

ANALYSE DE LA DUCTILITE DES SECTIONS FLECHIES DIMENSIONNEES SELON LE RPA-99

1. Introduction

Les structures autostables en béton armé, conçues dans les zones de forte magnitude sismiques, sont dimensionnées d'une telle manière que le mécanisme de formation des rotules plastiques commence par les poutres avant l'atténuation des poteaux. Cependant, l'augmentation du palier de plasticité dans les poutres pour garantir la capacité d'absorption de l'énergie libérée par le sol constitue un jalon pour les concepteurs des constructions dans les zones de forte sismicité [1]. Or, ce rôle est accompli par un paramètre très important dans le domaine de génie parasismique, appelé : ductilité.

Par définition, la ductilité est l'aptitude d'un élément de la construction où la construction entière de subir une déformation après la fin de la phase élastique jusqu'à la ruine [2]. Dans les éléments linéaires en béton armé, elle est exprimée par la ductilité de courbure disponible et quantifiée par le rapport de la courbure ultime ϕ_u , caractérisée par la déformation ultime de l'un des matériaux constitutifs, sur la courbure à la fin de la phase élastique ϕ_y . Sa valeur dépend du pourcentage des armatures tendues ρ , du pourcentage des armatures comprimées ρ' , de la résistance à la compression du béton f_{c28} et de la limite élastique des armatures f_e [3]. Plusieurs études ont été réalisées pour analyser et quantifier la ductilité dans les éléments de constructions en béton armé [4,5,6] dimensionnés par divers règlements. Il convient dans la présente étude de faire une extension, du travail réalisé par Park [5] et El Haddad [6], sur les poutres dimensionnées par le règlement parasismique Algérien (RPA-99) [1].

Afin de réaliser ce travail, on évalue en premier lieu, le facteur de ductilité de courbure disponible, en utilisant la méthode élaborée par Park et Ruitong [5], on intègre la spécificité du règlement Algérien en faisant varier la résistance à la compression du béton, le pourcentage d'armature comprimée et la limite de la résistance élastique des armatures. En deuxième lieu, on détermine le facteur de ductilité de courbure dans les sections de poutres en béton armé dimensionnées par les pourcentages maximaux et

minimaux préconisés par le règlement parasismique Algérien (RPA-99), suivi par une étude comparative entre les résultats trouvés et ceux des sections dimensionnées par le PS-92 [7] et ACI-99 [8].

2. Modèle de béton

Le comportement du béton dépend de l'indice de déformation durant l'écrasement. Le diagramme contrainte-déformation utilisé et préconisé par le règlement CBA93 [9] est constitué par un diagramme parabole rectangle (Figure 1). La contrainte de béton utilisée à l'état limite ultime de résistance, est exprimée par la relation :

$$f_{bc} = \frac{0.85f_{c28}}{\theta\gamma_b} \quad (1)$$

où γ_b est un coefficient de sécurité égale à 1.15 dans le cas d'une situation accidentelle (sismique), θ est un coefficient dépend des charges appliquées, égale à 1 pour les charges appliquées à une durée de moins 1 heure et f_{c28} étant la résistance caractéristique du béton limitée par le règlement parasismique Algérien (RPA-99) par une valeur minimale de 20 MPa et une valeur maximale de 45 MPa. Plusieurs études [5] ont montré que le facteur de ductilité de courbure augmente avec l'augmentation de la résistance à la compression du béton f_{c28} .

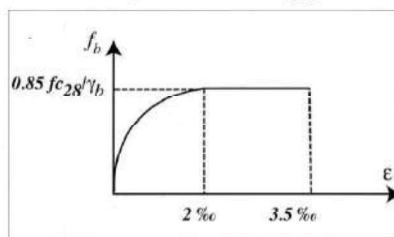


Figure 1 : Diagramme contrainte déformation du béton [9]

3. Modèle d'acier

Le règlement CBA-93 [9] à l'état limite ultime de résistance, adopte un diagramme simplifié contrainte-déformation élasto-plastique (Figure 2)

A. KASSOUL - K.EZZIANE
A. KADRI
Université H.B.B Chlef

RÉSUMÉ

L'objectif de cet article est de présenter une étude paramétrique sur les facteurs influençant la ductilité de courbure des sections transversales dans les poutres en béton armé, à savoir le pourcentage des armatures comprimées, la résistance à la compression du béton et la limite élastique des armatures. Pour l'évaluation du facteur de la ductilité de courbure, la méthode développée par Park et Ruitong a été utilisée en introduisant les caractéristiques spécifiques des matériaux constitutifs (aciers - béton) préconisés par le règlement parasismique Algérien (RPA-99) et le code de béton Algérien (CBA-93). Les conditions limitant le pourcentage des armatures longitudinales exigées par le règlement RPA-99, pour le ferrailage des poutres ont été examinées, ainsi que les valeurs des facteurs de ductilités de courbures correspondantes. Après cette étude paramétrique, on présente une analyse de la ductilité de courbure dans les poutres dimensionnées par le RPA-99, où une confrontation avec d'autres codes de constructions étrangers sera également offerte.

MOTS CLÉS

Armature • béton armé • pourcentage des armatures • ductilité • courbure • flexion • poutre • CBA-93, RPA-99.

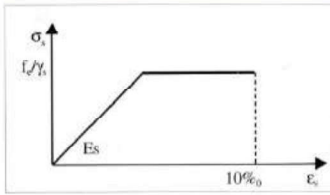


Figure 2 : Diagramme contrainte déformation de l'acier [9]

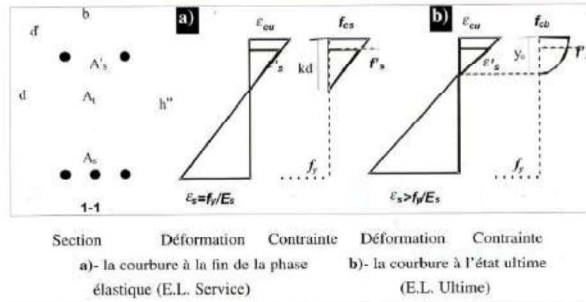


Figure 3 : Comportement de la section d'une poutre fléchie en béton armé.

où la déformation ultime est limitée à 10 ‰. La contrainte de calcul est exprimée par la relation :

$$\sigma_s = \frac{f_c}{\gamma_s} \quad (2)$$

où γ_s est un coefficient de sécurité égale à 1.15 dans le cas d'une situation durable et 1 dans le cas d'une situation accidentelle. Entre autre, le code RPA-99[1] fixe une valeur de la limite d'élasticité spécifiée inférieure ou égale à 500 MPa. Des études récentes [6] ont montré que le facteur de ductilité de courbure diminue avec l'augmentation de la limite élastique de l'acier.

4. Comportement de la section

Dans le cadre de calcul du facteur de ductilité de courbure des sections des poutres en béton armé non confinées, on utilise la méthode proposée par Park [5], qui tient compte des équations de compatibilité des déformations et les équations d'équilibre des forces internes et externes en supposant un comportement non linéaire de la section. La figure 3, montre les diagrammes contraintes-déformations correspondants à l'état élastique et à l'état ultime pour une section doublement armée. La courbure à la fin de la phase élastique s'écrit (Figure 3a) :

$$\phi_y = \frac{f_c / E_s}{d(1-k)} \quad (3)$$

où k étant le facteur de la hauteur de la zone comprimée qui dépend du pourcentage des armatures tendues ($\rho = A_s/bd$), du pourcentage des armatures comprimées ($\rho' = A'_s/bd$), d la hauteur utile de la section, E_s le module d'élasticité des armatures et f_e la limite élastique des armatures. La courbure ultime ϕ_u est définie lorsque la déformation du béton atteint la valeur ultime ϵ_{cu} , qui s'écrit (Figure 3b) :

$$\phi_u = \frac{\epsilon_{cu}}{y_n} \quad (4)$$

où ϕ_u est la hauteur de la zone comprimée à partir de l'axe neutre jusqu'à la fibre extrême comprimée. La valeur de ϕ_{cu} est limitée par le CBA-93 à 3.5‰ [9]. Par conséquence, le facteur de ductilité de

courbure disponible est exprimé par le rapport [2] :

$$\mu_\phi = \frac{\phi_u}{\phi_y} \quad (5)$$

5. Etude paramétrique

Pour la section représentée dans la figure 3, trois paramètres essentiels influençant la ductilité de courbure des sections fléchies en béton armé sont examinés, en l'occurrence, les armatures comprimées, la résistance à la compression du béton f_{c28} et la limite élastique des armatures longitudinales f_c . Les armatures comprimées sont représentées en fonction du rapport du pourcentage des armatures comprimées ρ' sur celui des armatures tendues ρ . Afin de cerner une variation acceptable du facteur de ductilité de courbure, quatre valeurs de ρ'/ρ ont été examinées à savoir : 0.0, 0.25, 0.5 et 0.75. Cette analyse sera répétée pour quatre valeurs différentes de la résistance à la compression du béton f_{c28} et dans d'ordre croissant de 20, 27, 35 et 45 MPa. L'ensemble de l'étude précédente sera traitée pour deux valeurs distinctes de la limite élastique des armatures longitudinales f_c , préconisées par le RPA-99 et le CBA-93 à savoir $f_c = 400$ MPa et $f_c = 500$ MPa.

Les résultats obtenus seront illustrés dans les figures 4 (a, b, c, d) et 5 (a, b; c; d), chaque figure représente une valeur précise du rapport ρ'/ρ , une valeur de la limite élastique f_c , et comporte quatre courbes correspondant chacune à une valeur de la résistance à la compression du béton f_{c28} .

La première observation montre que pour chaque courbe correspondant à une valeur de f_{c28} , le facteur de ductilité de courbure μ_ϕ , augmente avec la diminution du pourcentage des armatures tendues ρ et augmente avec l'augmentation de la résistance du béton.

5.1 Effet de la résistance de compression du béton

La figure 4a illustre l'effet de la résistance à la compression du béton f_{c28} sur le facteur de ductilité de courbure μ_ϕ , dans les sections des poutres fléchies en béton armé non confinées la-

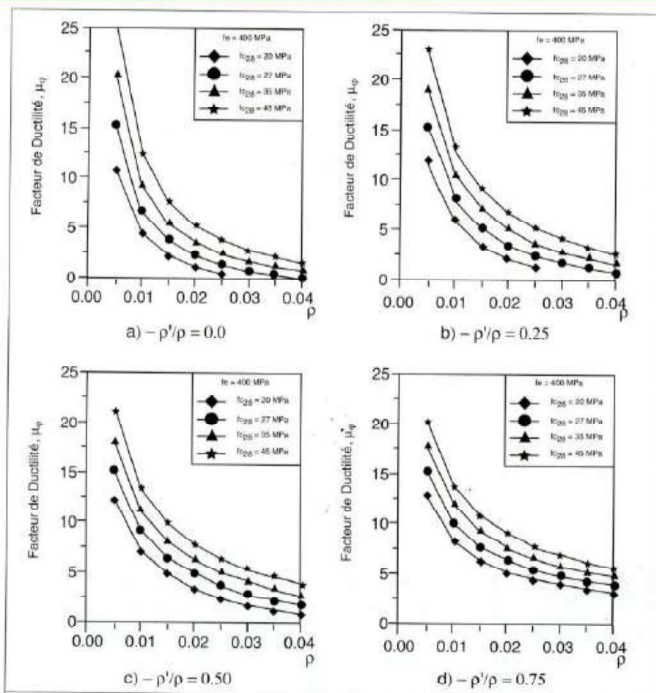


Figure 4 : Variation du facteur de ductilité de courbure disponible dans une section droite d'une poutre en béton armé $f_c = 400 \text{ MPa}$

tures comprimées augmente.

5.3 Effet de la limite élastique des armatures longitudinales

La comparaison des figures 4 et 5, pour les mêmes valeurs de ρ'/ρ et la même résistance à la compression du béton f_{c28} , montre clairement une diminution du

facteur de ductilité de courbure lorsque la limite élastique des armatures longitudinales f_e augmente de 400 MPa à 500 MPa. Ainsi, μ_ϕ diminue environ de 40% pour les faibles valeurs de ρ , et plus de 50% pour des valeurs moyennes de ρ allant de 0.01 à 0.025, par contre, pour des valeurs élevées de ρ ($\rho > 0.025$) cette diminution est aux alentours de 60 à 70%.

5.2 Effet des armatures comprimées

La comparaison entre les figures 4a, 4b, 4c et 4d, montre que le facteur de ductilité de courbure μ_ϕ augmente en fonction de l'augmentation du rapport ρ'/ρ , pour des valeurs élevées du pourcentage des armatures tendues ρ .

Par ailleurs, pour les faibles valeurs de ρ , μ_ϕ diminue lorsque ρ'/ρ augmente. Les mêmes constatations sont aussi visibles lorsqu'on compare le reste des figures dans la figure 5. Dans le même contexte, cette comparaison montre que pour le même pourcentage ρ , μ_ϕ s'améliore approximativement de 20% lorsque ρ'/ρ augmente de 0.00 à 0.25. Tandis que cette augmentation sera 2 fois plus lorsque ρ'/ρ passe de 0.0 à 0.75.

Néanmoins, pour les faibles valeurs de ρ ($\rho < 0.01$), on observe une légère décroissance de μ_ϕ quand ρ'/ρ augmente. Par contre, pour les valeurs élevées de ρ ($\rho > 0.025$), on constate que μ_ϕ augmente de 2 à 10 fois lorsque ρ'/ρ augmente de 0.0 à 0.75 pour les différentes valeurs de f_{c28} . Cette amélioration est due essentiellement à l'augmentation de la longueur de la zone comprimée y_u quand le pourcentage des arma-

Cette dégradation est influencée principalement par l'augmentation de la zone tendue de la section de poutre en béton armé à cause de l'augmentation de la contrainte des armatures f_c .

6. Ductilité locale dans les sections dimensionnées par RPA99

6.1 Valeurs limites des pourcentages d'armatures

Le règlement parasismique Algérien RPA-99 [1] exige que dans les poutres fléchies en béton armé, le pourcentage maximal r_{max} des armatures longitudinales en toute section n'exécède pas 4% hors la zone de recouvrement et 6% dans les sections appartenant à des zones de recouvrement. Pour le pourcentage minimal r_{min} , le RPA99 limite cette valeur à 0.5% de la section brute du béton dans tous les cas de figures. Concernant les armatures comprimées, le RPA-99 exige que le pourcentage des armatures comprimées ρ' doit être symétrique à ρ .

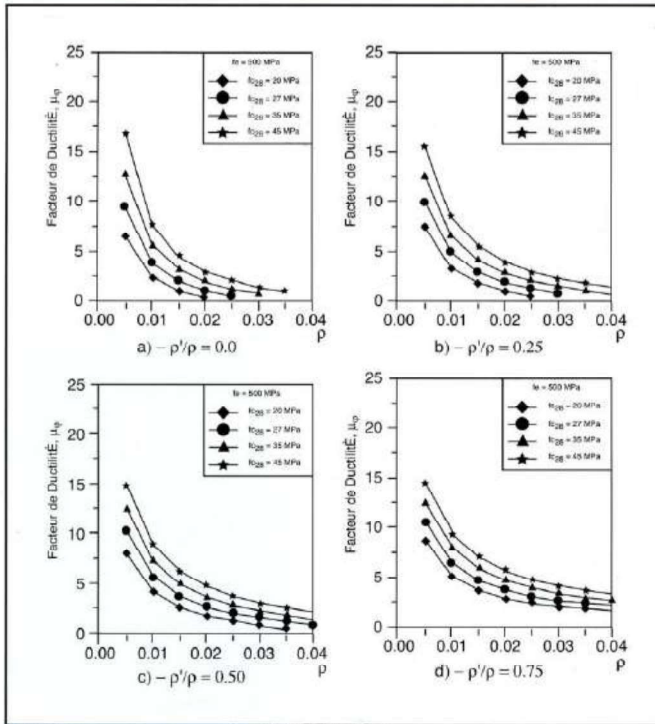


Figure 5 : Variation du facteur de ductilité de courbure disponible dans une section droite d'une poutre en béton armé ' $f_c = 500$ MPa'

National Society for Earthquake Engineering, V22, pp.155-165, No.3, Sep 1989.

[3] Kassoul A., Ezziane K., Kadri A., "Aspects qualitatifs de la ductilité dans les constructions en béton armé". Algérie Equipement - Revue technique (ENTP)- Alger, Numéro 34, pp. 4-7, juillet 2001.
 [4] Kassoul A., Ezziane K. Kadri A., "Ductilité de courbure de poutres en béton armé dimensionnées par le règlement parasismique Algérien (RPA-99)".

Deuxième Colloque national de génie parasismique, Sheraton, Alger, 8,9 et 10 octobre 2000.

[5] Park, R., Ruitong, D., "Ductility of Doubly Reinforced Concrete Beam Sections". ACI-Structural Journal, V.92, No.1, pp.217-225, Mar-Apr 1988.

[6] Al Haddad, M.S., "Curvature Ductility of Reinforced Concrete Beams Under Low and High

de courbure

Pour ces valeurs limites spécifiques préconisées par le règlement, on détermine les facteurs de ductilité de courbure disponibles correspondant, pour des contraintes de matériaux constitutifs fréquemment utilisés en pratique. A partir des résultats de calcul illustrés dans le tableau 1, on dégage les valeurs du facteur de ductilité de courbure dans les sections de poutres dimensionnées par les valeurs limites d'armatures adoptées par RPA-99, d'où on peut citer les remarques suivantes :

- Pour les sections dimensionnées aux alentours du pourcentage minimal ρ_{min} , μ_ϕ varie entre 12 et 21 suivant l'augmentation de f_{c28} pour F_c400 et entre 8 et 14 pour F_c500 et cela pour les différentes valeurs du rapport ρ'/ρ .
- Les sections qui ont atteint un pourcentage maximal de 4%, leurs facteurs de ductilité m_j n'excèdent pas la valeur de 6 pour un béton de résistance élevée de 45MPa et un rapport d'armature élevée ρ'/ρ égale à 0.75.
- Dans les sections appartenant à une zone de recouvrement où $\rho_{max} = 6\%$, leurs facteurs de ductilité sont devenus pratiquement nuls dans tous les cas considérés, sauf pour des valeurs élevées de f_{c28} et de ρ'/ρ .

6.3 Confrontation avec les codes étrangers

Afin de superviser la variation de la ductilité de courbure dans les sections de poutres dimensionnées par le RPA99 comparativement à d'autres codes étrangers, le tableau 2 illustre la

comparaison avec les conditions limites du ferrailage des sections fléchies dimensionnées par le règlement parasismique Français (PS92) inspiré de l'Eurocode 8 (EC8) [7] et le code du béton Américain (ACI-99) [8]. D'après ce tableau, on constate une convergence entre les facteurs de ductilité de courbure dans les sections dimensionnées par le PS92 et de l'ACI-99, par ailleurs, pour les sections dimensionnées par le RPA-99, le constat est avisé comme suit :

- Concernant les sections dimensionnées par ρ_{min} , il y a une légère augmentation à constater environ de 6 à 30% du RPA-99 par rapport au PS92 et ACI-99.
- Pour les sections dimensionnées par ρ_{max} égale à 4% selon le RPA-99, une diminution est observée aux alentours de 80%, sauf pour un rapport élevé de ρ'/ρ , par rapport au PS92 et ACI-99.
- Enfin pour les sections à ρ_{max} égale à 6% selon le RPA-99, on constate un écart considérable entre le facteur de ductilité du RPA-99 et ceux des autres codes.

L'augmentation observée est due à la valeur excessive de ρ_{min} préconisée par le RPA-99 qui dépasse largement les valeurs adoptées par les deux autres règlements. Par ailleurs, la valeur élevée de ρ_{max} préconisée par le RPA99, comparativement aux deux autres règlements a causé une nette diminution de la ductilité. Ce constat est probablement dû au RPA-99 qui recommande des pourcentages globaux au lieu de préciser le pourcentage limite entre les deux facettes tendues et comprimées comme c'est le cas dans les autres codes.

6.4 Effet de la distribution du pourcentage maximal ρ_{max}

Bien que le RPA 99 préconise un pourcentage d'armatures ρ_{max} égale à 4%, il n'indique aucune spécificité concernant les pourcentages limites pour les deux facettes comprimées et tendues. Néanmoins, il exige que le pourcentage des armatures comprimées ρ' doit être symétrique aux pourcentage des armatures tendues ρ dans les poutres sollicitées principalement par les forces latérales sismiques. Dans ce cas, on se retrouve avec une section bien ductile mais

ρ'/ρ	$f_{c28}(MPa)$	$f_e = 400 MPa$				$f_e = 500 MPa$			
		20	27	35	45	20	27	35	45
0.50	$\rho = \rho_{min} = 0.005$	12.5	15.4	18.2	21.2	8.21	10.4	12.6	14.9
	$\rho = \rho_{min} = 0.04$	1.08	2.04	2.93	4.18	0.35	1.07	1.72	2.34
	$\rho = \rho_{min} = 0.06$	0.00	0.76	1.62	2.36	0.00	0.14	0.69	1.38
0.60	$\rho = \rho_{min} = 0.005$	12.7	15.4	17.9	20.8	8.46	10.5	12.6	14.8
	$\rho = \rho_{min} = 0.04$	1.83	2.71	3.83	4.87	0.86	1.62	2.17	2.75
	$\rho = \rho_{min} = 0.06$	0.54	1.48	2.24	3.11	0.00	0.60	1.29	1.85
0.75	$\rho = \rho_{min} = 0.005$	12.9	15.4	17.7	20.2	8.78	10.7	12.6	14.6
	$\rho = \rho_{min} = 0.04$	3.19	4.17	4.88	5.75	1.91	2.34	2.81	3.39
	$\rho = \rho_{min} = 0.06$	1.97	2.81	3.84	4.44	1.04	1.72	2.12	2.52

Tableau 1 : Facteur de ductilité de courbure dans les sections des poutres dimensionnées par les pourcentages préconisés par le RPA99

	$f_{c28}(MPa)$	$\rho'/\rho = 0.50$		$\rho'/\rho = 0.75$	
		27	45	27	45
RPA99 [1]	$\rho = \rho_{min} = 0.005$	15.3	21.19	15.40	20.75
	$\rho = \rho_{min} = 0.04$	2.04	4.180	4.170	4.865
	$\rho = \rho_{min} = 0.06$	0.75	2.360	2.800	3.111
PS92 [7]	$\rho_{min} = 1.4/f_e = 0.035$	19.3	26.14	18.70	25.32
	$\rho_{min} = 7/f_e = 0.0175$	5.74	8.940	7.100	9.362
	$\rho_{min} = 0.02$	5.05	8.012	6.490	8.482
ACI99 [8]	$\rho_{min} = 200/145f_e = 0.0034$	19.6	26.58	18.9	25.72
	$\rho_{min} = 0.025$	3.17	6.600	5.59	7.142

Tableau 2 : Comparaison de μ_ϕ dans les sections dimensionnées par les pourcentages préconisés par le RPA99, le PS92 et le ACI-99. ($f_c = 400MPa$).

avec une partie de béton comprimé très réduite limitant ainsi les matériaux à travailler à leurs états limites.

Dans le tableau 3, on montre la distribution probable de ρ' en fonction de r avec la conservation de $(\rho + \rho') = \rho_{max} = 0.04$. On constate que pour les faibles valeurs de ρ' , ($\rho/\rho' = 0- 0.3$), le facteur de ductilité de courbure disponible, est pratiquement négligeable sauf pour des valeurs élevées de f_{c28} . Cependant, pour ($\rho/\rho' \geq 0.4$), les sections ayant les pourcentages correspondant, sont devenues plus ductiles pour les valeurs de f_{c28} et f_c . Ce constat reste valable jusqu'à ($\rho/\rho' = 0.8$). Par ailleurs, pour $\rho/\rho' = 1$ (cas d'armatures symétriques), les sections ayant les pourcentages correspondant, sont plus ductiles, alors que la zone du béton comprimé se trouve réduite.

Par conséquence, il est utile de rappeler qu'il

ρ	ρ'	ρ/ρ'	$f_e = 400 (MPa)$ et $f_{c28} (MPa) =$				$f_e = 500 (MPa)$ et $f_{c28} (MPa) =$			
			20	27	35	45	20	27	35	45
0.04	0.0	0	0	0.003	0.67	1.48	0	0	0.09	0.6
0.035	0.005	0.15	0	0.76	1.62	2.58	0	0.14	0.69	1.38
0.031	0.009	0.3	0.83	1.84	2.78	4.07	0.18	0.85	1.56	2.3
0.029	0.011	0.4	1.56	2.54	3.73	5.16	0.65	1.46	2.13	2.91
0.027	0.013	0.5	2.32	3.54	4.87	6.16	1.34	2.05	2.73	3.59
0.025	0.015	0.6	3.39	4.7	5.83	6.16	1.99	2.63	3.4	4.3
0.024	0.016	0.7	4.43	5.46	6.58	7.85	2.45	3.18	3.95	2.86
0.023	0.017	0.75	4.86	5.91	7.03	8.31	2.8	3.51	4.29	5.22
0.022	0.018	0.8	5.29	6.35	7.47	8.75	3.11	3.84	4.64	5.57
0.02	0.02	1	6.61	7.63	8.71	9.01	4.14	4.87	5.70	6.57

Tableau 3 : Valeurs de μ_ϕ en fonction de la distribution de ρ' avec la conservation de $\rho_{max} = 4\%$ du RPA-99.

faut spécifier le pourcentage maximal pour chaque facette de la section. La valeur de 2.2% s'avère une quantité suffisante pour le pourcentage maximal des armatures tendues et ρ' doit prendre 75% du pourcentage des armatures tendues ce qui offre à la section une ductilité suffisante.

7. Conclusion

Dans cette étude paramétrique sur les facteurs influençant la ductilité de courbure dans les sections de poutres en béton armé, on a intégré la spécificité des règlements CBA93 et du RPA99 d'où le facteur de ductilité de courbure trouvé a fait l'objet d'une confrontation avec ceux des sections dimensionnées par les règlements PS-

92 et ACI-99. Ainsi, une vision sur la distribution des armatures entre les deux facettes de la section a été réalisée.

Après cette analyse, on est dans la mesure de dégager les conclusions remarquables suivantes concernant les section dimensionnées selon le RPA-99:

- Les sections, dimensionnées au voisinage de ρ_{min} égale à 0.5% avec ρ'/ρ supérieur à 0.5, sont plus ductiles que celles des autres codes.

- Dans les sections prévues pour la formation des rotules plastiques, dimensionnées aux voisinage du pourcentage maximal ρ_{max} égale à 4% selon le RPA-99, ont une faible ductilité sauf pour les valeurs élevées de ρ/ρ' et f_{c28} .

- Toutes les sections appartenants à des zones de recouvrement dimensionnées au voisinage de ρ_{max} égale à 6%, sont pratiquement non ductiles.

Cependant, on exhorte actuellement aux concepteurs des constructions en béton armé de s'éloigner durant le dimensionnement de recourir pour l'adoption du pourcentage maximal préconisé par le RPA-99. Bien que, les sections dimensionnées par le pourcentage minimal ρ_{min} préservent une ductilité satisfaisante, la diminution de ce pourcentage à 0.4% sera souhaitable afin de s'aligner au voisinage des règlements étrangers (PS-92 et ACI-99). Par ailleurs, pour le pourcentage maximal, on recommande de s'alléger l'écart existant entre ρ_{max} du RPA-99 et les autres règlements et de spécifier les facettes concernées. La valeur de 2.2% s'avère une quantité suffisante pour le pourcentage maximal des armatures tendues. Comme, on incite à éviter le recouvrement dans les zones critiques prévues pour la formation de rotules plastiques et d'éliminer carrément ce pourcentage. Pour les armatures comprimées, un pourcentage de 75% des armatures tendues se révèle comme une solution adéquate dans les sections critiques en leur offrant une ductilité suffisante

Strain Rates". ACI-Structural Journal, V.92, No. 5, pp.526-534, Sep-Oct, 1995.

[7] AFPS90, "Recommandations AFPS90 pour la rédaction des règles relatives aux ouvrages et installations à réaliser dans les régions sujettes au séismes - TOME 2", Association Française de Génie parasismique, Presse de l'ENPC, 249p. Paris (France), 1992

[8] ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-95) and Commentary (ACI 318 R -99)", American Concrete Institute, 369 pp. Mich. 1999.

[9] CBA 93, "Codes de béton Algériennes 1993". Document technique réglementaire DTR-BC Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique (CGS), Alger.