

## ÉVALUATION DE LA RÉPONSE SISMIQUE DES STRUCTURES MÉTALLIQUES CONTREVENTÉES PAR DES PALÉES TRIANGULÉES

T. BRANCI<sup>1</sup> & A. LARABAT ZIANE<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Université HASSIBA BENBOUALI, Chlef, Algérie

<sup>2</sup> Université ABDERAHMANE MIRA, Béjaïa, Algérie

### RÉSUMÉ

L'objectif de la présente étude est d'évaluer l'effet des palées triangulées de contreventement, centrées en X, en V et en V inversé et excentrées en K et en V, sur la réponse sismique des structures métalliques, en termes de périodes, de déplacements latéraux, d'efforts tranchants et d'énergie sismique, à l'aide des trois méthodes de calcul préconisées par le code parasismique algérien, RPA 99/v 2003, à savoir la méthode statique équivalente, la méthode d'analyse modale spectrale et la méthode d'analyse dynamique par accélérogrammes dans laquelle ceux de Boumerdès 2003, Kobé 1995 et El Centro 1940 sont utilisés. Les résultats obtenus font l'objet d'investigations à titre comparatif où il a été observé que les structures contreventées par le système de palées triangulées excentrées résistent mieux aux actions sismiques que les autres systèmes.

**Mots-Clefs :** Structure, Métallique, Sismique, Palée, Réponse.

## 1. INTRODUCTION

Les ossatures métalliques à contreventements concentriques ou excentriques par palées triangulées sont fréquemment utilisées comme structures portantes des charges verticales et latérales des bâtiments métalliques à plusieurs étages, car elles présentent de nombreux avantages pratiques en termes de mise en œuvre. Actuellement, elles constituent l'un des systèmes de construction les plus utilisés à travers le monde [1-4]. Ce choix est dû en grande partie aux progrès des méthodes de construction et à l'amélioration de la performance des bâtiments en service. Dans le cas de l'Algérie, ce type d'ossature est beaucoup moins répandu en pratique bien qu'il soit largement préféré théoriquement par rapport à celui en béton armé à cause de sa bonne résistance face aux charges sismiques. Cette résistance est due essentiellement à la très bonne performance des palées triangulées de contreventement des ossatures métalliques aux charges sismiques. Ce type de contreventement est ainsi adopté fréquemment dans les structures métalliques pour augmenter la rigidité latérale et réduire les déplacements sous charges horizontales induites généralement par le vent et les tremblements de terre, d'une part, et pour sa capacité de dissipation d'énergie d'autre part. L'avantage d'un système de contreventement triangulé tient au fait que les diagonales ne sont soumises qu'à de la traction (système en X) ou à de la traction et compression (système en K ou en diagonale) sans aucune flexion. Par le passé, plusieurs études théoriques et expérimentales ont été menées sur ce type de structures afin d'étudier leur comportement sismique dans les domaines linéaire et non linéaire, Refs. [5-20].

L'objectif principal visé par ce travail est d'évaluer l'effet des palées triangulées de contreventement sur la réponse sismique des structures métalliques, en utilisant les trois méthodes d'analyse du règlement parasismique algérien (RPA), Ref. [21], qui sont la méthode statique équivalente (MSE) basée sur le premier mode fondamental de vibration, la méthode d'analyse dynamique modale spectrale (MADMS) basée sur un spectre de réponse normalisé et la méthode d'analyse dynamique temporelle (MADT) basée quant à elle sur des accélérogrammes sismiques réels, notamment ceux de Boumerdès 2003, Kôbé 1995 et El-Centro 1940. Les différents résultats obtenus font l'objet de comparaisons à partir desquelles des conclusions sont tirées.

## 2- MATÉRIEL ET MÉTHODE

### 2.1- DESCRIPTION DES MODÈLES DE STRUCTURES CONSIDÉRÉES

Les structures considérées sont constituées par des portiques en charpente métallique de 6 étages et 3 travées cha-

cune (Fig. 1). La hauteur de chaque étage et la portée de chaque travée étant de 3 m et de 4,5 m respectivement. Le système de contreventement adopté dans ce cas, dont le rôle est de s'opposer aux actions horizontales générées par le mouvement du sol et d'assurer la stabilité latérale des constructions, est défini par des palées triangulées centrées en X, en V et en V inversé, et excentrées en K et en V. Dans le cas des triangulations excentrées, aucune indication n'est mentionnée à leur sujet par le règlement RPA, contrairement à l'EC8, Ref. [22]. Les structures sont conçues et dimensionnées conformément aux dispositions des règles de constructions métalliques de l'Eurocode (EC3), Refs. [23-24]. Pour les structures portant des palées triangulées excentrées, le tronçon d'excentrement sismique est du type « court » d'une longueur de 0,9 m.

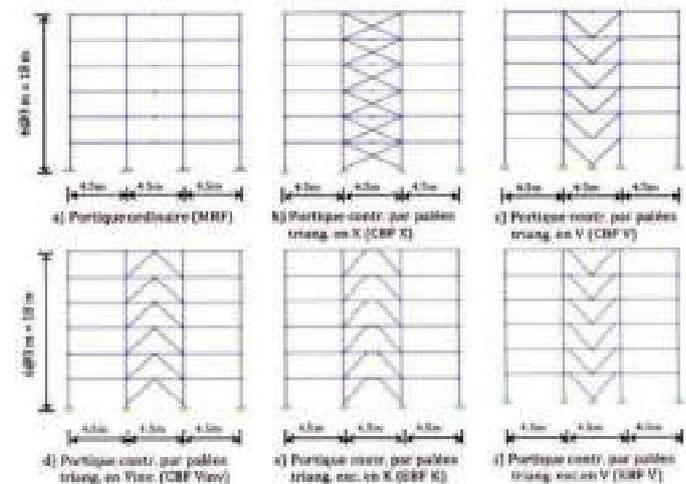


Figure 1 : Vues en élévation des modèles de systèmes de contreventement considérés.

### 2.2- PRÉSENTATION DES ACTIONS SISMIQUES

Les structures considérées ont été ainsi soumises aux trois cas de chargement mentionnés précédemment. Les analyses sont effectuées grâce au logiciel de calcul SAP 2000, Ref. [25]. Les actions sismiques sont basées sur les trois méthodes d'analyses indiquées précédemment.

#### 2.2.1- MÉTHODE STATIQUE ÉQUIVALENTE (MSE)

Selon cette méthode, la force sismique horizontale totale à la base de la structure V est exprimée selon le code RPA par la formule suivante :

$$V = \frac{ADQ}{R} W \quad (1)$$

où A, D, Q, R et W désignent respectivement le coefficient d'accélération de zone, le facteur d'amplification dyna-

mique moyen, le facteur de qualité, le coefficient de comportement global de la structure et le poids total de la structure. Les structures étudiées sont supposées implantées dans la zone III, zone classée comme zone de forte sismicité. Les valeurs des coefficients sont :  $A = 0.25$ ,  $D = 2.7$  et  $Q = 1.15$  pour un site ferme et un groupe d'usage 2. Les valeurs de  $R$  sont consignées dans le tableau 1 donné ci-après. Ce dernier coefficient s'apparente au coefficient  $R_{\mu}$  des règles américaines, Refs. [26-27] et au coefficient de comportement  $q$  des normes européennes EC8. Les charges permanentes ( $G$ ) et d'exploitations sont prises en moyenne égale à  $5.8 \text{ kN/m}^2$  et  $1.5 \text{ kN/m}^2$ .

**Tableau 1 :** Valeurs du coefficient de comportement  $R$ .

Type de contreventement	Valeurs de $R$
Portique auto-stable ordinaire	4
Ossature en portiques contreventée par palées triangulées en X	4
Ossature en portiques contreventée par palées triangulées en V	3
Ossature en portiques contreventée par palées triangulées en V inversé	3
Ossature en portiques contreventée par palées triangulées excentrées en V	4
Ossature en portiques contreventée par palées triangulées excentrées en K	3

## 2. 2.2- MÉTHODE D'ANALYSE DYNAMIQUE MODALE SPECTRALE (MADMS)

Selon cette méthode, les efforts sismiques sont déduits à partir d'un spectre de réponse élastique normalisé du code RPA en considérant les mêmes coefficients définis dans la MSE.

## 2.2.3- MÉTHODE D'ANALYSE DYNAMIQUE PAR ACCÉLÉROGRAMMES (MADT)

Les caractéristiques des trois accélérogrammes considérés dans la présente étude, en l'occurrence Boumerdès, El Centro et Kôbé, sont indiqués dans le tableau 2 ci-dessous, ainsi que leurs représentations graphiques qui sont illustrées par la Fig. 2. Dans le cas présent, il s'avère que l'utilisation de trois séismes pourrait être suffisante pour tirer des conclusions générales. Selon l'EC8, Ref. [22], il convient d'utiliser un minimum de trois (03) accélérogrammes. Néanmoins, lorsqu'un modèle spatial de la structure est exigé, le mouvement sismique doit consister en trois (03) accélérogrammes agissant simultanément à condition qu'un même accélérogramme ne puisse pas être utilisé simultanément pour les deux directions horizontales. Dans les recommandations AFPS 90, Refs. [28-29], il est demandé l'utilisation d'accélérogrammes indépendants pour chaque composante du mouvement sismique. Par contre, dans le cas d'une étude non linéaire, des recommandations de l'ASCE (American society of civil engineering), Ref. [30], conseillent d'utiliser trente (30) accélérogrammes. Par ailleurs, les trois accélérogrammes

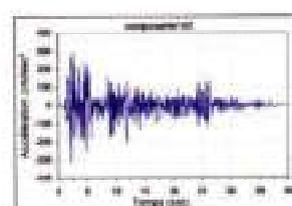
considérés sont, à priori, caractérisés par un contenu fréquentiel élevé tout en rappelant que le contenu fréquentiel d'une excitation sismique (accélérogramme) est l'ensemble des fréquences dont les ordonnées spectrales (accélération, vitesse, etc....) sont significatives. Les valeurs de trois (03) premières fréquences de chaque accélérogramme, correspondant aux trois premiers pics, par ordre d'amplitude, sont résumées dans le tableau 3 donné ci-après.

**Tableau 2 :** Caractéristiques des accélérogrammes considérés

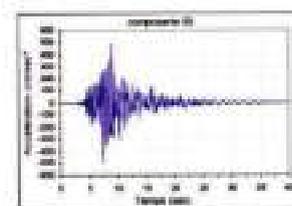
Séisme	Comp.	$A_{Max}$ (g)	Pas de temps (s)	Durée totale (s)	$I_{Amax}^0$
Boumerdès 21/03/2003	E-W	0.34	0.005	360	0.225
El Centro 18/05/1940	E-W	0.313	0.01	40.0	2.15
Kobe 16/01/1995	E-W	0.509	0.01	40.98	7.25

**Tableau 3 :** Valeurs des trois (3) premières fréquences des accélérogrammes considérés.

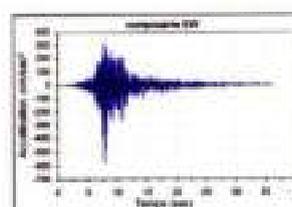
Séisme	$f_1$ (Hz)	$f_2$ (Hz)	$f_3$ (Hz)
Boumerdès	0.14	0.13	0.125
El Centro	0.50	0.20	0.170
Kobe	0.20	0.14	0.110



El Centro



Kobe



Boumerdès

Figure 2 : Accélérogrammes sismiques considérés.

**3- RÉSULTATS ET DISCUSSION**

Les résultats obtenus dans cette étude en termes de périodes fondamentales, de déplacements, d'efforts tranchants et d'énergie sismique pour les différentes structures considérées sont présentés comme ci-après.

**3.1- PÉRIODES PROPRES**

Selon le tableau 4, une chute de la fréquence fondamentale s'échelonnant entre 64 et 106% est enregistrée pour les portiques contreventés par des systèmes concentriques (en X, en V et en V inversé) par rapport à celle du portique sans contreventement, ainsi qu'une chute comprise entre 40 et 45% pour les portiques contreventés par les autres systèmes (système excentrique en V et en K).

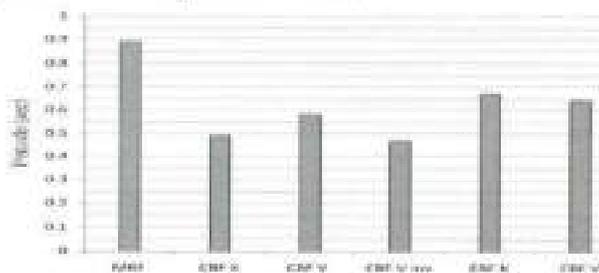


Figure 3 : Périodes fondamentales relatives au 1er mode de vibration des structures étudiées.

Tableau 4 : Caractéristiques dynamiques propres des structures étudiées.

Structure	Période fond. (sec)	Pulsation fond. (rad/sec)	Fréquence fond. (Hz)	Écart des fréquences (%)
MRF	0.89	7.06	1.11	/
CBF V	0.57	11.02	1.75	64.0
CBF X	0.49	13.81	2.08	97.0
CBF inv	0.46	13.65	2.17	106.0
EBF V	0.64	9.81	1.56	45.0
EBF K	0.66	9.52	1.51	40.0

**3.2- DÉPLACEMENTS LATÉRAUX**

Les déplacements latéraux de chaque étage obtenus par la MSE et par la MADMS sont illustrés sur la Fig. 3 où l'on constate en général que :

- les déplacements latéraux maximaux du portique auto-stable, sont en général, plus importants que ceux des autres portiques comportant des palées triangulées ; l'écart est plus significatif au niveau des étages supérieurs. Les autres portiques sont caractérisés par un déplacement latéral assez faible, à l'exception de celui centrée en V, qui présente un déplacement plus marqué au niveau des étages supérieurs par rapport au reste des portiques ;
- parmi tous les portiques étudiés, les portiques centrés en X présentent les déplacements latéraux les plus faibles. Ce constat leur confère une grande rigidité ;
- la méthode statique équivalente (MSE) est plus conservatrice que la méthode d'analyse dynamique modale spectrale (MADMS).

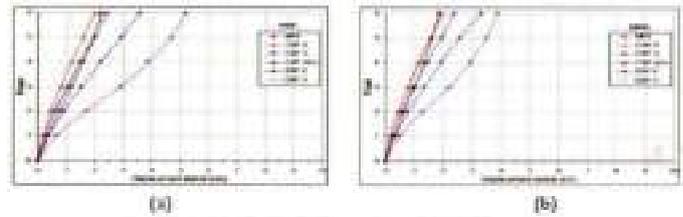


Figure 4 : Déplacements latéraux : a) par la MSE; b) par la MADMS.

La Fig. 4 montre les mêmes tendances avec la méthode d'analyse dynamique temporelle (MADT).

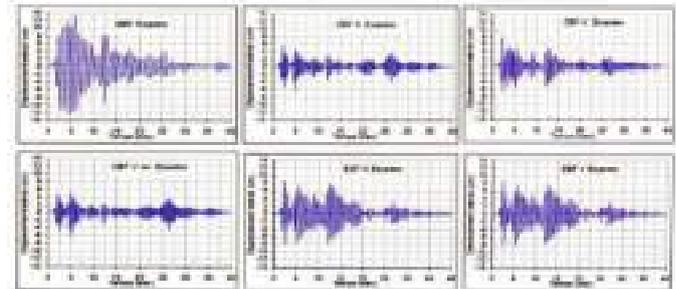


Figure 5 : Déplacements latéraux des sommets des portiques sous l'accélérogramme d'El Centro.

**3.3- EFFORTS TRANCHANTS**

La Fig. 5 illustre la distribution des efforts tranchants des différentes structures obtenue par la MADMS. D'après cette figure, on constate que :

- les structures contreventées par les palées triangulées centrées en V inversé présentent des efforts de cisaillement d'étages plus élevés par rapport à ceux des autres structures ;
- la structure avec contreventement centré en V présente des efforts tranchants différents de celle en V inversé ;
- le portique auto-stable est sollicité par des efforts tranchants plus faibles que ceux observés dans celui contreventé par palées triangulées en X.

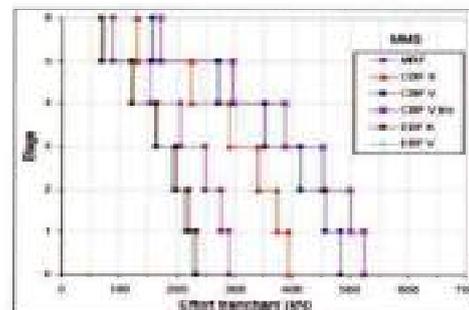


Figure 6 : Efforts tranchants obtenus par l'analyse modale spectrale.

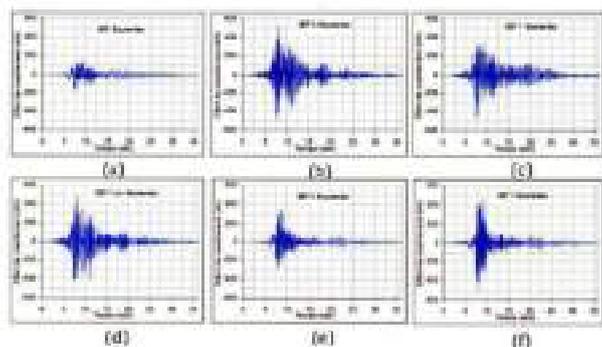


Figure 7 : Efforts de cisaillement à la base des structures sous l'accélérogramme de Boumerdès.

La Fig. 6 présente la variation temporelle des efforts tranchants à la base des structures sous l'accélérogramme de Boumerdès. Dans ce cas, c'est le portique autostable qui présente l'effort de cisaillement le plus faible (Fig. 6(a)), en raison de sa plus grande flexibilité par rapport aux autres portiques dont le taux de variation des efforts est compris entre 47 et 65% par rapport à celui du portique auto-stable.

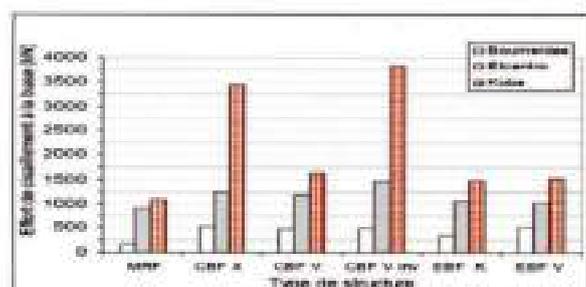


Figure 8 : Efforts de cisaillement maximal à la base des structures.

La Fig. 7 montre les valeurs maximales des efforts tranchants à la base obtenus sous l'action des trois accélérogrammes sous forme d'histogrammes. On remarque que les palées de contreventement ont tendance à faire croître les efforts de cisaillement à la base des structures, par rapport à celui du portique auto-stable, d'un taux de 29% (triangulation excentrée) et de 34% à 71% (triangulation centrée) dans le cas de l'accélérogramme de Kobé. Dans le cas de l'accélérogramme d'El Centro, cette variation est comprise entre 12% et 14% (triangulation excentrée) et entre 23% à 38% (triangulation centrée). Quant au séisme de Kobé, l'effort de cisaillement à la base est plus élevé que celui d'El Centro et de Boumerdès pour toutes les structures considérées, mais avec une variation plus significative vis-à-vis des structures contreventées en X et en V. Cette différence dans les résultats montre l'importance du type d'accélérogramme utilisé pour le calcul de la réponse sismique d'une structure donnée faisant ainsi appel

à la notion de séismes proches ou lointains. C'est pour cette raison que certains règlements parasismiques, tel que l'EC8, prennent en considération ce phénomène en imposant des coefficients tenant compte de la distance entre la structure et la source sismique.

### 3.4- ÉNERGIE SISMIQUE

Les résultats obtenus dans ce cas (Fig. 8) montrent un écart significatif entre les structures avec contreventements centrés en X et en V inversé par rapport aux autres structures. Ces deux structures ont tendance à emmagasiner plus d'énergie contrairement au portique auto-stable et aux structures avec contreventement excentré en K et en V qui ont tendance à emmagasiner moins d'énergie que toutes les autres structures analysées.

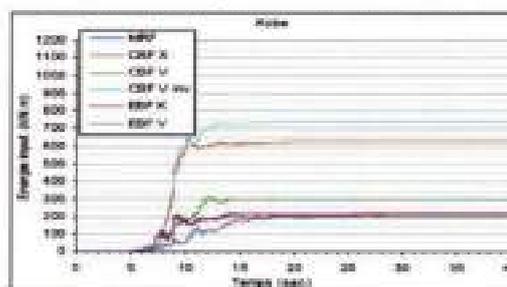


Figure 9 : Energie input sous l'accélérogramme de Kobé.

## 4- CONCLUSION

Dans cette présente étude, la réponse sismique de six portiques métalliques, dont cinq contreventés par des palées triangulées et un sans contreventement, est évaluée en termes de périodes, de déplacements, d'efforts de cisaillement et d'énergie sismique, sur la base des trois méthodes de calcul spécifiées dans le règlement algérien RPA 99/V/2003. Les résultats ont fait l'objet de comparaisons. A la lumière de ces comparaisons, il ressort les conclusions principales suivantes :

- une chute relativement importante de la période du premier mode de vibration est enregistrée pour les structures contreventées par des palées triangulées vis-à-vis de celle du portique sans contreventement ;
- le portique auto-stable présente des déplacements latéraux plus importants contrairement aux ossatures avec triangulations centrées dont les déplacements sont relativement plus faibles. Cependant, les ossatures avec triangulations excentrées sont plus performantes du point de vue déplacement latéral car dans ce cas la performance est affectée principalement par la longueur du tronçon sismique ;
- la méthode statique équivalente surestime les efforts tranchants à la base des structures analysées par rapport à l'analyse modale spectrale ;

- l'énergie sismique engendrée par les accélérogrammes de Boumerdès et de Kobé montre la particularité des structures avec triangulations excentrées en K puisqu'elles ont tendance à emmagasiner moins d'énergie que toutes les autres structures analysées.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Leberman, B., *La construction métallique*, Nathan, Guide des métiers du bâtiment, mars 1999.
- [2] Lemoine, B. et al., *Concevoir et construire en acier*, Eyrolles, Les essentiels acier, Novembre 2011.
- [3] Muzeau, J. P., *Manuel de construction métallique*, Eyrolles, Eurocode, Octobre 2013.
- [4] Muzeau, J. P., *La construction métallique avec les Eurocodes*, Eyrolles, Eurocode, Octobre 2013.
- [5] Boudiaf Bouabla, M., *Le comportement non linéaire des systèmes de contreventement en charpente métallique*, Thèse de magister, Université de Blida, Novembre 2001.
- [6] Sabelli, R. et al., *Seismic demands on steel braced frame buildings with buckling-restrained braces*, *Engineering Structures*, Vol. 25, N° 5, pp. 655-666, 2003.
- [7] Tremblay, R. et al., *Seismic response of multistory buildings with self-centering energy dissipative steel braces*, *American Society of Civil Engineers*, Reston, VA, Etats-Unis, Vol. 134, N°1, pp. 108-120, 2008.
- [8] Rossi, M. et Bocco, P.P., *Seismic behavior of eccentrically braced frames*, *Engineering Structures*, Vol.31, pp. 664-674, 2009.
- [9] Türker, T. et Bayraktar, A., *Experimental and numerical investigation of brace configuration effects on steel structures*, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 67, pp. 854-865, 2010.
- [10] Mahmoudi, M. et Zaree, M., *Evaluating response modification factors of concentrically braced steel frames*, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 66, pp.1196-1204, 2010.
- [11] Olivier, G., *Contrôle sismique d'un bâtiment en acier de l'étage par amortisseurs élastomériques et contreventements en Chevron*, Université de Sherbrooke, 259 pages, 2010.
- [12] Tsai, C.Y. et al., *Cyclic responses of three 2-story seismic concentrically braced frames*, *Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China*, Vol. 4, N° 3, 2010.
- [13] Larabat Ziane, A., *Effets des palées de contreventement sur la réponse sismique des structures des bâtiments*, Mémoire de magister, Université de Chlef, 17 Juin 2010.
- [14] Roeder, C.W., Lampkin, E.J., and Lehman, D.E., *Balanced design procedure for special concentrically braced frame connections*, Elsevier, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 67 No. 11, pp. 1760-72, 2011.
- [15] Azar, B. et al., *Study of the effect of using different kind of bracing system in tall steel structures*, Eurojournals publishing inc, 2012.
- [16] Hsiao, P-C, Lehman, D.E., and Roeder, C.W., *Improved analytical model for special concentrically braced frames*, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 73, pp. 80-94, 2012.
- [17] Okazaki, T., Lignos, D.G., Hikino, T., and Kajiwara, K., *Dynamic response of a chevron concentrically braced frame*, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Reston, VA, DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000679, 2013.
- [18] Hsiao, P-C, Lehman, D.E., and Roeder, C.W., *A model to simulate special concentrically braced frames beyond brace fracture*, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Wiley, Vol. 42, pp. 183-200, 2013.
- [19] Hsiao, P-C, Lehman, D.E., and Roeder, C.W., *Evaluation of response modification coefficient and collapse potential of SCBFs*, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Wiley, DOI: 10.1002/eqe.2286, 2013.
- [20] Okazaki, T., Lignos, D.G., Hikino, T., and Kajiwara, K., *Dynamic response of a chevron concentrically braced frame*, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Reston, VA, DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000679, 2013.
- [21] RPA99/Version 2003, *Règles parasismiques Algériennes*, Document Technique Réglementaire DTR B C 2 48, Centre de Recherche Appliquée en Génie Parasismique, Alger, 2003.
- [22] EN 1998-1 Eurocode 8, *Calcul des structures pour leur résistance aux séismes*, Partie 1 : Règles générales, actions sismiques et règles pour les bâtiments, Comité Européen de Normalisation, 2004.
- [23] EN-1993-1-1 Eurocode 3, *Calcul des Structures en Acier, Part 1-1 Règles générales et règles pour les bâtiments*, Comité Européen de Normalisation, 2003.
- [24] Brozzetti J., *Eurocode 3 et document d'application nationale, Calcul des Structures en Acier, Part 1-1 règles générales et règles pour les bâtiments*, Edition Eyrolles, Paris, 1996.
- [25] SAP2000/v12, *Integrated finite element analysis and design of structures*, Computer and Structures Inc. Berkeley, 2009.
- [26] UBC 97, *Uniform building code 97*, International Conference Building Officials, 1997.
- [27] AISC, American Institute of Steel Construction Inc., *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*, Chicago, 2005.
- [28] Recommandations AFP890, *Pour la rédaction de règles relatives aux ouvrages et installations à réaliser dans les régions sujettes aux séismes*, Tome 1, 1993.
- [29] Zarek, M., *Construire parasismique : Risque sismique, Conception parasismique des bâtiments, Réglementation*, Editions parenthèses, 1996.
- [30] Maurel, Ph., *Accélérogrammes et spectres de séisme*, Document de base, 2010.