

ANALYSE DU CRITERE DE LA DUCTILITE LOCALE DANS LES SECTIONS FLECHIES DIMENSIONNEES SELON L'EUROCODE 8

A. Kassoul¹, A. Bougara², M. Belkhatir³, K. Ezziane⁴

T. 3. [Performance of concrete structures]

RESUME

L'objectif de cet article est de mettre en évidence le critère de la ductilité locale dans les poutres en béton armé dimensionnées selon les normes européennes. Au début, on expose les lois de comportements des matériaux préconisées par l'Eurocode 2. Ensuite, le principe de la méthodologie d'évaluation du facteur de la ductilité en courbure disponible, sera exposé. Pour l'analyse du critère de la ductilité locale, on illustre la vision de l'Eurocode 8 concernant ce critère, puis on détermine le facteur de la ductilité disponible dans les sections ayant ρ_{max} de l'Eurocode 8, et on le compare avec la ductilité minimale ($\mu_{\varphi min}$) imposée par l'Eurocode 8. En outre, on détermine le pourcentage d'armatures tendues ρ correspondant réellement à $\mu_{\varphi min}$, ensuite on le compare avec ρ_{max} de l'Eurocode 8. En conclusion, on propose des recommandations permettant de tenir compte mieux du critère de la ductilité locale.

MOT CLES

Ductilité locale, poutres dissipatives, armatures tendues, Eurocode 8.

¹ Laboratoire de sciences des matériaux et environnement, UHB de Chlef, Algérie, amkassoul@hotmail.com

² Laboratoire de sciences des matériaux et environnement, UHB de Chlef, Algérie, aekbougara@hotmail.com

³ Laboratoire de sciences des matériaux et environnement, UHB de Chlef, Algérie, abelkhatir@yahoo.com

⁴ Laboratoire de sciences des matériaux et environnement, UHB de Chlef, Algérie, Ezzianek@yahoo.fr

1. INTRODUCTION

L'analyse du comportement des structures en béton armé a connu des progrès énormes sur tous les plans, où plusieurs recherches ont été consacrées, à la fin du 20^{ème} siècle, aux structures sujettes aux actions sismiques. En profitant des avancées scientifiques, plusieurs codes parasismiques ont amélioré leurs recommandations, et d'autres se sont apparus. Les normes européennes sont parmi les codes qui ont bénéficié du développement de la recherche, en concrétisant ces résultats sous forme de recommandations instamment des règles à suivre et à respecter. Parmi les thèmes recommandés par l'Eurocode 2 [2004], l'élargissement de l'utilisation du béton à haute résistance jusqu'à 90 MPa, et la prise en compte de la ductilité locale durant le dimensionnement par l'Eurocode 8 [2003]. L'objectif essentiel de ce travail est de mettre en évidence le critère de la ductilité locale dans les sections des poutres, dimensionnées selon les normes européennes. De ce fait, les sections ayant le pourcentage maximal d'armatures tendues ρ_{max} préconisé par l'Eurocode 8 [2003], seront examinées, afin d'avoir une vision très claire sur ce critère.

En vue de réaliser cet objectif, en premier lieu, on expose les lois de comportements des matériaux acier et béton non confinés, qui caractérisent la spécificité de l'Eurocode 2 [2004]. Ensuite, le principe de la méthodologie d'évaluation du facteur de la ductilité en courbure disponible, sera traité. Afin d'éclaircir le critère de ductilité locale dans les sections des poutres, on illustre la vision de l'Eurocode 8 [2003] concernant la prise en compte de ce critère durant le dimensionnement, identifiée par la ductilité locale minimale $\mu_{\phi min}$ et le pourcentage d'armatures tendues ρ_{max} . Par la suite, on estime le facteur de la ductilité disponible dans les sections ayant ρ_{max} , ensuite, on le compare avec la ductilité minimale $\mu_{\phi min}$. On outre, on détermine le pourcentage ρ correspond réellement à $\mu_{\phi min}$, puis on le compare avec ρ_{max} . En conclusion, on présente des remarques concernant la formule de ρ_{max} , permettant de tenir compte mieux du critère de la ductilité locale dans les poutres en béton armé dimensionnées selon l'Eurocode 8 [2003].

2. LOIS DE COMPORTEMENT DES MATERIAUX

2.1. Béton

Le dimensionnement des sections transversales d'un élément en béton armé selon l'Eurocode 2 [2004], utilise le diagramme parabole rectangle illustré dans la figure 1. La valeur de calcul de la résistance en compression du béton sur cylindre f_{cd} , est définie par :

$$f_{cd} = \frac{\alpha_{cc} f_{ck}}{\gamma_c} \quad (1)$$

Où γ_c est un coefficient de sécurité, égal à 1.5 pour les situations durables et à 1.2 pour les situations accidentelles. α_{cc} est un coefficient tenant compte des effets à long terme, sa valeur varie entre 0.8 et 1.

Ainsi, la déformation de compression ultime du béton ε_{cu2} , est définie par :

$$\varepsilon_{cu2} (\%) = \begin{cases} 3.5 & \text{pour } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \\ 2.6 + 35 \left(\frac{90 - f_{ck}}{100} \right)^4 & \text{pour } f_{ck} > 50 \text{ MPa} \end{cases} \quad (2)$$

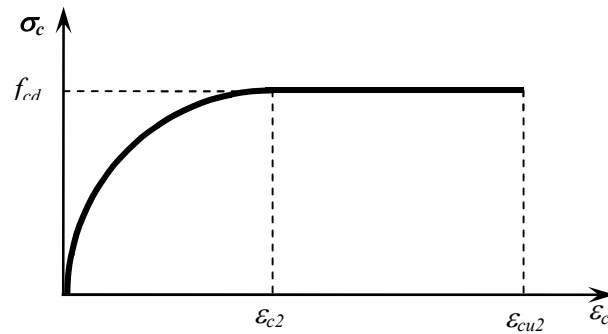


Figure 1. Diagramme parabole rectangle pour le béton non confiné sous compression d'après l'Eurocode 2 [2004].

2.2. Acier

La conception des sections en béton armé selon l'Eurocode 2 [2004], utilise le diagramme contrainte – déformation des aciers schématisé dans la figure 2. Ce diagramme est distingué par la courbe élasto plastique bilinéaire, caractérisée par une branche inclinée jusqu'à une déformation égale à $\epsilon_{sy,d}$ et une contrainte de l'armature égale à f_{yd} , ainsi qu'une branche supérieure supposée horizontale jusqu'à la déformation maximale ϵ_{uk} correspondant à la contrainte dans l'armature égale à f_{yd} , où :

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \quad (3)$$

Avec f_{yk} est la valeur caractéristique de la limite d'élasticité. γ_s est un coefficient partiel de l'acier égal à 1.15 pour les situations durables et 1 pour les situations accidentelles.

$\epsilon_{sy,d} = f_{yd}/E_s$: Allongement élastique de l'armature sous charge maximale

E_s : Module d'élasticité de l'acier, égal à 200000 MPa.

ϵ_{uk} : Allongement ultime de l'armature sous charge maximale. Elle est limitée à 7.5 % pour la classe A des aciers et 8.5 % pour la classe B.

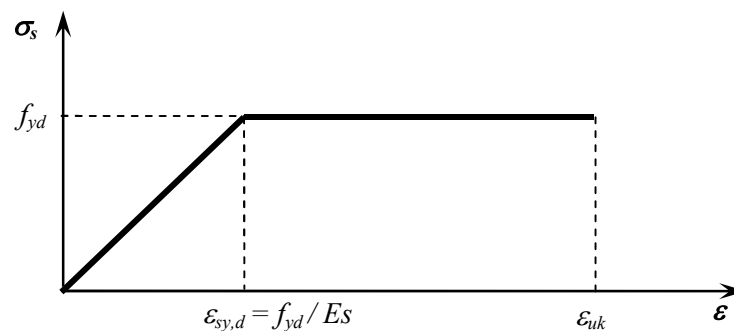


Figure 2. Diagramme "contrainte – déformation" des aciers du béton armé d'après l'Eurocode 2 [2004].

3. PRINCIPE DE LA METHODE D'EVALUATION DU FACTEUR DE DUCTILITE

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 [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 la traction des armatures.

4. VISION DE L'EUROCODE 8 CONCERNANT LE CRITERE DE LA DUCTILITE

Dans les codes parasismiques, le facteur de la ductilité globale caractérise généralement le coefficient de comportement des structures q_0 . En appuyant sur les valeurs de ce coefficient, l'Eurocode 8 [2003] divise la ductilité des structures en trois classes ; à savoir : DCL (Classe de Ductilité Limitée), DCM (Classe de Ductilité Moyenne) et DCH (Haute Classe de Ductilité). Dans ce contexte, il est très utile d'illustrer la vision de l'Eurocode 8 [2003] concernant le critère de la ductilité locale dans la conception des poutres dissipatives d'énergie. En effet, l'Eurocode 8 offre un lien direct entre la ductilité locale et la ductilité globale, en proposant des valeurs minimales pour le facteur de ductilité en courbure μ_ϕ (noté $\mu_{\phi,min}$) en fonction du coefficient du comportement des structures q_0 . Cette ductilité minimale $\mu_{\phi,min}$ est obtenue par la valeur minimale des deux expressions suivantes :

$$\mu_{\phi,min} = \begin{cases} 2q_0 - 1 & \text{si } T_1 \geq T_C \\ 1 + 2(q_0 - 1) \frac{T_C}{T_1} & \text{si } T_1 < T_C \end{cases} \quad (7)$$

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. D'après l'Eurocode 8 [2003], le coefficient q_0 est exprimé par $q_0 = 3\alpha_u / \alpha_1$ pour la classe DCM et $q_0 = 4.5\alpha_u / \alpha_1$ pour la classe 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 et le facteur de ductilité minimal $\mu_{\phi,min}$ correspondant varie entre 6 et 12 selon Fuentes [1988].

En conséquence, l'Eurocode 8 [2003] recommande que le facteur de ductilité en courbure disponible μ_ϕ , dans les poutres, devrait être supérieur ou égal à la valeur minimale $\mu_{\phi,min}$ ($\mu_\phi \geq \mu_{\phi,min}$). D'autre part, ce code intègre le respect de la ductilité explicitement dans la vérification du pourcentage maximal des armatures tendues ρ_{max} ; où il stipule que la valeur de ρ obtenue par le calcul en capacité devrait être inférieure ou égale à ρ_{max} de Eurocode 8 [2003], exprimée par l'expression ci-dessous :

$$\rho_{max} = \rho' + \frac{0.0018}{\mu_\phi} \frac{f_{cd}}{\varepsilon_{sy,d} f_{yd}} \quad (8)$$

Dans ce contexte, il est utile d'illustrer d'autres expressions de ρ_{max} préconisées par différents codes. Le règlement parasismique algérien RPA-99/ version 2003 [2003] exige que :

$$\rho_{max} \leq 0.04 \quad (9)$$

Le code ACI-378 [2005] adopte la valeur minimale entre les deux expressions suivantes :

$$\rho_{max} \leq \min \left(\rho' + 0.75 \left(\frac{0.85 \beta_1 f'_c}{f_y} \left(\frac{600}{600 + f_y} \right) \right), 0.025 \right) \quad (10)$$

Où f'_c est la résistance à la compression du béton, β_1 est un coefficient dépend de f'_c ; et f_y est la contrainte des aciers à l'écoulement.

Et , le code Néo-Zélandais selon Park et Ruitong [1988] préconise la valeur minimale entre les deux relations suivantes :

$$\rho_{max} \leq \min \left(\frac{1 + 0.17 \left(\frac{f'_c}{1015} - 3 \right)}{100} \left(1 + \frac{\rho'}{\rho} \right), \frac{1015}{f_y} \right) \quad (11)$$

Il est à noter que les codes RPA 99/2003 [2003], ACI-378 [2005] et NZ (Park et Ruitong [1988]) ne tiennent pas compte explicitement de la ductilité minimale durant le dimensionnement. Contrairement, l'Eurocode 8 [2003] revêt un intérêt particulier à la ductilité locale et exige son respect durant la conception, en imposant des valeurs minimales. En effet, il n'existe aucun intervalle de comparaison entre les valeurs qu'on peut déterminer par ces trois codes et celles déterminées avec l'Eurocode 8. Par conséquent, la condition suggérée par l'Eurocode 8 [2003] intègre explicitement le critère de la ductilité locale durant le dimensionnement.

5. ANALYSE DE LA DUCTILITE DANS LES SECTIONS AYANT ρ_{MAX} DE L'EUROCODE 8

Le tableau 1, expose une vérification de la ductilité disponible dans les sections dimensionnées selon l'Eurocode 8 [2003], en suivant le principe de la méthodologie exposée en § 3. Ces sections ayant le pourcentage ρ_{max} de la formule [8] de l'Eurocode 8 [2003], et envisage d'acquérir une ductilité minimale ($\mu_{\phi, min}$) de 8, 10 et 12 selon l'expression [7] de l'Eurocode 8 [2003].

Tableau 1. Vérification des facteurs de ductilité en courbure disponible correspondant aux pourcentages maximaux ρ_{max} préconisés par l'Eurocode 8 [2003].

ρ'/ρ	f_{yk} (MPa)	f_{ck} (MPa)	$\mu_{\phi, min} = 8$ [7]		$\mu_{\phi, min} = 10$ [7]		$\mu_{\phi, min} = 12$ [7]	
			ρ_{max} [8]	μ_{ϕ}	ρ_{max} [8]	μ_{ϕ}	ρ_{max} [8]	μ_{ϕ}
0.5	400	30	0.0141	6.1	0.0113	7.5	0.0094	8.9
		50	0.0234	6.1	0.0188	7.5	0.0156	8.9
		70	0.0328	3.8	0.0263	4.8	0.0219	5.7
		90	0.0422	3.2	0.0338	4.1	0.0281	5.0
	600	30	0.0063	5.5	0.0050	6.8	0.0042	8.0
		50	0.0104	5.5	0.0083	6.8	0.0069	8.1
		70	0.0146	3.5	0.0117	4.4	0.0097	5.3
		90	0.0188	3.0	0.015	3.8	0.0125	4.5
0.75	400	30	0.0281	4.7	0.0225	5.4	0.0188	6.1
		50	0.0469	4.7	0.0375	5.4	0.0313	6.1
		70	0.0656	2.7	0.0525	3.2	0.0438	3.7
		90	0.0844	2.4	0.0675	2.8	0.0563	3.3
	600	30	0.0125	3.4	0.0100	4.1	0.0083	4.8
		50	0.0208	3.4	0.0167	4.1	0.0139	4.8
		70	0.0292	2.0	0.0233	2.5	0.0194	3.0
		90	0.0375	1.7	0.0300	2.1	0.0250	2.6

Les résultats obtenus dans ce tableau montrent que les facteurs de ductilité en courbure disponible déterminés sont strictement inférieurs aux facteurs de ductilité en courbure minimaux de la formule [7], et plus particulièrement pour les valeurs élevées de f_{ck} , f_{yk} et ρ'/ρ . Ce résultat diffère totalement des recommandations de l'Eurocode 8 [2003], qui stipule que le facteur de la ductilité en courbure disponible déterminé devrait être supérieur où égal au facteur de la ductilité en courbure minimal déterminé par l'expression [7]. D'ici, on peut conclure que les sections transversales des poutres

fléchies dimensionnées par les pourcentages de ρ avoisinant à ρ_{max} de l'Eurocode 8 sont loin d'obéir au critère de la ductilité locale.

6. DETERMINATION DE ρ_{max} POUR UNE DUCTILITE MINIMALE DONNEE

Afin de mettre en évidence le critère de la ductilité locale dans les sections, en fonction de la résistance du béton f_{ck} , de la résistance de l'acier f_{yk} et du rapport ρ'/ρ , on compare les valeurs du pourcentage maximal d'armatures tendues ρ_{max} préconisé par l'Eurocode 8 [2003] avec celles obtenues par la procédure inverse de la méthode analytique (ρ_{anal}) décrite précédemment dans § 3. Les valeurs calculées sont présentées dans le tableau 2 pour $\mu_{\phi, min} = 8, 10$ et 12.

Tableau 2. Comparaison des pourcentages ρ_{max} obtenus par la formule [8] avec les pourcentages ρ_{anal} réels déterminés par la méthode analytique, correspondants à $\mu_{\phi, min} = 8, 10$ et 12.

ρ'/ρ	f_{yk} (MPa)	f_{ck} (MPa)	$\mu_{\phi, min} = 8$ [7]			$\mu_{\phi, min} = 10$ [7]			$\mu_{\phi, min} = 12$ [7]		
			ρ_{max} [8]	ρ_{anal}	$\frac{\rho_{max}}{\rho_{anal}}$	ρ_{max} [8]	ρ_{anal}	$\frac{\rho_{max}}{\rho_{anal}}$	ρ_{max} [8]	ρ_{anal}	$\frac{\rho_{max}}{\rho_{anal}}$
0.5	400	30	0.0141	0.0103	1.4	0.0113	0.0080	1.4	0.0094	0.0065	1.4
		50	0.0234	0.0170	1.4	0.0188	0.0133	1.4	0.0156	0.0105	1.5
		70	0.0328	0.0148	2.2	0.0263	0.0113	2.3	0.0219	0.0090	2.4
		90	0.0422	0.0160	2.6	0.0338	0.0123	2.8	0.0281	0.0095	3.0
0.5	600	30	0.0063	0.0043	1.5	0.0050	0.0033	1.5	0.0042	0.0026	1.6
		50	0.0104	0.0068	1.5	0.0083	0.0053	1.6	0.0069	0.0043	1.6
		70	0.0146	0.0060	2.4	0.0117	0.0045	2.6	0.0097	0.0038	2.6
		90	0.0188	0.0063	3.0	0.0150	0.005	3.0	0.0125	0.0038	3.3
0.75	400	30	0.0281	0.0120	2.3	0.0225	0.0088	2.6	0.0188	0.0068	2.8
		50	0.0469	0.0200	2.3	0.0375	0.0145	2.6	0.0313	0.0110	2.8
		70	0.0656	0.0158	4.2	0.0525	0.0115	4.6	0.0438	0.0088	5.0
		90	0.0844	0.0170	5.0	0.0675	0.0125	5.4	0.0563	0.0095	5.9
0.75	600	30	0.0125	0.0043	2.9	0.0100	0.0033	3.1	0.0083	0.0025	3.3
		50	0.0208	0.0070	3.0	0.0167	0.0053	3.2	0.0139	0.0040	3.5
		70	0.0292	0.0060	4.9	0.0233	0.0045	5.2	0.0194	0.0035	5.5
		90	0.0375	0.0063	6.0	0.0300	0.0048	6.3	0.025	0.0035	7.1

D'après les résultats illustrés dans le tableau 2, on constate que les pourcentages obtenus par la formule [8] de l'Eurocode 8 dépassent de loin les valeurs ρ_{anal} , qui correspondent réellement à $\mu_{\phi, min}$ de l'Eurocode 8. En effet, le rapport ρ_{max}/ρ_{anal} varie, pour $\rho'/\rho = 0.5$, de 1.4 à 1.6 pour $f_{ck} \leq 50$ MPa, et de 2.2 à 3.3 pour $f_{ck} > 50$ MPa. Par ailleurs, ce rapport est doublé pour $\rho'/\rho = 0.75$, tel qu'il varie entre 2.3 et 3.5 pour $f_{ck} \leq 50$ MPa et entre 4 et 7 pour $f_{ck} > 50$ MPa. Ceci montre que la formule [8] de l'Eurocode 8 donne des valeurs de ρ largement supérieures à la réalité analytique, ce qui défavorise la ductilité locale dans les poutres. D'ici, malgré que le critère de la ductilité locale est pris en compte, par l'Eurocode 8 [2003], durant le dimensionnement des poutres dissipatives pour les classes de ductilité DCM et DCH, les valeurs de ρ_{max} proposées par la relation [8] ne correspondent pas aux facteurs de ductilités minimaux pour lesquelles elles sont déterminées. D'ici, vient la nécessité

d'améliorer la formule [8], afin que les valeurs de ρ_{max} donnent des facteurs de ductilité disponibles supérieurs ou égaux à ceux correspondant à $\mu_{\phi,min}$.

7. CONCLUSION

Afin de vérifier le critère de la ductilité locale dans les sections transversales des poutres dissipatives, le principe de la méthodologie d'évaluation du facteur de la ductilité en courbure disponible a été exposé, on considérant les spécificités de l'Eurocode 2 concernant les lois de comportements du béton et de l'acier. D'après l'étude réalisée, les conclusions remarquables déduites sont les suivantes :

- l'Eurocode 8 revêt un intérêt particulier à la ductilité locale et exige son respect durant la conception, en imposant des valeurs minimales pour le facteur de ductilité en courbure $\mu_{\phi,min}$, et leur intégration dans le pourcentage maximale des armatures tendues ρ_{max} .
- La vérification du critère de la ductilité locale dans les sections transversales des poutres dissipatives, ayant le pourcentage maximal d'armatures tendues ρ_{max} adopté par l'Eurocode 8, a révélé que la ductilité disponible est toujours inférieure à la ductilité minimale $\mu_{\phi,min}$. Ce résultat diffère totalement des recommandations de l'Eurocode 8, qui exige que le facteur de la ductilité en courbure disponible doit être supérieur ou égal à $\mu_{\phi,min}$. D'ici, on peut conclure que les sections ayant des pourcentages de ρ avoisinant à ρ_{max} de l'Eurocode 8 sont loin d'obéir au critère de la ductilité locale.
- La formule de ρ_{max} de l'Eurocode 8 donne des valeurs largement supérieures à la réalité analytique, surtout pour les résistances élevées du béton, ce qui défavorise la ductilité locale dans les poutres.

Bien que, l'expression de la formule de ρ_{max} adoptée par l'Eurocode 8, constitue un progrès considérable dans la réglementation parasismique par la considération de la ductilité locale durant le dimensionnement, sa modification s'avère nécessaire afin qu'elle puisse fournir la ductilité minimale durant le dimensionnement.

8. REFERENCES

- ACI 318M. Building code requirements for structural concrete and commentary, ACI Committee 318 - Structural Building Code, 2005.
- Eurocode 2 2004, Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, Brussels.
- Eurocode 8 2003, Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, Brussels.
- Fuentes A. 1988, Comportement post-élastique des structures en béton armé, édition Eyrolles, Paris.
- Kassoul A. Ezziane K. & Kadri A. 2004, 'Nouveau pourcentage d'armature pour la condition de ductilité dans les poutres', Revue française de génie civil, 8 [7], 769-791.
- Park R. & Ruitong D. 1988, 'Ductility of doubly reinforced concrete beam sections', ACI-Structural Journal, 92, 217-225.
- RPA-99/ 2003. Règles parasismiques Algériennes 1999 - Version 2003. DTR-BC 248 - Centre National de Recherche Appliquée en Génie sismique (CGS), Alger.