

ANALYSE DE LA DEMANDE DE DUCTILITE DES STRUCTURES DES BATIMENTS A PROFIL IRREGULIER

T. Branci¹

T. 3. Performance of concrete structures

RESUME

L'objectif de cette présente communication consiste à évaluer les effets des irrégularités verticales sur la réponse sismique de quatre structures autostables en béton armé de bâtiments multi-étagés. Une structure de bâtiment régulier équivalent sert de référence. La discontinuité dans le plan vertical des structures est introduite par une réduction brusque de l'aire du plancher des étages supérieurs. La variation de la réponse maximale en termes de demandes de ductilité suivant la hauteur de ce type de structures a été considérée, d'une part, par la méthode d'analyse modale et, d'autre part, par la méthode statique équivalente du code parasismique Algérien (RPA99/version 2003). Les résultats obtenus par les deux méthodes sont sensiblement identiques en ordre de grandeur et en distribution. A l'issue de cette investigation, une méthode statique approximative de détermination de la répartition du chargement latéral a été proposée en identifiant le comportement sismique de la structure irrégulière à un système particulier à deux degrés de liberté.

MOT CLES

Irrégularité, sismique, réponse, structure, ductilité.

¹ Département Génie Civil, UHB , Chlef, Algérie, brancit@yahoo.fr

1. INTRODUCTION

La forme des bâtiments est l'un des paramètres architecturaux les plus importants, car elle influence d'une manière très sensible la réponse globale du bâtiment aux actions sismiques. Pour un bon comportement vis-à-vis du séisme, les règlements parasismiques en vigueur préconisent de tendre vers des formes simples, compactes et régulières, tant en plan qu'en élévation. Mais, souvent pour des raisons architecturales ou esthétiques, certains édifices comportent un ou plusieurs décrochements en élévation qui se traduisent par une répartition irrégulière des masses, ou de la rigidité, provoquant une répartition irrégulière du chargement sismique horizontal qui peut engendrer de sérieuses concentrations de contraintes précisément au droit des changements structuraux où leur capacité à stocker et à dissiper de l'énergie se trouve très réduite. Plusieurs investigations ont identifiés des écarts significatifs entre les réponses sismiques des structures à profil régulier et celles des structures à profil irrégulier. La plupart de ces études ont mis en évidence une nette augmentation des déplacements relatifs inter-étages et des demandes de ductilité au niveau de la zone de discontinuité, ainsi qu'une forte contribution des modes supérieurs aux efforts de cisaillements, [Shahrooz et Moehle 1990], [Wong et Tso 1994], [Valmundsson et Nau 1997], [Al-Ali et Krawinkler 1998], [Das et Nau 2003], [Fragiadakis et al. 2006]. Les règlements parasismiques, tels que le règlement algérien RPA99 [RPA99 2003] et l'Eurocode 8 [Eurocode n° 8 1988], préconisent l'utilisation de l'analyse dynamique modale spectrale ou l'analyse dynamique temporelle comme méthodes de calcul de préférence pour évaluer la réponse sismique des bâtiments irréguliers, tout en maintenant la méthode statique équivalente pour les structures de bâtiments ayant des profils réguliers. Afin d'évaluer les effets des irrégularités sur la réponse sismique des structures de bâtiments, l'objectif principal de la présente étude consiste à estimer la réponse non linéaire, en termes de demandes de ductilité d'étages, d'une série de quatre portiques à profil irrégulier, soumis chacun à trois accélérogrammes différents. Un portique régulier équivalent sert de référence. Il s'agit, en fait, de vérifier les dispositions réglementaires, relatives au choix des méthodes utilisées, à travers une comparaison des deux méthodes, méthode d'analyse modale spectrale et méthode statique équivalente, vis-à-vis de la distribution et de la magnitude de la demande de ductilité d'étages de ce type de structures bien particulier.

2. DESCRIPTION DES STRUCTURES ETUDIEES

Les modèles structuraux de base considérés dans la présente étude consistent en des portiques irréguliers en élévation en béton armé comportant 15 étages. Quatre portiques irréguliers sont considérés ayant trois travées à la base de 6.0 m chacune. Les étages de chaque portique ont chacun 3.0 m de hauteur. Le système de résistance aux charges latérales considéré est conçu sur la base des forces obtenues par la méthode statique équivalente et l'analyse dynamique modale. Puisque c'est la distribution des forces de conception obtenue par la méthode statique équivalente et l'analyse modale qui est considérée au lieu de la magnitude de l'effort tranchant à la base, la distribution des forces de conception est maintenue la même pour les deux méthodes. L'analyse dynamique modale a été menée en utilisant un spectre de conception fourni par le code RPA99. Pour la méthode statique équivalente, l'effort tranchant à la base obtenu par l'analyse modale a été distribué en utilisant les équations de la méthode statique du code RPA99. Selon ce dernier, l'irrégularité géométrique verticale existe si la dimension en plan horizontal du système de contreventement d'un étage est supérieure à 150% de la dimension correspondante d'un étage adjacent. Ce type d'irrégularité verticale, comme spécifié dans le code RPA99, représente le principal paramètre évalué dans cette étude. Dans le but de créer un système qui a un rapport avec ce critère, chaque structure irrégulière possède, à un étage donné, une dimension horizontale de son système de contreventement qui est supérieure à 150% de celle d'un étage adjacent. Pour toutes les structures étudiées, ces rapports sont de 300%. Ainsi, le décrochement dans un bâtiment à plusieurs étages est défini comme étant un changement brusque dans la dimension en plan le long de la hauteur du bâtiment. Les portions situées au-dessous et au-dessus du niveau du décrochement sont couramment désignées respectivement par « base » et « tour ». Toutes les structures sont modélisées en tant que systèmes à deux dimensions (Figs 1 et 2).

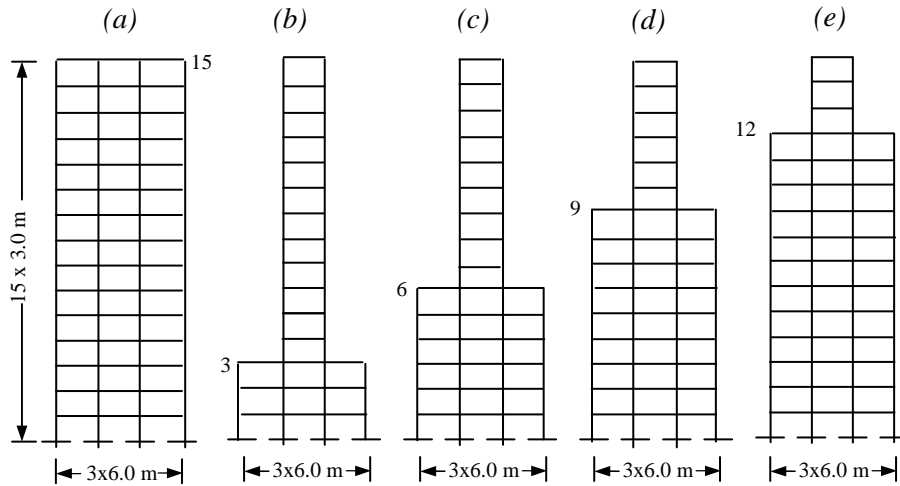


Figure 1. Profils des portiques : (a) régulier; (b), (c), (d) et (e) irréguliers.

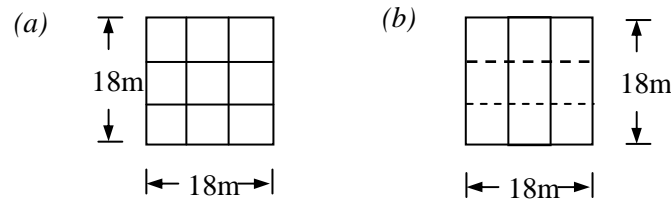


Figure 2. Vues en plan des étages des portiques : (a) régulier; (b) irréguliers.

3. METHODE D'ANALYSE DYNAMIQUE NON LINEAIRE

L'analyse dynamique non-linéaire du comportement de ces structures a été menée en utilisant le logiciel de calcul Drain-2D [Kanaan et Powell, 1973]. Un modèle bilinéaire est utilisé pour stimuler le comportement hystérésis des poutres et des poteaux. Ce modèle est caractérisé par un écroissage de 5% pour tous les éléments de la structure. A défaut d'une connaissance précise de la distribution des amortissements dans les éléments de la structure et de leur variation avec les fréquences propres de vibration de la structure, la matrice d'amortissement C est évaluée en utilisant la combinaison linéaire de Rayleigh $C = aM + bK$, [Clough et Penzien, 1975]. L'algorithme de résolution de Newmark a été utilisé pour l'intégration numérique pas à pas dans le temps du système d'équations couplées d'équilibre dynamique, donné par:

$$M\ddot{v} + C\dot{v} + Kv = -M\ddot{v}_g \quad (1)$$

où v est le vecteur des déplacements de tous les degrés de libertés, \ddot{v}_g est l'accélération du sol, M est la matrice des masses concentrées, K est la matrice de rigidité globale, et C est la matrice d'amortissement. Dans cette étude, les réponses maximales des poteaux et des poutres ont été déterminées par l'analyse non-linéaire. Le paramètre le plus intéressant donné par ce modèle est la rotation plastique θ_p aux extrémités des éléments structuraux.

4. ACTIONS SISMIQUES

Trois accélérogrammes du mouvement du sol ont été utilisés dans cette étude. (a) la composante N-S du séisme du 18 mai 1940 d'El-centro, caractérisé par une accélération maximale du sol de 0.32g, (b) la composante N-S du séisme du 13 mars 1992 de Erzincan, dont l'accélération maximale est de 0.4g et (c) la composante S60E du 19 septembre 1985 de Mexico avec une accélération maximale de 0.20g. La réponse sismique de chaque portique irrégulier aux trois accélérogrammes a été évaluée.

Pour chaque portique, les réponses finales dues aux trois accélérogrammes sont déduites à partir de la moyenne des trois réponses calculées afin de rendre les résultats moins dépendant des caractéristiques du mouvement de la base.

5. DEMANDES DE DUCTILITE

Quand une structure est soumise à un tremblement de terre sévère, les éléments constituant la structure sont soumis à de grandes déformations. Si les éléments n'ont pas assez de ductilité, ils subiront des dommages et la structure pourrait s'effondrer. La ductilité ou « la capacité de déformation » est souvent utilisée dans le concept d'ingénierie sismique et est considérée comme l'un des paramètres les plus critiques dans l'évaluation de la performance sismique des structures. Dans la présente étude, le rapport de ductilité a été choisi comme un indicateur pour quantifier la capacité de ductilité. Par conséquent, les déformations inélastiques des éléments sont mesurées en termes de rapport de ductilité d'élément. Le rapport de ductilité d'élément est défini comme étant le rapport de la rotation totale maximale de l'extrémité de l'élément à la rotation limite élastique de l'extrémité de l'élément à chaque niveau de la structure, selon la relation suivante:

$$\mu = \frac{\theta}{\theta_y} = 1 + \frac{\theta_p}{\theta_y} \quad (2)$$

où $\theta = \theta_y + \theta_p$ est la rotation maximale de l'élément; $\theta_y = \frac{M_y L}{3EI}$ est définie comme étant la rotation limite de l'élément; θ_p = la rotation calculée de la rotule plastique, M_y = le moment plastique de résistance de flexion, I = le moment d'inertie; E = le module d'élasticité de Young; et L = la longueur de l'élément. Selon la définition de θ_y , la relation (2) peut s'écrire:

$$\mu = 1 + \frac{3EI\theta_p}{M_y L} \quad (3)$$

Pour un Poteau ou une poutre d'un portique rigide, les rotules plastiques pourraient se former aux extrémités de l'élément structural et le point d'inflexion peut être supposé situé à mi-longueur de l'élément. Par conséquent, le rapport de ductilité donnée par la relation (3) devient:

$$\mu = 1 + \frac{6EI\theta_p}{M_y L} \quad (4)$$

La présente étude est principalement focalisée sur l'influence des irrégularités structurales sur la ductilité des portiques. Pour s'assurer de la relative efficacité des portiques conçus par les deux méthodes, statique et modale, une comparaison des rapports des ductilités obtenus par les demandes de ductilité des rotations plastiques des éléments à chaque étage a été menée.

6. ANALYSE DES RESULTATS

Les figures 3 à 4 montrent les distributions des rapports des demandes de ductilité de rotation calculés le long de la hauteur des structures dans les poteaux et les poutres appartenant aux portiques irréguliers et au portique régulier équivalent. Les conclusions déduites à partir de cette étude sont énumérées comme suit :

1. En générale, pour tous les portiques irréguliers, la demande de ductilité dans les poutres de la partie "tour" est plus accentuée que celle des poutres de la partie "base" et affiche une nette croissance au voisinage du niveau du décrochement. Ceci implique que lors d'un séisme de forte intensité les poutres dans cette zone pourraient subir des désordres importants et perdront leurs capacités de chargement si elles ne possèdent pas suffisamment de ductilité.

2. La distribution ainsi que la magnitude de la demande de ductilité obtenue par les deux méthodes, statique et modale, est sensiblement la même. Ceci démontre qu'en termes de demande de ductilité pour les structures étudiées, il n'y a aucun avantage visible à utiliser la méthode d'analyse dynamique modale dans le calcul des charges de conception.

3. Le niveau de ductilité jugé acceptable pour les poutres de ce type de structures est compris entre les valeurs 4 et 6.

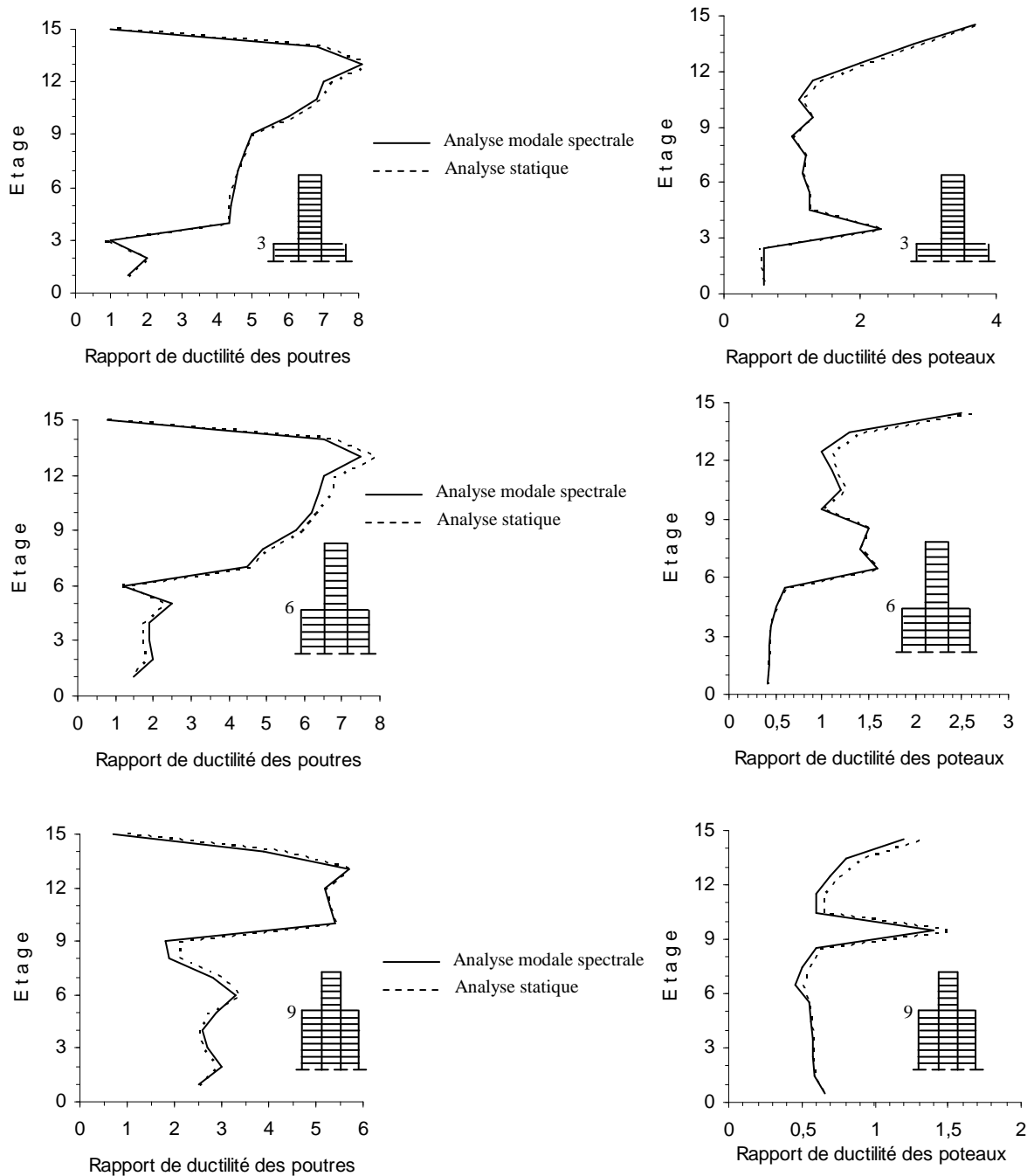
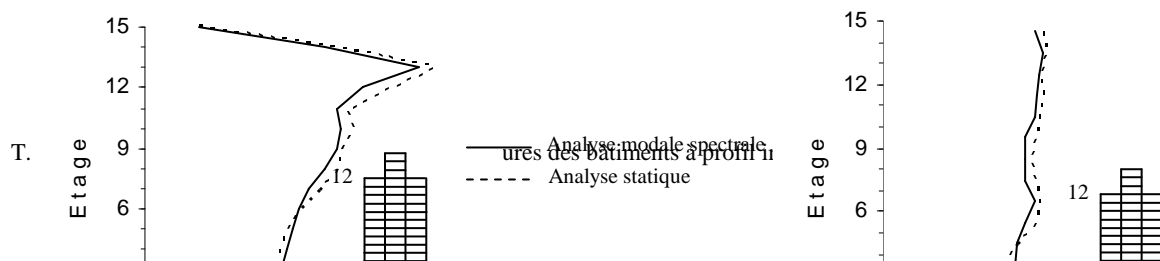


Figure 3. Effets des décrochements sur la demande de ductilité en rotation.



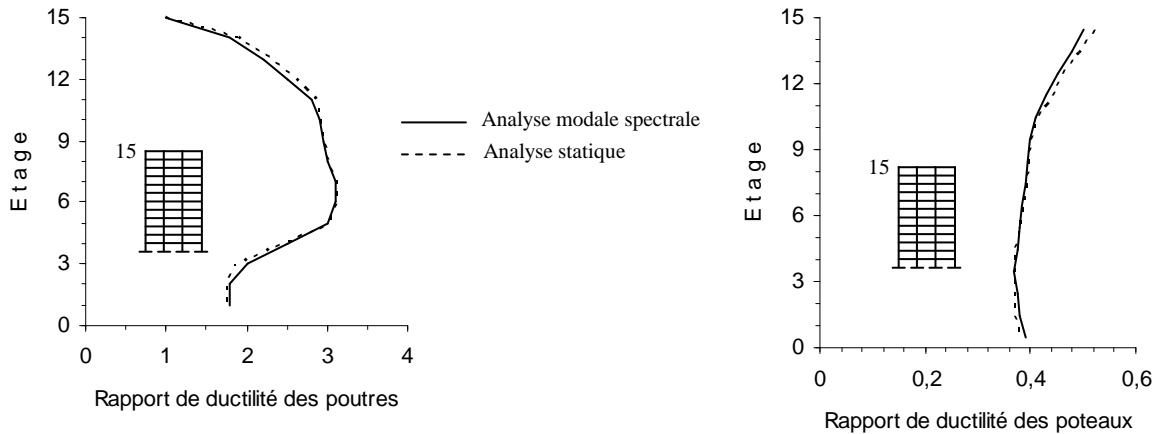


Figure 4. Effets des décrochements sur la demande de ductilité en rotation.

7. MODELE DE CALCUL PROPOSE

Les structures considérées dans cette étude possèdent un seul niveau de décrochement. En traitant la « tour » et la « base » de la structure en tant que systèmes élastiques à un seul degré de liberté, la structure peut être modélisée à son tour par un système équivalent à deux degrés de liberté. Le modèle analytique utilisé pour représenter une structure à un seul niveau de décrochement est indiqué sur la figure 5, dans laquelle H désigne la hauteur totale de la structure, h_t la hauteur de la « tour », et h_b la hauteur de la « base ». L'allure du premier mode de vibration est supposée correspondre à la forme de flexion du modèle représenté par la figure 5(b), où v_t et v_b désignent respectivement les déplacements latéraux des sommets de la « tour » et de la « base ».

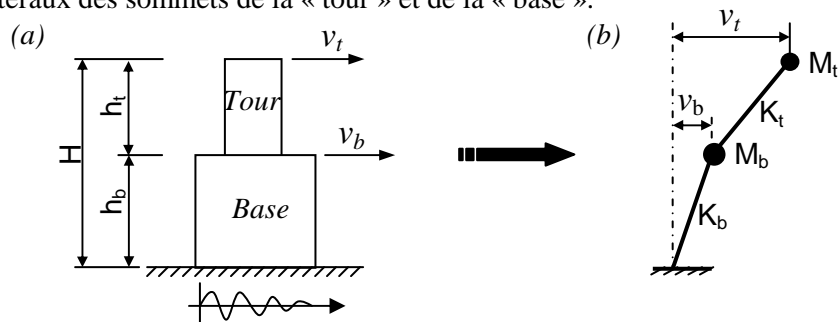


Figure 5. Modèle dynamique du bâtiment irrégulier.

En supposant que les deux portions vibrent seulement selon leurs modes fondamentales, la forme du premier mode, après plusieurs déductions, peut s'exprimer par l'équation suivante:

$$[\phi]^T = \left(\frac{1}{N_b}, \frac{2}{N_b}, \dots, 1, \frac{1+\lambda}{N_b}, \frac{1+2\lambda}{N_b}, \dots, \frac{1+\lambda N_t}{N_b} \right) \tag{5}$$

où N_b et N_t désignent respectivement le nombre d'étages dans la base et dans la tour; $[\phi]^T$ vecteur transposé du mode fondamentale. Le paramètre λ [Shahrooz *et* Moehle 1990] est donné par :

$$\lambda = \left(1 + 2 \frac{M_t}{M_b} \right) / \left(5 \frac{K_t}{K_b} \right) \quad (6)$$

L'effort tranchant global V à la base de la structure peut être distribué sur la hauteur de la structure irrégulière suivant la formule suivante :

$$F_i = \frac{M_i \phi_i (V - F_t)}{\sum_{i=1}^N (M_i \phi_i)} \quad (7)$$

où selon le règlement RPA99 : $F_t = 0,07TV \leq 0,25V$; M_i est la masse du $i^{ème}$ étage de la "tour" ou de la « base » ; ϕ_i composante du mode fondamental correspondant au déplacement de l'étage i . L'examen des résultats (figure 6) des structures analysées avec la méthode proposée ci-dessus, montre que la demande de ductilité d'étage affiche une relative diminution au niveau de la portion située au-dessus du niveau du décrochement vis-à-vis de celle obtenue par les deux méthodes de calcul précédentes.

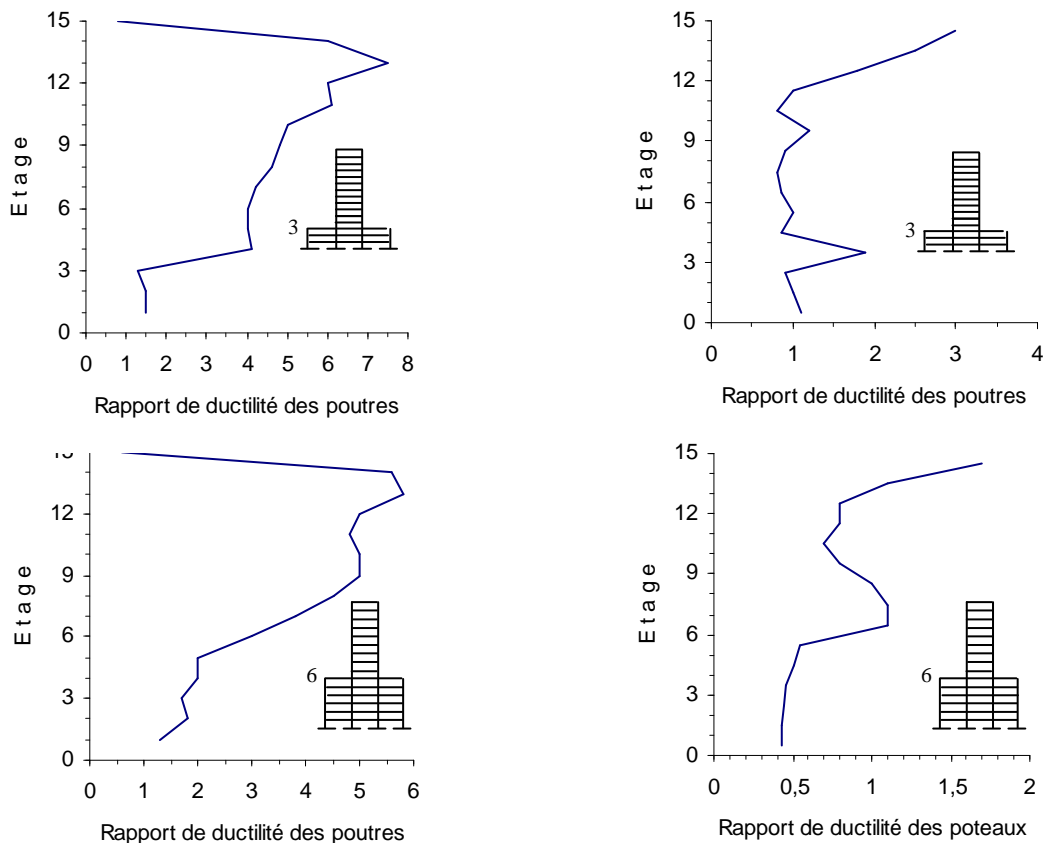


Figure 6. Evaluation de la demande de ductilité en rotation par la méthode proposée.

8. CONCLUSIONS

En vue d'une meilleure compréhension du comportement sismique des bâtiments irréguliers en élévation, une étude des demandes de ductilité sous actions sismiques a été effectuée. Dans ce cadre, deux méthodes de détermination des demandes de ductilité d'étages, à savoir la méthode statique

équivalente du code RPA99 et l'analyse modale spectrale sont évaluées pour quatre portiques présentant des irrégularités en élévation et pour un portique régulier équivalent. L'examen des résultats obtenus montre que les irrégularités en élévation conduisent globalement à une augmentation de la demande de ductilité. Cet effet est d'autant plus significatif qu'il existe un changement brusque dans la distribution de la rigidité du bâtiment. Il est montré également que les demandes de ductilité obtenues par les deux méthodes sont relativement similaires. Par conséquent, il s'avère que les deux méthodes peuvent être inappropriées à la prévention de la présence de concentration de déformations inélastiques, donc de dommages, dans les éléments de ce type de structures et plus particulièrement dans les éléments situés au-dessus du niveau du décrochement. Finalement, en identifiant le comportement de la structure sous l'effet d'une action sismique à la base par celui d'un modèle dynamique à deux degrés de liberté et en s'inspirant du code RPA99, une méthode de calcul a été proposée pour pouvoir évaluer de manière plus précise les efforts horizontaux de calcul dans la structure irrégulière. L'examen des résultats obtenus par l'utilisation de la méthode proposée sur les mêmes structures analysées précédemment a permis de mettre en évidence une relative diminution de la demande de ductilité dans les étages de la partie de la structure située au-dessus du niveau du décrochement.

REFERENCES

- Al-Ali A. A. K. & Krawinkler H. 1998, *Effets of vertical irregularities on seismic behavior of building structures*, Report No. 130, The John A. Blume Earthquake Engineering Center, U.S.A.
- Clough R. & Penzien J. 1975, *Dynamics of structures*, McGraw-Hill, New York.
- Das S. & Nau J. M. 2003, 'Seismic design aspects of vertically irregular reinforced concrete buildings', *Earthquake Spectra*, **19**[3], 455-477.
- Eurocode N°8 1989, *Structures en régions sismiques, dimensionnement*, Commission des communautés européennes.
- Fragiadakis M., Vamvatsikos D. & Papadrakakis M. 2006 'Evaluation of the influence of vertical irregularities on the seismic performance of a nine-storey steel frame', *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **35**[12], 1489-1509.
- Kanaan A.E. & Powell G. H. 1973, *Drain-2D: A general purpose computer program for dynamic analysis of inelastic plane structures*, Report No. EERC-73/6 and 73/22, University of California, Berkeley.
- RPA 99 2003, *Règles Parasismiques Algériennes*, Document Technique Réglementaire, Alger.
- Shahrooz B. M. & Moehle J. P. 1990, 'Seismic response and design of setback buildings', *Journal of Structural Engineering*, **116**[5], 1423-1439.
- Valmundsson E. G. & Nau J. M. 1997, 'Seismic response of building frames with vertical structural irregularities', *Journal Structural Engineering*, **123**[30], 30-41.
- Wong C. M. & Tso W. K. 1994, 'Seismic loading for buildings with setbacks'. *Canadian Journal of Civil Engineering*, **21**[5], 863-871.