

CRITÈRE DE LA DUCTILITÉ LOCALE DURANT LA CONCEPTION DES BÂTIMENTS EN BÉTON ARMÉ

Amar KASSOUL, Khelifa SEBAI

Université Hassiba Benbouali de Chlef, B.P. 151, Chlef, Algérie

1. INTRODUCTION

L'analyse pathologique de quelques constructions endommagées durant les séismes récents en Algérie a montré un manque significatif dans le comportement sismique de ces bâtiments (Davidovici, 2003). En conséquence, l'étude du comportement sismique des constructions similaires s'avère toujours nécessaire afin de mettre en évidence leurs performances sismiques. La ductilité est l'un des indicateurs précieux pour l'étude de cette performance dans le domaine post élastique (Park, 1989).

Actuellement, les codes parasismiques récents exigent des dispositions constructives assez spéciales dans les zones critiques des éléments résistants des constructions, afin de préserver d'une manière implicite une ductilité locale suffisante. Dans une étape très avancée, l'Eurocode 8 (Eurocode8, 2003) recommande explicitement la prise en compte de la ductilité locale, par l'exigence des conditions de ductilité bien définie que doivent être respectées durant le dimensionnement.

Afin de sensibiliser les concepteurs des structures en béton armé sur l'importance de la ductilité locale, l'objectif de ce travail tente de mettre en évidence le critère de la ductilité locale recommandé par l'Euro code 8 (Eurocode8, 2003). En vue de traiter cet objectif, on détermine le facteur de la ductilité globale par la méthode statique non linéaire, puis

celui de la ductilité locale dans chaque section des éléments structuraux de trois structures en béton armé, dimensionnées selon le règlement parasismique Algérien (RPA99/v2003, 2003).

2. PRINCIPE DES MÉTHODES D'ESTIMATION DES FACTEURS DE DUCTILITÉS

2.1. Facteur de ductilité globale

Actuellement, la méthode statique non linéaire (push over) constitue un outil performant pour l'évaluation de la ductilité globale des structures. Cette méthode est réalisée par une application d'une série d'analyses inélastique statique sur le bâtiment au moyen d'un modèle de charge latérale présélectionné basé sur le premier mode de vibration de la structure (Boumkik, 2006). Le modèle de charge reste constant au cours de l'analyse mais son amplitude est augmentée progressivement jusqu'à ce que le bâtiment atteigne un déplacement cible spécifique. En général, ce déplacement cible représente le déplacement

maximum, quand le bâtiment atteint une excitation du séisme maximale. En conséquence, le facteur de ductilité globale de la structure μ_Δ , est exprimé par le rapport de ce déplacement cible (Δ_u) et le déplacement à la fin de phase élastique (Δ_y) correspondant à 75 % de l'effort ultime (Park, 1989), où :

$$\mu_\Delta = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad [1]$$

2.2. Facteur de ductilité en courbure disponible

La procédure l'évaluation du facteur de ductilité en courbure disponible présentée par (Kassoul *et al.*, 2004) est adaptée selon les recommandations de l'Eurocode 2 (Eurocode 2, 2004). Elle s'articule autour de l'utilisation des relations de compatibilités de déformations, et les équations d'équilibres des efforts internes de la compression du béton et de traction des armatures.

La Figure 1 (a, b), présente une section transversale d'une poutre à l'état limite de service, où $\varepsilon_{sy,d}$ représente la déformation des armatures tendues, ξ_y désigne le facteur de la hauteur de la zone comprimée, d la hauteur utile de la section et d' la hauteur de l'enrobage dans la zone comprimée. D'après la Figure 2a, la courbure à la fin de la phase élastique est exprimée par :

$$\varphi_y = \frac{\varepsilon_{sy,d}}{d(1-\xi_y)} \quad [2]$$

La Figure 1(c, d) illustre le comportement de la section à l'état limite ultime, où ξ_u représente le facteur de la hauteur de la zone comprimée. Dans le cas de rupture par écrasement du béton, la déformation du béton ε_c dans les fibres extrêmes supérieures excède la valeur ultime de ε_{cu2} (Eurocode 2, 2004), avant que la déformation ε_s dans les

armatures tendues atteigne ε_{ud} (Eurocode 2, 2004). D'après la Figure 2c, la courbure à l'état limite ultime est exprimée par :

$$\varphi_u = \frac{\varepsilon_{cu2}}{\xi_u d} \quad [3]$$

Le facteur de ductilité en courbure disponible ($\mu_{\varphi c}$), dans le cas de la rupture par écrasement du béton s'obtient, par le rapport entre la courbure à l'état ultime déterminée en [3] et la courbure à la fin de la phase élastique déterminée en [2] :

$$\mu_{\varphi c} = \frac{\varphi_u}{\varphi_y} = \frac{\varepsilon_{cu2}}{\varepsilon_{sy,d}} \frac{(1-\xi_y)}{\xi_u} \quad [4]$$

3. CRITÈRE DE DUCTILITÉ LOCALE

L'Eurocode 8 (Eurocode 8, 2003) offre un lien direct entre la ductilité locale et la ductilité globale, en proposant des valeurs minimales pour μ_φ (noté $\mu_{\varphi,min}$) en fonction du coefficient du comportement des structures q_0 . En conséquence, il recommande que le facteur de ductilité en courbure disponible $\mu_{\varphi c}$, devrait être supérieur ou égal à $\mu_{\varphi,min}$ ($\mu_{\varphi c} \geq \mu_{\varphi,min}$). Ce facteur $\mu_{\varphi,min}$ est déterminé par les deux expressions suivantes (Eurocode 8, 2003) :

$$\mu_{\varphi,min} = \begin{cases} 2q_0 - 1 & \text{si } T_1 \geq T_C \\ 1 + 2(q_0 - 1) \frac{T_C}{T_1} & \text{si } T_1 < T_C \end{cases} \quad [5]$$

Où T_1 est la période fondamentale du bâtiment dans le plan vertical dans lequel la flexion a lieu et T_C est la période limite supérieure de la zone d'accélération constante du spectre. En général, ce coefficient q_0 varie entre 3 et 6 et le

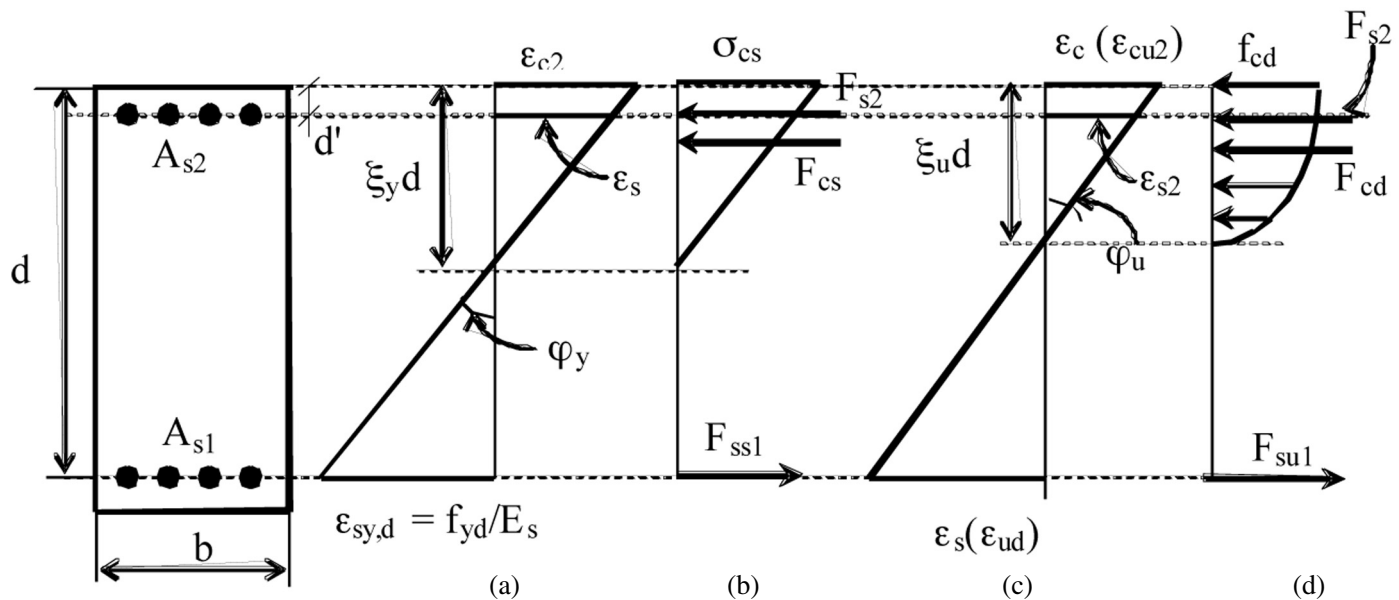


Figure 1. Comportement d'une section fléchée d'une poutre

facteur de ductilité en courbure minimal $\mu_{\varphi,min}$ correspondant varie entre 6 et 12 (Fuentes, 1988). Par ailleurs, les règles parasismiques algériennes (RPA99/v2003, 2003) n'indiquent aucun critère explicite qui permet la vérification de la ductilité locale durant le dimensionnement.

4. DESCRIPTION DES STRUCTURES ÉTUDIÉES

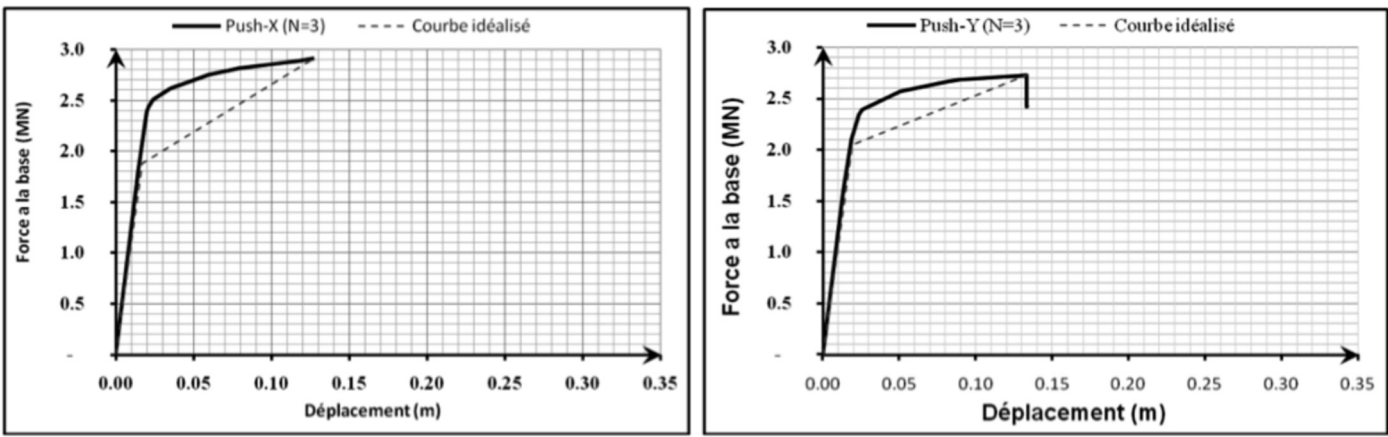
Pour la réalisation de cette étude, trois structures contre-ventées par portiques auto stables en béton armé ont été identifiées. Ces structures répondent aux critères de la régularité en plan et en élévation ainsi que la distribution des masses. Elles sont dimensionnées selon les codes Algériens en vigueur à savoir, les règles parasismiques (RPA99/v2003, 2003) et le code du béton CBA 93 (CBA 93, 2004). La première structure est un bâtiment de trois niveaux (NB3). Elle est implantée dans une zone de moyenne sismicité et de sol ferme. La deuxième structure

est un bâtiment à cinq niveaux (NB5), à usage d'habitation, implanté dans une zone de moyenne sismicité et de sol meuble. La troisième structure est un bâtiment à sept niveaux (NB7), à usage d'habitation, implanté dans une zone de faible sismicité et de sol ferme.

5. ÉVALUATION DES FACTEURS DE DUCTILITÉS

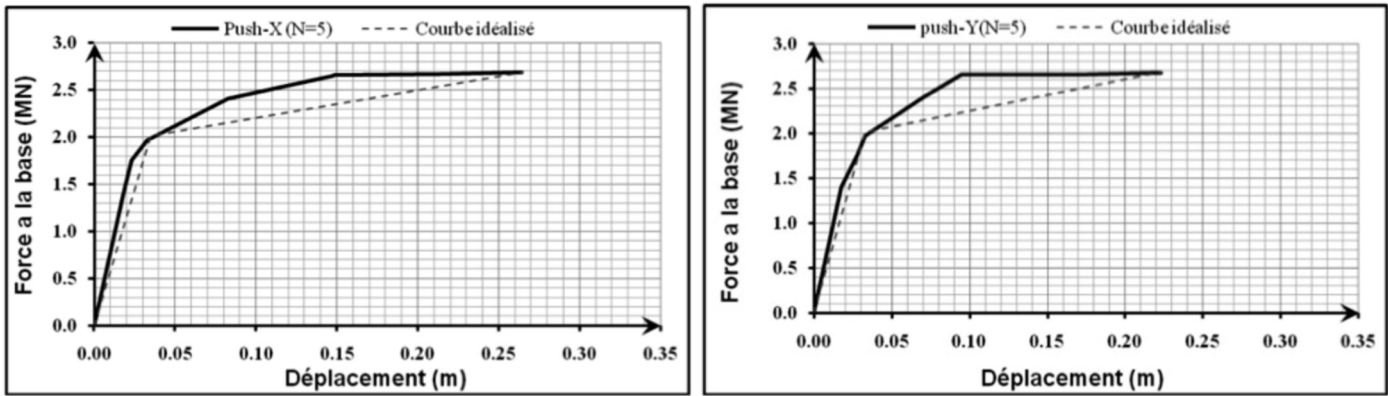
5.1. Facteur de ductilité globale

Pour l'évaluation du facteur de ductilité globale des trois structures identifiées, on utilise la méthode décrite dans le paragraphe §2.1. Les résultats en termes de forces – déplacements obtenus par la méthode statique non linéaire, pour les deux directions de chaque bâtiment, sont illustrés dans les Figures 2, 3 et 4. D'après la Figure 2a, le facteur de la ductilité globale μ_{Δ} pour le sens longitudinal du bâtiment (NB3) égale à 6.5



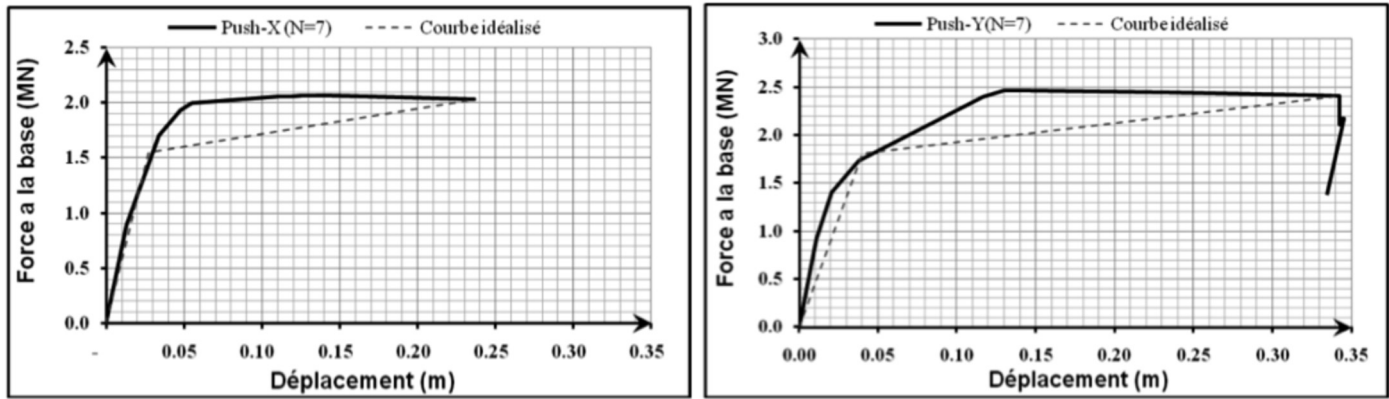
a-sens longitudinal (X) b-sens transversal (Y)

Figure 2. Diagramme force – déplacement par analyse progressive du bâtiment BN3



a- sens x b- sens y

Figure 3. Diagramme force – déplacement par analyse progressive du bâtiment BN5



a- sens x

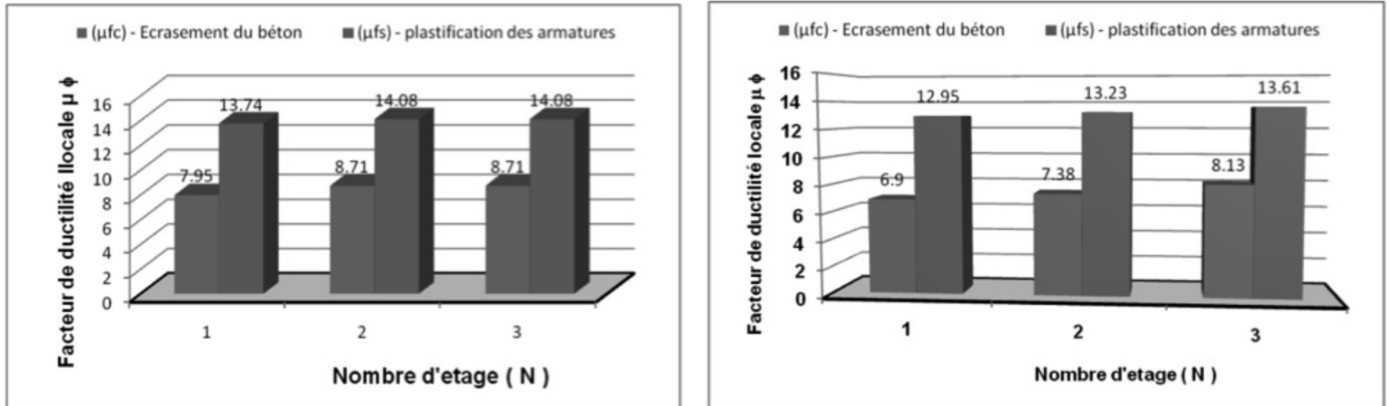
b- sens y

Figure 4. Diagramme force – déplacement par analyse progressive du bâtiment BN7

lorsque le déplacement cible Δ_u atteint 0.13m et le déplacement correspondant à 0.75V égal à 0.02. Pour le sens de y, μ_Δ atteint 6.75 (Figure 2b). Ces deux facteurs restent bien supérieurs à ceux adoptés par RPA99/v2003 et de l'Euro code 8 (q_0 varie entre 3 à 6). Pour la deuxième structure (NB5), le facteur de ductilité globale varie entre 6.62 dans le sens x (Figure 3a) et de 5.58 dans le sens y (Figure 3b), et qui restent toujours supérieurs à ceux adoptés par RPA99/v2003 et de l'Euro code 8. Pour le bâtiment (NB7), d'après la Figure 4a, le facteur de la ductilité globale μ_Δ égal à 6.98 lorsque le déplacement cible Δ_u devient proche de 0.23 et le déplacement correspondant à 0.75V égal à 0.034. Pour le sens transversal, on enregistre μ_Δ égal à 8.58 (Figure 4b). Ces deux facteurs restent aussi supérieurs à ceux adoptés par RPA99/v2003 et de l'Euro code 8. D'ici, de point de vue globale ces trois structures fournissent une ductilité globale très acceptable, néanmoins il reste à validé cette conclusion de point de vue locale.

5.2. Facteur de ductilité locale

Les facteurs de ductilités en courbure disponible des éléments (poutres) des structures identifiées sont déterminés, on utilise la procédure décrite dans le paragraphe § 2.2. Les résultats obtenus sont illustrés dans les Figures 5, 6 et 7. La Figure 5a présente une confrontation entre les facteurs de ductilités en courbures disponibles de la structure NB3, dans les cas d'échecs par écrasement du béton (μ_{fc}) et par plastification des armatures (μ_{fs}). D'après cette figure, on constate que μ_{fc} , varie entre 7.95 à 8.71 dans les niveaux supérieurs. Ces facteurs restent strictement inférieurs à ceux déterminés dans le cas d'échec par plastification des armatures, et qui varie entre 13.71 et 14.08. Dans les deux cas de ruptures les facteurs de ductilités dans les étages supérieurs sont plus élevés à ceux des niveaux inférieurs, ceci est dû à la diminution du pourcentage des armatures tendues dans les étages supérieures. En conséquence, les facteurs de ductilité locale obtenus dans le cas d'échec par écrasement du béton, dans le sens de x de la structure



a- sens x

b- sens y

Figure 5. Facteurs de ductilités locales des éléments de la structure (NB3)

(NB3), sont les plus défavorables, et qui seront considérées dans l'analyse du critère de la ductilité locale. Le même constat est observé pour le sens transversal (y) dans la Figure 5b.

Concernant les facteurs de ductilités locales du bâtiment (NB5), la Figure 6a montre que les facteurs estimés dans le cas d'échec par écrasement du béton varient entre 9.18 à 10.48 dans les étages supérieurs, et qui restent strictement inférieurs à ceux déterminés dans le cas d'échec par plastification des armatures, variant entre 14.05 et 14.54. Le même constat est observé pour le sens transversal (Figure 6b).

Pour le bâtiment (NB7), ces facteurs sont estimés, dans le cas d'échec par écrasement du béton, entre 8.29 à 11.05 dans les étages supérieurs (Figure 7a), et qui restent inférieurs à ceux déterminés dans le cas d'échec par plastification des armatures, variant entre 13.62 et 14.69. Dans le sens transversal (y) $\mu_{\phi c}$ varie entre 9.26 et 10.72 alors que $\mu_{\phi s}$ varie entre 14.05 et 14.60 (Figure 7b).

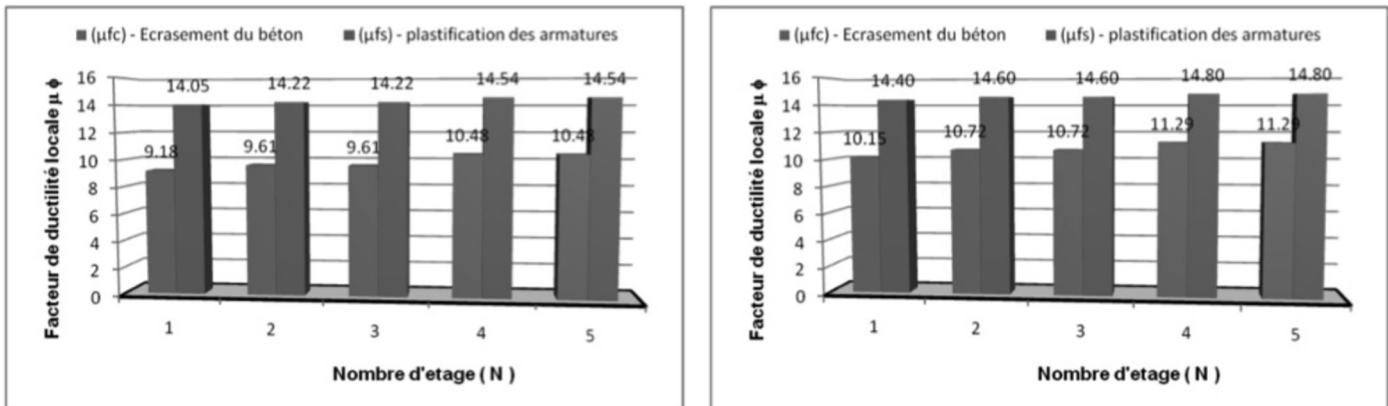
D'ici, il est à noter que les facteurs de ductilités en courbures disponibles ($\mu_{\phi c}$) estimés dans le cas d'échec par écrasement du béton sont très défavorables comparative-

ment à ceux déterminés dans le cas d'échec par plastification des armatures, dans les trois structures considérées. En conséquence, les facteurs $\mu_{\phi c}$ sont considérés dans l'analyse du critère de la ductilité locale dans la suite.

6. ANALYSE DU CRITÈRE DE LA DUCTILITÉ LOCALE

Les valeurs des facteurs de la ductilité globale et locale déterminées dans le paragraphe 5, n'indiquent aucun degré de ductilité où de fragilité de ces trois structures. Dans la suite, on essaye d'exprimer le lien entre les facteurs de ductilité locale et globale déterminés, et de mettre en évidence le critère de ductilité locale exigé par l'Eurocode 8 ($\mu_{\phi c \text{ réel}} \geq \mu_{\phi \text{ min}}$), qui a été présenté dans le paragraphe §3.

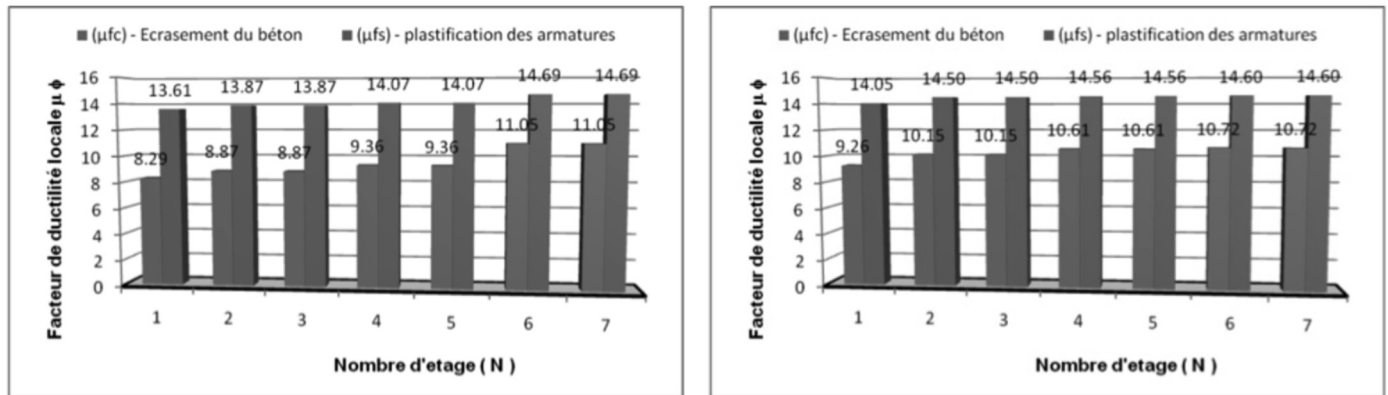
Les Figures 8, 9 et 10 montrent clairement que toutes les courbes représentant la ductilité locale ($\mu_{\phi c \text{ réel}}$), pour chaque structure, sont situées à l'intérieur du fuseau constitué par les courbes du facteur de ductilité en cour-



a- sens x

b- sens y

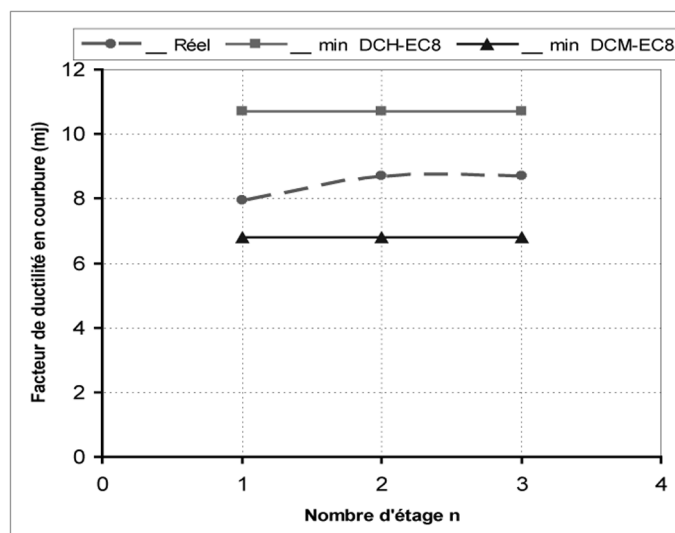
Figure 6. Facteurs de ductilités locales des éléments de la structure (NB5)



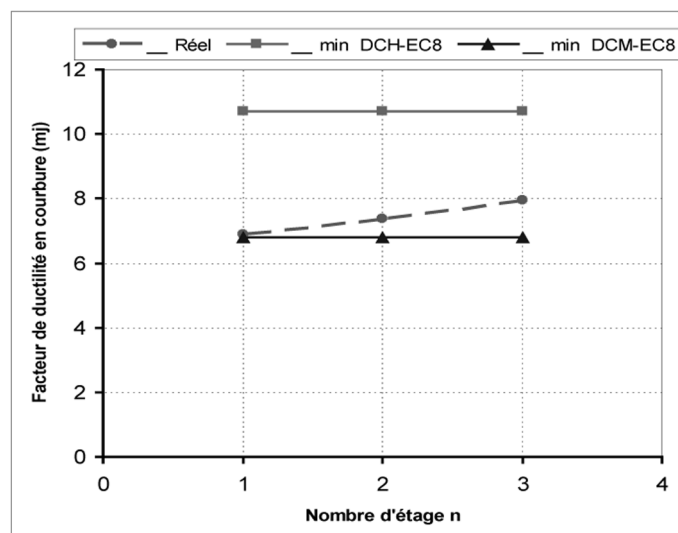
a- sens x

b- sens y

Figure 7. Facteurs de ductilités locales des éléments de la structure (NB7)

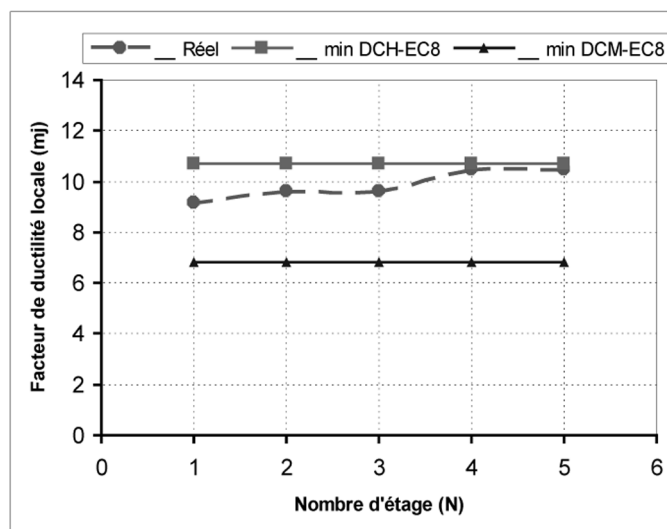


a- Sens x

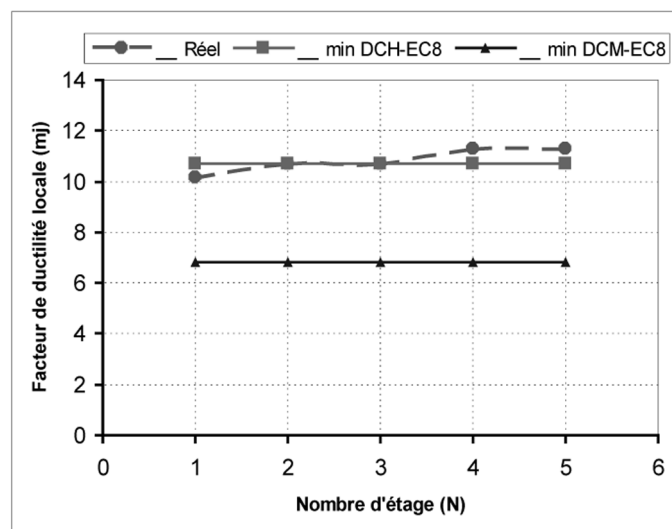


b- Sens y

Figure 8. Variation de la ductilité locale dans chaque étage du bâtiment (NB3)



a- Sens x



b- Sens y

Figure 9. Variation de la ductilité locale dans chaque étage du bâtiment (NB5)

bure minimale, pour les deux classes de ductilités moyenne ($\mu_{\phi_{\min}} - \text{DCM}$) et élevée ($\mu_{\phi_{\min}} - \text{DCH}$) de l'Eurocode 8.

Par conséquent, d'après ces résultats on peut déduire que les facteurs de ductilité locale de ces trois structures dimensionnées par le RPA99/v2003 ne fournissent qu'une classe de ductilité moyenne. Néanmoins, pour atteindre une haute classe de ductilité, il est nécessaire d'accompagner le dimensionnement réalisé avec des dispositions constructives assez spéciales dans les zones critiques.

7. CONCLUSION

Cette étude nous a permis de mettre en évidence le critère de la ductilité locale des structures en béton armé dimensionnées par les codes algériens en vigueur.

L'évaluation du facteur de ductilité globale par la méthode statique non linéaire (Push Over) montre que le facteur de ductilité globale de ces structures est toujours supérieur à ce du facteur de comportement recommandé par RPA99/v2003 et l'Eurocode 8.

L'évaluation des facteurs de ductilités en courbures disponibles, montre que ceux obtenus par plastification des armatures sont strictement supérieurs à ceux obtenus par écrasement du béton. Ces derniers varient entre 7 à 11 dans les structures étudiées, et sont considérés dans l'analyse du critère de la ductilité locale.

L'analyse du critère de la ductilité locale montre que tous les éléments traités sont moyennement ductiles. Par ailleurs, pour atteindre des niveaux de ductilités très élevées et de préserver une ductilité locale très adéquate ce type des structures exige une amélioration constructive assez particulière dans les zones critiques durant la

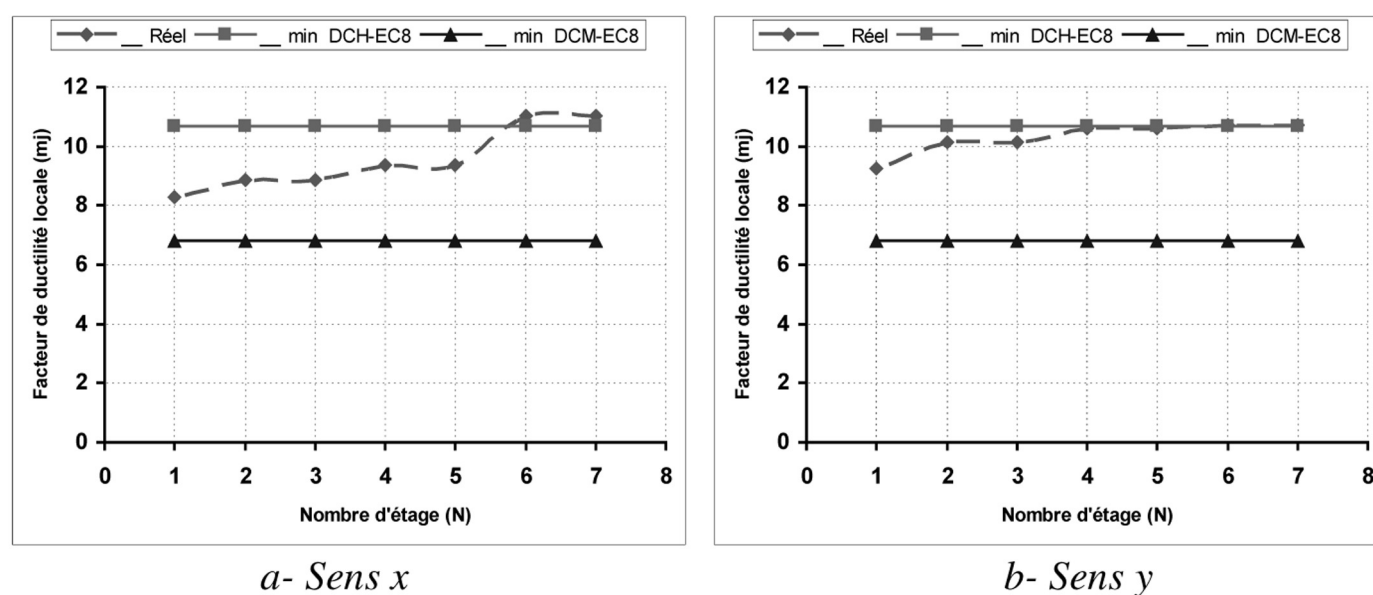


Figure 10. Variation de la ductilité locale dans chaque étage du bâtiment (NB7)

conception. Dans ce contexte, on exhorte aux concepteurs des règles parasismiques algériennes d'exiger la vérification du critère de la ductilité locale d'une manière explicite durant le ferrailage des éléments structuraux.

8. BIBLIOGRAPHIE

- Boumekik A., Analyse Pushover des Structures en Béton Armé -Théorie de l'endommagement, Rapport annuel du projet de recherche, Université de Batna, 2006
- CBA-93, *Code du béton algérien 1993*, DTR-BC -CGS, Alger, 1994.
- Davidovici V., Rapport préliminaire du séisme de Boumerdes – 21 mai 2003, 92p.
- Eurocode 2 EN 1992-1-1, *Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings*, Brussels, 2004.
- Eurocode 8 prEN 1998-1, *Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*, Brussels, 2003.
- Fuentes A., *Comportement post-élastique des structures en béton arme*, Paris, Eyrolles, 1988.
- Kassoul A., Ezziane K., Kadri A., « Nouveau pourcentage d'armature pour la condition de ductilité dans les poutres », *Revue française de génie civil*, vol. 8, n° 7, 2004, p. 769-791.
- Park R., « Evaluation of ductility structures and structural assemblages from laboratory testing », *Bulletin of the New Zeland National Society for Earthquake Engineering*, vol. 22, n° 3, 1989, p. 155-165.
- Park R., Ruitong D., « Ductility of doubly reinforced concrete beam sections », *ACI-Structural Journal*, vol. 92, 1988, p. 217-225.
- RPA-99/v2003, *Règles parasismiques Algériennes 1999 - Version 2003*, DTR-BC 248 - CGS, Alger, 2003.