Hachinohe ; (c) San Fernando

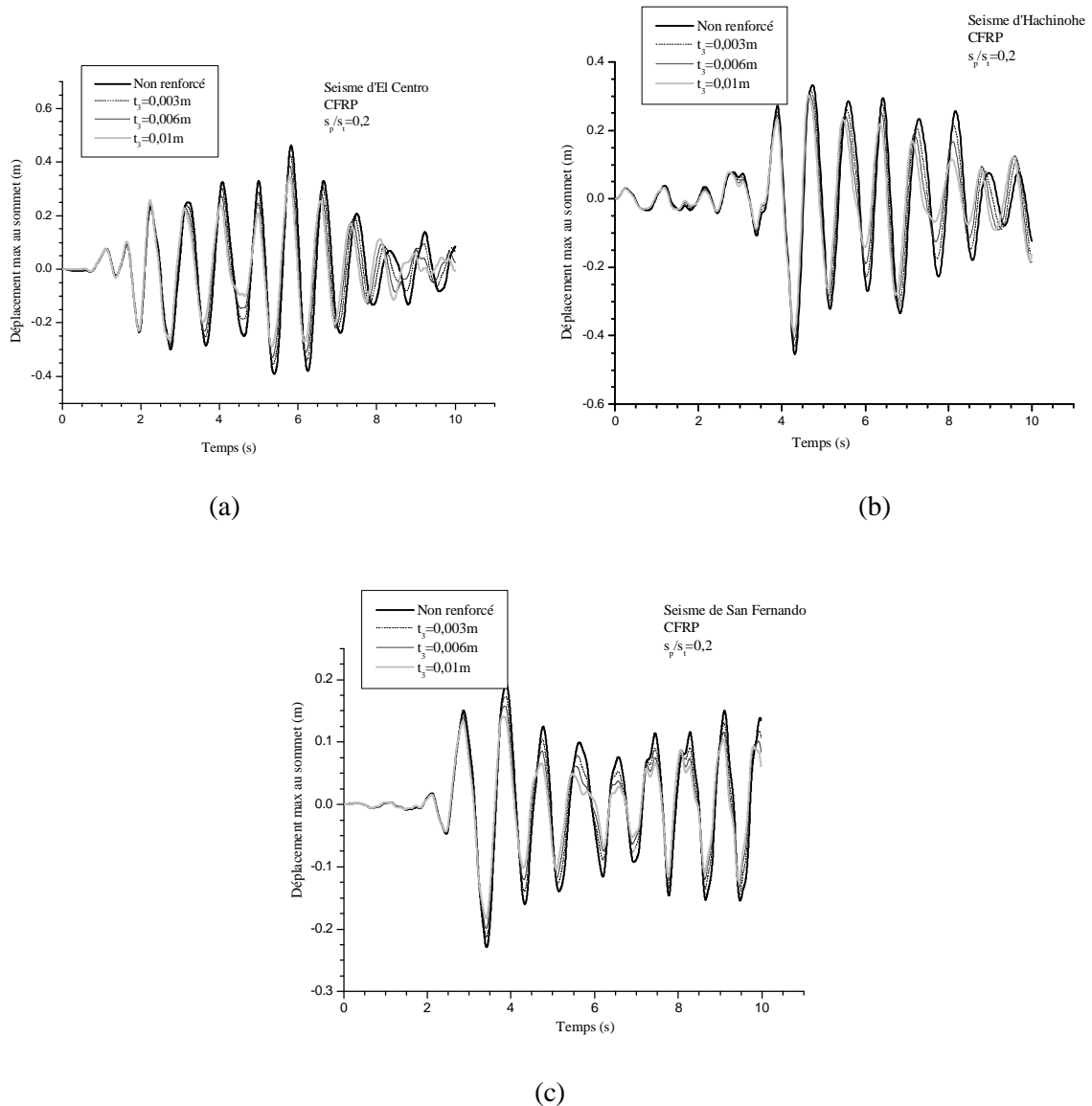


Figure 6. Effet de l'épaisseur des matériaux de renforcement sur les déplacements au sommet
 (a) El Centro ; (b) Hachinohe ; (c) San Fernando

6. Discussions et interprétations des résultats

D'après les déplacements maximaux au sommet présentés dans la figure 4, les plaques CFRP diminuent les déplacements des murs de contreventement réhabilités avec une réduction avoisinant les 14 %, celles en GFRP d'un taux de 5 % et une forte réduction était obtenue pour les plaques d'acier, environ 20 %.

Se basant sur les déplacements données par la figure 5, une réduction des déplacements a été enregistré pour un ratio $s_p/st = 0,8$ d'un taux de 24 %, suivi de 20,5 % pour $s_p/st = 0,4$ et de 14 % pour $s_p/st = 0,2$. Ces résultats montrent que la réduction des déplacements est proportionnelle au ratio s_p/st .

Par l'analyse de l'effet de l'épaisseur de la plaque de renforcement sur les déplacements des murs en B.A. (figure 6), la réduction des déplacements est notamment proportionnelle à l'épaisseur de la plaque utilisée. De ce fait, un taux de réduction de 22 % est observé pour $t_3 = 0,01$ m, un taux de 14 % pour $t_3 = 0,006$ m et un taux de 6.8 % pour $t_3 = 0,003$ m.

Analysons autrement l'efficacité des plaques composites utilisées dans la présente étude devant les différents séismes testés et d'après les résultats obtenus, nous pouvons constater que le taux de réduction des déplacements latéraux au sommet des murs a été enregistré sous le séisme d'El Centro, de 22 %, suivi de 15 % sous le séisme de San Fernando et d'un taux réduit de 11 % sous le séisme d'Hachinohe.

7. Conclusion

L'intérêt principal de la présente analyse est d'étudier l'effet de la réhabilitation des murs de contreventement en béton armé par des matériaux composites sur la réponse sismique des bâtiments élancés. En effet, les structures étaient analysées sous trois (03) types de séisme (El Centro, San Fernando et Hachinohe). Un model de calcul en élément fini est présenté.

Suivant l'étude paramétrique, des structures de 20 et 25 étages contreventées par murs en béton armé étaient testées. Il a été démontré que les performances escomptées dépendent des dimensions et des propriétés géométriques des plaques composites utilisées, sous les séismes record étudiés. Les résultats obtenus étaient satisfaisants, prouvant l'efficacité du renforcement par les plaques composites face aux excitations sismiques. Cette étude peut être étendue au calcul sismique des structures contreventées par des murs en béton armé, situées dans les pays à risques sismiques.

8. Bibliographie

- A. Coull ; N.K Subedi, «Coupled shear walls with two and three bands of openings», Pergamon Press, Vol. 7, 1972, p. 81-86.
- A. Coull; N.W Adams, «Variable stiffness elastic base mechanic for model shear wall structures», Journal of strain analysis, Vol. 15, 1983, p.145-149.
- A. Coull; T.H Mohamed, «Simplified analysis of lateral load distribution in structures consisting for frames coupled shear walls and cores», Journal of Structures Engineering, Vol. 61 , 1983, p.1-8.
- A. McLeod, «New rectangular Finite Element for shear wall analysis», Journal of Structure Division, Vol. 2, 1969, p.452-461.
- A. Tounsi «Improved theoretical solution for interfacial stresses in concrete beams strengthened with FRP plate» International Journal of Solids and Structures, Vol. 43 n° 14-15, 2006 , p. 4154-4174.
- H.S. Shen, Y. Chen, J. Yang, «Bending and vibration characteristics of a strengthened plate under various boundary conditions», Engineering Structures, Vol. 25, 2003,p. 1157-1168.
- K.J. Bathe, «Finite element procedures» , Prentice-Hall, Inc, New Jersey, 1996
- M. Albiges; W. Jalil, «Contreventement des bâtiments par façades et noyaux», Annale de l'I.T.B.T.P, Série : théorie et méthode de calcul, Publication n°410,1982
- M.M. Coin, Decauchy & Collignon, «Murs de contreventement à ouvertures multiples», Annale de l'I.T.B.T.P, Série : théorie et méthodes de calcul, Publication n°132, 1971
- R. Yeghnem, S.A. Meftah, A. Tounsi, E. Adda Bedia, «Earthquake response of RC coupled shear walls strengthened with thin composite plates», Journal of Vibration and Control, 2009, Vol. 15, 2009, p. 963-984.
- S. A. Meftah., A. Tounsi., A. Megueni, E .Adda bedia. «A. Lateral stiffness and vibration characteristics of RC shear walls bonded with thin plates», Composite Structures, Vol. 73, Issue 1, 2006, p. 110-119.
- S.A. Meftah, R. Yeghnem, A. Tounsi, E. Adda Bedia, «Lateral stiffness and vibration characteristics of composite plated RC shear walls with variable fibers spacing», Materials & Design, Vol. 29, Issue 10, 2008, p. 1955-1964.
- S. Benyoucef, A. Tounsi, S.A. Meftah, E. Adda Bedia «Approximate analysis of the interfacial stress concentrations in FRP-RC hybrid beams», Composites interface journal, Vol.13 n°17, 2006, p. 561-571.