

Chapitre1

REVUE GENERALE ET REGLEMENTAIRE SUR LA DUCTILITE LOCALE

1.1. INTRODUCTION

Ce chapitre se compose de trois parties, dans la première partie, nous allons donner un aspect général sur la ductilité des structures en béton armé, où on présente une définition de la ductilité, suivie par la relation entre la ductilité, la déformabilité et la fragilité, ensuite, les différents types de ductilité et la relation entre ces types seront présentés, en dernier lieu, on présente la relation entre les différentes classes de ductilité selon le règlement Eurocode 8. Dans la deuxième partie, on présente les critères requis pour les structures ductiles. Finalement, ce chapitre sera clôturé par une synthèse sur l'importance accordée à la ductilité locale des poutres en béton armé et leur prise en compte dans les différents codes sismiques à savoir : le règlement parasismique Algérien (RPA99/V-2003, 2003), le code Américain (ACI-318, 2014), le code Canadien (CSA-04, 2004), l'Eurocode 8 (EN 1998-1, 2003), le code Italien (NTC-08, 2008) ainsi que le code de la Nouvelle Zélande (NZS-3101, 2006) et le code Turc (TEC-07, 2007).

1.2. ASPECT GENERAL SUR LA DUCTILITE

1.2.1. Définition

Dans la conception parasismique, le terme ductilité est utilisé pour évaluer la performance des structures, en indiquant la quantité d'énergie sismique qui peut être dissipée par les déformations plastiques. L'utilisation de la notion de ductilité donne la possibilité de réduire les efforts de conception sismiques, et permet de produire des dégâts contrôlés dans la structure même en cas de fortes secousses sismiques. Dans l'analyse non linéaire des structures en béton armé, la ductilité définit la capacité d'une structure de subir une déformation après la fin de sa phase élastique, avec une dégradation significative de sa rigidité. Cette ductilité permet de prédire la capacité de déformation ultime d'une structure, qui constitue la propriété la plus importante pour la conception des structures sous charges exceptionnelles ou accidentelles (Gioncu et Mazzolani (2002), Bouzid et Kassoul (2016)).

1.2.2. Facteur de ductilité

Le facteur de ductilité μ est défini par le rapport entre la déformation maximale Δ_u et la déformation à la fin de la phase élastique Δ_y (Bertero (1988) ; Park (1989)) :

$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (1.1)$$

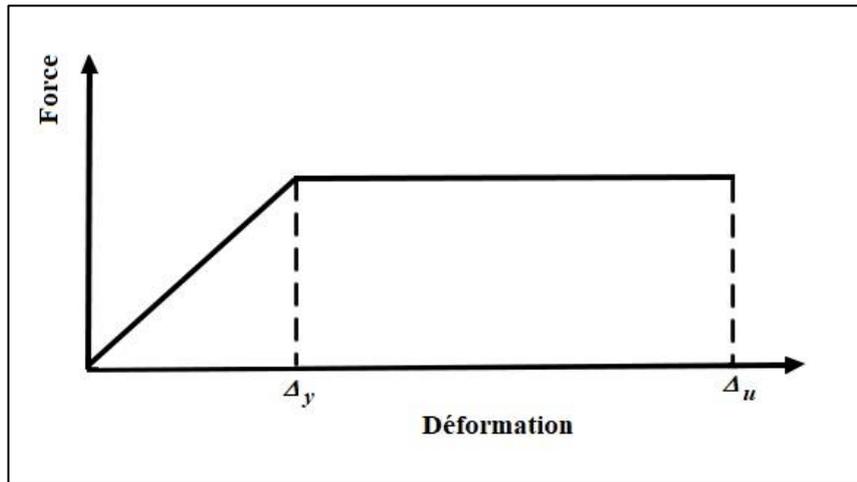


Figure 1.1 : Facteur de ductilité (Park (1989)).

1.2.3. Relation « Déformabilité – Ductilité »

La déformabilité est la capacité d'un matériau, d'un élément de structure ou d'une structure entière à se déformer avant la rupture. Par contre la ductilité est la capacité d'un matériau, d'un élément de structure ou d'une structure entière à subir une déformation après la fin de sa phase élastique, avec une réduction significative de sa rigidité (Bertero (1988)). La Figure 1.2 montre la différence entre la ductilité et la déformabilité

Il est noté qu'une structure peut avoir une grande déformabilité mais aura une faible ductilité.

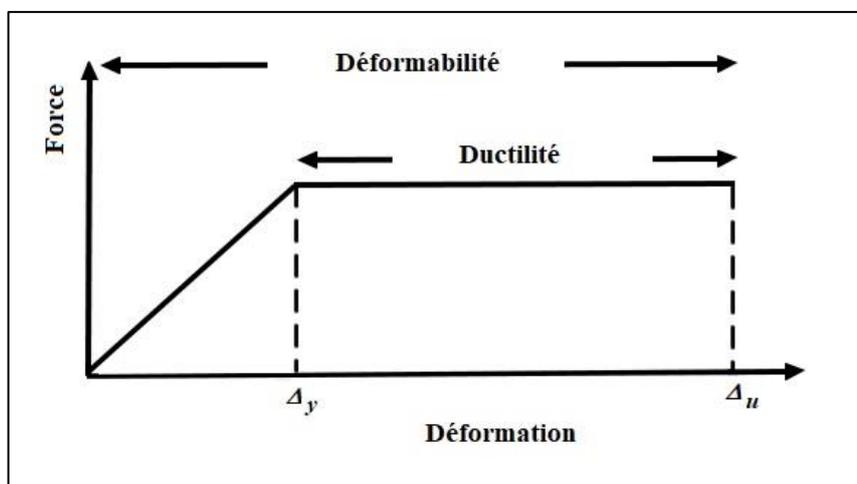


Figure 1.2 : Déformabilité –Ductilité –Facteur de ductilité (Bertero (1988) ;Kassoul(2015)).

1.2.4. Relation « Ductilité – Fragilité »

La ductilité est l'un des paramètres qui caractérisent le comportement post élastique de la structure. Pour les éléments en béton armé, lorsque le palier de plasticité est important, on dit que l'élément est ductile. Cependant, lorsque ce palier est court, on dit que l'élément est fragile (Figures 1.3 et 1.4). Généralement, un comportement fragile aura lieu dans le cas où l'élément est insuffisamment armé (quantité d'armature insuffisante) et dans le cas où l'élément est armé en excès, l'élément est dit rigide (Park (1989) ; Sebai (2012)).

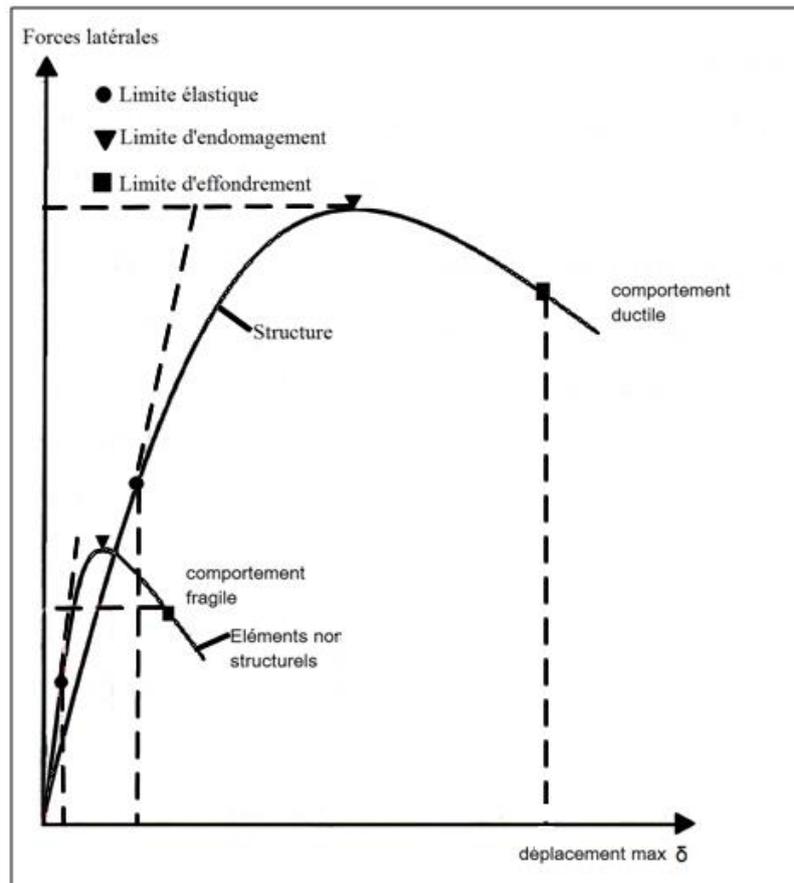


Figure 1.3 : Ductilité et fragilité (Gioncu et Mazzolani (2002) ; Sebai (2012)).

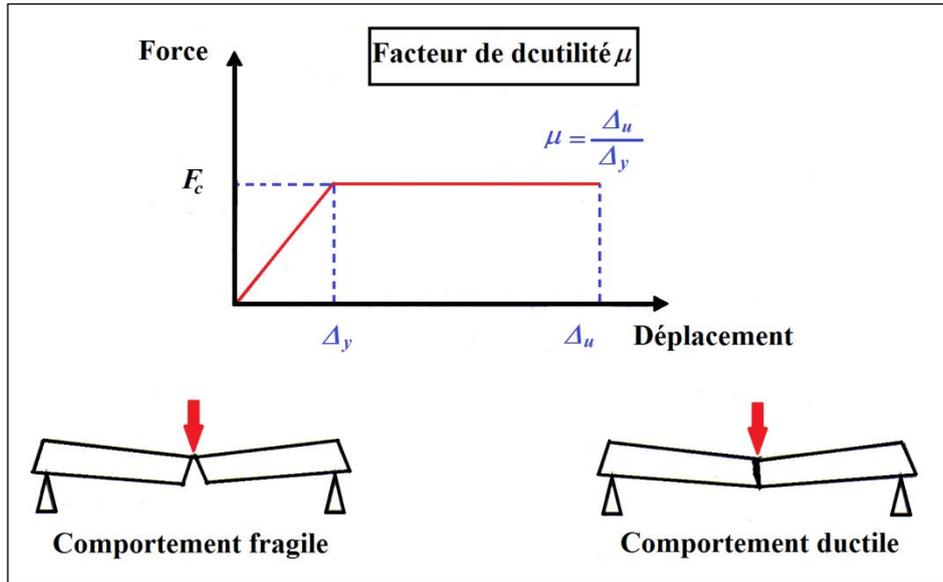


Figure 1.4 : Comportement « ductile et fragile » (Sebai (2012)).

1.2.5. Différents types de ductilité

L'analyse du comportement des structures nécessite la connaissance des critères caractérisant le domaine non linéaire de la structure, et de leurs composantes, à savoir ; les matériaux constituants, poutres, poteaux, voiles,etc. Dans la littérature, on rencontre cinq types de ductilité, qui sont résumés dans le Tableau 1.1 (Park (1989) ; Gioncu (2000)).

1.2.5.1. Ductilité de déformation

La ductilité de déformation ou la ductilité axiale caractérise les déformations élasto-plastique des matériaux pour différents types de chargement. Le facteur de cette ductilité est quantifié par le rapport de la déformation de rupture ε_u et la déformation à la fin de la phase élastique du matériau ε_y (Gioncu (2000)) ; où :

$$\mu_\varepsilon = \frac{\varepsilon_u}{\varepsilon_y} \quad (1.2)$$

1.2.5.2. Ductilité en courbure

La ductilité en courbure ou la ductilité locale renvoie à la déformation plastique de la section transversale, en considérant l'interaction entre les parties qui composent la section elle-même (Park (1989)) ; son facteur est exprimé par le rapport de la courbure ultime φ_u et la

courbure à la fin de la phase élastique φ_y (MacGREGOR (1974) ; Park et Ruitong (1988) ; Nakamura *et al.* (1992) ; Ziara *et al.*(1995) ; Al-Haddad(1995));où :

$$\mu_\varphi = \frac{\varphi_u}{\varphi_y} \quad (1.3)$$

1.2.5.3. Ductilité des éléments

La ductilité des éléments ou la ductilité en rotation considère les propriétés de l'élément entier (poutre ou poteaux), son facteur est déterminé par le rapport de la rotation ultime θ_u et la rotation à la fin de la phase élastique θ_y (Park (1989)) :

$$\mu_\theta = \frac{\theta_u}{\theta_y} \quad (1.4)$$

1.2.5.4.Ductilité de structure

La ductilité de structure ou la ductilité globale interpelle le comportement global de la structure entière. Ce type est exprimé par le rapport du déplacement ultime δ_u et le déplacement à la fin de la phase élastique δ_y , où :

$$\mu_\delta = \frac{\delta_u}{\delta_y} \quad (1.5)$$

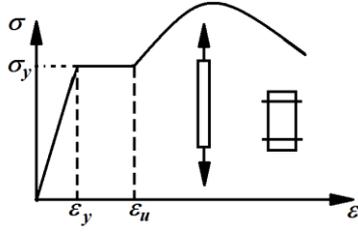
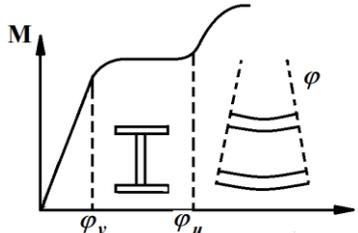
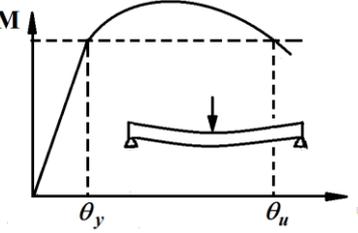
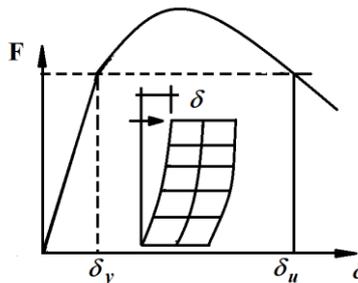
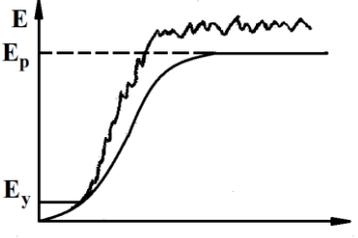
Généralement, ce facteur traduit le comportement des structures dans les codes parasismiques (Park (1989) ; Gioncu (2000)).

1.2.5.5.Ductilité énergétique

La ductilité énergétique considère le niveau de l'énergie sismique dissipée par la structure. Elle traduit l'aptitude de la construction à l'absorption et la dissipation d'énergie (Gioncu (2000)). Ce type de ductilité repose sur le critère d'égalité des énergies. Il est exprimé par le rapport entre les énergies maximales absorbées respectivement en élasticité (E_e) et en élasto-plasticité (E_p) :

$$\mu_E = \frac{E_p}{E_e} \quad (1.6)$$

Tableau 1.1 : Différent types de la ductilité (Park (1989) ; Gioncu (2000)).

N °	Type de ductilité	Configuration du type	Facteur de ductilité
1	Ductilité de déformation (déformation, ε)		$\mu_{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_u}{\varepsilon_y}$
2	Ductilité en courbure où locale (courbure, φ)		$\mu_{\varphi} = \frac{\varphi_u}{\varphi_y}$
3	Ductilité de l'élément (rotation, θ)		$\mu_{\theta} = \frac{\theta_u}{\theta_y}$
4	Ductilité de structure (globale, déplacement), δ		$\mu_{\delta} = \frac{\delta_u}{\delta_y}$
5	Ductilité énergétique (hystérétique), E		$\mu_E = \frac{E_p}{E_y}$

1.2.6. Ductilité locale et globale

1.2.6.1. Ductilité locale

La ductilité disponible résulte du comportement de la structure en tenant compte de sa performance, des propriétés des matériaux, du type de section, des charges gravitationnelles et de la dégradation de rigidité (Gionçu et Mazzolani (2002)). Elle est déterminée soit par la ductilité axiale, en courbure ou en rotation, selon les sollicitations des éléments. Ce type de ductilité est influencé par plusieurs paramètres. Le tableau 1.2 résume les éléments en béton armé et métalliques concernés et les paramètres influençant ce type de ductilité (Sebai (2012)).

Tableau 1.2 : Paramètres influençant la ductilité locale (Gioncu (2000)).

La ductilité locale (disponible)	
Éléments en béton armé	Assemblages métalliques
Matériau	Panneau d'assemblage
<ul style="list-style-type: none"> • Nuance d'acier • La vitesse de déformation • Qualité de béton 	<ul style="list-style-type: none"> • Type de panneau • Mécanisme de cisaillement • Mécanisme d'écrasement
Section transversale	Les semelles des poteaux en I
<ul style="list-style-type: none"> • Type de section • Élancement du mur • Interaction du mur 	<ul style="list-style-type: none"> • Type de poteau • Mécanisme plastique
Eléments	Liens
<ul style="list-style-type: none"> • Déformation-durcissement • Flambement • Les forces axiales • Charges cycliques 	<ul style="list-style-type: none"> • Type de liens • Mécanisme plastique local • Chargement cyclique • La vitesse de déformation

1.2.6.2. Ductilité globale

Une valeur très importante dans la conception sismique est la limite de ductilité ou la ductilité minimale que doit avoir la structure. Cette limite n'est pas nécessairement la plus grande dissipation d'énergie possible, mais un changement significatif du comportement structural, c'est la ductilité requise ou la demande d'une structure à un certain niveau de ductilité (Gioncu *et al.* (1997) ; Gioncu (1998) ; Gioncu et Mazzolani (2002)). Elle est quantifiée par la ductilité de déplacement ou la ductilité énergétique. Le tableau 1.3 résume les paramètres influençant ce type de ductilité (Sebai (2012)).

Tableau 1.3 : Paramètres influençant la ductilité globale (Gioncu (2000)).

La ductilité globale (requise)	
Mouvements de terre	Réponse de la structure
<p align="center">source</p> <ul style="list-style-type: none"> • Type de séisme • Profondeur du centre de séisme 	<p align="center">Fondation</p> <ul style="list-style-type: none"> • Type de fondation • L'isolement de la base • Mécanisme d'écrasement
<p align="center">Distance à la source</p> <ul style="list-style-type: none"> • Prés ou loin à la source • Atténuation 	<p align="center">Système de structure</p> <ul style="list-style-type: none"> • Type de structure • Mécanisme d'effondrement
<p align="center">Le site</p> <ul style="list-style-type: none"> • Profil de sol • Amplification • Durée 	<p align="center">Éléments non structuraux</p> <ul style="list-style-type: none"> • Interaction • Limite d'endommagement • Limite d'effondrement

1.2.7. Relation entre les différents types de ductilités

Dans les structures globales, la relation entre la ductilité disponible et la ductilité requise est aussi compliquée. Elle est en fonction de la topologie de la distribution d'énergie de la structure. La demande de ductilité globale peut correspondre à des demandes de ductilité locales beaucoup plus importantes. Par exemple, pour un pilier de pont un facteur de ductilité globale de 4 à 5 correspond à un facteur de ductilité locale varie entre 12 à 16 (Amret Luigi (2008) ; Kassoul (2015)). La Figure 1.5 montre une corrélation entre la ductilité locale et la ductilité globale.

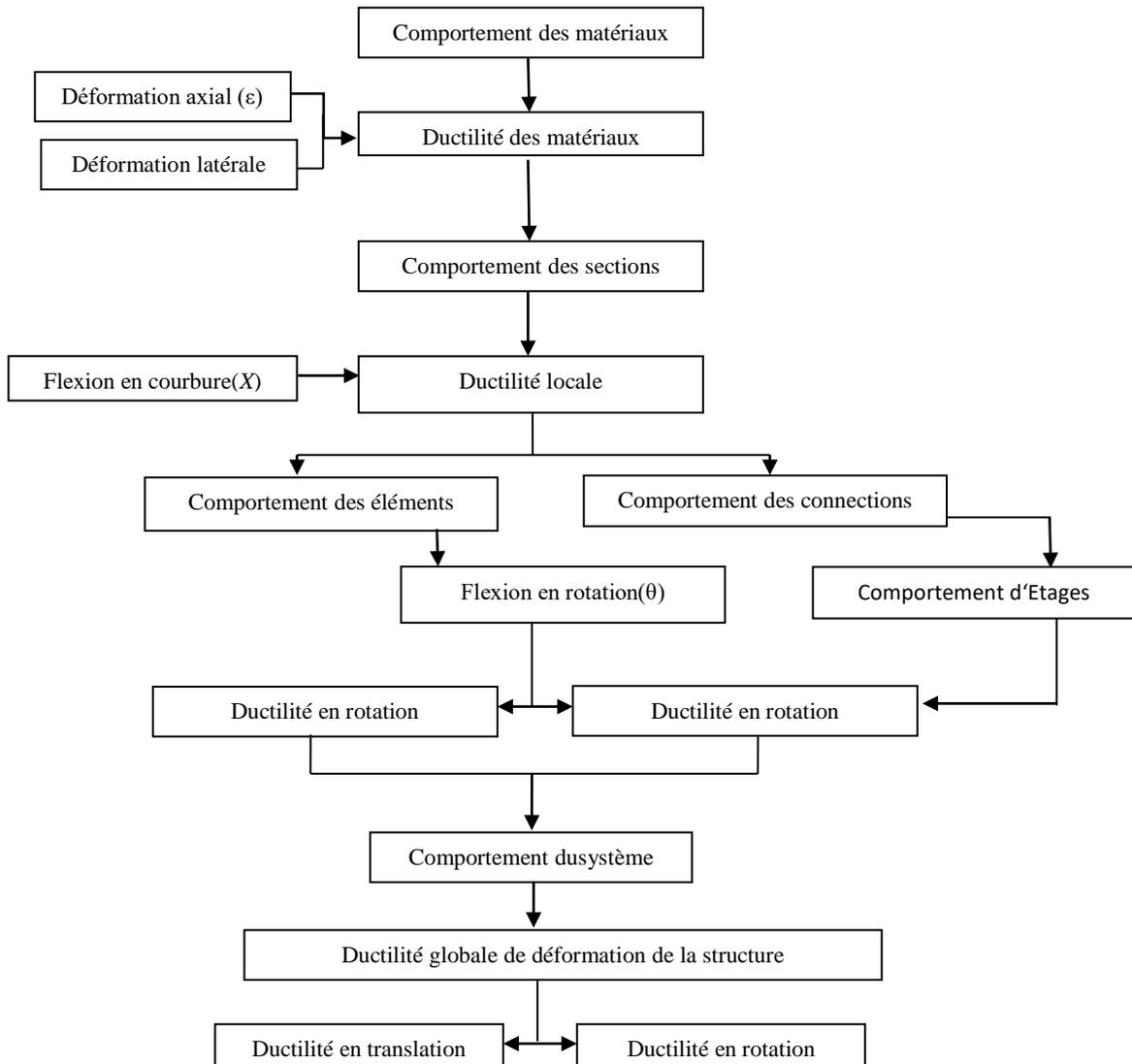


Figure 1.5 : Relation entre les différents types de ductilité (Amr et Luigi (2008) ; Sebai (2012)).

1.2.8. Classe de ductilité

L'Eurocode 8 (EN 1998-1, 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 locale disponible durant le dimensionnement de chaque section et la ductilité globale, en imposant des critères de ductilité locale. Il est à noter que le règlement parasismique algérien (RPA99/V-2003, 2003) appuie directement ces recommandations sur la conception des structures avec une classe de ductilité élevée (Kassoul (2015)). La Figure 1.6 montre bien les trois classes de la ductilité.

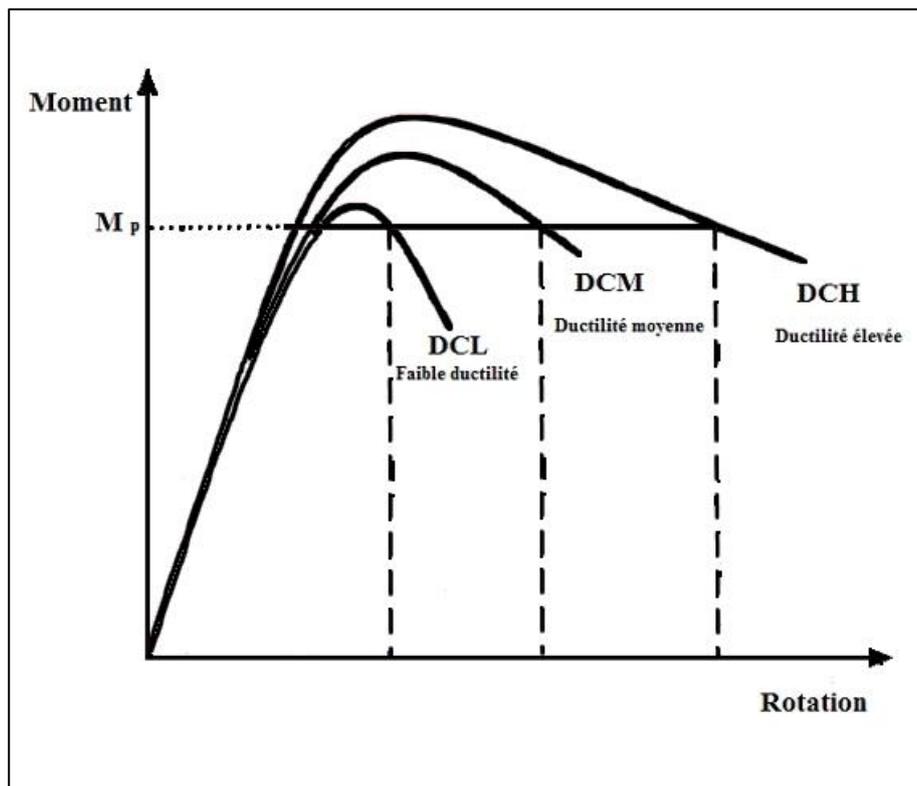


Figure 1.6 : Classes de ductilité des éléments (Gioncu et Mazzolani (2002) ; Mazzolani et Piluso (1993)).

1.3. CRITERES REQUIS POUR LES STRUCTURES DUCTILES :

Le niveau de sécurité optimal est assuré à travers un comportement élastique lors d'un séisme modéré, l'endurance des déformations post-élastiques lors d'un séisme sévère, sans jamais mettre en danger les vies humaines et la préservation de l'intégrité structurelle. Ainsi dans les différents règlements courants, le critère de calcul de la force sismique pour des structures ductiles a été établi sur la base que ces dernières seraient aptes à résister à des

séismes modérés sans dommages structurels et aptes à résister à des séismes sévères sans s'effondrer mais subissant éventuellement des dommages structurels et non structurels. Il devient donc nécessaire de définir au préalable le niveau ou la demande de ductilité (Hachemi (2004) ; Park (1992))

1.3.1. Demande de ductilité

Pour mieux visualiser le concept de demande de ductilité, considérons un portique à r niveaux soumis à un chargement monotone croissant. L'approche rationnelle consiste à :

- Choisir le mécanisme de déformation post-élastique favorisant un comportement flexionnel approprié,
- Garantir un mode de plastification conforme à la manière préconçue tout en évitant l'action de l'effort tranchant ou d'adhérence,
- Fournir une certaine capacité de résistance à ces structures.

Les régions dissipatives d'énergie sont alors :

- Préalablement choisies,
- Convenablement conçues,
- Soigneusement ferrillées afin de fournir une capacité de résistance et de déformation adéquates.

1.3.2. Mécanismes de ruine

La position des rotules plastiques, dépend essentiellement de la demande de ductilité Souhaitée (Bousalem et *al.* (1999)).

1.4. Ductilité locale des poutres dans les différents codes sismiques

1.4.1. Règlement parasismique Algérien RPA 99/V-2003

On rappelle les pourcentages d'armatures exigés par le règlement parasismique Algérien (RPA99/V-2003, 2003) :

- Le pourcentage total ($\rho + \rho'$) minimum des aciers longitudinaux sur toute la longueur de la poutre égal à 0,5 % ;
- Le pourcentage total ($\rho + \rho'$) maximum des aciers longitudinaux en zone courante égal à 4 % ;
- Le pourcentage total ($\rho + \rho'$) maximum des aciers longitudinaux en zone de recouvrement égal à 6 %.

Comme il exige certaines dispositions pour les armatures comprimées qui doivent être supérieures à 50 % des armatures tendues.

Il est à noter que ces pourcentages du règlement RPA sont considérés pour une classe de ductilité élevée (DCH). Ces valeurs seront discutées largement dans l'étude paramétrique.

1.4.2. Code Américain ACI-318

Le code américain ACI (ACI-318, 2014) limite le pourcentage d'armatures tendues à $0,75\rho_b$, cette valeur fournira un comportement ductile pour la plupart des structures. Pour les poutres avec armatures comprimées le code ACI limite le taux $(\rho - \rho')$ comme suit :

$$(\rho - \rho') \leq 0,75\rho_b \quad (1.7)$$

Où, ρ_b est le pourcentage de balancement, ce paramètre sera discuté par la suite dans la troisième partie. D'après le code ACI (ACI-318, 2014), le pourcentage de balancement est exprimé par la relation suivante :

$$\rho_b = \frac{0,85\beta_1 f'_c}{f_y} \left(\frac{600}{600 + f_y} \right) \quad (1.8)$$

Avec :

f'_c est la résistance du béton, f_y est la limite élastique des aciers ;

β_1 est le rapport entre le rectangle de béton équivalent et la profondeur de l'axe neutre, où il égale à :

$$\beta_1 = \begin{cases} 0,85 & \text{si } f'_c \leq 30\text{MPa} \\ 0,85 - 0,008(f'_c - 30) \geq 0,65 & \text{si } f'_c > 30\text{MPa} \end{cases} \quad (1.9)$$

Pour les structures avec une ductilité importante, le pourcentage d'armatures tendues dans les régions critiques est limité par la valeur $0,5\rho_b$. Dans le cas des poutres avec armatures comprimées, le code américain ACI-318 (ACI-318, 2014) limite le taux $(\rho - \rho')$ par la valeur $0,5\rho_b$:

$$(\rho - \rho') \leq 0,5\rho_b \quad (1.10)$$

Le code ACI-318 (ACI-318, 2014) fournit aussi un pourcentage d'armatures minimal comme suit :

$$\rho_{\min} = \rho'_{\min} = \max\left(0,25 \frac{\sqrt{f'_c}}{f_y}; \frac{1,38}{f_y}\right) \quad (1.11)$$

1.4.3. Code Canadien CSA-04

Selon le code canadien CSA (CSA-04, 2004), les sections d'armatures tendues (A_s) et comprimées (A'_s) doivent respecter la condition suivante :

$$A_s, A'_s \geq 1,4 \frac{b_w d}{f_{yk}} \quad (1.12)$$

Où, b_w est la largeur de la section du béton, d est la hauteur utile de la section du béton et f_{yk} est la limite élastique des aciers.

Pour assurer un comportement ductile le code CSA (CSA-04, 2004) limite le pourcentage d'armatures tendues ρ par 0,025 (2,5 %).

1.4.4. Eurocode 8

L'Eurocode 8 (EN 1998-1, 2003) relie le pourcentage maximal d'armatures tendues dans les poutres avec la ductilité locale requise comme suit :

$$\rho_{\max} = \rho' + \frac{0,0018 f_{cd}}{\mu_{\varphi} \varepsilon_{sy} f_{yd}} \quad (1.13)$$

Où, ρ_{\max} est le pourcentage maximal d'armatures tendues, ρ' est le pourcentage d'armatures comprimées, μ_{φ} est le facteur de la ductilité locale, f_{cd} est la résistance à la compression du béton, f_{yd} est la contrainte dans l'armature et ε_{sy} est la déformation de l'armature sous charge maximale.

Aussi, un pourcentage d'armatures tendues minimal a été fourni comme suit :

$$\rho_{\min} = 0,5 \left(\frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \right) \quad (1.14)$$

Où, f_{ctm} est la résistance moyenne du béton à la traction et f_{yk} est la limite élastique des aciers.

1.4.5. Code Italien NTC-08

D'une manière similaire que l'Eurocode 8 (EN 1998-1, 2003), le code italien NTC-08 (NTC-08, 2008) fournit un pourcentage d'armatures tendues pour assurer une ductilité locale

adéquate dans les régions critiques. Mais dans la formule il n'y a pas une dépendance explicite entre la ductilité locale et le pourcentage d'armatures tendues, cette formule est donnée comme suit :

$$\frac{1,4}{f_{yk}} < \rho < \rho' + \frac{3,5}{f_{yk}} \quad (1.15)$$

Où, ρ est le pourcentage d'armatures tendues, ρ' est le pourcentage d'armatures comprimées et f_{yk} est la limite élastique des aciers.

En outre, dans les régions critiques, les deux codes l'Eurocode 8 (EN 1998-1, 2003) et NTC(NTC-08, 2008) exigent que le taux d'armatures comprimées doit être supérieur à la moitié du taux d'armatures tendues, c'est-à-dire :

$$\rho' \geq 0,5\rho \quad (1.16)$$

1.4.6. Code de la Nouvelle Zélande NZS-3101

Le code de la nouvelle Zélande (NZS-3101, 2006) limite le pourcentage d'armatures tendues dans les régions critiques par l'expression suivante :

$$\rho_{max} = \frac{f'_c + 10}{6f_y} \leq 0,025 \quad (1.17)$$

Où, f'_c est la résistance du béton et f_y est la limite élastique des aciers.

1.4.7. Code Turc TEC-07

Le code Turc (TEC-07, 2007) a donné un pourcentage d'armatures tendues minimal et maximal pour les poutres ayant un niveau de ductilité élevé ; le pourcentage minimal est donné par la relation suivante :

$$\rho_{min} = 0,8 \left(\frac{f_{ct}}{f_{yk}} \right) \quad (1.18)$$

Où, f_{ct} est la résistance du béton à la traction et f_{yk} est la limite élastique des aciers.

La résistance du béton à la traction f_{ct} est donnée par :

$$f_{ct} = 0,35\sqrt{f_{ck}} \quad (1.19)$$

D'autre part, le pourcentage d'armatures tendues maximal ρ_{max} est limité par 2 %, cette valeur est spécifiée dans le code Turc TS-500 (TS-500, 2000) pour assurer une ductilité élevée.

1.5. CONCLUSION

Un aspect général et réglementaire sur la ductilité des structures en béton armé et sur la ductilité locale en particuliers a été présenté dans cette section. À la lecture de ce chapitre, nous pouvons noter que :

- Dans la conception parasismique la ductilité est une propriété indispensable, où le niveau de sécurité des constructions contre les efforts sismiques est assuré par un comportement élastique ou ductile.
- Chaque type de ductilité est défini par son facteur de ductilité ;
- L'Eurocode 8 (EN 1998-1, 2003) classe les structures en trois classes de ductilité faible, moyenne et élevée ;
- Les différents codes parasismiques assurent un comportement ductile aux poutres par la limitation du taux d'armatures longitudinales.