

ANALYSE DU CRITERE DE LA DUCTILITE LOCALE DE QUELQUES STRUCTURES EN BETON ARME DIMENSIONNEES SELON LES REGLES PARASISMIQUES ALGERIENNES RPA99/v2003

KASSOUL Amar¹, SEBAI Khelifa²

¹ Maître de Conférences, Département de génie civil, Université Hassiba Benbouali – Chlef

² Post graduant, Département de génie civil, Université Hassiba Benbouali – Chlef

RESUME : *L'objectif de cette communication, tente d'analyser le critère de la ductilité locale de quelques structures en béton armé dimensionnées selon les règles parasismiques algériennes RPA99/v2003. D'abord, on expose quelques notions sur la ductilité et la vision de leur prise en compte dans les codes parasismiques modernes et les critères suggérés par ces codes. Dans le même contexte, on décrit les méthodes d'évaluation des facteurs de ductilité globale de la structure et locale des éléments linéaire en béton armé. Ensuite, deux structures ont été conçues et dimensionnées selon le code RPA99/v2003. Afin d'analyser le critère de la ductilité locale dans les éléments porteurs, on détermine le facteur de la ductilité globale par la méthode statique non linéaire et le facteur de ductilité en courbure dans chaque élément, puis on analyse le critère de la ductilité des deux structures identifiées. Les résultats obtenus montrent que ces deux structures peuvent préserver facilement une ductilité de classe moyenne. Par ailleurs, pour atteindre des ductilités très élevées ces structures demandent une amélioration assez particulière dans les dispositions constructives.*

MOTS CLES : *ductilité, structures, critère, RPA99/v2003, Eurocode 8.*

1. Introduction

Le nord algérien est reconnu par sa forte activité sismique ; où plusieurs régions ont été secouées ces dernières années. L'étude pathologique de constructions endommagées a montré un manque flagrant dans le comportement sismique de ces constructions (Davidovici, 2003). En conséquence, l'étude du comportement sismique des constructions similaires s'avère toujours nécessaire afin de mettre en évidence leurs performances. La ductilité est l'un des paramètres précieux pour indication 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 recommande explicitement la prise en compte de la ductilité locale, par l'exigence des conditions de ductilité bien définie que doivent être respecté durant le dimensionnement (Eurocode8, 2003).

L'objectif essentiel de ce travail est de mettre en évidence ces conditions, par l'analyse du critère de la ductilité locale de deux structures en béton armé dimensionnées selon le règlement parasismique Algérien (RPA99/v2003, 2003), afin de cerner mieux la variation de la ductilité dans ces structures.

2. Aspects qualitatifs de la ductilité

2.1 Notions sur la ductilité

Par définition, la ductilité est la capacité de la structure (élément) de subir une déformation après la fin de la phase élastique avec une dégradation significative de sa résistance et de sa rigidité (Bertero, 1988). Par contre, la déformabilité est la capacité d'un élément de la structure ou de la structure entière de se déformer avant l'effondrement (Figure 1). Par conséquent, le facteur de ductilité est le rapport entre la déformation maximale et la déformation obtenue à la fin de la phase élastique (Park, 1989).

2.2 Différentes types de ductilités

L'analyse du comportement des structures nécessite la connaissance des critères caractérisant le domaine non linéaire de la structure et de leurs éléments. Pratiquement, on rencontre cinq types de ductilité qui sont les suivantes (Gioncu, 200) :

- la ductilité de déformation, ou ductilité des matériaux, son facteur de ductilité est quantifié par le rapport de la déformation de rupture du matériau (ε_u) et la déformation à la fin de la phase élastique (ε_y); où $\mu_\varepsilon = \varepsilon_u / \varepsilon_y$.
- ductilité en courbure ou ductilité locale, son facteur est exprimé par le rapport de la courbure ultime de la section φ_u et la courbure à la fin de la phase élastique φ_y ; où $\mu_\varphi = \varphi_u / \varphi_y$
- Ductilité en rotation, ou ductilité intermédiaire, son facteur est déterminé par le rapport de la rotation ultime de l'élément θ_u et la rotation à la fin de la phase élastique θ_y ; où $\mu_\theta = \theta_u / \theta_y$.
- Ductilité de déplacement, ou ductilité globale, leur facteur est exprimé par le rapport du déplacement ultime de la structure Δ_u et le déplacement à la fin de la phase élastique Δ_y ; où $\mu_\Delta = \Delta_u / \Delta_y$. Généralement, ce facteur traduit le comportement des structures dans les codes parasismiques.
- Ductilité énergétique, lorsque la ductilité est considérée au niveau de l'énergie sismique dissipée, le facteur de ductilité énergétique est exprimé par ($\mu_E = E_u / E_y$).

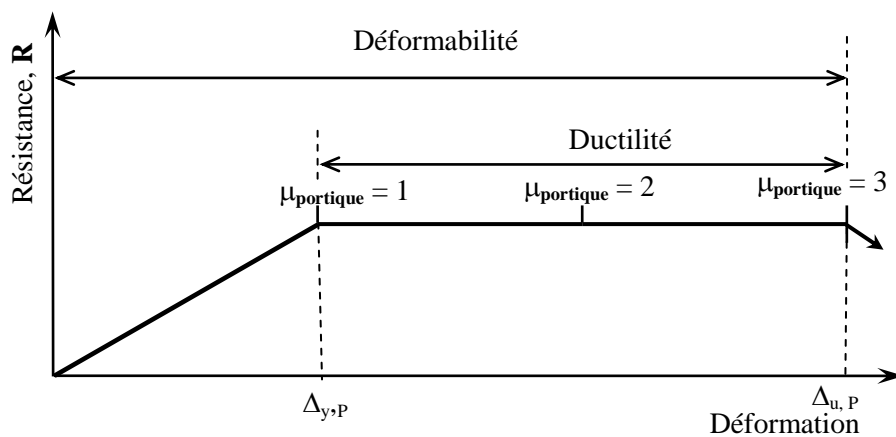


Figure 1. Déformabilité - ductilité - facteur de ductilité (Bertero, 1988)

2.3. Classe de ductilité

L'Eurocode 8 (Eurocode 8, 2003) divise la ductilité des structures en trois classes ; à savoir : la classe de ductilité limitée (DCL), la classe de ductilité moyenne (DCM) et la classe de ductilité élevée (DCH). Ce code fait un lien direct entre la ductilité en courbure disponible durant le dimensionnement de chaque section et de la ductilité globale, en imposant des critères de ductilité locale (Eurocode 8, 2003). Il est à noter que les règles parasismiques algériennes appuyées directement ces recommandations sur la conception des structures avec une classe de ductilité élevée (RPA99/v 2003, 2003).

3. Critère de ductilité locale dans les poutres dissipatives

Il est très utile d'illustrer la vision de l'Eurocode 8 (Eurocode 8, 2003) vis-à-vis de la ductilité locale dans le dimensionnement des sections des poutres dissipatives d'énergie. Dans les longueurs critiques prévues pour la formation des rotules plastiques des poutres, l'Eurocode 8 exige, en outre des détails constructifs assez spéciaux, des résistances appropriées du béton et des aciers utilisés ainsi qu'une ductilité locale suffisante. En effet, il 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 μ_φ , devrait être supérieur ou égal à $\mu_{\varphi,min}$ ($\mu_\varphi \geq \mu_{\varphi,min}$). Ce facteur $\mu_{\varphi,min}$ est déterminé par les deux expressions suivantes (Eurocode 8, 2003) :

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

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, ainsi que q_0 est le coefficient du comportement des structures. D'après l'Eurocode 8 (Eurocode 8, 2003), ce coefficient est exprimé par :

- $q_0 = 3 \alpha_u / \alpha_1$ pour la classe de ductilité moyenne (DCM)
- $q_0 = 4.5 \alpha_u / \alpha_1$ pour la classe de ductilité élevée (DCH)

Avec α_u / α_1 égal à 1,1 pour les constructions en portiques à un seul étage, et à 1.3 pour les constructions à plusieurs étages et plusieurs travées. En général, ce coefficient q_0 varie entre 3 et 6, ainsi le facteur de ductilité en courbure minimal $\mu_{\phi, \min}$ correspondant varie entre 6 et 12 (Fuentes, 1988).

D'autre part, ce code intègre le respect de la ductilité explicitement dans la vérification du pourcentage maximal des armatures tendues ρ_{\max} (Eurocode 8, 2003) ; où il stipule que la valeur de ρ obtenue par le calcul en capacité devrait être inférieure ou égale à ρ_{\max} , exprimé par l'expression ci-dessous :

$$\rho_{\max} = \rho' + \frac{0.0018 f_{cd}}{\mu_{\phi} \varepsilon_{sy,d} f_{yd}} \quad (2)$$

En outre, le pourcentage d'armatures comprimées ρ' doit être égal au moins à la moitié du pourcentage des armatures tendues ρ , $\rho' \geq 0.5 \rho$

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. Méthodes d'évaluation des facteurs de ductilités

4.1 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 basée sur le premier mode de vibration de la structure ou des modèles de charge statique latérale équivalent dans les règlements parasismiques. 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 est prise pour représenter le déplacement maximum du bâtiment quand elle atteint une excitation du séisme maximale. Les résultats de l'analyse push over sont utilisés pour estimer la capacité du bâtiment d'après la courbe de la variation du déplacement au sommet, avec le cisaillement à la base, et en conséquence le facteur de ductilité globale de la structure, en utilisant la définition exposée dans le paragraphe § 2 (Boumekik, 2006).

4.2. Facteur de ductilité en courbure

La procédure l'évaluation du facteur de ductilité en courbure 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.

L'utilisation de l'état limite de service dans les poutres en béton armé est conditionnée le plus souvent par les contraintes limites dans le béton et dans les armatures. Afin d'éviter des fissures longitudinales et des microfissures, la contrainte de compression dans le béton sera limitée à $k_1 f_{ck}$ ($f_{cd} \leq k_1 f_{ck}$), où généralement $k_1 = 0.6$ (Eurocode 2, 2004). Afin d'éviter les déformations inélastiques, les fissures et les déformations inacceptable, les contraintes de traction dans les armatures seront limitées à $k_3 f_{yk}$ ($f_{yd} \leq k_3 f_{yk}$), dans notre cas $k_3 = 0.8$ (Eurocode 2, 2004).

La Figure 2, présente une section transversale d'une poutre en béton armé doublement armée à l'état limite de service, où ξ_y désigne le facteur de la hauteur de la zone comprimée à l'état élastique, 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 :

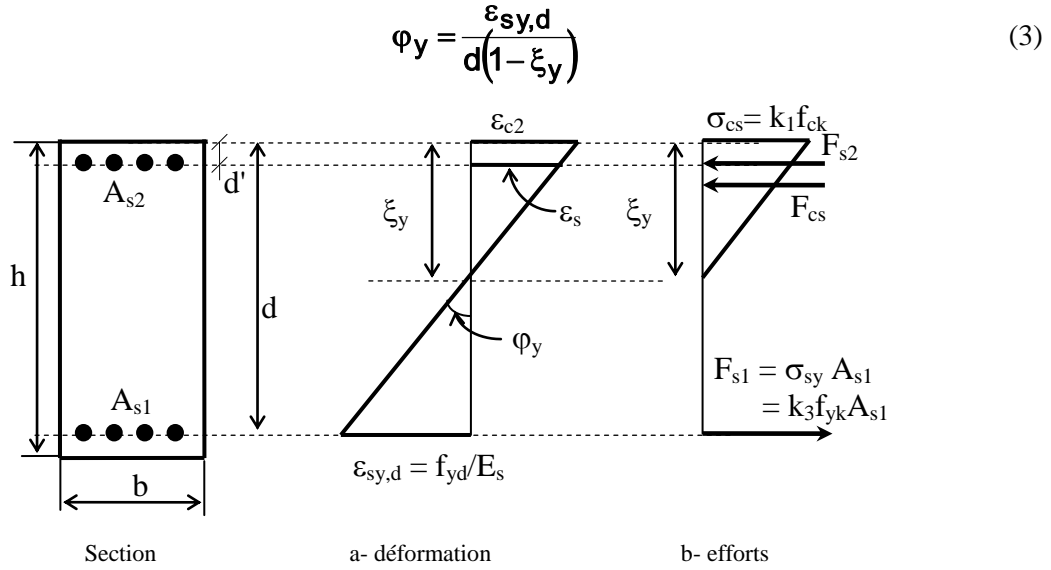


Figure 2. Comportement d'une section fléchie d'une poutre a la fin de phase élastique

Sachant que la contrainte dans les armatures comprimées $\sigma_{s2} = \varepsilon_{s2} E_s$, l'équation d'équilibre statique des efforts internes sollicitant la section, dans la Figure 2b s'écrit :

$$\frac{1}{2} \xi_y d b k_1 f_{ck} + \frac{(\xi_y d - d')}{d(1-\xi_y)} k_3 f_{yk} A_{s2} = \sigma_{sy} A_{s1} \quad (4)$$

La solution de cette équation (4), conduit à un polynôme du second degré en fonction de la variable ξ_y , dont la solution acceptable retenue est :

$$\xi_y = \left(\frac{1}{2} + \frac{k_3 f_{yk} (\rho + \rho')}{k_1 f_{ck}} \right) - \sqrt{\left(\frac{1}{2} + \frac{k_3 f_{yk} (\rho + \rho')}{k_1 f_{ck}} \right)^2 - \frac{2 k_3 f_{yk}}{k_1 f_{ck}} \left(\rho + \frac{d'}{d} \rho' \right)} \quad (5)$$

Où $\rho = A_{s1} / bd$ est le pourcentage d'armatures tendues, et $\rho' = A_{s2} / bd$ est le pourcentage d'armatures comprimées.

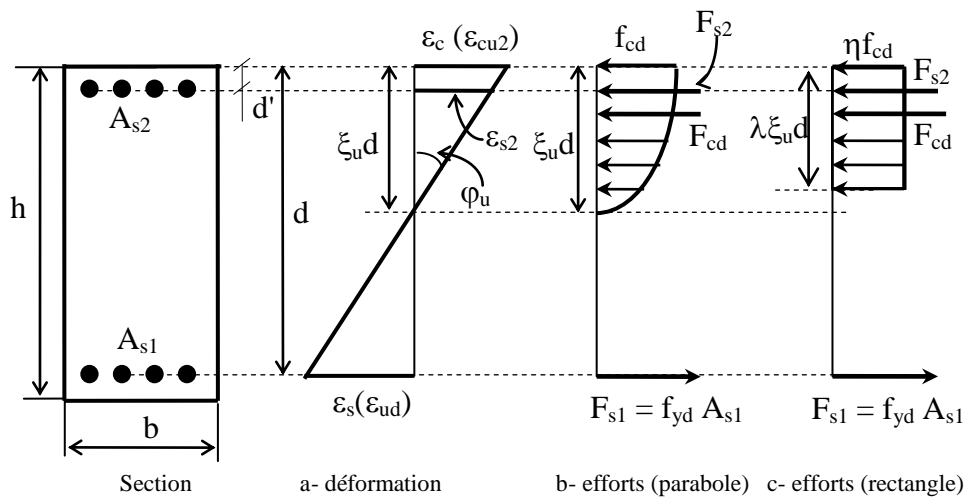


Figure 3. Comportement de la section d'une poutre fléchie en béton armé à l'état limite ultime

A l'état limite ultime, plusieurs considérations préconisées par l'Eurocode 2 sont prises en considérations (Eurocode 2, 2004). La Figure 3 illustre le comportement d'une section transversale non confinée, considérée comme la plus défavorable d'une zone critique d'une poutre en béton armé où ξ_u représente le

facteur de la hauteur de la zone comprimée. Afin de déterminer la courbure à l'état limite ultime, on considère la rupture par écrasement des fibres extrêmes du béton.

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} ($\varepsilon_c \geq \varepsilon_{cu2}$), avant que la déformation ε_s dans les armatures tendues atteigne ε_{ud} ($\varepsilon_s < \varepsilon_{ud}$).

La courbure à l'état limite ultime, d'après la Figure 3a, est exprimée par:

$$\varphi_u = \frac{\varepsilon_{cu2}}{\xi_u d} \quad (6)$$

Sachant que la contrainte dans les armatures comprimées $\sigma_{s2} = \varepsilon_{s2} E_s$, l'équation d'équilibre des efforts internes de compression et de traction, s'écrit:

$$\lambda \xi_u d b \eta f_{cd} + \frac{(\xi_u d - d')}{\xi_u d} \varepsilon_{cu2} E_s A_{s2} = f_{yd} A_{s1} \quad (7)$$

Où λ et η sont des facteurs données par l'Eurocode 2 (Eurocode 2, 2004).

La solution de l'équation (7), conduit à une expression du second degré variant en fonction de ξ_u , dont la solution acceptable, s'écrit comme suit :

$$\xi_u = \frac{(f_{yd} \rho - \varepsilon_{cu2} E_s \rho')}{2 \lambda \eta f_{cd}} + \frac{\sqrt{(f_{yd} \rho - \varepsilon_{cu2} E_s \rho')^2 + 4 \lambda \eta f_{cd} \varepsilon_{cu2} E_s \rho' \frac{d'}{d}}}{2 \lambda \eta f_{cd}} \quad (8)$$

Le facteur de ductilité en courbure, dans le cas de la rupture par écrasement du béton s'obtient, par le rapport entre la courbure à l'état ultime déterminée en (6) et la courbure à la fin de la phase élastique déterminée en (3) :

$$\mu_{\varphi c} = \frac{\varepsilon_{cu2} (1 - \xi_y)}{\varepsilon_{sy,d} \xi_u} \quad (9)$$

5. Description des structures étudiées

Deux structures en béton armé sont choisies pour la réalisation de cette étude. Elles répondent aux critères de la régularité en plan et en élévation ainsi que la distribution des masses et de rigidité. Elles sont dimensionnées selon les codes Algériens en vigueur à savoir, le règlement parasismique (RPA99/v2003, 2003) et le code du béton CBA 93 (CBA 93, 2004). La première structure est un bâtiment de trois niveaux, implanté dans une zone de moyenne sismicité, les différents détails de ce bâtiment sont illustrés sur la Figure 4 et le Tableau 1. La deuxième structure est un bâtiment à cinq niveaux, à usage d'habitation, implanté dans une zone de faible sismicité (Figure 5 et Tableau 2).

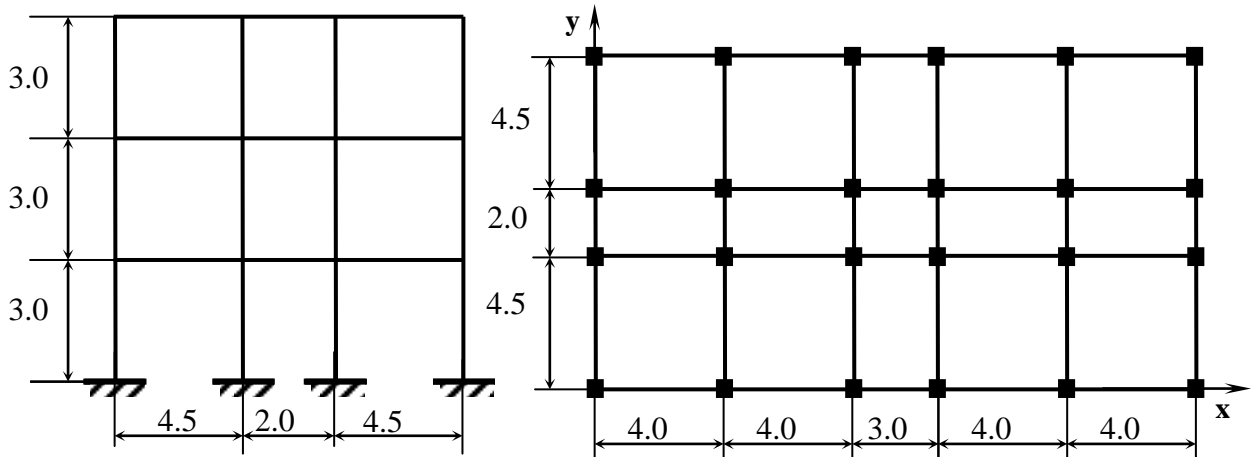


Figure 4. Détail du bâtiment à 3 niveaux (N = 3)

Tableau 1. Dimensions et ferrailages des poteaux et poutres de la structure N = 3

	Etages	Dimension (bxh)	Armatures
poteaux	3	35 x 35	8T16
	2	40 x 40	8T20
	RDC	40 x 40	8T20
Poutres sens Y	3	30 x 35	3T16
	2	30 x 35	3T18
	RDC	30 x 45	3T18
Poutres sens X	3	30 x 35	3T16
	2	30 x 35	3T18
	RDC	30 x 45	3T18

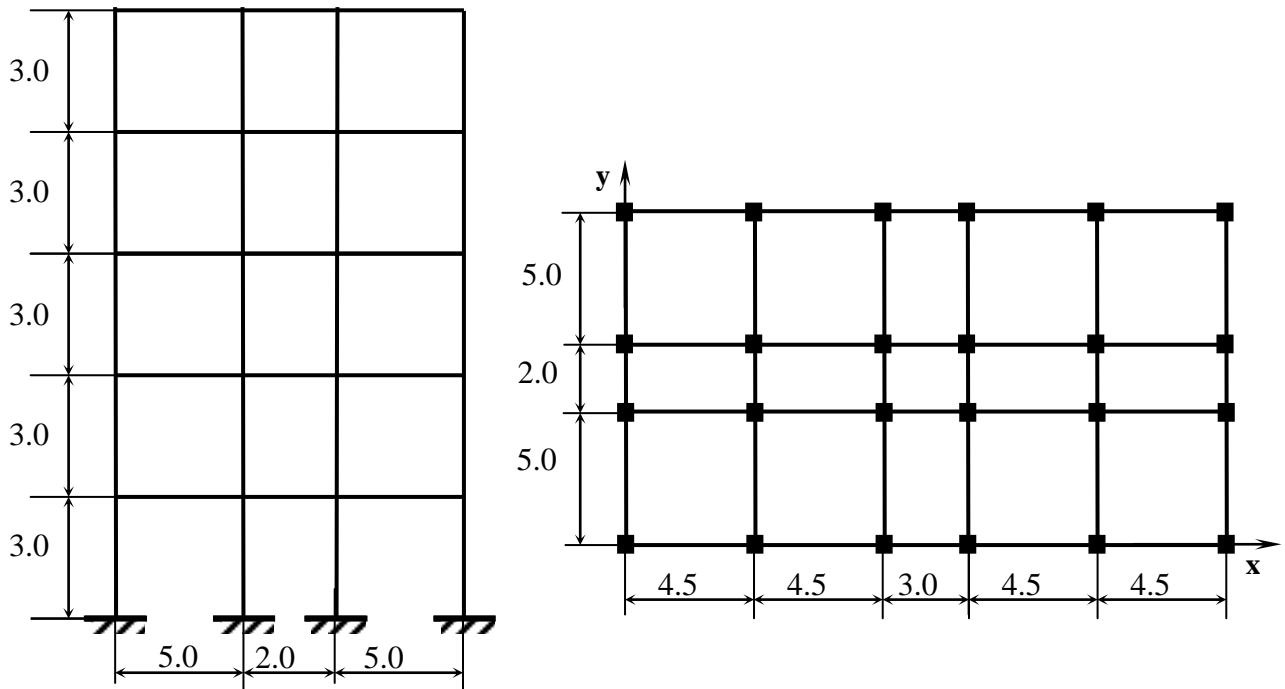


Figure 5. Détail du bâtiment à 3 niveaux (N = 3)

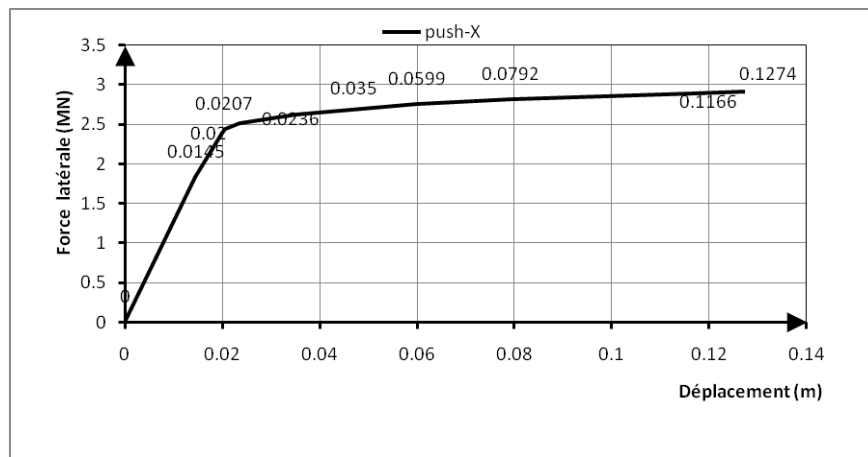
Tableau 2. Dimensions et ferrailages des poteaux et poutres de la structure N = 5

	Etages	Dimension (bxh)	Armatures
poteaux	5	35 x 35	8T16
	4	40 x 40	8T20
	3	40 x 40	8T20
	2	45 x 45	8T20
	RDC	45 x 45	8T25
Poutres sens Y	5	30 x 45	3T14+3T10
	4	30 x 45	3T16+3T14
	3	30 x 45	5T16
	2	35 x 45	3T20+2T12
	RDC	35 x 45	3T20+2T12
Poutres sens X	5	30 x 40	5T12
	4	30 x 40	5T12
	3	30 x 40	3T14+2T10
	2	35 x 40	3T14+3T12
	RDC	35 x 40	3T14+3T12

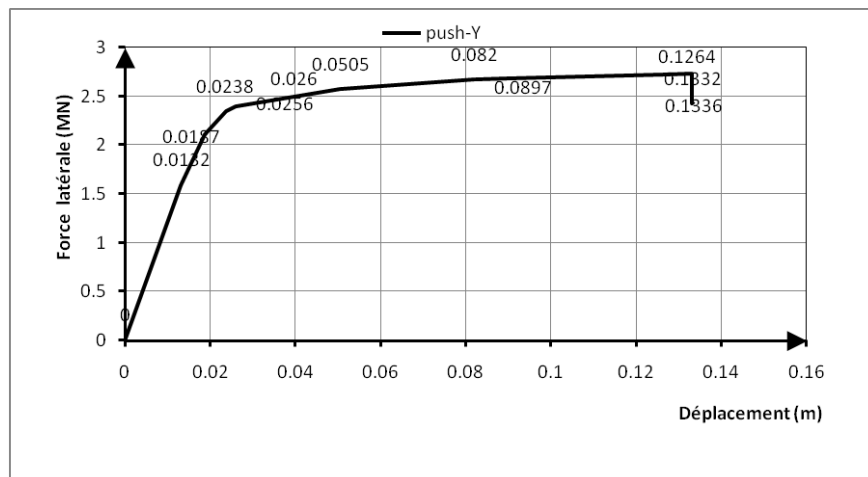
6. Evaluation des facteurs de ductilités

6.1. Facteur de ductilité globale

Pour l'évaluation du facteur de ductilité globale des structures identifiées, on utilise la méthode statique non linéaire (Push over) décrite dans le paragraphe § 4.2. La Figure 6 (a, b) illustre la courbe charge déplacement pour les directions transversale et longitudinale de la structure ($N = 3$). D'après cette figure, le facteur de ductilité de déplacement où globale varie entre 6.4 dans le sens x (Figure 6a) et de 6.76 dans le sens y (Figure 6b), et qui restent toujours supérieurs à ceux adoptés par RPA99/v2003 et de l'Eurocode 8 (q_0 varie entre 3 à 6). La même chose pour la Figure 7 (a, b), les facteurs de ductilités de déplacement où globale varie de 8 dans le sens x (Figure 7a) et de 6.84 dans le sens y (Figure 7b), et qui restent aussi supérieurs aux facteurs du comportement adoptés par (RPA 99/v2003, 2003) et l'Eurocode 8 (Eurocode 8, 2003), mentionné dans le paragraphe § 3. D'ici, de point de vue globale ces structures fournissent une ductilité globale très acceptable, néanmoins il reste à validé cette conclusion de point de vue locale.

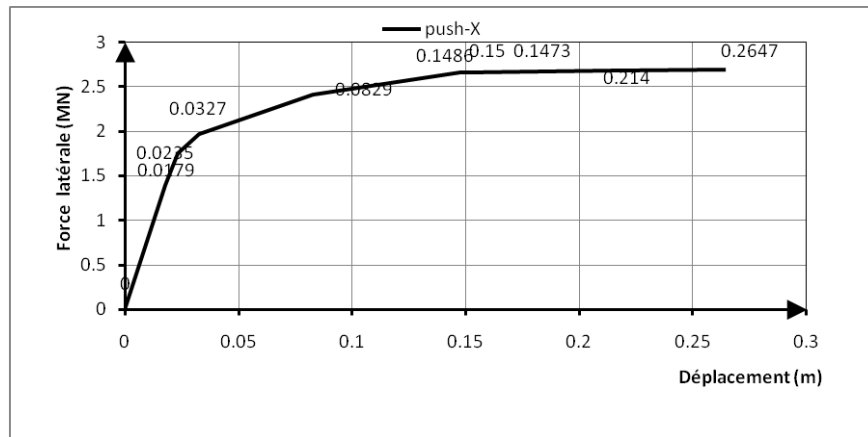


a - sens x

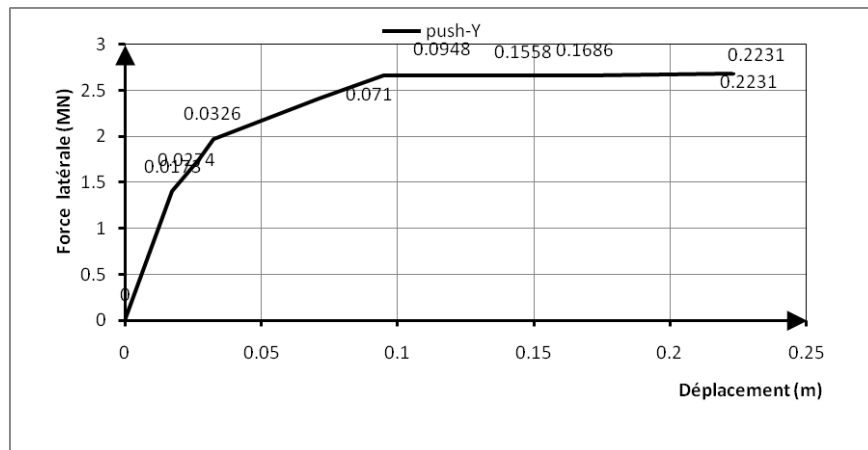


b- sens y

Figure 6. Diagramme force – déplacement par analyse progressive du bâtiment ($N = 3$)



a- sens x

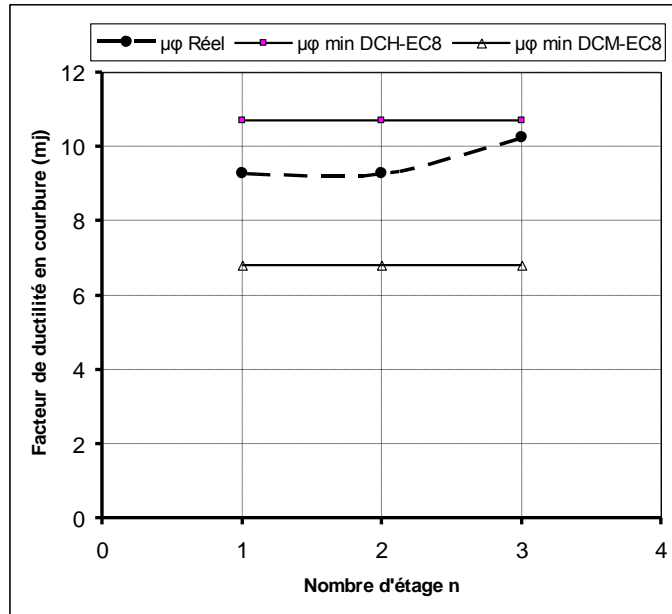


b- sens y

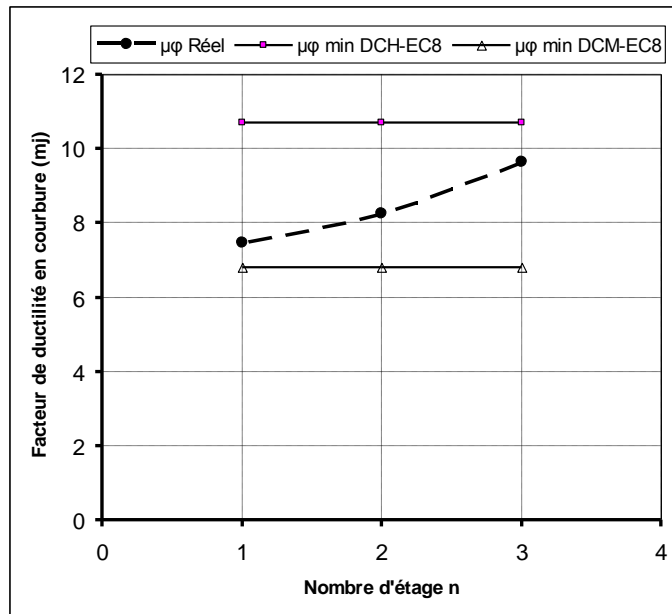
Figure 7. Diagramme force – déplacement par analyse progressive du bâtiment (N = 5)

6.2. Facteur de ductilité locale

Le facteur de ductilité locale μ_{ϕ} est déterminé par la procédure décrite dans le paragraphe § 4.1. La Figure 8 (a, b) schématise explicitement la variation du facteur de ductilité en courbure où locale dans chaque niveau, dans les sens de x et de y de la structure (N = 3). Cette figure montre que le facteur de ductilité en courbure réel ($\mu_{\phi, \text{réel}}$) varie entre 9 dans les étages inférieurs à 10.2 dans les étages supérieurs, suivant le sens **x**, et entre 7.5 et 9.5 dans les étages supérieurs, dans le sens **y**. Cette augmentation est due à la diminution du pourcentage des armatures tendues, vue la diminution du chargement sismique dans les étages supérieurs. Concernant la structure de cinq niveaux (N = 5), la Figure 9 (a, b) montre que $\mu_{\phi, \text{réel}}$ varie entre 8 et 10 dans le sens de **x**, et de 9 à 13.5 dans le sens de **y**. Cette augmentation est due toujours au pourcentage d'armatures tendues minimales dans les étages supérieurs. Une remarque a signalée dans les figures 8 et 9, est que la courbe de $\mu_{\phi, \text{réel}}$ reste toujours à l'intérieur du fuseau constitué par les deux courbes du facteur de ductilité en courbure minimale pour les classes de ductilités moyenne (DCM) et élevée (DCH) de l'Eurocode 8 (Eurocode 8, 2003).

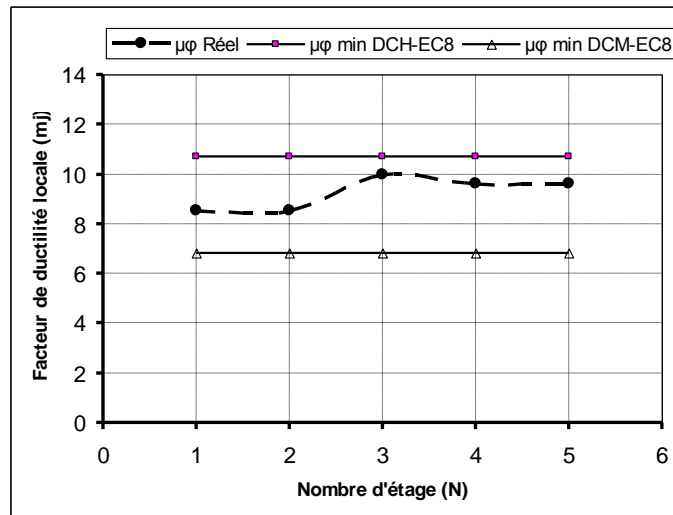


a- Sens x

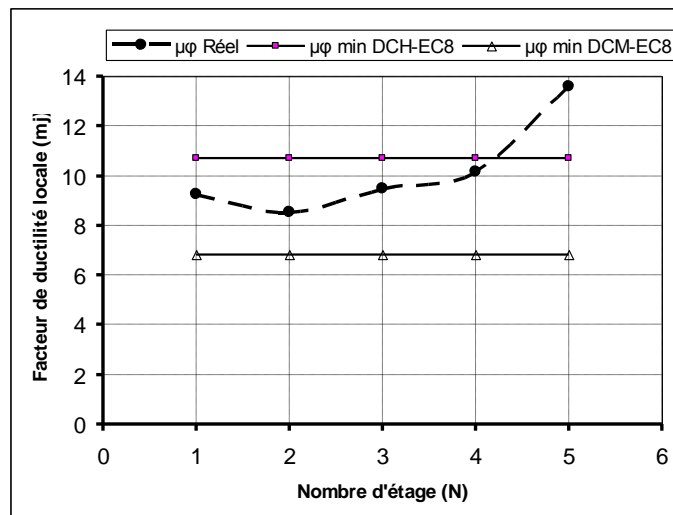


b- Sens y

Figure 8. Variation du facteur de ductilité locale dans chaque étage du bâtiment (N = 3)



a- Sens x



b- Sens y

Figure 9. Variation du facteur de ductilité locale dans chaque étage du bâtiment (N = 5)

7. Analyse du critère de la ductilité locale

Les valeurs des facteurs de la ductilité globale et locale déterminés dans le paragraphe 6, n'indiquent aucun degré de ductilité où de fragilité des deux structures. Dans la suite, on essaye d'exprimer le lien entre les facteurs de ductilité locale et globale déterminés précédemment, et de mettre en évidence le critère de ductilité locale exigé par l'Eurocode 8 ($\mu_{\phi, \text{réel}} \geq \mu_{\phi \text{min}}$), qui a été présenté dans le paragraphe § 2.3.

Les Figures 8 et 9 montrent clairement que toutes les courbes représentant la ductilité locale ($\mu_{\phi, \text{réel}}$), pour chaque structure, sont situées à l'intérieur du fuseau constitué les courbes du facteur de ductilité en courbure minimale, pour les deux classes de ductilités moyenne ($\mu_{\phi \text{min}} - \text{DCM}$) et élevée ($\mu_{\phi \text{min}} - \text{DCH}$) de l'Eurocode 8.

Par conséquent, d'après ces résultats on peut déduire que les facteurs de ductilité locale de ces deux 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.

8. Conclusion

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

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 ceux du facteur de comportement recommandé par RPA99/v2003 et l'Eurocode 8.

L'évaluation du facteur de ductilité locale montre que ce facteur varie entre 7 à 13 dans les structures étudiées, et il augmente dans les étages supérieurs.

L'analyse du critère de la ductilité locale montre que tous les éléments traités sont moyennement ductiles. Par conséquent, afin d'atteindre une haute classe de ductilité, il est nécessaire de prendre des dispositions constructives assez spéciales.

9. Bibliographie

- Bertero V.V., *State of the art report –Ductility based structural design*, Proceedings of Ninth world conf. earthquake eng., Vol. 3, Tokyo, Japon, 673–686, 1988.
- Boumekik Ahmed, *Analyse Pushover des Structures en Béton Armé -Théorie de l'endommagement*, Rapport annuel du projet de recherche, Université de Batna, 2006
- CBA-93, *Code de béton algérien 1993*. Document technique réglementaire DTR-BC -CGS, Alger, 1994.
- Davidovici Victor, *Rapport préliminaire du Séisme de BOUMERDES – 21 mai 2003*, 92p. , 2003.
- 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, édition Eyrolles, 1988.
- Gioncu V., *Framed structures - Ductility and seismic response General Report*, Journal of Construction Steel Research, N°55, 125–154, 2000.
- 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, 769-791, 2004.
- 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, 155-165, 1989.
- Park R., Ruitong D., *Ductility of doubly reinforced concrete beam sections*. ACI-Structural Journal, vol. 92, 217-225, 1988.
- RPA-99/v2003. *Règles parasismiques Algériennes 1999 - Version 2003*. DTR-BC 248 - CGS, Alger, 2003.