

ANALYSE STATIQUE NON LINÉAIRE D'OSSATURES MÉTALLIQUES CONTREVENTÉES PAR PALÉES EN X

NON LINEAR STATIC ANALYSIS OF X-BRACED STEEL FRAMES

Réception : 01/08/2019

Acceptation : 03/11 /2019

Publication : 09/01/2020

BRANCI Taïeb¹, YAHMI Djamel², BOUYAKOUB Samira³¹Université Hassiba Benbouali de Chlef, B.P 78C, Ouled-Fares, Chlef 02180 Algérie, brancit@yahoo.fr²Université Hassiba Benbouali de Chlef, B.P 78C, Ouled-Fares, Chlef 02180, Algérie, yahmi_djamel@hotmail.fr³Département de Génie Civil, Université Hassiba Benbouali de Chlef, Algérie, bouyakoubsamira@outlook.com

Résumé- Comme prévue dans les dispositions des codes parasismiques, la conception sismique des structures de bâtiments réguliers est normalement basée sur la méthode statique équivalente qui tient compte du facteur de comportement q (ou R) dont le rôle est de minimiser les effets des charges latérales de conception afin de prendre en considération leur comportement non linéaire lors de puissants séismes. Le but de cet article est d'évaluer, à partir d'analyses statiques non linéaires classiques, le facteur de comportement à travers ses trois essentielles composantes sismiques, R_{Ω} (rapport de sur-résistance), R_{μ} (rapport de ductilité) et R_p (rapport de redondance), pour trois ossatures métalliques de bâtiments de hauteurs différentes, contreventées par palées triangulées en X, dimensionnées sur la base des dispositions des Eurocodes (EC3 et EC8). Les effets de la hauteur de l'ossature et le rapport d'élançement des palées sur le q -facteur et ses composantes, sous l'application de deux charges sismiques latérales d'allures différentes, ont été étudiés. Les résultats des analyses montrent que les variations de ces deux paramètres combinés aux charges appliquées ont des effets notables sur le facteur de comportement.

Mots - clés : Ossature, Métallique, Analyse, Non linéaire, Code.

Abstract- As provided in the provisions of seismic codes, the seismic design of the structures of the regular buildings is normally based on the equivalent static method which takes into account the behaviour factor q (ou R) whose role is to minimize the effects of the lateral design loads to account for their non-linear behaviour during severe earthquakes. The purpose of this paper is to evaluate, from non linear static analyses, the behaviour factor through its principal seismic components, R_{Ω} (overstrength ratio), R_{μ} (ductility ratio), and R_p (redundancy ratio), for three X-braced steel frames buildings (CBF-X) of different heights, designed in accordance with the provisions of structural Eurocodes (EC3 and EC8). The effects of the height of the frame and the braces slenderness ratio on the behavior factor and its components, under the application of two lateral seismic loads of different repartitions, have been studied. The results of analyses depict that the variations of these two parameters combined with applied loads have noticeable effects on behavior factor.

Keywords: Frame, Steel, Analyze, Non linear, Code.

1-Introduction

Les ossatures métalliques munies de palées triangulées en X sont spécifiquement conçues pour résister à la fois aux charges verticales et horizontales. Sous l'action combinée de ces deux charges, les palées sont

contraintes de résister à des forces axiales capables de générer des déformations qui peuvent dépasser leur limite élastique de résistance. Dans ces conditions, ces dernières pourraient se plastifier et dissiper ainsi de l'énergie à travers leur comportement non linéaire. Les codes sismiques prennent en compte ces déformations en réduisant le spectre

de réponse élastique de calcul par le facteur de comportement qui dépend, selon la littérature, de plusieurs autres facteurs parmi lesquels certains ne sont pas pris en compte tel que l'élanement des palées. Le but de cette présente étude est de mener des investigations d'ordre numérique sur une série de simples ossatures métalliques en 2D, contreventées par des palées en forme de X, et dimensionnées selon les recommandations des codes Européens : Réf. [12]. Comme il a été mentionné précédemment, le choix de ce type de contreventement en X a été sélectionné à cause de sa capacité de résistance vis-à-vis des efforts de traction engendrés par les forces horizontales (vent ou séisme) permettant ainsi d'assurer la stabilité latérale de la structure dans laquelle il est incorporé. Dans cette étude, le but recherché est de pouvoir évaluer le q-facteur de ces structures à travers des analyses de type statique non linéaire sous l'effet de la variation de la hauteur de l'ossature et de l'élanement des palées sur la base de deux charges sismiques latérales réparties distinctes de forme triangulaire et rectangulaire. A titre d'indication, l'analyse statique non linéaire (ou pushover) est connue pour sa performance dans l'étude de la vulnérabilité des structures vis-à-vis des charges sismiques à travers le suivi chronologique de la formation des rotules plastiques dans la structure analysée jusqu'à son effondrement. Au total, trois ossatures régulières de 3, 6, et 9 étages avec 3 travées chacune ont été analysées et des comparaisons entre les valeurs du facteur de comportement et ses composantes, sous l'effet des deux chargements, ont été effectuées. A cause de sa relation avec les caractéristiques mécaniques des structures, telles que la ductilité et la résistance de réserve des matériaux, ainsi que son importance vis-à-vis des charges sismiques, le facteur de comportement a fait l'objet de plusieurs études par le passé : Réf. [3-11]. Les performances sismiques de différents systèmes structuraux conçus sur la base de plusieurs codes parasismiques pour résister aux charges latérales ont été largement étudiées au cours des dernières décennies. A la lumière de ces investigations, il a été constaté que la répartition des charges latérales utilisée par les dispositions réglementaires en matière de conception parasismique ne conduit pas toujours à une répartition régulière de la demande de ductilité et des dommages dans les éléments de la

structure. Par conséquent, l'utilisation de tels modèles de charges latérales ne garantit pas la répartition optimale des matériaux dans toute la structure durant son comportement non linéaire. Dans ce cas de figure, l'utilisation de méthodes plus performantes telles que l'analyse statique non linéaire en poussée progressive (analyse pushover) ou l'analyse dynamique totalement non linéaire nécessitant une intégration pas à pas, pourraient obtenir une prévision plus précise du comportement structurel sous chargement sismique.

2- Dispositions réglementaires de l'EC8 vis-à-vis des structures contreventées par des palées en X

Selon l'EC8, les systèmes contreventés par palées triangulées en X résistent aux charges latérales grâce aux palées par lesquelles une grande partie de l'énergie est dissipée tandis que les autres éléments (poteaux et poutres) restent dans le domaine élastique. L'énergie est dissipée par déformation axiale sous la forme de traction et compression des palées. D'après l'EC8, le rapport d'élanement λ des palées doit être compris entre 1.3 et 2.0. Cette dernière valeur est imposée pour prévenir toute déformation due au flambement des palées qui pourrait endommager les joints. Dans ce cas, le degré d'élanement dans une palée est exprimé sous la forme de « rapport d'élanement », défini comme suit :

$$\lambda_i = \frac{l}{\pi \cdot r} \sqrt{\frac{f_y}{E}} \quad (1)$$

où l , r , f_y et E désignent respectivement la longueur de flambement, le rayon de giration de la section transversale, la résistance limite élastique et le module de Young de la palée. Dans cette étude, pour chaque structure trois valeurs de λ_i ont été retenues (1.93, 1.56 et 1.30) correspondant chacune à celui de l'étage situé à mi-hauteur de chaque structure. Par ailleurs, la résistance de réserve Ω_i d'un élément de palée est supposée égale au rapport de la résistance plastique de conception de la palée i (N_{pi}) à la force axiale de conception de la palée i (N_{di}) et en plus Ω_i^{Max} ne doit pas dépasser Ω_i^{Min} au plus de 25%. L'EC8 classe les CBF-X en deux catégories d'après l'importance

de la ductilité : (1) structure à comportement dissipatif bas (DCL) où q-facteur = 1.5, (2) structure à comportement dissipatif qui est divisé en deux catégories dénommées respectivement ductilité de classe moyenne (DCM) et ductilité de classe élevée (DCH) dans lesquelles la valeur du q-facteur varie selon la catégorie. Dans l'EC8, la valeur recommandée du q-facteur pour les CBF-X est fixée à 4,0. Néanmoins, en attribuant une valeur fixe forfaitaire à q-facteur pour les CBF-X et un intervalle de valeurs aléatoires pour le rapport d'élanement λ montre d'une manière implicite que l'EC8 ne dispose pas, dans sa version actuelle, de formulations exactes pour ce genre de problème. Ce qui implique, d'après notre point de vue, qu'à travers ces valeurs l'EC8 pourrait, lors d'analyse d'une structure, ne pas tenir compte des conséquences du rapport d'élanement des palées et du nombre d'étages sur le facteur de comportement. Dans ce cas, l'étude des effets de ces deux paramètres sur la réponse de la structure devient donc nécessaire.

3- Méthode d'évaluation du facteur de comportement

L'expression la plus répandue pour la détermination du facteur de comportement est exprimée par la relation suivante : Réf. [12] :

$$R = R_{\mu} R_S \quad (2)$$

où $R = q$, R_S et R_{μ} sont les facteurs de résistance de réserve et de ductilité respectivement. Le facteur R_S est exprimé généralement comme suit :

$$R_S = \frac{V_u}{V_d} = \frac{V_u V_y}{V_y V_d} = R_p R_{\Omega} \quad (3)$$

où V_y , V_d et V_u désignent respectivement la résistance limite élastique, l'effort tranchant de conception et la résistance ultime de la structure. R_S et R_p sont les facteurs de résistance de réserve et de redondance. Le facteur R_S représente d'une manière générale la résistance de l'ossature et dépend de plusieurs paramètres liés à la nature de la structure et son environnement : Réf. [13-14]. Par contre, le facteur de ductilité R_{μ} indique en quelque sorte la mesure du comportement non linéaire globale de la structure : Réf : [15-16] et sa valeur peut

être obtenue à partir de formules établies dans la littérature : Réf. [17]. Dans ce cas, la courbe de capacité de la structure peut être aisément déterminée par la méthode statique non linéaire schématisée par la Fig.1 suivante.

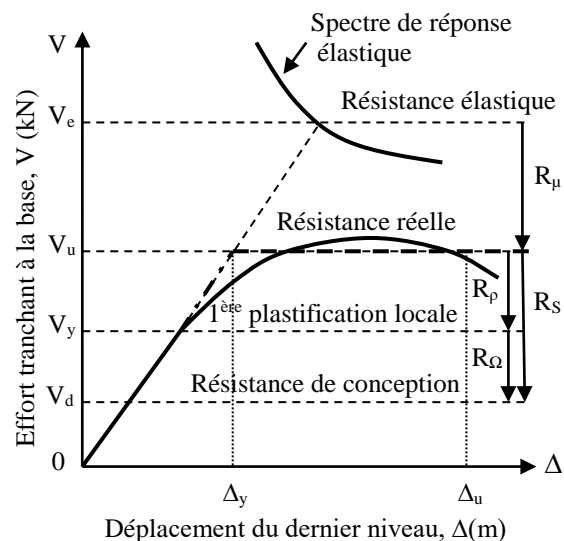


Figure 1 : Réponse générale des structures

Figure 1 : General response of structures

4- Description des structures à analyser

Le choix des structures à analyser est résumé dans le tableau 1 donné ci-dessous dont les données sont inspirées à partir de résultats de certains travaux passés : Réf. [18]. Il s'agit de trois ossatures métalliques contreventées par des palées triangulées en X de 3, 6 et 9 étages et 3 travées (CBF-X) chacune, dimensionnées en accord avec les prescriptions de l'EC3 et l'EC8. Le chargement sismique de conception est défini à partir du spectre de réponse d'accélération de l'EC8 avec une accélération maximale de sol égale à 0.35g, une classe de sol B et un facteur de comportement $q = 4,0$. Les trois structures sont représentées sur la Fig. 2 et les caractéristiques de leurs éléments sont résumées dans le Tab.1. La charge gravitaire sur les poutres est supposée égale à 27.5 kN/m² (charge permanente + surcharge du plancher), tandis que la contrainte limite élastique de l'acier est estimée égale à 235 MPa.

5- Méthode statique non linéaire

Le facteur de comportement est évalué à partir des courbes de capacité obtenues en effectuant des analyses statiques non linéaires sur les structures considérées à travers la version non linéaire du logiciel de calcul SAP2000 v14.02 : Réf. [19] en utilisant deux formes de charges latérales. Ces analyses sont très efficaces car elles ont la particularité de déterminer les effets d'un chargement latéral sur le comportement structural global à travers des courbes force-déplacement. Les analyses sont conduites où chaque structure est modélisée en un système à deux dimensions en tenant compte de leur comportement non linéaire par le biais des rotules plastiques basées sur les tableaux de FEMA-356 : Réf. [20]. Les rotules plastiques sont supposées se former aux deux extrémités de chaque poteau et poutre et à mi-longueur des palées. Au cours des analyses, seul l'effet de la traction dans les palées est pris en compte contrairement à celui de la compression qui est ignoré vu sa faible capacité suite aux vérifications établies au préalable sur les structures analysées.

6- Résultats et discussions

L'analyse pushover effectuée à l'aide du logiciel SAP2000 conduit aux résultats résumés dans la Fig. 3 et 4 présentées ci-dessous, en termes de facteurs de résistance de réserve R_S , et de ductilité R_μ pour les différentes ossatures analysées. A travers les figures 3 et 4, on observe que : a) R_S est maximale pour les structures les moins élevées et minimale pour les structures dont le rapport d'élancement (λ_1) des palées est maximal ; b) une légère variation de R_μ , quelque soit la hauteur de la structure et l'allure du chargement latéral, et de surcroît moins sensible à la variation de λ_i ; c) par contre, le facteur de comportement q décroît quand le nombre d'étages augmente indépendamment de l'allure du chargement, ce qui implique que ce dernier est strictement dépendant à la fois de la configuration de la structure et des palées. Aussi, quand la structure est plus élancée elle est plus sollicitée et moins ductile ; mêmes constatations pour les palées.

Tableau 1 : Valeurs caractéristiques des CBF-X

Tableau 1: Characteristic values of CBF-X

Structure	λ	i	Poteaux: HEB (N° des étages)	Palées: TUBE (N° des étages)
à 3 étages	1.93	1	220 (1-3)	127X4 (1) + 108X3.6 (2) + 101.6X3.6 (3)
	1.56	2	240 (1-3)	152.4X4 (1) + 133X4 (2) + 127X4 (3)
	1.30	3	260 (1-3)	193.7X4.5 (1) + 159X4 (2) + 139.7X4 (3)
à 6 étages	1.93	1	240 (1-2) + 220 (3-4) + 200 (5-6)	127X4 (1-3) + 108X3.6 (4) + 101.6X3.6 (5) + 82.5X3.2(6)
	1.56	2	260 (1-2) + 240 (3-4) + 220 (5-6)	152.4X4 (1-2) + 139.7X4 (3) + 133X4 (4) + 27X4(5) + 101.6X3.6 (6)
	1.30	3	280 (1-2) + 260 (3-4) + 240 (5-6)	193.7X4.5 (1-2) + 168.3X4 (3) + 159X4 (4) + 139.7X4(5) + 127X4 (6)
à 9 étages	1.93	1	260 (1-3) + 240 (4-6) + 220 (7-9)	127X4 (1-4) + 108X3.6 (5-6) + 101.6X3.6 (7)+ 88.9X3.2 (8) + 76.1X3.2 (9)
	1.56	2	280 (1-3) + 260 (4-6) + 240 (7-9)	152.4X4 (1-3) + 139.7X4 (4) + 133X4 (5) + 127X4 (6-7) + 108X3.6 (8) + 88.9X3.2 (9)
	1.30	3	320 (1-3) + 300 (4-6) + 280 (7-9)	193.7X4.5 (1-4) + 159X4 (5) + 152.4X4 (6) + 139.7X4 (7) + 127X4 (8) + 108X3.6 (9)

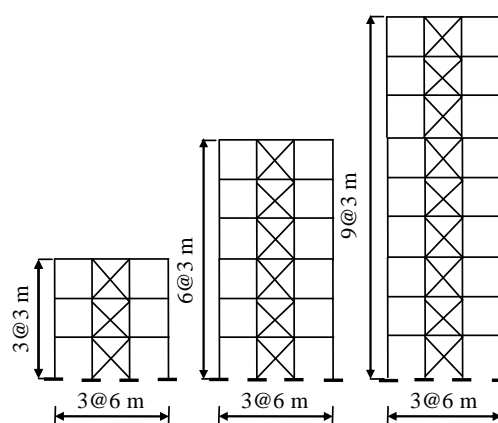


Figure 2 : Modèles de structures étudiées

Figure 2 : Model of studied structures

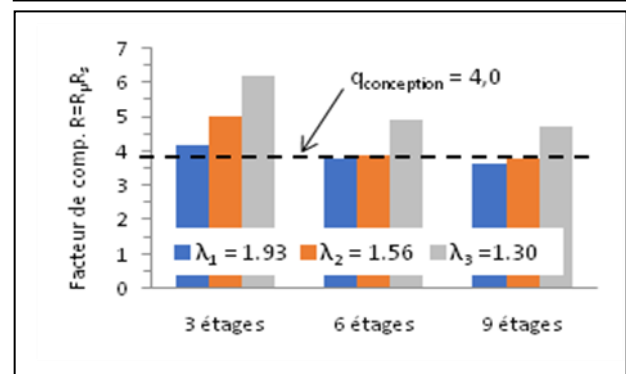
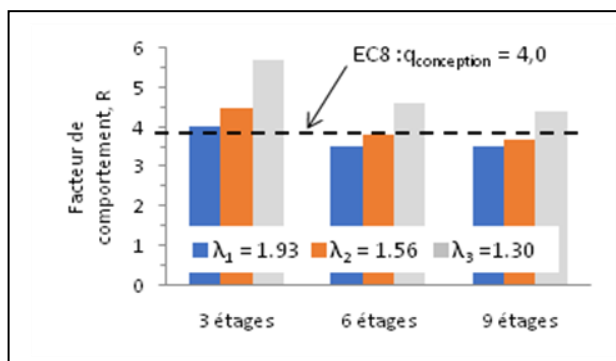
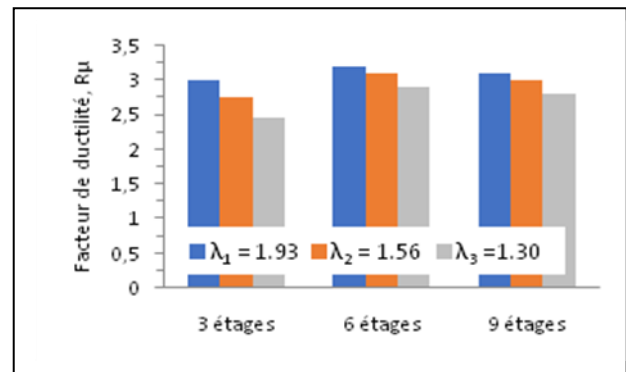
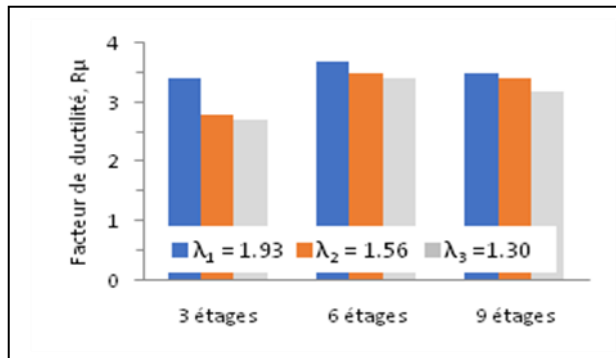
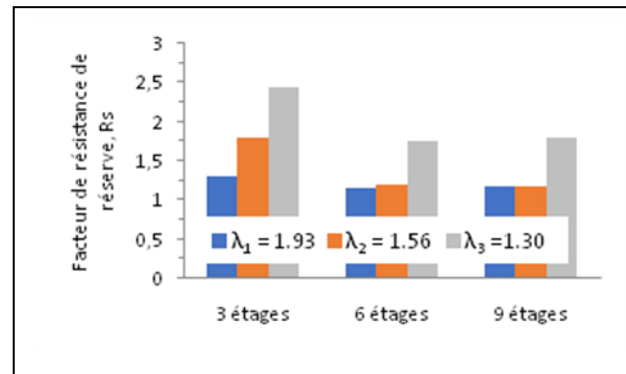
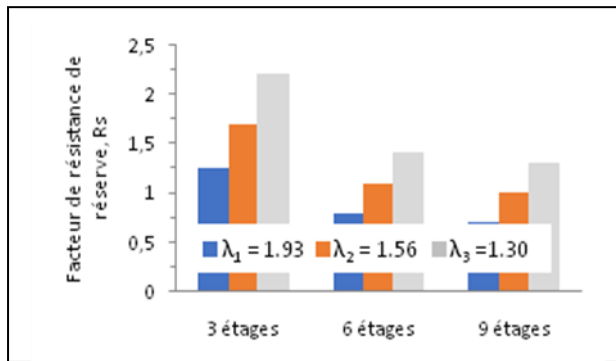


Figure 3 : Valeurs du facteur de comportement et ses composantes sous l'effet d'un chargement à répartition triangulaire.

Figure 4: Valeurs du facteur de comportement et ses composantes sous l'effet d'un chargement à répartition rectangulaire.

Figure 3 : Values of the behaviour factor and its components under the effect of a rectangular distribution load.

Figure 4: Values of the behaviour factor and its components under the effect of a rectangular distribution load.

7- Conclusion

Cette étude a permis d'évaluer les facteurs de résistance de réserve et de ductilité d'un certain nombre de structures métalliques contreventées par des palées triangulées en forme de X dimensionnées en accord avec les dispositions des codes européens en tenant compte des effets combinés de la hauteur de la structure et du rapport d'élançement des palées. Les résultats de cette étude peuvent être résumés comme suit : Quand le nombre d'étages croît la valeur du facteur de sur-résistance R_S décroît et celle de R_μ subit une légère variation mais décroît quand le rapport d'élançement λ_i des palées diminue, tandis que l'effort axial dans les palées du premier étage croît, ce qui conduit à leur endommagement prématuré. Par ailleurs, la diminution des facteurs R_S et R_μ entraînent la diminution de la valeur de q . En outre, le rapport d'élançement λ_i des palées a un effet majeur sur le facteur q puisque sa diminution conduit à une augmentation de celui-ci tandis que l'EC8, dans tous les cas, affiche une valeur constante de q quelque soit la structure contrairement aux résultats de cette présente étude qui attestent que le facteur q accuse différentes valeurs selon le nombre d'étages et le rapport d'élançement. En conclusion, il est important de signaler que la valeur du facteur q dépend de très près de la configuration de la structure et du rapport d'élançement des palées de contreventement : plus la structure est élançée plus elle est exposée, à sa base, à des efforts axiaux plus importants pouvant affecter irrémédiablement sa capacité de résistance latérale. Finalement, dans le but de déterminer tous les facteurs de comportement afférés aux structures métalliques munies de palées, il s'avère nécessaire d'utiliser une méthode de calcul plus appropriée que l'analyse pushover qui paraît convenir mais qui n'est pas tellement exacte dans divers cas.

Références bibliographiques

[1] EN 1998-1-1, *Design of structures for earthquake resistance-Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*, CEN, European Committee for Standardization, Brussels, 2005.

[2] EN 1993-1-1, *Design of steel structures-Part 1: General rules and rules for buildings*,

CEN, European Committee for Standardization, Brussels, 2005.

[3] Balendra, T. and Huang, X., *Overstrength and Ductility Factors for Steel Frames Designed According to BS 5950*, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 129, pp 1019-1035, 2003.

[4] Maheri, M. R. and Akbari, R., *Seismic behavior factor, R, for steel X-braced and knee-braced RC buildings*, Engineering Structures, Vol. 25, pp 1505-1513, 2003.

[5] Kim, J. and Choi, H., *Response modification factors of chevron-braced frames*, Engineering Structures, Vol. 27, pp 285-300, 2005.

[6] Mahmoudi, M. and Zaree, M., *Evaluating response modification factors of concentrically braced steel frames*, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 66, pp 1196-1204, 2010.

[7] Faggiano, B., Fiorino, L., Formisano, L.A., Macillo, V., Castaldo, C. and Mazzolani, F. M., *Assessment of the Design Provisions for Steel Concentric X Bracing Frames with Reference to Italian and European Codes*, The Open Construction and Building Technology Journal, Vol. 8, pp. 208-215, 2014.

[8] Yahmi, D., Branci, T., Bouchaïr, A., Fournely, E., *Evaluating the Behaviour Factor of Medium Ductile SMRF Structures*, Periodical Polytechnica Civil Engineering, pp. 373-385, 11-12-2017.

[9] Yahmi, D., Branci, T., *Évaluation du facteur de comportement des ossatures métalliques en portiques*, 7^{ème} Symposium sur la construction en zone sismique (SYCZS'2015), Université Hassiba Benbouali, Chlef, Algeria, Chlef les 11 et 12 Octobre 2015.

[10] Yahmi, D., Branci, T., Bouchaïr, A., Fournely, E., *Evaluation of behaviour factors of steel moment-resisting frames using standard pushover method*, Procedia Engineering, Vol. 199, pp. 397-403, 2017.



- [11] Yahmi, D., Branci, T., Bouchaïr, A., Fournely, E., *Evaluating of the behaviour factor of concentric x-braced steel structures*", Key Engineering Materials, Vol. 763, pp. 98-105, 2018.
- [12] ATC-34, *A critical review of current approaches to earthquake-resistant design*, Applied Technology Council, Redwood City, California, 1995.
- [13] M. Ferraioli, M., Lavino, A. and Mandara, A., *Behaviour Factor of Code-Designed Steel Moment-Resisting Frames*, International Journal of Steel Structures, Vol. 14, pp 243-254, 2014.
- [14] Elghazouli, A. Y., *Assessment of European seismic design procedures for steel framed structures*, Bulletin of Earthquake Engineering, Vol. 8, pp. 65-89, 2010.
- [15] Nassar, A. and Krawinkler, H., *Seismic demands for SDOF and MDOF systems*, Report No. 95, The John A. Blume, Earthquake Engineering Center, Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford University, California, USA. 1991.
- [16] Fajfar, P., *A nonlinear analysis method for performance based seismic design*, Earthquake Spectra, Vol. 16, pp. 573-592, 2000.
- [17] Mahmoudi, M. and Zaree, M., *Determination the response modification factors of buckling restrained braced frames*, Procedia Engineering, Vol. 54, pp. 222-231, 2013.
- [18] Kamaris, G. S., Vallianatou, Y. M. and Beskos, D. E., *Seismic damage estimation of in-plane regular steel moment resisting and x-braced frames*, Bulletin of Earthquake Engineering, Vol. 10, pp. 1745-1766, 2012.
- [19] SAP2000, *Linear and nonlinear static and dynamic analysis of three-dimensional structures*, Computers and Structures Inc. (CSI), Berkeley, (CA), 2010.
- [20] FEMA 356, *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, American Society of Civil Engineers for the Federal Emergency Management Agency, Washington, 2000.