
Evaluation de l'effet du nombre d'étages et de travées sur le facteur de comportement d'ossatures métalliques

Djamel Yahmi¹, Taïeb Branci¹, Abdelhamid Bouchaïr^{2,3} & Eric Fournely^{2,3}

¹Université Hassiba Benbouali, Faculté de Génie Civil et d'Architecture, Département de Génie Civil, Chlef, Algérie, yahmi_djamel@hotmail.fr, brancit@yahoo.fr

²Université Clermont Auvergne, Université Blaise Pascal, Institut Pascal, 4, Av. Blaise Pascal, TSA 60026, CS 60026, 63178 Aubière cedex, abdelhamid.bouchaïr@univ.bpclermont.fr, eric.fournely@bpclermont.fr

³CNRS, UMR 6602, Institut Pascal, F-63171 Aubière, France

RÉSUMÉ. Les conséquences des séismes passés sur les ossatures de bâtiments ont montré que certaines constructions ont bien résisté à des forces sismiques plus importantes que celles pour lesquelles elles ont été calculées. Ceci est dû souvent à une résistance de réserve interne qui n'a pas été initialement prise en compte dans les calculs de dimensionnement et à une capacité dissipative de l'ossature à travers des déformations inélastiques (ductilité). L'objet de cette étude est d'évaluer les facteurs de résistance de réserve, de ductilité et de comportement pour une série de portiques auto-stables en charpente métallique dans lesquels les effets du nombre d'étages et de travées sont pris en compte. Pour cela, une analyse statique non-linéaire en poussée progressive a été menée en utilisant le logiciel SAP2000. Les résultats obtenus montrent que le nombre d'étages a une influence non négligeable sur le facteur de comportement q tandis que le nombre de travées a un effet moindre sur ce même facteur. Il est aussi montré que la valeur du facteur de comportement, des ossatures métalliques étudiées, obtenue à partir de l'Eurocode-8 est toujours inférieure à celles calculées par l'analyse en poussée progressive.

ABSTRACT. The consequences of past seismic have shown that certain buildings frames have resisted well to larger seismic forces than those that they were designed. This is due mainly to an internal reserve strength and a dissipative capacity of the frame through inelastic deformation (ductility). The purpose of this study is to evaluate the reserve strength, ductility and behaviour factors for a set of steel moment-resisting frames in which the effects of the number of stories and bays are considered. For this, a non-linear static analysis (pushover) has been carried out using the software SAP2000. The results obtained show that the number of stories has a large effect on the behaviour factor q while the number of spans has a relatively modest effect. Besides, it is shown that the value of the behaviour factor, for the studied steel moment-resisting frames, given by Eurocode-8 is lower than those calculated through the pushover analysis.

MOTS-CLÉS : ossature métallique, facteur de comportement, ductilité, résistance de réserve, séisme.

KEY WORDS : steel frame, behaviour factor, ductility, reserve strength, earthquake.

1. Introduction

Les observations réalisées à la suite de plusieurs séismes ont montré que les ossatures de bâtiments sont capables de résister sans dommages à des forces sismiques plus importantes que celles pour lesquelles elles ont été conçues. Ceci est expliqué par la présence d'une résistance de réserve significative dans ces ossatures qui n'a pas été prise en compte lors de la conception [RAH 98]. Actuellement, les codes parasismiques tiennent compte effectivement de cette résistance de réserve à travers le facteur de comportement (q , pour l'Eurocode 8 [EC8 04] et R pour d'autres codes [RPA 99]). Ce coefficient a l'avantage de tenir compte de la réserve de ductilité disponible dans l'ossature et sert à réduire ainsi les forces sismiques élastiques maximales de dimensionnement.

Compte tenu de l'importance du facteur q dans le comportement dynamique des ossatures, plusieurs recherches scientifiques [BAL 03] [MAH 13] [MON 13] ont été entreprises dans ce domaine afin d'évaluer le rôle de ce facteur vis-à-vis de la ductilité et de la résistance de réserve et d'étudier les origines de cette résistance de réserve et son effet sur le comportement non linéaire des ossatures de bâtiments. Balendra et al. [BAL 03] ont évalué le facteur de comportement des ossatures métalliques et ont montré que les ossatures en portiques possèdent une résistance de réserve significative. Mahmoudi et al. [MAH 13] ont démontré que pour des ossatures en charpente métallique, le facteur de comportement dépend de la résistance de réserve des éléments structuraux. Mondal et al. [MON 13] ont de leur côté montré que pour des ossatures en béton armé avec plusieurs étages, la valeur du facteur de comportement des ossatures analysées, déduite à partir du code parasismique indien, est supérieure aux valeurs calculées. Louazi et al. [LOU 14] ont montré que, pour des ossatures en béton armé, la valeur du facteur de comportement diminue avec l'augmentation de la hauteur de l'ossature.

L'objectif de la présente étude est d'évaluer le facteur de comportement d'une série de portiques de bâtiments en acier dimensionnés conformément aux règlements Européens, EC8 [EC8 04] et EC3 [EC3 05], en considérant notamment l'effet du nombre d'étages et de travées. Ainsi, une analyse push-over sous charges horizontales triangulaires est menée en utilisant le logiciel SAP2000 [9]. Elle est basée sur les lois du comportement en moment-rotation des sections d'éléments structuraux du code Américain FEMA-356 (Figure 1). L'effet de l'effort axial sur les résistances en flexion des sections de poteaux est pris en compte à travers la courbe d'interaction N-M du SAP2000 [FEM 00].

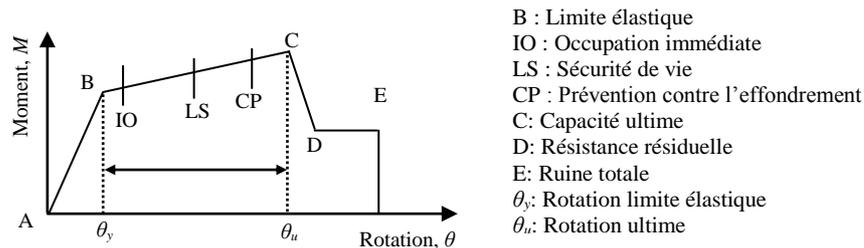


Figure 1. Loi Moment-Rotation non linéaire idéalisée utilisée pour les poutres et poteaux.

2. Facteur de comportement

Le facteur de comportement, proposé pour la première fois par l'ATC en 1978 [ATC 78], a fait l'objet de plusieurs recherches. Ce facteur dépend de plusieurs paramètres tels que la ductilité « R_μ », la résistance de réserve due à la conception « R_Ω », la période fondamentale et la résistance de réserve due à la redistribution des efforts internes (redondance) « R_ρ ». La formulation la plus utilisée actuellement de ce facteur est exprimée comme étant le produit de trois facteurs [ATC 08] :

$$q = R_\mu R_\Omega R_\rho \quad [1]$$

L'évolution récente de certains codes parasismiques tels que l'EC8 et le CNBC [CNB 05] a pris en compte ces paramètres.

2.1 Facteur de résistance de réserve global

D'après les travaux de recherche de certains auteurs [RAH 98] [LOU 14], le facteur de résistance de réserve global (R_S) est la combinaison du facteur de résistance de réserve de conception (R_Ω) et celui de redondance (R_ρ):

$$R_S = R_\Omega R_\rho = \frac{V_y}{V_d} \frac{V_u}{V_y} \quad [2]$$

Où V_d , V_y , V_u , désignent respectivement l'effort tranchant de conception à la base, la limite élastique (ou l'apparition d'une première rotule plastique dans la structure) et la limite ultime de la structure (Figure 2).

2.1 Facteur de ductilité

Le facteur de ductilité R_μ peut être défini comme étant le paramètre qui mesure la réponse non linéaire globale d'une ossature et sa capacité dissipative due aux déformations inélastique. Plusieurs propositions ont été faites pour déterminer le facteur R_μ . Par exemple, dans la méthode N2 proposée par Fajfar [FAJ 02], le facteur de ductilité est donné par les équations [3] et [4].

$$R_\mu = (1 - \mu) \cdot \frac{T}{T_c} + 1 \quad \text{si } T < T_c \quad [3]$$

$$R_\mu = \mu \quad \text{si } T \geq T_c \quad [4]$$

T est la période fondamentale de la structure, T_c est la période caractéristique du mouvement sismique et μ le facteur de ductilité de l'ossature (figure 2) défini comme suit :

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad [5]$$

Où Δ_u , Δ_y (obtenu via la courbe de comportement idéalisée) sont le déplacement maximal et celui correspondant à la limite élastique de la structure respectivement.

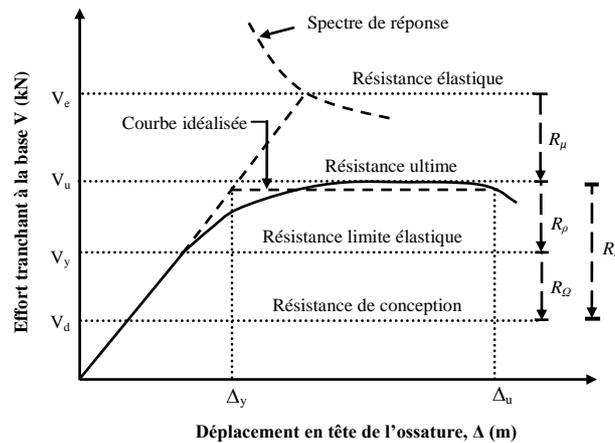


Figure 2. Courbe effort tranchant à la base-Déplacement en tête de l'ossature.

3. Description et choix des structures étudiées

Un groupe de portiques auto-stables en acier de 3, 6, 9 et 12 étages avec 3 et 6 travées de 5m chacune, d'une hauteur de 3m pour chaque étage sont modélisés pour évaluer l'impact de différents paramètres sur le facteur de comportement. Les portiques sont appelés (xEyT) avec x le nombre d'étages et y le nombre de travées. Les huit portiques étudiés (3E3T, 6E3T, 9E3T, 12E3T, 3E6T, 6E6T, 9E6T et 12E6T) sont dimensionnés selon les prescriptions de l'EC3 et l'EC8 avec une accélération maximale de sol égale à 0,35g et de classe B. L'acier a une limite d'élasticité égale à 235MPa avec une loi élasto-plastique. La charge gravitaire est de 27,5kN/m (charge permanente + exploitation), tandis que les charges latérales supposées représentées l'action sismique sont déduites à partir de la méthode statique équivalente de l'EC8.

Tableau 1. Caractéristiques des ossatures étudiées.

Nombre d'étages	Poteaux HEB & Poutres IPE
3 étages	HEB240-IPE330 (étages 1-3)
6 étages	280-360(1-4) + 260-330(5-6)
9 étages	340-360(1) + 340-400(2-5) + 320-360(6-7) + 300-330(8-9)
12 étages	400-360(1) + 400-400(2-3) + 400-450(4-5) + 360-400(6-7) 340-400(8-9) + 340-360(10) + 340-330(11-12)

Note : dans le tableau on lit comme exemple 240-330(1-3) = HEB240-IPE330 (du 1er au 3eme étage). Idem pour toutes les autres ossatures. Les assemblages poutre-poteau et pied de poteau sont considérés comme rigide.

Les géométries, les charges et les caractéristiques des matériaux des portiques considérés dans cette étude sont celles de la référence [Val 12].

Un modèle à deux dimensions pour chaque ossature est créé avec le SAP2000 pour effectuer l'analyse Push-over. Les poutres et les poteaux sont modélisés par des éléments élastiques avec des rotules plastiques concentrées à leurs extrémités. Les sources de non-linéarité géométrique ont été considérées.

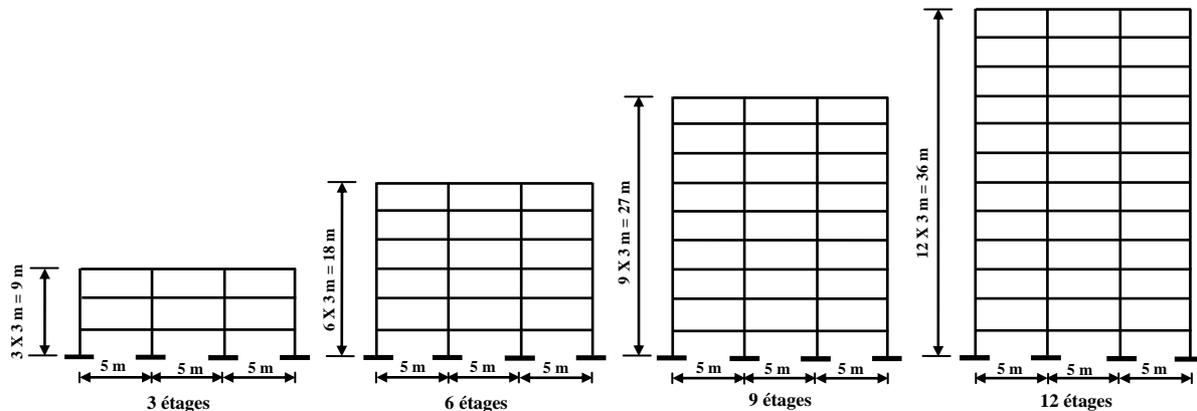


Figure 3. Vues en élévation des ossatures analysées (cas avec 3 travées).

4. Limites de performance structurale

Pour évaluer le facteur de comportement q , un critère de performance structurale est nécessaire en vue de définir l'état limite ultime de l'ossature à partir des résultats de modélisation (push-over). Dans la présente étude, deux critères sont utilisés. Le premier est défini par la capacité de rotation ultime (point C dans la figure 1) d'un seul poteau (instabilité locale, IL), et le deuxième est basé sur la capacité ultime de tous les poteaux du premier niveau de l'ossature ou lorsque l'effort tranchant à la base de l'ossature est maximal (instabilité globale, IG).

5. Résultats et discussion

La figure 4 montre la distribution des rotules plastiques pour le cas d'instabilité locale où un des poteaux les plus sollicités atteint sa capacité ultime C. La figure 5 montre la même distribution pour le cas d'instabilité globale où les poteaux les plus sollicités ont atteint leurs capacités ultimes. A noter que la capacité ultime de chaque poteau tient compte de l'interaction N-M. Les courbes de capacité des ossatures étudiées sont illustrées par les figures 6 à 7. Les valeurs du facteur de comportement et ses composantes calculées pour les quatre portiques étudiés (3, 6, 9 et 12 étages) sont représentées sur la figure 8.

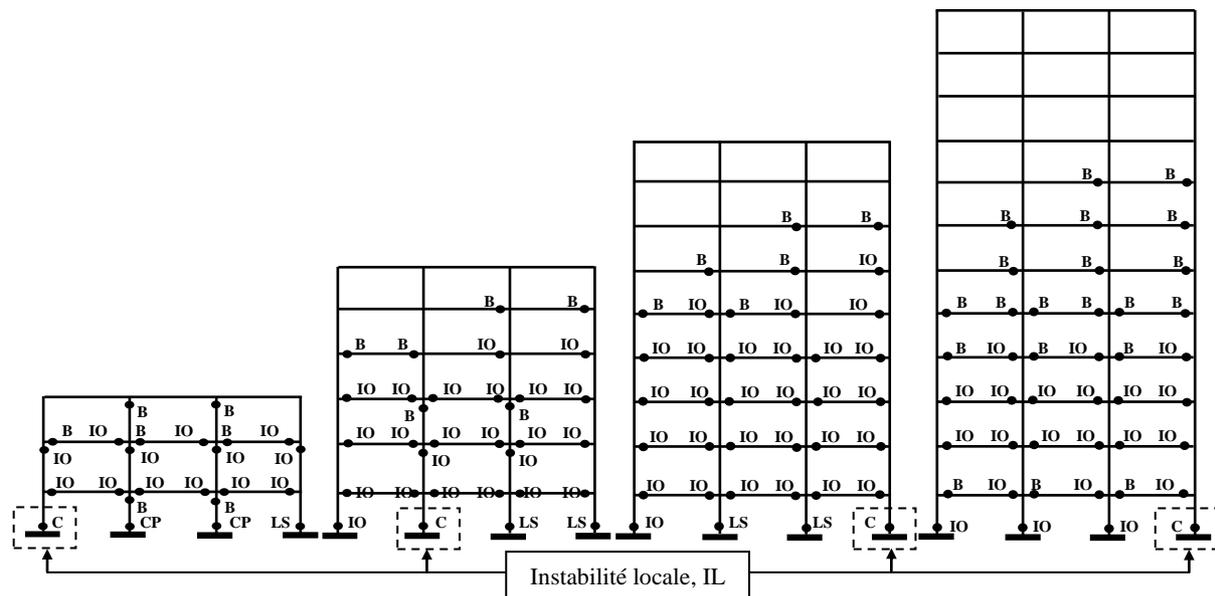


Figure 4. Distribution des rotules plastiques (cas d'instabilité locale)

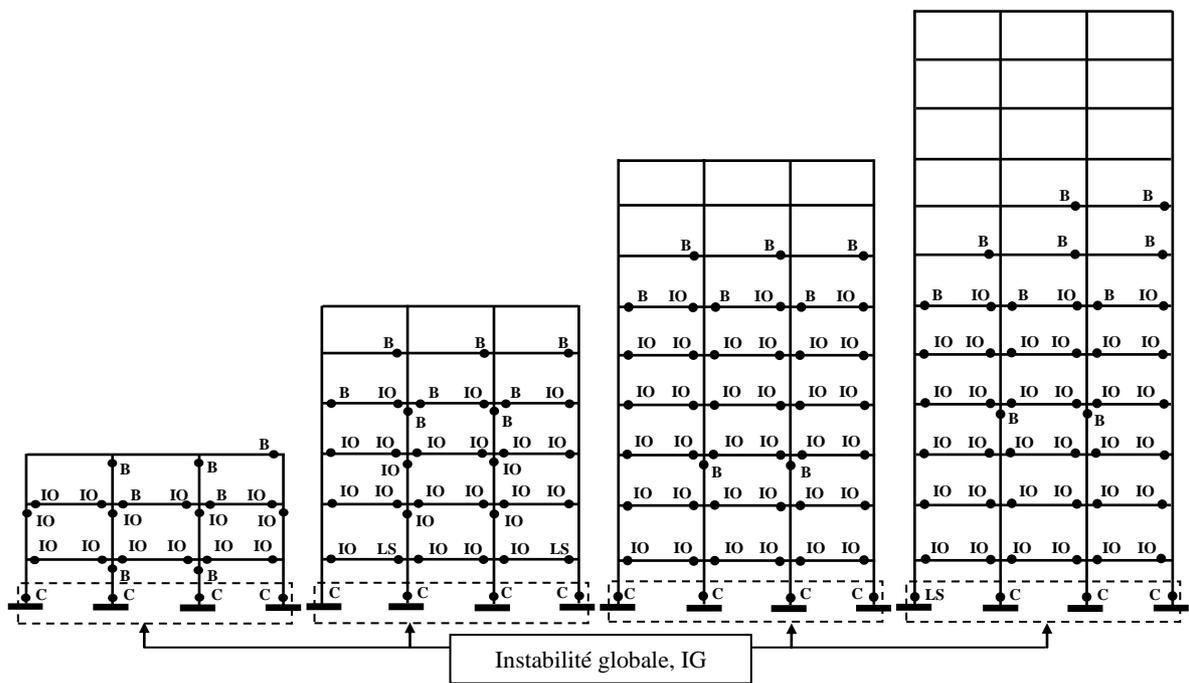


Figure 5. Distribution des rotules plastiques (cas d'instabilité globale)

À la suite des analyses effectuées, des comparaisons sont menées entre les résultats obtenus. Les paramètres de comparaison sont le nombre d'étages et de travées. D'après ces comparaisons il est constaté que :

- Les rotules plastiques se sont formées successivement dans les extrémités des poutres et en pieds des poteaux du premier niveau. Dans la majorité des cas, des rotules se sont également développées en têtes de quelques poteaux (Figures 4 et 5).
- L'instabilité globale (IG) qui correspond à la défaillance des ossatures étudiées (Figure 5) est apparue par l'atteinte des capacités ultimes C des poteaux du premier niveau après le développement de rotules plastiques d'instabilité locale à leurs bases (Figure 4).
- Dans tous les cas étudiés, les rotules plastiques les plus déterminantes de la ruine se sont formées à la base des sections des poteaux du premier niveau. Ceci s'explique par la réduction du moment de résistance plastique de la section du poteau due à l'effort axial appliqué au poteau du premier niveau (figure 9).

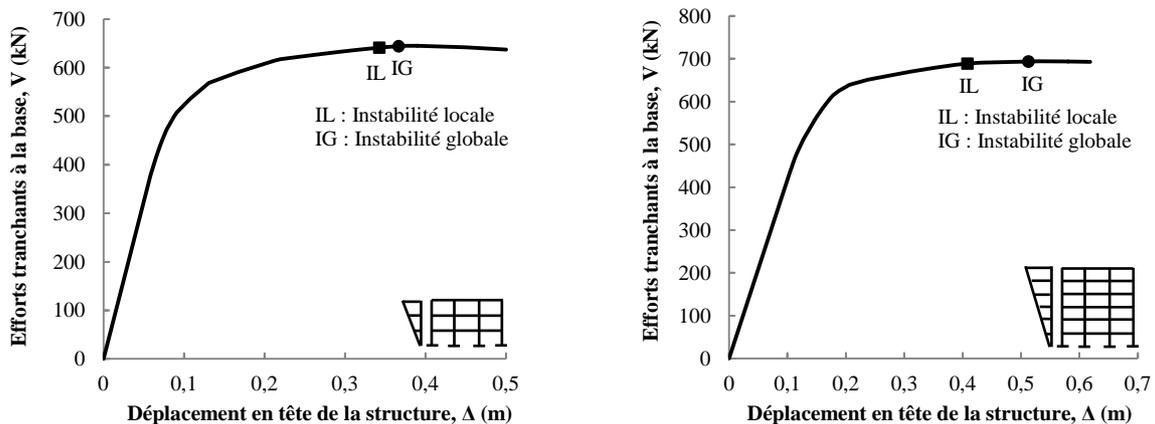


Figure 6. Courbes de capacités des ossatures à 3 et 6 niveaux & 3 travées (3E3T et 6E3T).

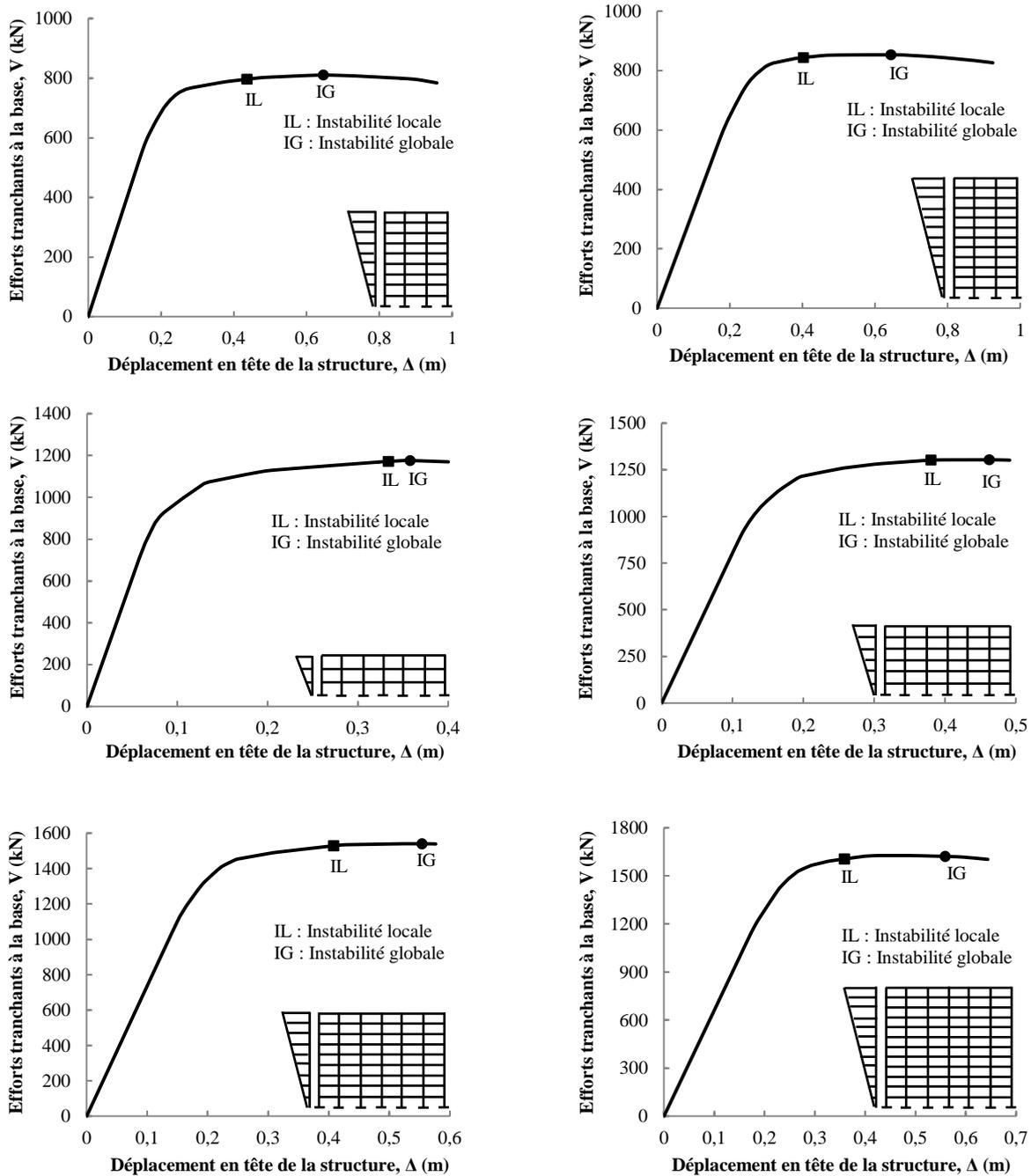


Figure 7. Courbes de capacités des autres ossatures étudiées.

Dans la Figure 8, les deux composantes de modification de la réponse R_s et R_μ d'une ossature définies dans l'équation [1] et [2] sont illustrées. Elles doivent être multipliées pour obtenir le facteur de comportement. En particulier, le facteur de résistance de réserve et celui de ductilité obtenus à partir de l'analyse push-over au niveau du chargement qui correspond à l'instabilité globale (état limite ultime). La figure 8 montre que :

- La valeur la plus élevée du facteur de ductilité est obtenue pour l'ossature de faible hauteur où la présence de l'instabilité locale est apparue presque en même temps que l'instabilité globale. Au contraire, pour les ossatures de grande hauteur l'augmentation de l'effort axial à la base des sections des poteaux du premier niveau réduit leurs capacités de rotation ce qui provoque l'instabilité locale des poteaux du premier niveau (Figure 9), et par conséquent une diminution de la ductilité globale de l'ossature.
- Le facteur de résistance de réserve R_s est fortement influencé par le nombre d'étages de l'ossature. En particulier, la plus grande valeur de ce facteur est obtenue pour l'ossature de faible hauteur.

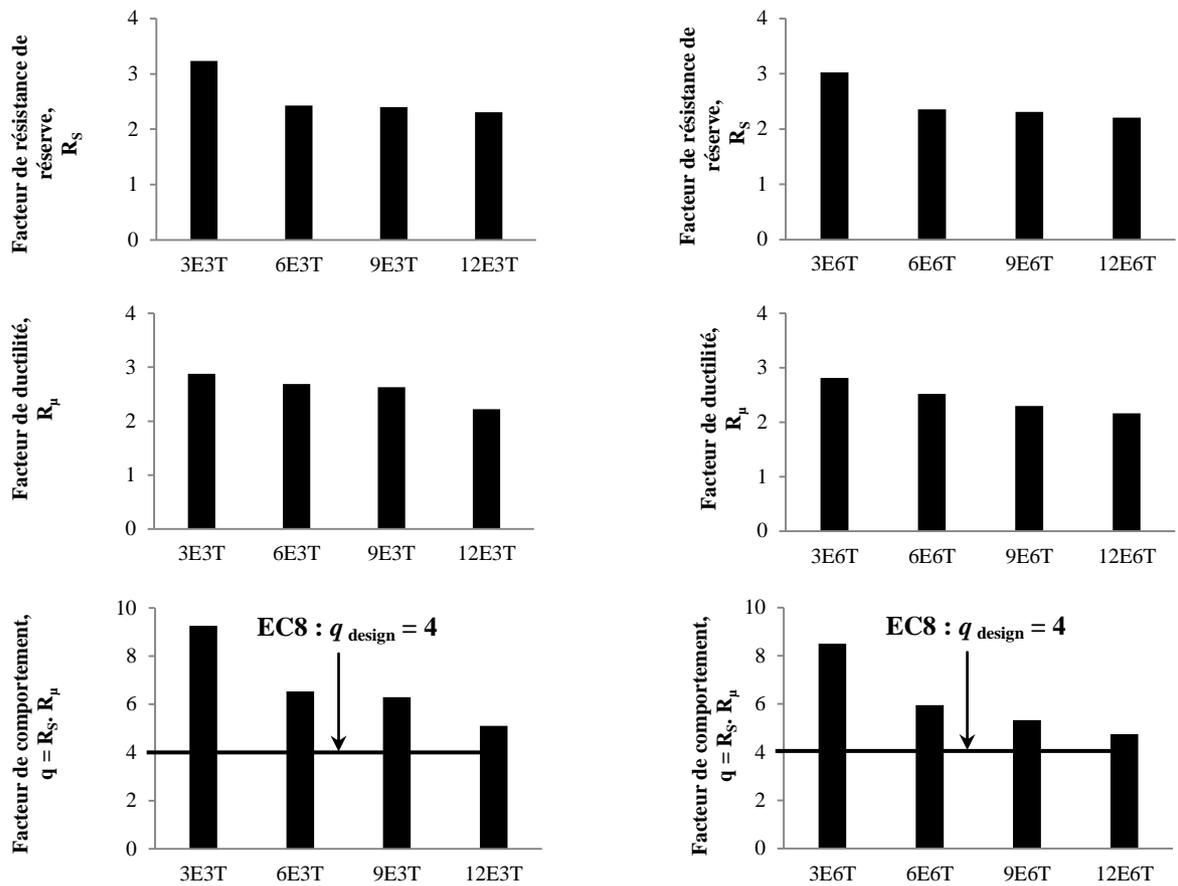


Figure 8. Facteur de comportement des ossatures étudiées.

La Figure 8 résume les valeurs du facteur de comportement obtenues à partir de l'analyse push-over pour les ossatures considérées. La valeur maximale du facteur de comportement donnée dans l'EC8 est représentée par une ligne droite ($q = 4$). D'après cette figure, il est clair que le nombre d'étages a une influence non négligeable sur la valeur du facteur de comportement, tandis que le nombre de travées a un effet relativement modeste. La valeur de ce facteur diminue lorsque le nombre d'étages augmente. Il est observé également que la valeur du facteur de comportement déduite par l'EC8 reste inférieure aux valeurs calculées pour toutes les ossatures analysées.

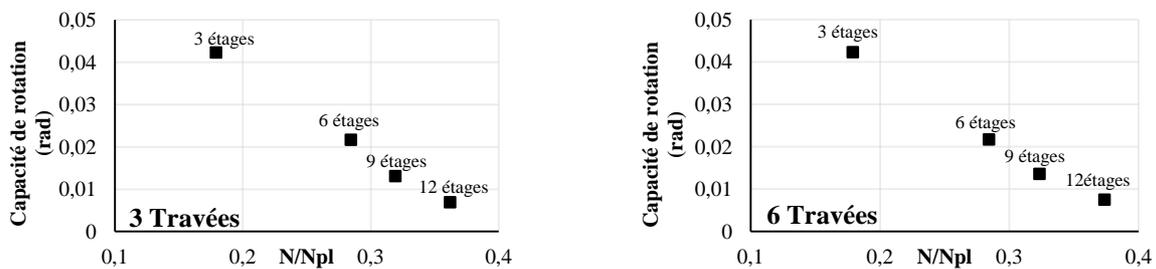


Figure 9. Effet de l'effort axial à la capacité de rotation à la base des poteaux à l'instabilité locale (IL).

La figure 9 montre l'évolution de la capacité de rotation des poteaux en fonction du taux de chargement axial du poteau. Ce taux de chargement, représenté par le rapport entre l'effort sollicitant et l'effort résistant plastique (N/N_{pl}), est illustré pour les poteaux du premier niveau. Il peut être observé que la capacité de rotation des sections des poteaux est largement influencée par le taux de chargement axial. Lorsque le nombre d'étages augmente, le taux de chargement augmente, et la capacité de rotation ainsi que le moment résistant plastique de la section du poteau diminuent. Ainsi, la capacité de ductilité de l'ossature se trouve fortement impactée, ce qui influence son facteur de comportement.

6. Conclusion

L'étude a permis d'évaluer le facteur de comportement d'ossatures en acier dimensionnées conformément au règlement Européen. Le nombre d'étages et le nombre de travées sont pris en compte pour voir leurs effets sur ce facteur en comparaison avec la valeur maximale de l'EC8. Une analyse push-over a été menée pour évaluer le comportement élasto-plastique des ossatures en grands déplacements avec prise en compte du comportement plastique des sections soumises à une combinaison d'effort normal et de moment fléchissant. Les résultats principaux de ces investigations sont résumés dans les points suivants :

- Le nombre d'étages a un effet capital sur la valeur du facteur de résistance de réserve R_S , de ductilité R_μ et par conséquent de celui du comportement q .
- Lorsque le nombre d'étages augmente, l'effort axial appliqué au poteau du premier niveau augmente. Ceci mène à la réduction de la capacité résistante et la capacité de rotation de la section soumise à M-N. Ainsi, les valeurs du facteur de résistance de réserve et du facteur de ductilité diminuent, ce qui influence par conséquent celui du facteur de comportement.
- Le nombre de travées a un effet relativement modeste sur le facteur de comportement.

Il est également observé que les valeurs du facteur de comportement, des ossatures étudiées, calculé à partir des modélisations push-over est supérieure à la valeur maximale donnée par l'EC8.

7. Bibliographie

- [RAH 98] Rahgozar M. A., Humar J. L., *Accounting for overstrength in seismic design of steel structures*, Canadian Journal of Civil Engineering, vol. 25, 1998, p. 1-15.
- [EC8 04] EN 1998-1. Eurocode 8, *Design of structures for earthquake resistance, Part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings*, European Committee for Standardization, CEN, 2004.
- [RPA 99] Algerian seismic design code. *National Center of Applied Research in Earthquake Engineering Algeria, Version*, 2003.
- [BAL 03] Balendra T., Huang X., *Overstrength and ductility factors for steel frames designed according to BS 5950*, Journal of Structural Engineering, ASCE; vol. 129, August 1, 2003, p. 1019–1035.
- [MAH 13] Mahmoudi M., Zaree M., *Determination the Response Modification Factors of Buckling Restrained Braced Frames*, Procedia Engineering, vol. 54, 2013, p 222 – 231.
- [MON 13] Mondal A., Ghosh S., *Performance-based evaluation of the response reduction factor for ductile RC frames*, Engineering Structures, vol. 56, 2013, p 1808–1819.
- [LOU 14] Louzai A., Abed A., *Evaluation of the seismic behavior factor of reinforced concrete frame structures based on comparative analysis between non-linear static pushover and incremental dynamic analyses*, Bulletin of Earthquake Engineering, 2014, vol. 13, p 1773–179.
- [EC3 05] EN 1993-1. Eurocode 3, *Design of steel structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings*. European Committee for Standardization, CEN, 2005.
- [SAP 10] SAP2000., *Linear and nonlinear static and dynamic analysis of three-dimensional structures. Advanced Version 14.0*, Analysis Ref. Manual, Computer and Structures, Berkeley, CA, 2010.
- [FEM 00] Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Building, FEMA-356., Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C, 2000.
- [ATC 78] ATC3-06., *Tentative provisions for the development of seismic regulations for building*. Applied Technology Council, Redwood City, CA, 1978.
- [ATC 08] ATC-63., *Quantification of building seismic performance factors.*, Applied Technology Council, Redwood City, CA, 2008. pp. 6-31.
- [CNB 05] CNBC., *Code National du Bâtiment – Canada., Canada. Conseil National de Recherches du Canada – Institut de recherche en construction*, Ottawa, Ontario, Canada, 2005.
- [FAJ 02] Fajfar P., *Structural Analysis in Earthquake Engineering A Breakthrough of Simplified Nonlinear Methods*, 12th European Conference on Earthquake Engineering, 2002. Paper Reference 843.
- [VAL 12] Vallianatou G. S. K. Y., Beskos D. E., *Seismic damage estimation of in-plane regular steel moment resisting and x-braced frames*, Bull Earthquake Eng, 2012, vol. 10, p 1745–1766.