

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



Département de Génie Civil
Laboratoire des Matériaux de Génie Civil et Environnement

Mémoire de Master en Génie Civil
Thème

Ductilité et comportement sismique des structures

MANSOURI Redha

Présenté et soutenu publiquement le 04octobre2017

Composition du Jury :

Président	Mr	A.LARIBI	M.C.B	ENP
Promotrice	Mme	R.MITICHE-KETTAB	Professeur	ENP
Examineurs	Mr	R.BOUTEMEUR	M.A.A	ENP
	Mr	M.DEMIDEM	M.A.A	ENP

ENP 2017

**Ecole Nationale Polytechnique 10, Avenue Hassen Badi BP182 El- Harrach
16200 Alger (Algérie)
Tel:213 21 52 53 01/03 -Fax:213 21 52 29 73**

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



Département de Génie Civil
Laboratoire des Matériaux de Génie Civil et Environnement

Mémoire de Master en Génie Civil
Thème

Ductilité et comportement sismique des structures

MANSOURI Redha

Présenté et soutenu publiquement le 04octobre2017

Composition du Jury :

Président	Mr	A.LARIBI	M.C.B	ENP
Promotrice	Mme	R.MITICHE-KETTAB	Professeur	ENP
Examineurs	Mr	R.BOUTEMEUR	M.A.A	ENP
	Mr	M.DEMIDEM	M.A.A	ENP

ENP 2017

**Ecole Nationale Polytechnique 10, Avenue Hassen Badi BP182 El- Harrach
16200 Alger (Algérie)
Tel:213 21 52 53 01/03 -Fax:213 21 52 29 73**

ملخص

المخاطر الزلزالية هي سبب عدة حالات اجتماعية واقتصادية مكلفة وخطيرة من حيث عدد الضحايا والأضرار التي تلحق بهياكل المباني والجسور. هذا هو السبب في جعل معرفة سلوك هذه الهياكل أمر ضروري. الهدف من هذا العمل هو دراسة سلوك المباني تحت الضغوط الزلزالية وفقا للقوانين الزلزالية المعمول بها. ويهدف هذا الموضوع المقترح أيضا الى دراسة ليونة الهياكل، معامل السلوك و تأثير هذين العاملين على السلوك الزلزالي لهياكل المباني.

الكلمات المفتاحية:

زلزال، هيكل، ليونة، معامل السلوك.

Abstract

Seismic risks are the cause of costly and serious socio-economic situations in terms of the number of victims and damage to buildings. They occupy a current problem provoking systematically damage in civil engineering works (buildings, bridges ...). This is why the prevention and knowledge of the behavior of these structures is essential.

The aim of this work is to control the behavior of structures under seismic stresses according to the seismic code, the proposed subject aims at the study of seismic behavior of structures, the identification of the ductility of structures, the behavior coefficient; and to study the influence of two factors on the seismic behavior of structures.

Keywords:

Earthquake, Structure, Ductility, behavior coefficient.

Résumé

Les risques sismiques sont à l'origine de situations socio-économiques coûteuses et graves en termes de nombre de victimes et d'endommagement des constructions. Ils occupent un problème d'actualité provoquant assez systématiquement des dégâts dans les ouvrages de génie civil (bâtiments, ponts, ...). C'est la raison pour laquelle la prévention et la connaissance du comportement de ces ouvrages sont indispensables.

Le but de ce travail est de maîtriser le comportement des structures sous sollicitation sismique dimensionnées selon le code parasismique. Le sujet proposé vise donc l'étude de comportement sismique des structures, l'identification de la ductilité des structures, le coefficient de comportement; et d'étudier l'influence de ces deux facteurs sur le comportement sismique des structures.

Mots clés :

Séisme, Structure, Ductilité, Coefficient de comportement.

Remerciements

Je remercie tout d'abord ALLAH le tout puissant de m'avoir donné la volonté, la santé et le courage afin de finaliser ce modeste travail.

Je remercie cordialement mes parents qui m'ont aidé et soutenu tout au long de mes études.

C'est avec une profonde reconnaissance et considération particulière que je remercie ma promotrice: Mme R. KETTAB, pour sa disponibilité et ses précieuses orientations

Je remercie les membres du jury qui m'ont fait l'honneur de présider et d'examiner ce modeste travail.

Toute ma gratitude aussi à tous les enseignants qui ont contribué à ma formation durant tous les cycles.

Mes remerciements vont également à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce projet.

Table des matières

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des symboles

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale 8

CHAPITRE I : LA DUCTILITÉ

I.1. Introduction 10

I.2. Ductilité 10

 I.2.1. Définition 10

 I.2.2. Ductilité des matériaux 11

 I.2.2.1. Ductilité du béton 11

 I.2.2.2. Ductilité des aciers 12

I.2.3. Ductilité des éléments structuraux 12

I.2.4. Ductilité globale et locale des structures 12

I.3. Manières de quantification de la ductilité 13

 I.3.1. Ductilité des déformations 13

 I.3.2. Ductilité de courbure 14

 I.3.3. Ductilité de rotation 14

 I.3.4. Ductilité de déplacement 15

I.4. Conclusion 15

CHAPITRE II : COMPORTEMENT SISMIQUE LINEAIRE ET NON LINEAIRE DES STRUCTURES

II.1. Introduction 17

II.2. Mécanismes de résistance des constructions aux séismes 17

 II.2.1. Capacité des constructions a stocké l'énergie 17

 II.2.2. Capacité des constructions a dissipé l'énergie 18

II.3. Modèles de comportement non linéaire des structures 18

II.4. Rotules plastiques 20

 II.4.1. Définition de la rotule plastique 20

 II.4.2. Caractéristiques des rotules plastiques 21

 II.4.3. Critère de ruine en rotation 22

II.5. Mécanismes de rupture des structures en béton armé 22

II.6. Conclusion 23

CHAPITRE III : COEFFICIENT DE COMPORTEMENT

III.1. Introduction 25

III.2. Coefficient de comportement 25

 III.2.1. Pourquoi un coefficient de comportement 25

 III.2.2. Définition du coefficient de comportement 25

 III.2.3. Contenu du coefficient de comportement 26

III.3. Historique de l'évaluation de coefficient de comportement 27

III.4. Coefficient de comportement dans les codes parasismiques 29

TABLE DES MATIERES

III.5. Coefficient de comportement dans les règlements parasismiques algériens	30
III.5.1. Coefficient de comportement des structures en béton armé	32
III.6. Paramètres influant sur le coefficient de comportement	32
III.6.1. Ductilité	32
III.6.2. Période propre	32
III.6.3. Amortissement	33
III.6.4. Type de sol	33
III.6.5. Régularité de la structure	33
III.6.6. Commentaires	33
III.7. Evaluation du coefficient de comportement	33
III.7.1. Critères d'évaluation du coefficient de comportement	34
III.7.2. Choix du critère	35
III.8. Conclusion	35
CONCLUSION GENERALE	
Conclusion générale	36
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	
Références Bibliographiques	37

Liste des figures

CHAPITRE I : LA DUCTILITÉ

Figure. I.1 : Définition de la ductilité	10
Figure. I.2 : Ductilité en déformations	11
Figure. I.3 : Représentation schématique de Courbe contrainte-déformation en Compression d'un élément en béton armé	12
Figure. I.4 : Relation entre ductilité globale (μ_{Δ}) et ductilité locale (μ_{ϕ}) pour une poutre console	13
Figure. I.5 : Elément après déformation.	13
Figure. I.6 : Relation moment-courbure	14
Figure 1.7 : Diagramme Rotation d'une poutre encastree soumise à une force	14
Figure.I.8 : Déplacement au sommet du bâtiment	15

CHAPITRE II : COMPORTEMENT SISMIQUE LINEAIRE ET NON LINEAIRE DES STRUCTURES

Figure II.1: Diagrammes contraintes – déformations et charges – déformations	17
Figure II.2: Modèle viscoplastique parfait. (a) : éléments constitutifs. (b) : diagramme force élastique-déplacement de l'élément élasto-plastique parfait	18
Figure II.3: Modèle viscoplastique écruissable. (a) : éléments constitutifs. (b) : diagramme force élastique -déplacement de l'élément élasto-plastique écruissable.	19
Figure II.4: Diagramme force élastique-déplacement d'un élément d'endommagement	19
Figure II.5: Éléments constitutifs du modèle endommageable	20
Figure II.6 : Exemple de dommages d'un bâtiment après l tremblement de terre de boumerdes 2003	20
Figure II.7 : Endommagement d'un portique à 2 étages par flexion dans les zones critiques des poteaux dans une installation portuaire lors du séisme de buhj (inde) en 2001	21
Figure II.8 : Ruine d'un poteau court dans un magasin de stockage lors du séisme de buhj (Inde) en 2001	21
Figure II.9 : Rupture par cisaillement d'un poteau béton armé lors du séisme de Kalamata (Grèce) en 1986	22
Figure II.10: Mécanismes de ruine possibles pour un portique à 3 étages	23

CHAPITRE III : COEFFICIENT DE COMPORTEMENT

Figure. III.1 : Determination du facteur de comportement	26
Figure.III.2 : principe d'égalité des déplacements	34
Figure.III.3 : Principe d'égalité des énergies	35

Liste des symboles

μ : Coefficient de ductilité.

μ_ε : Coefficient de ductilité en déformation.

μ_θ : Coefficient de ductilité en rotation.

μ_g : Coefficient de ductilité globale.

μ_\emptyset : Coefficient de ductilité locale.

μ_x : Coefficient de ductilité de courbure.

μ_Δ : Coefficient de ductilité en déplacement.

ρ : Masse.

K_{ep} : Raideur de ressort élastique.

X_y : Déplacement.

F_y : Force seuil élastique.

C : Amortisseur visqueux.

R ou q : Coefficient de comportement.

T : Périodes.

B : Coefficient de comportement .

Introduction générale

Lors d'un séisme important, l'action sismique impose aux structures des déformations cycliques et dynamiques.

L'action sismique agit sur une structure en lui appliquant une d'énergie. Cette énergie absorbée par la structure doit être dissipée soit par amortissement soit par des déformations élastiques et plastiques.

Pour une même sollicitation sismique, une structure ductile pourra être dimensionnée pour une résistance moins importante qu'une structure non ductile, d'où l'intérêt de choisir un comportement ductile. Cependant, dans ce cas, des exigences supplémentaires doivent être respectées pour garantir une ductilité suffisante des éléments de la structure.

L'effet favorable de la capacité de la structure à dissiper l'énergie introduite sous forme de déformations plastiques ainsi que sa résistance sont pris en compte par un coefficient de réduction.

Les maxima des sollicitations s'exerçant dans la structure réelle sont respectivement égaux à ceux de la structure fictive mais divisés par un coefficient de comportement noté R ou q .

Donc il existe une relation implicite entre la ductilité d'une structure et son coefficient de comportement.

Mais, peut-t-on quantifier le paramètre de la ductilité et est ce qu'il y a d'autres paramètres qui influent sur ce coefficient de comportement qu'il faut prendre en considération ?

Dans ce qui suit, on va essayer de répondre à cette question et comparer ces paramètres avec ceux du règlement parasismique algérien (RPA).

Le présent mémoire comprend trois chapitres :

- Le premier chapitre consiste des notions sur la ductilité
- Le deuxième chapitre présente le comportement sismique linéaire et non linéaire des structures
- Le troisième chapitre s'intéresse au coefficient de comportement

On terminera le travail par une conclusion générale.

CHAPITRE I :

LA DUCTILITÉ

I.1. Introduction

Lors d'une excitation sismique, la structure subit des déformations en phase post-élastique qui ont pour effet de diminuer les forces agissant dans la structure ; ces déformations interviennent de ce fait comme des limiteurs d'efforts.

Les forces d'inertie qui apparaissent du fait des actions sismiques dans un élément structural résultent des actions transmises par les liaisons de cet élément avec le reste de la structure.

Les déformations correspondant à ces forces peuvent atteindre un niveau inacceptable pour lequel la ruine est inévitable par instabilité de forme ou plastique.

La plupart des matériaux présentent une capacité importante de déformation plastique avant rupture ; donc il est possible d'obtenir une sécurité acceptable en autorisant des incursions dans le domaine plastique. Cette propriété fondamentale est appelée ductilité.

I.2. Ductilité

I.2.1. Définition

La ductilité est une caractéristique importante des structures devant résister aux séismes par la formation d'un mécanisme plastique global. Mais qu'est-ce que la ductilité ?

Le terme ductilité définit la capacité d'une structure et de ses différents éléments présélectionnés à se déformer inélastiquement sans perte excessive de la résistance et de la raideur.

La ductilité est le paramètre clé du comportement parasismique. D'une manière générale, en admettant un comportement idéalisé selon la figure I.1, la ductilité (u_{tot}/u_y) est définie comme le rapport entre la déformation totale (u_{tot}) et la déformation à l'initiation de la plastification (u_y). Cette définition s'applique aux déformations au sens large du terme, c'est-à-dire aux déplacements, aux courbures, aux rotations, aux allongements, etc.

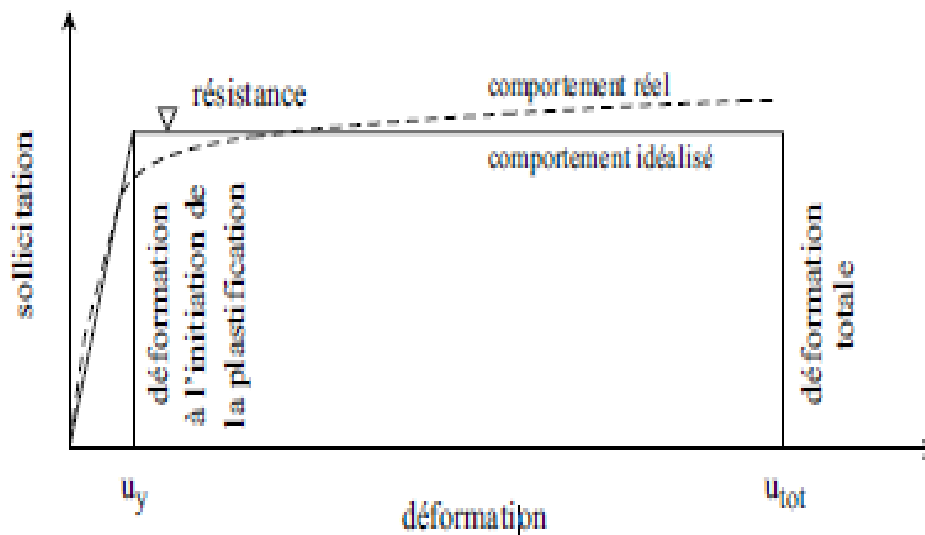


Figure.I.1: Définition de la ductilité. [1]

I.2.2. Ductilité des matériaux

La ductilité des matériaux est une caractéristique mécanique qui explique leur capacité à stocker l'énergie lors l'application brutale des forces.

Les matériaux sont dits ductiles lorsqu'ils peuvent absorber sans dommage une quantité importante d'énergie par unité de volume.

La ductilité des matériaux est mesurée par le rapport de la déformation ultime ϵ_{μ} atteinte au moment de la rupture, à la déformation élastique maximale ϵ_e (voir Fig. I.2).

Ce rapport est appelé coefficient de ductilité en déformation noté μ_{ϵ} :

$$\mu_{\epsilon} = \frac{\epsilon_{\mu}}{\epsilon_e}$$

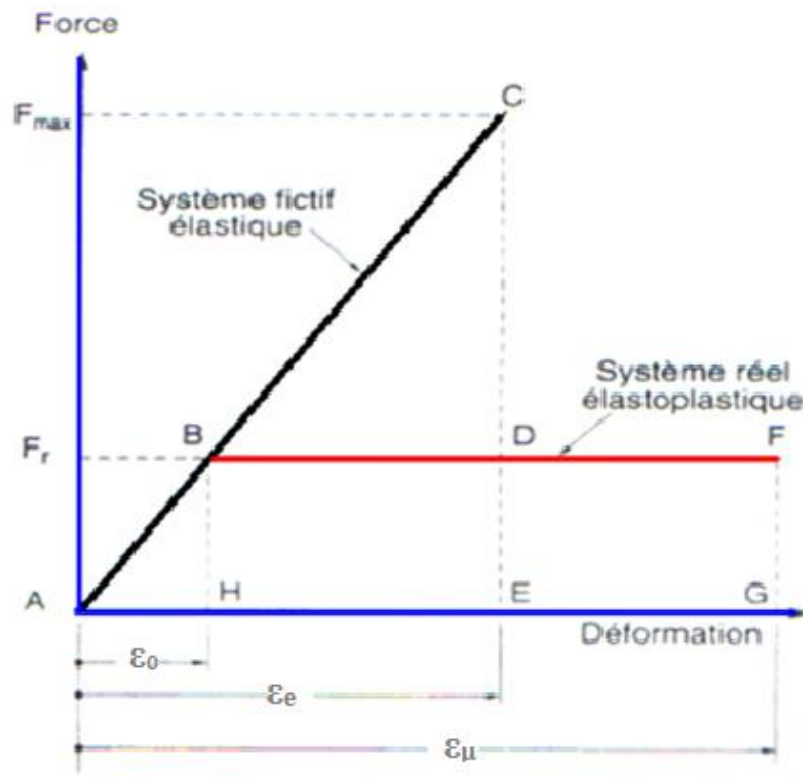


Figure.I.2 : Ductilité en déformations [2]

I.2.2.1. Ductilité du béton

Le béton est un matériau non homogène par nature qui montre un comportement hautement non linéaire différent en traction et en compression.

Ce matériau permet la réalisation des structures rigides limitant les dégâts des éléments non structuraux mais il possède deux défauts majeurs :

- ✓ Masse volumique importante.
- ✓ Résistance à la traction négligeable.

La courbe contrainte - déformation est linéaire jusqu'à environ 40% de la contrainte maximale de compression F_c , pour les contraintes supérieures à $0,4F_c$, la contrainte commence à s'écarter graduellement de la droite élastique jusqu'à une contrainte comprise entre $0,75$ et $0,90 F_c$. (voir Fig.I.3)

Au delà du pic de résistance, la valeur de la contrainte diminue jusqu'à l'écrasement du béton pour une déformation ultime ϵ_{μ} .

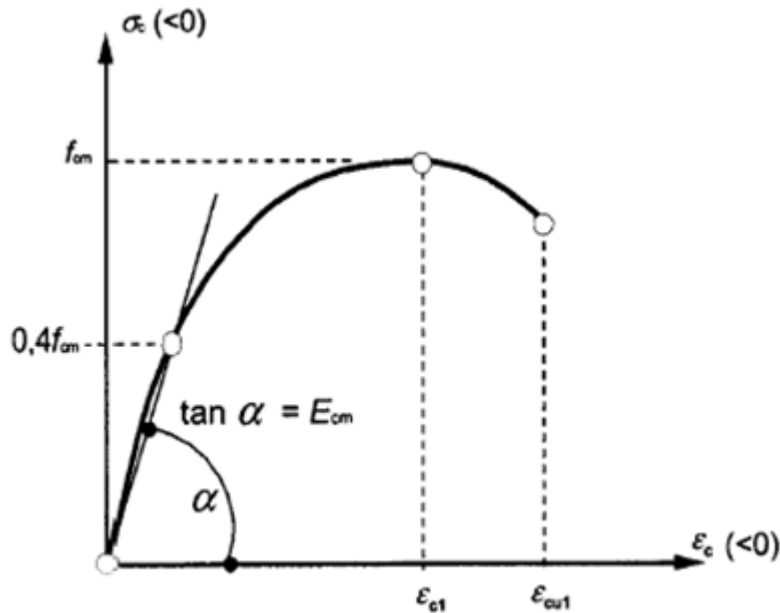


Figure.I.3 : Représentation schématique de Courbe contrainte – déformation en Compression d'un élément en béton [2]

I.2.2.2. Ductilité des aciers

L'acier est un matériau de construction homogène et résistant, il résiste aussi bien à la traction qu'à la compression et ainsi supporte mieux que les autres matériaux les structures présentant une alternance de ces deux efforts.

L'acier est très ductile et peut donc absorber beaucoup d'énergie cinétique au cours de ses déformations élastiques, et dissipe par conséquent bien l'énergie à travers ces déformations plastiques.

I.2.3. Ductilité des éléments structuraux

Elle exprime le rapport entre la rotation maximale θ_u et celle élastique θ_e que peut subir l'élément structural ; on peut dire qu'elle est mesurée par le coefficient de ductilité en rotation noté μ_θ :

$$\mu_\theta = \frac{\theta_u}{\theta_e}$$

Cette ductilité nous permet de donner une bonne distribution des moments dans la structure en assurant une performance d'un élément ou d'une liaison de la structure.

I.2.4. Ductilités globale et locale des structures

➤ La ductilité globale d'une structure correspond au rapport des déplacements horizontaux maximaux U_u au sommet aux déplacements horizontaux élastiques U_y :

$$\mu_g = \frac{U_u}{U_y}$$

Donc cette ductilité est exprimée en fonction de la ductilité en déplacement notée μ_g . Elle permet de déterminer le coefficient de comportement R ou q (par une règle empirique comme celle des déplacements égaux, par exemple).

- La ductilité locale considère les déformations au niveau des zones plastiques (rotules). Elle correspond aux sollicitations effectives des matériaux et ses valeurs sont nettement plus élevées que celles de la ductilité globale.

La relation entre ductilité locale et ductilité globale pour une poutre console est représentée à la figure I.4 :

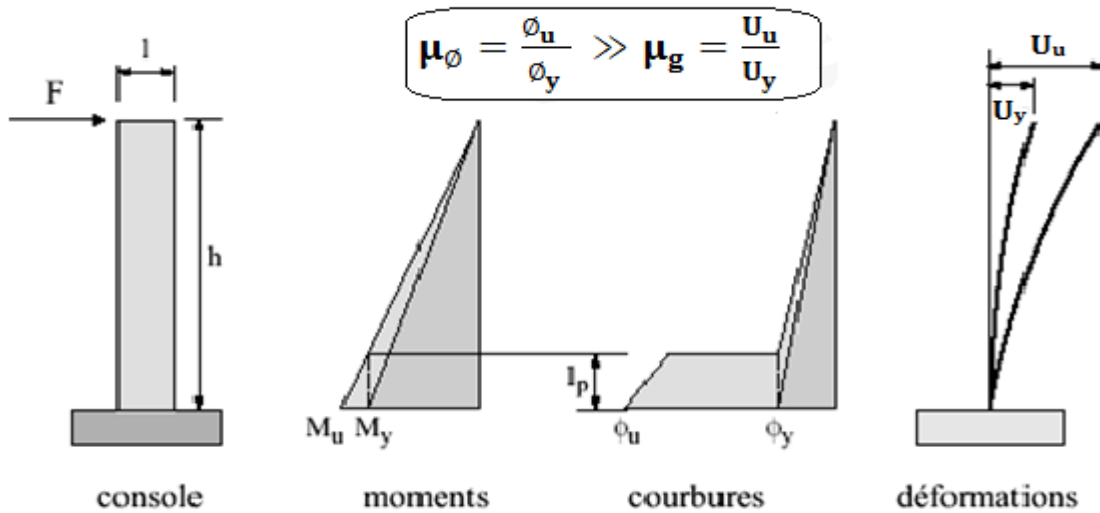


Figure.I.4 : Relation entre ductilité globale (μ_g) et ductilité locale (μ_ϕ) pour une poutre console.

La relation qui existe entre ces facteurs est la suivante :

$$\mu_\varepsilon > \mu_\phi > \mu_g$$

- Pour les éléments dont le rapport (hauteur/longueur) est assez grand (exemple : voiles de contreventement en béton armé) :

$$\mu_\phi = \mu_g$$

- pour les poutres et poteaux de section courante :

$$\mu_\phi > \mu_g$$

I.3. Quantification de la ductilité

I.3.1. Ductilité des déformations

La source de la ductilité est la capacité des matériaux à supporter des déformations plastiques sans réduction importante des contraintes.

On définit la ductilité des déformations comme le rapport de la déformation totale ε_{tot} imposée à la déformation élastique ε_y :

$$\mu_\varepsilon = \frac{\varepsilon_{tot}}{\varepsilon_y}$$



Figure.I.5 : Elément après déformation

Cette ductilité est liée à la capacité de déformation locale des matériaux.

I.3.2. Ductilité de courbure

Dans les poutres, c'est la capacité de rotation dans les rotules plastiques qui nous intéresse. On peut définir une ductilité de courbure (rotation par unité de longueur) comme étant le rapport de la courbure maximale à la courbure élastique soit:

$$\mu_x = \frac{X_m}{X_y} \quad (\text{Voir Fig.I.6})$$

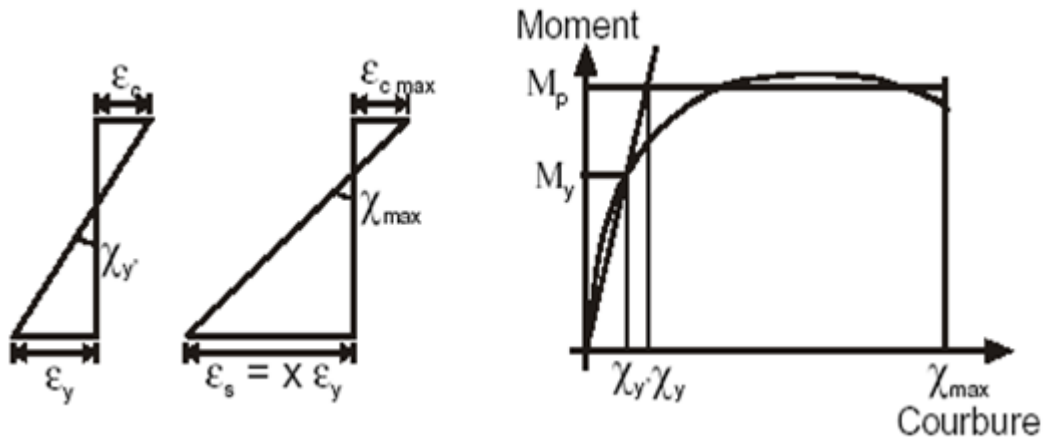


Figure.I.6 : Relation moment-courbure

Dans le cas d'une section mixte, il faut distinguer la capacité de rotation sous flexion positive et sous flexion négative, si l'on raisonne sous moment positif, la courbure élastique qui est liée à la courbure de première limite élastique, correspond soit à l'atteinte de la déformation limite élastique de l'acier ($\epsilon_y = F_y/E_a$), soit à la déformation limite élastique du béton ($\epsilon_c = 0,0015$ par exemple). La courbure ultime est en général contrôlée par l'atteinte de la déformation ultime dans le béton ($\epsilon_c = 0.0035$ par exemple) et non pas par la déformation ultime dans l'acier puisque la capacité de déformation de l'acier est typiquement élevée.

Cette ductilité est associée à la capacité de rotation dans une section.

I.3.3. Ductilité de rotation

Une ductilité de rotation importante ne peut s'obtenir que si les déformations plastiques ont la possibilité de se développer sur une longueur suffisante de l'élément. (Voir Fig.I.7)

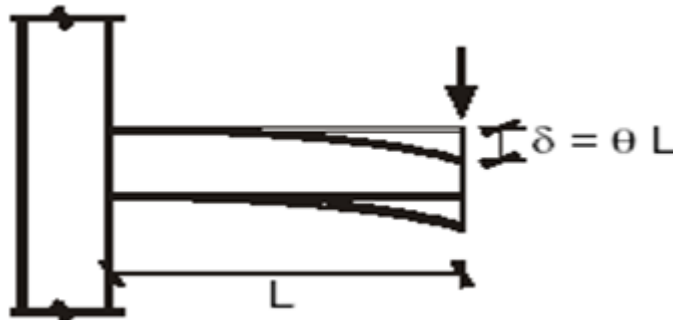


Figure.I.7 : Rotation d'une poutre encastrée soumise à une force

Si les déformations inélastiques sont fortement localisées, la demande de la ductilité de déformation sera très importante même sous un tremblement de terre d'intensité moyenne. Il est donc important d'assurer aussi une ductilité de rotation de la poutre qui associe à la courbure une notion de longueur. On définit la ductilité de rotation de la

poutre comme le rapport de la rotation maximale totale de la rotule plastique θ_{tot} à la rotation élastique θ_y

$$\mu_{\theta} = \frac{\theta_{\text{tot}}}{\theta_y} = \frac{\delta}{\delta_y}$$

Le paramètre de rotation plastique θ_p est défini comme :

$$\theta_p = \frac{\delta}{0,5L}$$

Avec : δ et L respectivement la flèche de la poutre au point considéré et la portée de la poutre.

I.3.4. Ductilité de déplacement

La ductilité en déplacement est généralement une mesure de la ductilité globale de la structure. Elle est définie comme étant le rapport du déplacement latéral total ($\Delta_{\text{tot}} = \Delta_y + \Delta_p$) au déplacement latéral élastique Δ_y (voir Fig.I.8) :

$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta_{\text{tot}}}{\Delta_y}$$

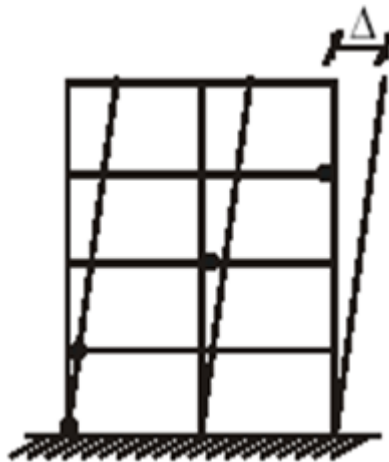


Figure.I.8 : Déplacement au sommet du bâtiment [2]

Elle peut être directement comparée à la ductilité nécessaire pour résister au tremblement de terre et qui est donnée par le facteur de comportement R de la structure. Le déplacement latéral devrait être pris au centre de gravité des forces sismiques, mais il est en général pris au niveau du toit, sans grande erreur généralement. Cette ductilité se réfère au comportement global de l'élément ou de la structure.

I.4. Conclusion

On a vu dans les paragraphes précédents que la ductilité peut se déterminer par plusieurs méthodes. Le choix de la méthode sera en fonction du problème à traiter. Par exemple dans le domaine des matériaux de construction, la méthode utilisée est celle de déformation ou de rotation.

En ce qui concerne notre travail, c'est la ductilité globale de la structure qui sera prise comme critère pour la détermination de la ductilité des structures, car elle donne une image globale du comportement de la structure face à une force extérieure.

CHAPITRE II :

COMPORTEMENT SISMIQUE LINÉAIRE ET NON LINÉAIRE DES STRUCTURES

II.1. Introduction

Depuis plusieurs années, la nouvelle génération des codes et règlements parasismiques que ce soit pour le dimensionnement des structures et/ou la vérification des constructions existantes contre l'action des séismes doit s'appuyer nécessairement sur des analyses non-linéaires (dimensionnement en capacité et comportement dissipatif des structures). Ce qui conduit d'une part à maîtriser la ductilité des éléments structuraux et la position des zones critiques et d'autre part de hiérarchiser les modes de rupture. La prévention exacte du comportement sismique des structures n'est pas du tout facile. Pour avoir des bonnes approches sur leur comportement, il faut une bonne quantification de l'intensité sismique ainsi une bonne modélisation des structures à analyser.

II.2. Mécanismes de résistance des constructions aux séismes

II.2.1. Capacité des constructions à stocker l'énergie

Les déformations élastiques que subit une construction lors d'une excitation sismique traduit le stockage de l'énergie provenant de cette dernière. Ces déformations ont une caractéristique de réversibilité en cas de suppression de ces charges excitatrices.

Au delà de la limite élastique de déformation, la structure connaît une naissance de déformation d'aspect plastique. L'aptitude de la structure à stocker l'énergie de déformation plastique dépend de la ductilité ou la fragilité de cette dernière. Enfin si la structure est fragile, la rupture est inévitable dès l'atteinte de la limite élastique de déformation.

La quantité d'énergie emmagasinée dans les éléments constructifs peut être représentée sur le digramme contraintes – déformations ou charges – déformations (voir Fig.II.1).

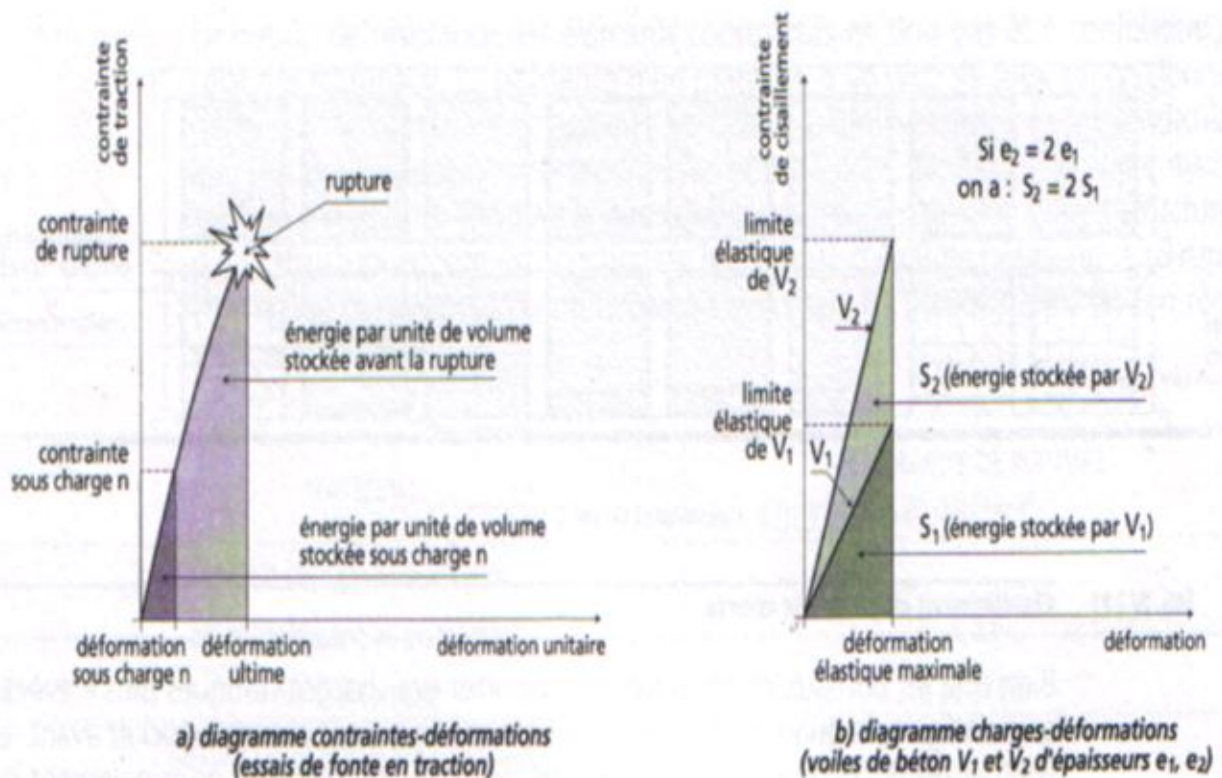


Figure.II.1 : Diagrammes contraintes – déformations et charges – déformations

II.2.2. Capacité des constructions à dissiper l'énergie

Les structures ont encore une capacité de traduire une partie de l'énergie sismique sous forme d'une dissipation d'énergie par divers mécanismes. Ces mécanismes peuvent être regroupés en quatre catégories :

- Dissipation en réflexion de la structure, avec le sol. Celle-là peut être déterminée par l'étude de l'interaction sol – structure.
- Dissipation par frottement qui se produit dans les joints de contact entre les différents matériaux, comme le cas des panneaux de la maçonnerie avec l'ossature en béton armé.
- Dissipation par fissuration ou par rupture des éléments structuraux. Dans ce cas, il est souhaitable que la rupture des éléments constructifs soit progressive et non pas brutale.
- Dissipation par amortissement interne et qui représente la cause la plus importante de la dissipation d'énergie. Cette dissipation est due à la viscosité et à la plasticité des matériaux.

II.3. Modèles de comportement non linéaire des structures

Cette partie a pour objectif de mettre en évidence quelques modèles de comportement dynamique non linéaires fréquemment utilisés dans l'analyse non linéaire des structures.

➤ Le Modèle Viscoplastique Parfait

Il est le plus fréquemment utilisé en analyse dynamique non linéaire (voir Fig.II.2).

Ce modèle est constitué par :

- une masse ρ .
- un élément élasto – plastique caractérisé par un ressort élastique de raideur K_{ep} .
- un patin caractérisé par une force seuil élastique $F_y = K_{ep} \cdot X_y$ où X_y est le déplacement élastique maximal de l'élément.
- Un amortisseur visqueux C .

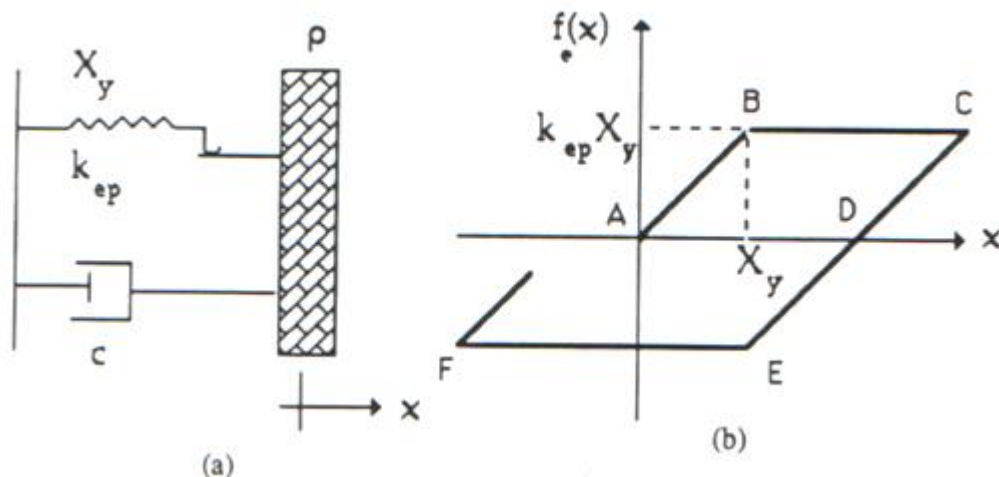


Figure.II.2 : Modèle viscoplastique parfait. (a) : éléments constitutifs. (b) : diagramme force élastique – déplacement de l'élément élasto – plastique parfait [3]

➤ **Le Modèle Viscoplastique Ecrouissable**

Qui est une amélioration du modèle précédent par l'introduction d'une variable dite variable d'écrouissage (voir Fig.II.3). Ce modèle est constitué par :

- une masse ρ .
- un élément élastique caractérisé par un ressort élastique de raideur K_1 .
- un élément élasto - plastique caractérisé par un ressort élastique de raideur K_2 .
- un patin caractérisé par une force seuil élastique $F_y = K_2 \cdot X_y$ avec X_y désigne le déplacement élastique maximal.
- un amortisseur visqueux C

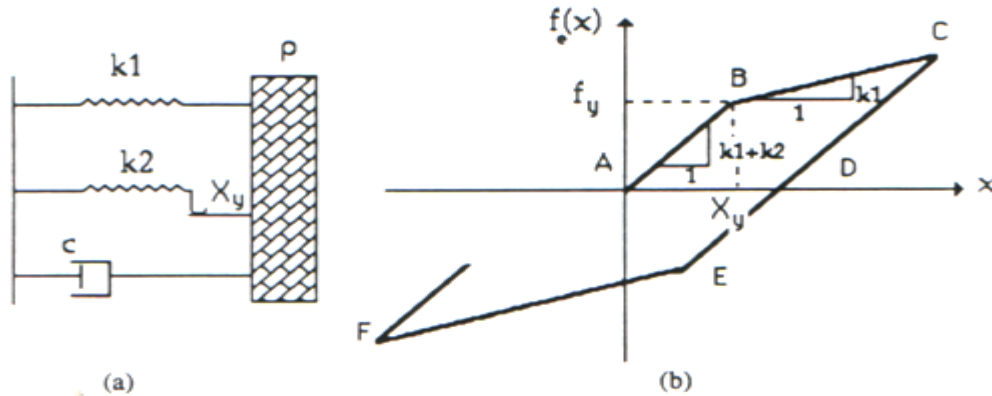


Figure.II.3: Modèle viscoplastique écrouissable. (a) : éléments constitutifs. (b) : diagramme force élastique- déplacement de l'élément élasto- plastique écrouissable. [3]

➤ **Le Modèle d'endommagement**

Ce modèle est composé de :

- une masse ρ .
- un élément linéaire caractérisé par un ressort linéaire de raideur K_e .
- un élément élasto - plastique : composé d'un ressort linéaire de raideur K_{ep} en série avec un patin de force seuil égale à $K_{ep} X_y$ avec X_y désigne le déplacement élastique maximal.
- éléments d'endommagement : qui représentent des éléments élasto - plastiques à rupture brutale.
- Élément visqueux : caractérisé par la constante de viscosité égale à C . (Voir Fig.II.5)

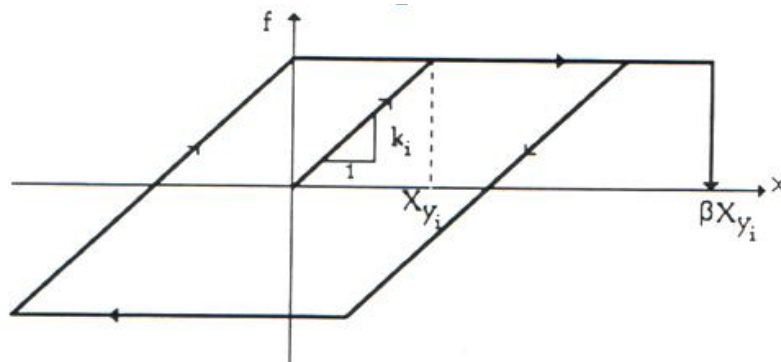


Figure.II.4 : Diagramme force élastique - déplacement d'un élément d'endommagement. [3]

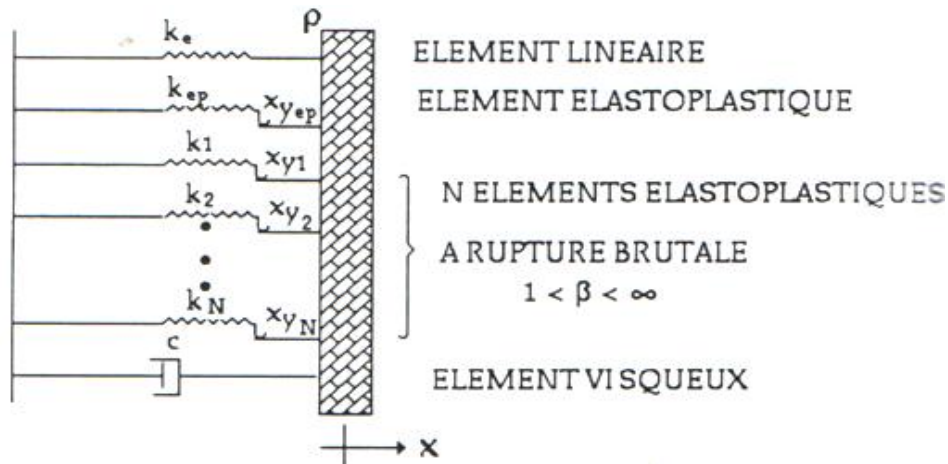


Figure. II.5 : Éléments constitutifs du modèle endommageable. [3]

II.4. Rotules plastiques

Une structure réelle est toujours soumise à des charges verticales (action du poids propre des éléments de la structure au minimum) qui représentent les charges permanentes et qui se superposent aux actions horizontales qui représentent généralement les charges sismiques.

Pour une direction précise de l'effort horizontal, des moments ultimes s'ajoutent aux droits des zones critiques dites - pour le moment - zones de plastification et qui s'accumulent jusqu'à obtenir un mécanisme (la ruine) (Fig. II.6)



Figure.II.6: Exemple de dommages d'un bâtiment après un tremblement de terre de Boumerdes 2003. [4]

II.4.1. Définition de la rotule plastique

Zones d'un élément de structure (poutres, poteaux, voiles,...) subissant des déformations irréversibles et capables de dissiper l'énergie sous sollicitations alternées, au delà d'un seuil de sollicitation. Elle se comporte comme une articulation autorisant la rotation des autres parties de l'élément. (Fig. II.7)

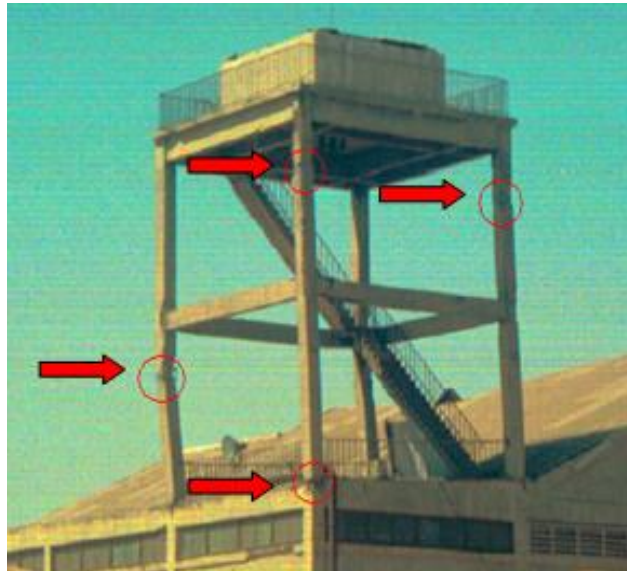


Figure.II.7 : Endommagement d'un portique à 2 étages par flexion dans les zones critiques des poteaux dans une installation portuaire lors du séisme de Boumerdes 2003. [4]

II.4.2. Caractéristiques des rotules plastiques

Les non-linéarités sont concentrées au niveau des rotules plastiques. Chaque rotule est caractérisée localement par : Le moment de fissuration, la plastification et la ruine.

La longueur de chaque rotule ne correspond pas à la longueur de la portion de la poutre ou du poteau ayant physiquement plastifié (L_p).

Dans le cas général L_p dépend de la ductilité et donc du niveau de chargement.

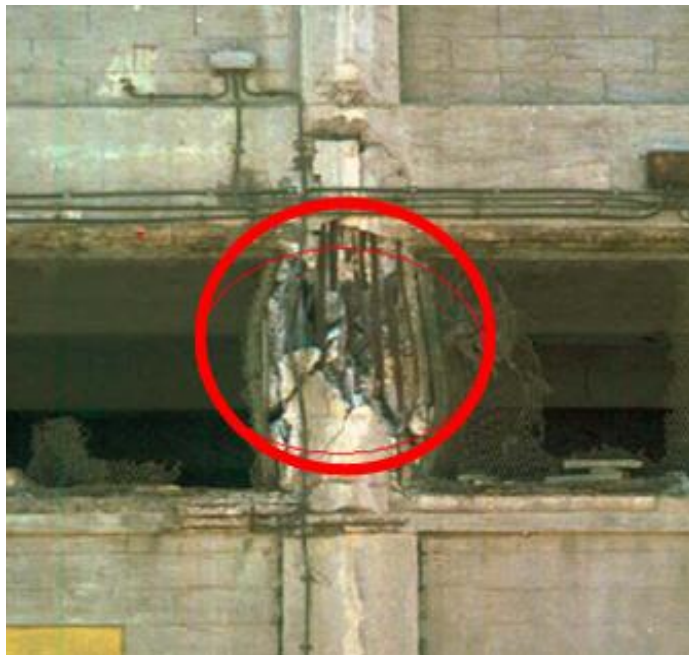


Figure.II.8 : Ruine d'un poteau court dans un magasin de stockage lors du séisme de Boumerdes 2003. [4]

La dégradation de l'inertie dans chaque rotule plastique représente un état endommagé de la structure. Pourtant, il s'avère que l'inertie chute, certes de manière globale entre le début (inerties élastiques) et la fin du séisme (inerties dégradées encore plus faibles que les inerties fissurées) mais elle ne diminue pas (forcement) à chaque pas de temps : les fissures éventuelles peuvent se refermer et l'inertie augmente au cours des cycles.

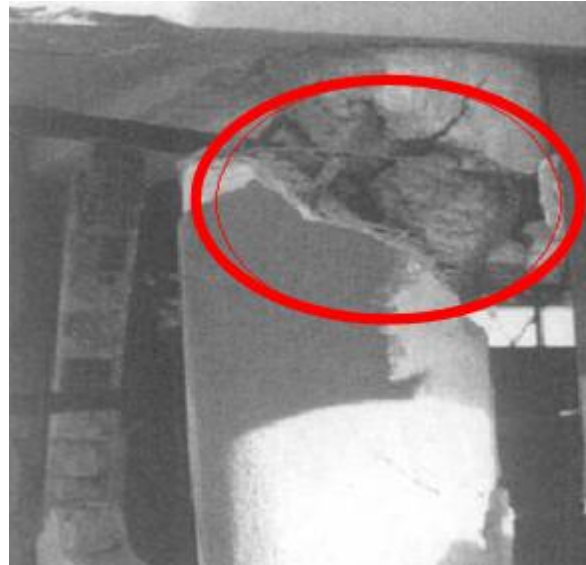


Figure.II.9 : Rupture par cisaillement d'un poteau béton armé lors du séisme de Boumerdes 2003. [4]

II.4.3. Critère de ruine en rotation

Les phénomènes observés lors de la ruine par flexion des structures élancées montrent, au niveau local des sections endommagées, trois phases principales : la fissuration de la section, la plastification des aciers et enfin la ruine de la section qui se traduit par l'écrasement du béton en compression.

Il existe plusieurs méthodes pour définir une rotation de ruine. Parmi ces méthodes on peut citer à titre d'exemple :

- **Méthode De Priestley**

Priestley utilise la notion de longueur de la rotule plastique pour définir une rotation de ruine.

- **Méthode Empirique**

Basée sur une formule empirique

- **Méthode Simplifiée de L'ATC40-FEMA 273-356**

II.5. Mécanismes de rupture des structures en béton armé

Dans les systèmes hyperstatiques et sous un chargement croissant, la fissuration du béton provoque d'abord une redistribution des sollicitations dans les différentes pièces de la structure, puis certaines zones entrent dans le domaine post élastique d'où l'apparition de rotules plastiques qui contribuent à la formation d'un mécanisme de rupture qui doit être statiquement stable pour être retenu comme représentant de la capacité portante du système étudié.

En effet une structure peut avoir plusieurs mécanismes de rupture ; et dans ce cas le concepteur doit choisir celui le plus critique et cela pour des raisons de sécurité (Voir fig II.10).

L'hypothèse d'intervention simultanée de plusieurs mécanismes est, certes dans le sens de la sécurité car elle ne tient pas compte de la probabilité de cette simultanéité.

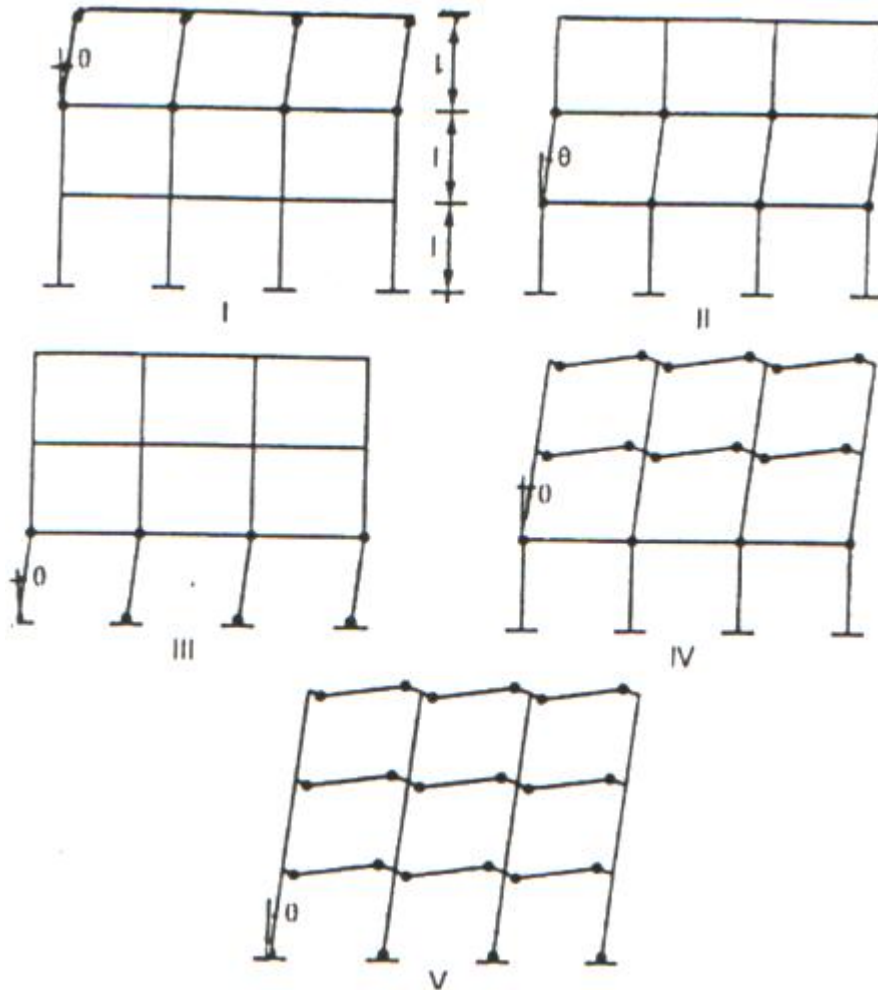


Figure.II.10 : Mécanismes de ruine possibles pour un portique à 3 étages. [5]

II6. Conclusion

Les déformations non élastiques peuvent être plusieurs fois plus importantes que les déformations élastiques.

CHAPITRE III :

COEFFICIENT DE COMPORTEMENT

III.1. Introduction

Dans les deux chapitres précédents, on a défini la notion de ductilité des structures puis, les différentes propositions des chercheurs pour la modélisation du comportement des ouvrages.

Maintenant, il nous semble très important d'éclairer une autre problématique qui est le souci actuel des chercheurs en génie parasismique. Il s'agit du coefficient de comportement.

Plusieurs chercheurs ont tenté de valider expérimentalement et théoriquement ce coefficient et de cerner les paramètres qui le conditionnent.

Pour notre pays, le RPA a inscrit dans son programme, la révision prochaine des articles concernant le coefficient de comportement R.

Au lendemain du séisme du 21 mai 2003, un débat s'est ouvert entre les différents experts sur les valeurs qu'attribuent les RPA à ce coefficient et notamment pour celui qui concerne les ossatures remplies par des panneaux de maçonnerie rigide.

Cela montre la grande importance du coefficient de comportement et son influence sur le dimensionnement et la résistance des structures face aux séismes, d'où la raison de mettre en évidence ce coefficient dans les paragraphes suivants.

III.2. Coefficient de comportement

III.2.1. Pourquoi un coefficient de comportement

Pour un séisme majeur, le concepteur n'est pas obligé d'exiger une résistance maximale sous l'action F_{max} mais une résistance considérablement plus faible, pourvu que le système dispose d'une ductilité suffisante. Le problème qui se pose en génie parasismique est qu'il n'est pas réaliste, sauf dans le cas des ouvrages à risque spécial comme les centrales nucléaires, de considérer que le comportement des structures reste dans le domaine linéaire pour des séismes de forte intensité.

Donc, il faut introduire un facteur ou un coefficient qui permet au calculateur – qui ne dispose que des calculs linéaires, de passer des résultats d'un calcul linéaire équivalent à des résultats réels d'un calcul non-linéaire (comportement non-linéaire). Ce coefficient est appelé coefficient de comportement.

Alors, dans la méthode dite 'calcul linéaire équivalent', il y'a lieu de diviser les sollicitations résultants d'un calcul élastique par le coefficient de comportement pour obtenir des sollicitations de dimensionnement aux états limites ultimes propres de la structure, avec toute fiabilité requise, un comportement satisfaisant.

III.2.2. Définition du coefficient de comportement

En réalité, il existe plusieurs tentations de plusieurs auteurs à définir le coefficient de comportement. Nous allons le définir d'une façon assez simple pour que cette notion du coefficient de comportement soit bien évidente.

Soit une structure donnée et un accélérogramme quelconque à (t). La réponse d'une structure sous un accélérogramme résultant du produit de l'accélérogramme à (t) par un multiplicateur λ est enregistrée sous un diagramme λ -déplacement.

En faisant croître les valeurs de λ considérées, on trouvera :

- des multiplicateurs λ tels que toutes les sections restent dans le domaine élastique.
- Un multiplicateur λ_e tel qu'on atteint la limite élastique globale de la structure.
- Des multiplicateurs λ tels que des sections entrent dans la phase élastoplastique mais sans atteindre la ruine de la structure.
- Un multiplicateur λ_{max} où on constate l'apparition d'un mécanisme de ruine.

Le coefficient de comportement de la structure étudiée est défini comme : $R = \lambda_{max} / \lambda_e$

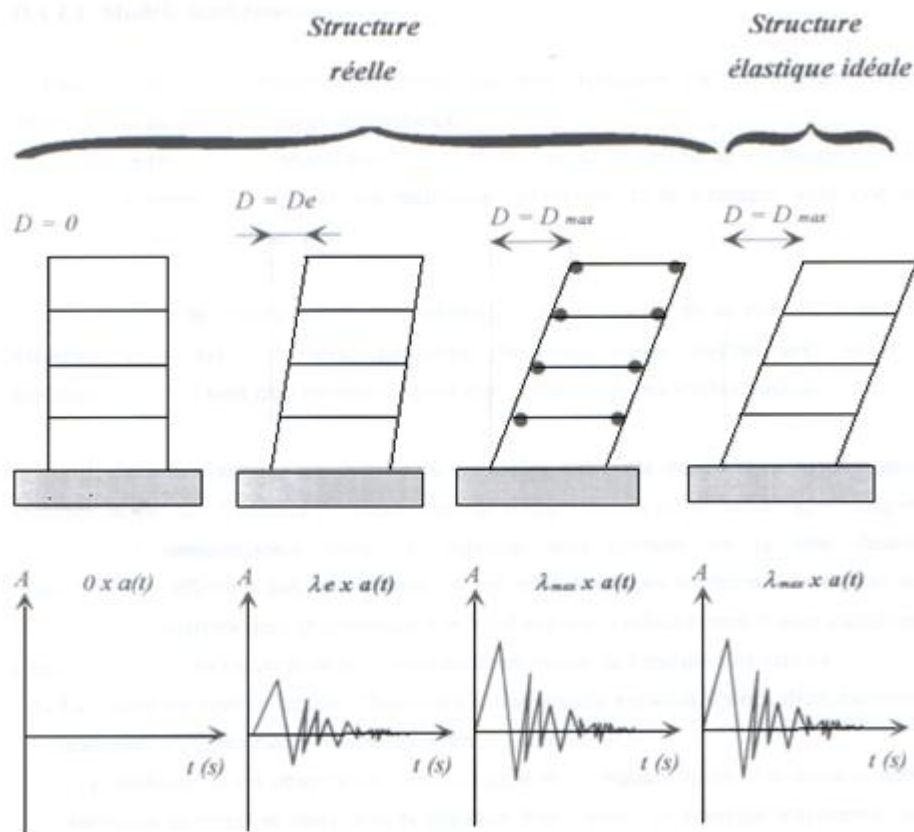


Figure.III.1 : Détermination du facteur de comportement. [5]

III.2.3. Contenu du coefficient de comportement

Dans les structures à risque normal et lors d'une action sismique, des incursions dans le domaine plastique sont autorisées mais qui ne peuvent être utilisées qu'associées à un spectre de dimensionnement.

Pour les structures à risque spécial, il est exigé de rester dans le domaine élastique donc imposer un coefficient de comportement $R=1$ ou légèrement supérieur à 1.

Le choix des valeurs des coefficients de comportement doit tenir compte de plusieurs fonctions comme:

- Association avec le spectre de dimensionnement.
- Utilisation des réserves de ductilité (transformation des sollicitations en déformations).
- Le coefficient de comportement tient compte de la dégradation des rigidités.

- Ce coefficient intègre l'évolution des structures au cours du mouvement sismique, parce que dans le cas réel inélastique, les rotules plastiques qui se forment les premières, subissent l'essentiel des cyclages du fait de leur souplesse. Ces rotules ne sont pas prises en compte dans le calcul élastique classique multimodal.
- Ce coefficient couvre les incertitudes propres au calcul des structures en situation sismique.

III.3. Historique de l'évaluation de coefficient de comportement

Nous essayerons de résumer, ci-après, les principaux travaux de recherche effectués dans ce domaine durant ces trente dernières années.

➤ **NEWMARK et HALL**

Le facteur de comportement est donné par les formules suivantes :

$$\begin{array}{ll} 0 \leq T < \frac{T_1}{10} & R_u = 1 \\ \frac{T_1}{10} \leq T < \frac{T_1'}{4} & R_u = \sqrt{2u-1} \left[\frac{T_1}{4T} \right]^{2.513 \log \left[\frac{1}{\sqrt{2u-1}} \right]} \\ \frac{T_1'}{4} \leq T < T_1 & R_u = \sqrt{2u-1} \\ T_1' \leq T < T_1 & R_u = \frac{Tu}{T_1} \\ T_1 \leq T < 10.0s & R_u = u \end{array}$$

Où les périodes T_1 , T_1' sont données dans le spectre de réponse.

Le facteur de comportement est caractérisé par des facteurs réducteurs constants $(\sqrt{2u-1}, u)$ dépend de la ductilité et de la région spectrale.

À l'exception de deux régions de transition où les facteurs réducteurs ont été déterminés par interpolation.

➤ **RIDDELL et NEWMARK**

Les facteurs de réduction trouvés dépendent de la ductilité et de la période de vibration T mais aussi de l'amortissement. Le facteur de comportement est donné par les formules suivantes :

$$\begin{aligned}
 0 \leq T < 0.0303s & \quad R_u = 1 \\
 0.0303s \leq T < 0.125s & \quad R_u = (P_a u - q_a)^{r_a} \left[\frac{1}{8T} \right]^{1.625 \log[(P_a - q_a)^{r_a}]} \\
 0.125s \leq T < T_1' & \quad R_u = (P_a u - q_a)^{r_a} \\
 T_1' \leq T < T_1 & \quad R_u = \frac{T}{T_1} (P_v u - q_v)^{r_v} \\
 T_1 \leq T < T_2' & \quad R_u = (P_v u - q_v)^{r_v} \\
 T_2' \leq T < T_2 & \quad R_u = \frac{T}{T_2 P_d u^{-r_d}} \\
 T_2 \leq T < 10.0s & \quad R_u = \frac{1}{P_d u^{-r_d}}
 \end{aligned}$$

Où les coefficients $p_a, q_a, r_a, p_v, q_v, r_v, p_d, r_d$ sont donnés en fonction de l'amortissement. Les périodes T_1, T_1' et T_2 sont données dans le spectre de réponse défini par les auteurs.

➤ **LAI et BIGGS**

Le facteur de comportement est défini par la formule suivante :

$$R_u = \alpha + \beta(\log T)$$

Les coefficients α et β dépendent de la ductilité et de la région spectrale.

➤ **PLUMIER, BALLIO et BOUSHABA**

Le facteur de comportement q de la structure est alors défini par :

$$q = \frac{\lambda_{\max}}{\lambda_e}$$

Où : λ_e est l'accélération du sol pour laquelle la structure atteint son état élastique limite
 λ_{\max} est l'accélération du sol pour laquelle la structure atteint son état ultime.

➤ **RIDDELL, HIDALGE et CRUZ**

Le facteur de comportement est donné par les formules suivantes :

$$\begin{aligned}
 0 \leq T < T^* & \quad R_u = 1 + \frac{R^* - 1}{T^*} T \\
 T \geq T^* & \quad R_u = R^*
 \end{aligned}$$

Où: Les coefficients R^* et T^* sont donnés en fonction de la ductilité μ .

Ces auteurs ont montré que le facteur de réduction proposé est égal à la ductilité elle-même si elle est comprise entre 2 et 5 et il lui inférieure pour une ductilité comprise entre 5 et 10.

➤ **Les chercheurs NASSAR et KRAWINKLER**

Ont étudié l'influence de la distance épacentrale ainsi que des paramètres du système structural sur le facteur de réduction.

La relation R_u pour le système bilinéaire et pour un amortissement $\xi=5\%$ est donné par la formule :

$$\begin{aligned}
 R_u &= [c(u-1) + 1]^{\frac{1}{c}} \\
 c = c(T, u) &= \frac{T^a}{T^a + 1} + \frac{b}{T}
 \end{aligned}$$

Où : Les valeurs de a et b sont données en fonction du coefficient d'écroutissage α .

➤ **COIN ET AL**

La valeur du coefficient de comportement est donnée par :

$$q(\lambda(a(t))) = \frac{F_e}{F_{ba}}$$

Avec : a(t) : est l'accélérogramme

$\lambda(a(t))$: un facteur d'amplification

F_e : est l'effort maximal atteint dans l'hypothèse de l'élasticité.

F_{ba} : est l'effort maximal atteint dans l'hypothèse du comportement réel du béton armé.

➤ **MIRANDA**

L'étude a montré que les conditions de sol très meuble peuvent influencer le facteur de réduction ; par contre la magnitude et la distance épacentrale n'ont qu'un effet négligeable sur celui-ci. Une formule simplifiée pour le facteur de comportement est donnée par l'expression suivante :

$$Ru = \frac{u-1}{\phi} + 1 \geq 1$$

Où le coefficient Φ est fonction de la ductilité u , de la période T et des conditions de site.

III.4. Coefficient de comportement dans les codes parasismiques

Le coefficient de comportement est quantifié de diverses manières dans les codes parasismiques. Dans ce qui suit, on essaye de le présenter brièvement dans quelques codes parasismiques.

➤ **Eurocodes 8**

L'Eurocodes d'une part et l'AFPS d'autre part ont fait un travail considérable dans le domaine parasismique. Le coefficient de comportement noté q est fixé en fonction de la nature des matériaux constructifs, du type de contreventement et de la ductilité de l'ensemble de la structure. [6]

➤ **Code Vénézuélien**

Dans ce code, le coefficient de comportement noté R_u est fixé en fonction de la régularité de la construction, de la nature des matériaux, de la ductilité, du mode de contreventement et de la période fondamentale de la structure. Il est donné par les formules suivantes :

$$\begin{aligned} 0 < T < \frac{T^*}{4} & \quad Ru = 1 + \left(\frac{4T}{T^*}\right)(u-1) \\ T > \frac{T^*}{4} & \quad Ru = u \end{aligned}$$

Avec :

u : ductilité de l'ensemble de la structure

T : période fondamentale de la structure

T* : période spectrale caractéristique du sol.

➤ **Règlement parasismique marocain (RPS2002)**

Dans les règlements parasismiques marocains, le coefficient de comportement a la même valeur que le coefficient de ductilité.

Le facteur de comportement, caractérise la capacité de la structure de dissipation de l'énergie vibratoire qui lui est transmise par les secousses sismiques. La valeur de ce coefficient est donnée dans l'article (3.3.4) sous un tableau (voir le tableau III.1) en fonction du type de système de contreventement et du niveau choisi de la ductilité. [7]

Tableau.III.1 : Valeur du coefficient de comportement (RPS2002). [7]

System de contreventement	ND1	ND2	ND3
Portique	2	3,5	5
Murs de refends	2	3	4
refends	1,4	2,1	2,8

Avec :

ND1 : structures peu ductiles (niveau 1 de ductilité)

ND2 : structures a ductilité moyenne (niveau 2 de ductilité)

ND3 : structures de grande ductilité (niveau 3 de ductilité)

III.5. Coefficient de comportement dans les règlements parasismiques algériens

➤ **RPA 88**

D'après l'article 3.2.1.3.3 du règlement, le coefficient de comportement noté B est défini comme suit :

$$B = \frac{1}{2d_t}$$

Avec :

d_t : facteur d'endommagement qui dépend de la nature du système structurel

➤ **RPA 99 Version 2003**

Dans le nouveau règlement ce coefficient est fixé par des valeurs mentionnées dans l'article (4-3) sous un tableau synoptique (voir le tableau III.2). Ce coefficient est déterminé en fonction du matériau constructif et du système de contreventement utilisé.

Tableau.III.2: Valeurs du coefficient de comportement R (RPA2003). [8]

Cat	Description du système de contreventement	Valeur de R
<u>A</u>	<u>Béton armé</u>	
1a	Portiques autostables sans remplissages en maçonnerie rigide	5
1b	Portiques autostables avec remplissages en maçonnerie rigide	3,5
2	Voiles porteurs	3,5
3	Noyau	3,5
4a	Mixte portiques/voiles avec interaction	5
4b	Portiques contreventés par des voiles	4
5	Console verticale à masses réparties	2
6	Pendule inverse	2
<u>B</u>	<u>Acier</u>	
7	Portiques autostables ductiles	6
8	Portiques autostables ordinaires	4
9a	Ossature contreventée par palées triangulées en X	4
9b	Ossature contreventée par palées triangulées en V	3
10a	Mixte portiques/palées triangulées en X	5
10b	Mixte portiques/palées triangulées en V	4
11	Portiques en console verticale	2
<u>C</u>	<u>Maçonnerie</u>	
12	Maçonnerie porteuse chaînée	2,5
<u>D</u>	<u>Autres systèmes</u>	
13	Ossature métallique contreventée par diaphragme	2
14	Ossature métallique contreventée par noyau en béton armé	3
15	Ossature métallique contreventée par voiles en béton armé	3,5
16	Ossature métallique avec contreventement mixte comportant un noyau en béton armé et palées ou portiques métalliques en	4
17	façades Systèmes comportant des transparences (étages souples)	2

III.5.1. Coefficient de comportement des structures en béton armé

Les valeurs du coefficient de comportement sont données par le (RPA) en fonction du mode de contreventement et des matériaux constructifs utilisés.

Les structures les plus utilisées dans les constructions sont en béton armé.

Les types des structures cernées (en béton armé) sont:

➤ **Structures en portiques autostables sans remplissages en maçonnerie rigide (cat 1A):**

Les ossatures sont constituées uniquement de poutres et poteaux capables de reprendre la totalité des sollicitations dues aux charges verticales et horizontales. Dans le RPA et pour ce type des structures le coefficient de comportement est égal à 5.

➤ **Structures en portiques autostables avec remplissages en maçonnerie rigide (cat 1B):**

Ces ossatures sont identiques avec le premier type sauf qu'elles présentent des panneaux de remplissage qui jouent un rôle d'un système de contreventement, dans le RPA et pour ce type des structures, le coefficient de comportement est égal à 3,5.

➤ **Structures en voiles porteurs (cat 2):**

Dans ce type de structures, les voiles résistent à la fois aux charges verticales dues au poids propre et aux charges horizontales dues au séisme. Dans le RPA et pour ce type des structures le coefficient de comportement est égal à 3,5.

➤ **Structures à contreventement mixte portique / voile (cat 4A et 4B):**

Ce type de contreventement comporte deux catégories, une mixte avec interaction (cat 4A) le coefficient de comportement est égal à 5, et l'autre catégorie présente des portiques contreventés par les voiles (cat 4B) le coefficient de comportement est égal à 4.

III.6. Paramètres influant sur le coefficient de comportement

III.6.1. Ductilité

Nous avons déjà cité la définition de ce paramètre dans le premier chapitre et nous avons même constaté sa relation directe avec le coefficient de comportement.

Les chercheurs dans les codes parasismiques considèrent ce paramètre comme le paramètre primordial qui permet l'évaluation du coefficient de comportement.

III.6.2. Période propre

La période propre de vibration représente l'une des caractéristiques intrinsèques de la structure.

Ce paramètre dépend de la rigidité de la structure ainsi de sa masse.

Certains chercheurs prennent en considérations la valeur de la période propre pour déterminer la valeur finale du coefficient de comportement et cela après l'exécution de plusieurs expériences.

(Par exemple l'expérience de Riddell et Cruz)

III.6.3. Amortissement

Ce paramètre est fourni généralement sous un rapport appelé taux d'amortissement qui représente le rapport entre l'amortissement fictif et celui critique de la structure, il dépend essentiellement du type du matériau ainsi de la nature des liaisons ou assemblages entre les éléments constituant la structure.

Sous une action sismique, l'absorption de l'énergie est due principalement à ce paramètre surtout si la structure reste dans son comportement dans le domaine élastique.

III.6.4. Type de sol

Généralement, la connaissance des caractéristiques de sol n'est pas précise. Et pour faciliter les calculs, les concepteurs considèrent le sol comme un matériau homogène ce qui est rarement le cas.

La nature du sol influe sur la propagation des ondes sismiques (vitesse et magnitude), par conséquent, elle influe sur le comportement des structures sous l'action sismique.

III.6.5. Régularité de la structure

Certains auteurs -comme Davidovici- modulent le coefficient de comportement de la structure en fonction de sa régularité ou son irrégularité en plan et en élévation cela d'après poser des critères définissant les dimensions de régularité ou irrégularité de la structure.

III.6.6. Commentaires

Dans les règlements parasismiques algériens, on constate que le coefficient de comportement dépend seulement de la ductilité, donc plusieurs points d'interrogation doivent être posés :

- Est-ce que les autres paramètres n'ont aucune influence en gardant la même ductilité de la structure ?
- S'il y'a influence, est ce qu' elle est négligeable ou importante ?
- Pour quoi cette divergence d'un auteur à un autre de l'évaluation du coefficient de comportement ?
- S'il y'a une influence importante de l'un de ces paramètres, pour quoi pas subdivisonner le tableau déterminant les valeurs du coefficient de comportement en ajoutant des nouvelles classes des ossatures et en prenant en considérations ces paramètres ?
- Les valeurs données dans le règlement sont elles acceptables ?

III.7. Evaluation du coefficient de comportement

Sous une action sismique, la structure conçue est fondamentalement amenée à absorber l'énergie apportée par cette action et elle doit être capable de résister en tenant compte de la dissipation d'énergie à travers ses éléments constructifs.

Diverses approches ont été effectuées dans le but pour permettre la prise en compte du comportement ductile non linéaire d'une structure.

L'approche qui consiste à définir un coefficient de comportement de la structure est le sujet de plusieurs recherches récentes effectuées sur le domaine parasismique.

III.7.1. Critères d'évaluation du coefficient de comportement

Les difficultés et les incertitudes de calcul dans le domaine post élastique nous conduisent à nous contenter pratiquement de méthodes plus simples de caractère pragmatique.

Après l'analyse de la réponse de la structure qui présente une fonction force-déplacement de type élastoplastique, deux méthodes sont proposées afin de déterminer la valeur approchée du coefficient de comportement.

➤ **La première est la méthode d'égalité des déplacements.**

Ce critère qui paraît le plus simple consiste à égaliser le déplacement maximal du système réel avec celui du système fictif élastique (Fig.III.2).

Le coefficient de comportement correspondant à ce système est :

$$R = \frac{F_{\max}}{F_e}$$

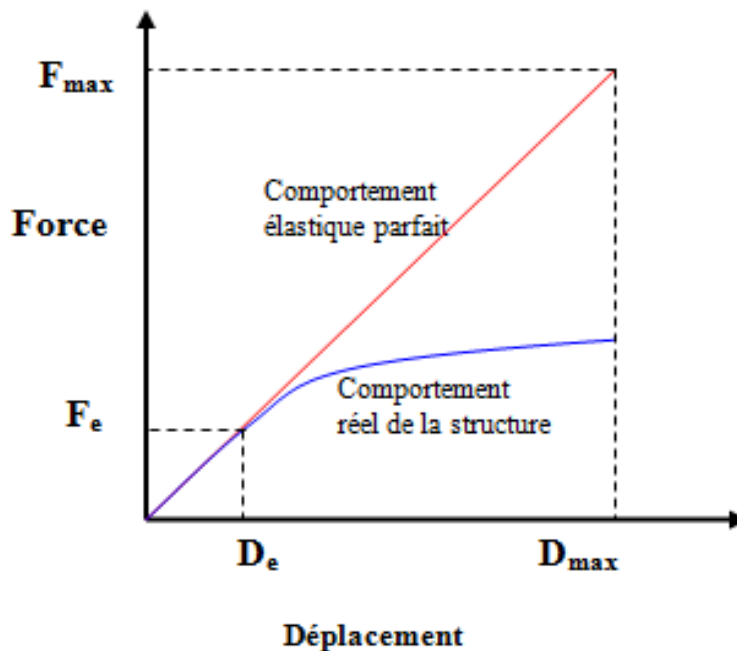


Figure.III.2 : Principe d'égalité des déplacements. [5]

➤ **La deuxième méthode est la méthode d'égalité des énergies.**

Ce critère consiste à faire une égalité entre l'énergie potentielle du système réel avec celle du système fictif parfaitement élastique. Ce dernier système présente un échange total entre l'énergie potentielle et l'énergie cinétique.

L'énergie potentielle de la structure est représentée par les aires hachurées (Fig.III.3).

Le coefficient de comportement correspondant à ce système est :

$$R = \frac{F_{\max}}{F_e}$$

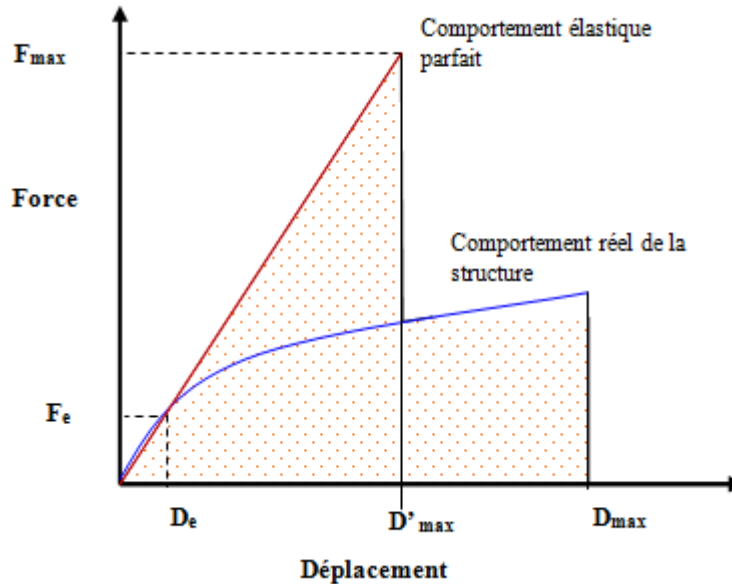


Figure.III.3 : Principe d'égalité des énergies. [5]

Remarque :

Il existe un autre critère pour la détermination approchée du coefficient de comportement d'une structure qui est le critère d'égalité des accélérations du sol avec celle de la structure, ce critère n'est pas applicable dans le calcul non linéaire car il concerne les structures et les systèmes à hautes fréquences (25 à 33 Hz)

III.7.2. Choix du critère

Après plusieurs expériences et analyses effectuées sur des oscillateurs à un ou plusieurs degrés de liberté, les chercheurs-comme M.Davidovici à titre d'exemple- ont abouti aux résultats suivants :

- Pour les systèmes à basses fréquences propres le critère qui doit être pris est celui d'égalité des déplacements.
- Pour les systèmes à fréquences propres situées entre 2 à 8 Hz et qui est le cas pour les constructions usuelles, le critère qui doit être pris est celui d'égalité des énergies.

III.8. Conclusion

Le facteur de comportement est un facteur introduit dans les règlements parasismiques pour réduire les forces élastiques obtenues d'une analyse élastique linéaire, pour tenir compte de la dissipation d'énergie au cours du tremblement de terre. Ce facteur de comportement tient compte globalement de la capacité dissipative hystérétique de la structure, permettant de ramener son dimensionnement à un niveau de comportement élastique avec l'introduction de forces sismiques équivalentes d'intensité réduite.

La difficulté de la détermination du coefficient de comportement et la complexité de la relation implicite existant entre ce coefficient et les autres paramètres peuvent expliquer les différences quant à sa détermination d'un auteur à un autre.

Conclusion générale

Lorsque les sollicitations sismiques sont importantes, le manque de ductilité dans les structures rend les ruptures fragiles prépondérantes. Ceci, même si la capacité de déformation post-élastique des structures est « prise en compte » grâce notamment au coefficient de comportement

La qualité sismique d'une structure est principalement fonction du couple formé par sa résistance et sa ductilité globale. Et le déplacement ultime des structures, dépend aussi de la ductilité de structure.

Pour empêcher la ruine de la structure, l'amplitude de ces déformations plastiques doit être limitée à des valeurs qui sont compatibles avec les ductilités locales et globales disponibles dans la structure, c'est-à-dire avec sa capacité de dissipation d'énergie.

L'action sismique agit sur une structure en lui appliquant une énergie. Cette énergie absorbée par la structure doit être dissipée soit par l'amortissement soit par des déformations plastiques. L'effet favorable de la capacité de la structure à dissiper l'énergie introduite sous forme de déformations plastiques ainsi que sa sur résistance sont pris en compte par le coefficient de comportement.

Lors d'un calcul sismique d'une structure, la valeur à attribuer au facteur R, dépend de la capacité de celle-ci à dissiper de l'énergie sismique par déformations plastiques.

$R=1$, veut dire que la structure est considérée non dissipative; celle-ci est alors dimensionnée de manière à avoir un comportement purement élastique lors d'un tremblement de terre qui lui induirait des sollicitations similaires à celles de l'action sismique de projet, pour laquelle elle a été dimensionnée. Dans le cas contraire, pour une structure dissipative, on prend une valeur de R supérieure à 1. Cette valeur est d'autant plus élevée que la structure est plus dissipative. Pour fixer les idées, les valeurs de R considérées dans les codes parasismiques sont comprises entre 1 et 8.

Dans la littérature, le facteur de comportement, R, dépend de plusieurs paramètres tels que, la ductilité, la période propre fondamentale de vibration de la structure, la réserve de résistance, appelée aussi sur-résistance, la redondance de la structure, ainsi que les caractéristiques du mouvement du sol.

Le choix de la valeur du facteur de comportement R n'est pas évident. La plupart des codes réglementaires prennent en compte une valeur forfaitaire unique de ce facteur en fonction du système de contreventement de la structure et de ses matériaux constitutifs. En réalité, le facteur de comportement est une fonction complexe d'un grand nombre de paramètres.

Cette étude a permis d'améliorer mes connaissances sur le comportement sismique des structures

Références Bibliographiques

- [1] Sébastien GIEU. DUCTILITÉ DES STRUCTURES EN BÉTON ARMÉ. 115P.
Thèse d'ingénieur : Génie Civil. Paris, Conservatoire National des Arts et Métiers : 2012
- [2] Cours de Constructions parasismiques de l'Ecole Nationale Polytechnique, Dr
N. Mihoubi Baouche.
- [3] Cours de Dynamique des structures de l'Ecole Nationale Polytechnique, Pr :
B.Tiliouine.
- [4] Victor DAVIDOVICI (Consultant Séisme de BOUMERDES – 21 mai 2003 / Rapport
préliminaire. 8 juin 2003.
- [5] Victor DAVIDOVICI. Pratique du calcul sismique. Editions EYROLLES. 61, bd Saint-
Germain 75240 Paris: 2013. 243P. ISBN Afnor: 978-2 12-465401-7. ISBN Eyrolles: 978-
2-212-14135-1.
- [6] Eurocodes 8 (2004), Calcul des structures pour leur résistance aux séismes. Norme
Européenne pren1998-3.
- [7] RPS2002 (REGLEMENT DE CONSTRUCTION PARASISMIQUE du Maroc), Secrétariat
d'État à l'Habitat
- [8] RPA99/2003 (Règles Parasismiques Algériennes 1999 version 2003), 2004. Centre
national de recherche appliquée en Génie-Parasismique.
- [9] ANDRE FILIATRAULT. Elément de génie parasismique et de calcul dynamique des
structures. Edition de l'école polytechnique de Montréal. Canada : 1996. ISBN 2-553-
00575-X.
- [10] Victor DAVIDOVICI. Alain CAPRA. Calcul dynamique des structures en zone
sismique. 2^{ème} Editions, EYROLLES 61, Boulevard Saint-Germain 75005. PARIS :
1982.164p
- [11] Association française du génie parasismique. Guide de la conception parasismique
des bâtiments. 2^{ème} tirage Editions EYROLLES 61, Boulevard Saint Germain 75343
.PARIS :2004. ISBN 2-212-11347-1.
- [12] MECHICHE Mohamed Oussalem. Evaluation du facteur de comportement global.
Relation entre ce facteur et la ductilité locale requise. Cas des structures en acier en
contreventements centre et excentre. 72P
Thèse de Doctorat : Génie Civil. TIZI OUZOU, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI :2013
- [13] Cours de techniques de recherches et de communications de l'Ecole Nationale
Polytechnique, Pr KETTAB.