

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
Université ABOU-BEKR-BELKAID-TLEMCEM



Faculté de Technologie  
Département de Génie Civil

Option : Structures  
Présentée par

**Melle BOUMEDIENE NESRINE & Melle BOURDIM AMINA**

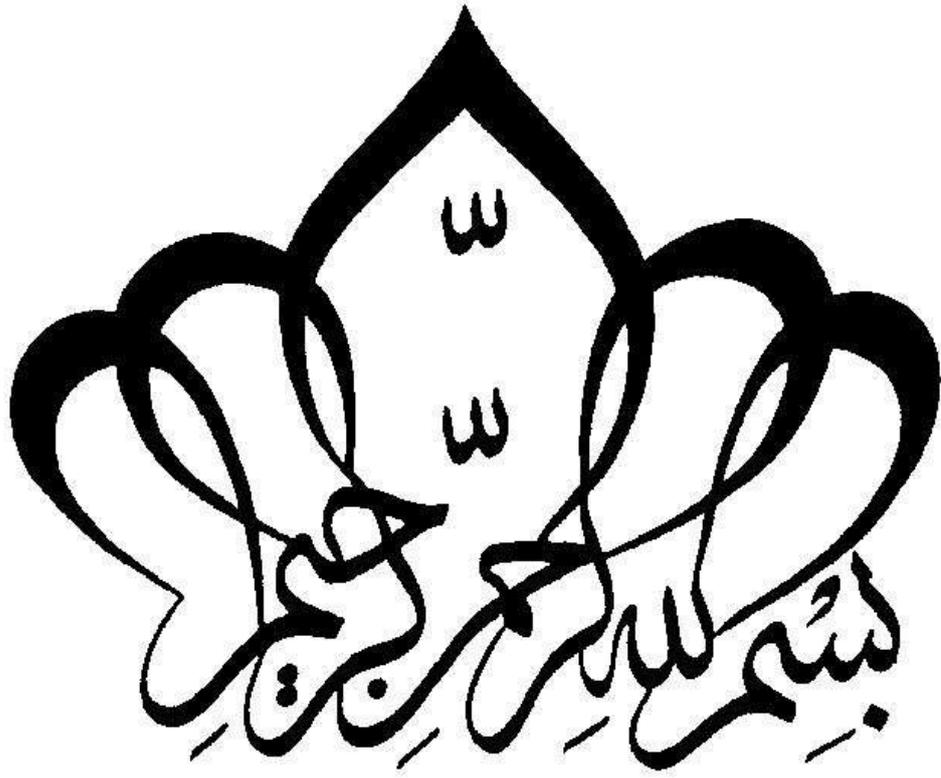
**Thème :**

**Évaluation des coefficients de comportement et des longueurs des rotules plastiques des voiles en béton armé**

Soutenue devant le jury composé de

<b>Dr. DJAFOUR N.</b>	Présidente
<b>M<sup>me</sup> GHEZALI S.</b>	Examinatrice
<b>Pr. MATALLAH M</b>	Encadrant
<b>M<sup>me</sup> MEDJAHED A.</b>	Encadrant

**Année universitaire 2018/2019**



## *Dédicaces*

« وما توفيقي إلا بالله عليه توكلت و إليه أنيب »

*Je dédie ce modeste travail à*

♣ *Mes chers parents qui m'ont toujours fait aimer la voie du savoir, et à qui je dois le plus grand respect.*

♣ *Mon frère et mes sœurs, Abd El Illah, Sihem, Fadja, Anfel, mon beau-frère Salim, et ma chère nièce assil.*

♣ *A mes grands-parents, Rahma, Fatima, Simouh et Yahia.*

♣ *A toute Ma famille (oncle, tante, cousins, cousines, amis..) et tous ce qui sont cher pour moi.*

♣ *A mon binôme, ma quatrième sœur Melle BOUMEDIENE nesrine et sa famille, surtout ces parents et sa sœur Samah que je remercie vivement.*

♣ *A tous mes amis, Nesrine, Mamia, Meriem, Razia, Hadjer Souhila, Esmâ, Safaa, Latifa, Soraya, Chahra, Fadéla, Imen, Imad, Karim, Hichem, Mohammed, Ali, Nadir, . . .*

♣ *A tous mes frères et mes collègues de la promotion « STRUCTURE » et tous les étudiants de génie civil et je leurs souhaite bon courage.*

*Bourdim Amina*

## *Dédicaces*

« وما توفيقي إلا بالله عليه توكلت و إليه أنيب ».

*Je dédie ce modeste travail à*

- ♠ *Mes parents qui m'ont toujours soutenu le long de mes études à qui je dois ce que je suis devenu.*
- ♠ *Ma petite chère sœur Samah qui ma toujours encouragé.*
- ♠ *A toutes les deux familles BOUMEDIENE, et HOUCINE .*
- ♠ *A mes grands parents, Fatima, Rabiaa, Abd Allah, Mohammed.*
- ♠ *A ma deuxième sœur et mon binôme Melle BOURDIM Amina, ainsi ses parents, son petit frère, ses sœurs et toute sa famille.*
- ♠ *A tous mes amis, Amina, Yasmine, Karim, Imad, Afrah, Lamia, Meriem, Samia, Hadjer, Asma, Ikram . .*
- ♠ *A toute la promotion de Génie Civil 2019, en particulier mes collègues et mes amis et tous les étudiants de la faculté de technologie.*

*Boumediene Nesrine*

## Remerciements

*Nous adressons nos plus sincères sentiments de reconnaissance et de remerciement envers le bon Dieu, le clément et le miséricordieux, lequel nous a accordé la force, la patience, le courage et la volonté pour élaborer ce travail dans les meilleures conditions.*

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات

*Nous voulons exprimer notre gratitude à nos encadreurs Mr. MATALLAH Mohammed, Professeur à l'université de Tlemcen) et Mme. MEDJAHED Amina maître assistante (université de Tlemcen), pour le temps qu'ils nous ont accordé, leurs aides inestimables, leur confiance, leur gentillesse et leur disponibilité ainsi que pour leurs conseils précieux.*

*Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail en acceptant de l'examiner et de l'enrichir par leurs propositions.*

*Nos remerciements s'adressent également aux membres du laboratoire RISAM et notamment Mr. TADJEDITI A., Mr. TAIBI A. Et Mr. RACHEDI M. Pour leur accueil et leurs soutiens et encouragements.*

*Nous tenons de remercier chaleureusement tous les enseignants de la faculté de génie civil, qui nous ont enrichis de connaissances et de savoir, ainsi aux responsables de la bibliothèque.*

*Enfin nos remerciements vont également à toutes les personnes qui nous ont, de près ou de loin, apporté aide et encouragement.*

*Merci à tous.*



# Table des Matières

ملخص .....	ix
Résumé .....	xi
Abstract .....	xiii
Liste des Tableaux .....	xv
Liste des Figures .....	xvi
Introduction générale.....	xix
<b>Chapitre 1 Etude bibliographique des voiles en béton armé sous chargement sismique .....</b>	<b>1</b>
1.1 Introduction .....	2
1.2 Qu'est-ce qu'un mur de cisaillement, a quoi sert-il ? .....	3
1.3 Caractéristiques essentielles du comportement des voiles en béton armé.....	4
1.4 Dommages et dégâts subis par les voiles :.....	4
1.5 Modes de rupture des voiles : .....	5
1.5.1 Modes de rupture des voiles élancés :.....	5
1.5.2 Modes de rupture des voiles courts : .....	7
1.6 Quelques principes de dimensionnement : .....	9
1.7 Choix de modélisation :.....	10
1.7.1 Les modèles géologiques : .....	11
1.7.2 Les modèles globaux : .....	11
1.7.3 Les modèles semi-locaux :.....	11
1.7.4 Les modèles locaux : .....	11
1.8 Echelles de discrétisation.....	12
1.8.1 Approche globale .....	12
1.8.2 Approche macroscopique .....	13
1.8.3 Approche semi-globale .....	14
1.9 Ferrailages des voiles : .....	15
1.9.1 Introduction : .....	15

1.9.2	Les méthodes pour le Ferrailage des voiles : .....	16
1.9.3	La disposition du ferrailage .....	23
1.9.4	Vérification au cisaillement : .....	23
1.10	Flambement des murs de contreventement : .....	24
1.10.1	Longueur de flambement.....	24
1.10.2	Elancement mécanique du voile : .....	27
1.10.3	La vérification vis avis du flambement d'un voile : .....	28
1.11	Conclusion : .....	29
	<b>Chapitre 2 Les différentes approches pour le calcul des coefficients de comportement et l'estimation des rotules plastiques dans les voiles en béton armé.....</b>	<b>31</b>
2.1	Introduction .....	32
2.2	Analyse statique non linéaire : .....	32
2.3	Définition de l'analyse PUSHOVER.....	32
2.3.1	But de l'analyse Push over .....	34
2.4	Coefficient de comportement.....	34
2.4.1	Définition.....	34
2.4.2	Paramètre du facteur de comportement.....	35
2.4.3	Comparaison entre codes parasismiques .....	47
2.4.4	Valeurs du coefficient de comportement pour les structures en voile selon les règlements internationaux : .....	48
2.5	Notion de rotules plastiques : .....	51
2.6	Loi moment-courbure pour un mur de cisaillement : .....	52
2.6.1	Mattock (1967) et Priestley et al. (1996) .....	55
2.6.2	ICBO [1997] .....	55
2.6.3	Thomsen and Wallace [2004] .....	56
2.6.4	Euro-code 8 (2005).....	56
2.6.5	Priestley et al. [2007] : .....	56
2.6.6	Bohl et Adebar 2011 .....	57

2.6.7	Kazaz [2013] .....	57
2.6.8	Wibowo et al. [2013].....	58
2.6.9	Altheeb et al. [2015].....	58
2.7	Fissuration des murs en béton armé .....	58
2.7.1	Introduction .....	58
2.7.2	Estimation des ouvertures de fissure .....	59
2.7.3	Evaluation des ouvertures des fissures .....	61
2.8	Conclusion :.....	63
	<b>Chapitre 3 Simulation par approche macroscopique du comportement des voiles en béton armé .....</b>	<b>65</b>
3.1	Introduction .....	66
3.2	Programme SAFE :.....	66
3.2.1	Mur non élancé (T10) :.....	66
3.2.2	La disposition de ferrailage du voile non élancé (T10) :.....	67
3.3	Mur élancé (BC80) :.....	68
3.3.1	La disposition du ferrailage de voile élancé (BC80) : .....	69
3.4	Condition aux limites : .....	71
3.5	Chargement :.....	71
3.6	Essais pseudo dynamiques.....	72
3.7	Modélisation macroscopique du comportement des deux voiles :.....	72
3.8	Les modèles utilisés pour la simulation : .....	76
3.8.1	Modèle non linéaire du béton (modèle d'endommagement de fichant) :.....	76
3.8.2	Modèle élasto-plastique pour l'Acier :.....	76
3.9	Les résultats du voile SAFE (T10) :.....	79
3.9.1	Push-over (quasi statique monotone) .....	79
3.9.2	Réponse cyclique.....	80
3.10	Les résultats du voile (BC 80) :.....	84
3.10.1	La courbe force – déplacement (push –over) : .....	84

3.10.2 Comparaison Expérimentale-Numérique : .....	84
3.11 Conclusion : .....	86
<b>Chapitre 4 Evaluation des coefficients de comportement et des longueurs des rotules plastiques .....</b>	<b>87</b>
4.1 Introduction .....	88
4.2 Méthode d'Idéalisation de la courbe de capacité : .....	88
4.2.1 Le déplacement cible : .....	90
4.3 Les résultats obtenus pour le Voile non élancé SAFE T10: .....	93
4.3.1 Calcul du coefficient de comportement : .....	95
4.3.2 Comparaison avec les règlements : .....	95
4.3.3 Méthode d'Estimation des longueurs de rotules plastiques .....	96
4.3.4 Moment courbure : .....	96
4.4 Résultat pour le mur élancé BC80.....	103
4.4.1 Calcul du coefficient de comportement : .....	104
4.4.2 Comparaison avec les règlements : .....	104
4.4.3 Les valeurs analytiques de la longueur plastique pour le voile BC80 .....	105
4.5 Conclusions : .....	108
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>109</b>
<b>Bibliographie .....</b>	<b>111</b>

## ملخص

تتعلق هذه الرسالة بسلوك الجدران الخرسانية المسلحة تحت الضغط الزلزالي. هدفه هو اقتراح نمذجة موثوقة يمكنها معالجة الاستجابة غير الخطية لمجموعة واسعة من الجدران تحت الضغط الزلزالي وتحديد المساهمات المحتملة لمثل هذه النماذج في التصميم.

في البداية سنرى ، خصائص سلوك الجدران تحت الزلزال. وتناقش مبادئ التحجيم وكذلك خيارات النمذجة المختلفة. الفجوات التي تم تحديدها تبرر التصنيف الهيكلي المختار ونهج النمذجة المعتمد. يتم اختيار عائلتين من الهياكل:

(1) جدار غير نحيلة ،

(2) جدار نحيلة.

في وقت لاحق ، بعد تحديد الاستجابات الكلية ، سنهتم بحساب معامل السلوك الذي يتم تقديمه في القوانين الزلزالية لتقليل القوى المرنة التي تم الحصول عليها لتأخذ في الاعتبار تبديد الطاقة أثناء الهزة. يأخذ عامل السلوك هذا في الاعتبار على المستوى العالمي القدرة التبددية الهستيرية للهيكل. بعد ذلك سوف نقدر أطوال المفاصل البلاستيكية للشرايين اللذين تم استخدامهما لإجراء تحليل الدفع. ومن ثم اقترح إجراء مقارنة تجريبية رقمية.

تتم الحسابات على نطاق ماكروسكوبي باستخدام برنامج Cast3M .

**الكلمات المفتاحية** معامل السلوك، القوانين الزلزالية، تبديد الطاقة، تبديد هستيري، نهج عالمي



## Résumé

Ce mémoire concerne le comportement des voiles en béton armés sous sollicitation sismique. Son objectif est de proposer une modélisation fiable qui puisse aborder la réponse non linéaire d'une grande variété de murs sous sollicitation sismique et d'identifier les apports possibles d'une telle modélisation à la conception.

Dans un premier temps nous allons voir, les caractéristiques du comportement des voiles sous séisme. Les principes de dimensionnement ainsi que les divers choix de modélisation sont discutés. Les lacunes identifiées justifient la typologie structurelle choisie et l'approche de modélisation adoptée. Deux familles de structures sont choisies: 1) un mur non élancé, 2) un mur élancé.

Plus tard, après l'identification des réponses globales, on s'intéressera au calcul du coefficient de comportement qui est introduit dans les règlements parasismiques pour réduire les forces élastiques obtenues pour tenir compte de la dissipation d'énergie au court d'un tremblement de terre. Ce facteur de comportement tient compte globalement de la capacité dissipative hystérétique de la structure.

Ensuite on va estimer les longueurs des rotules plastiques des deux voiles qui ont été utilisés pour exécuter l'analyse de Push over. Une comparaison expérimentale-Numérique-Réglementation est ainsi proposée.

Les calculs sont réalisés à l'échelle macroscopique en utilisant le logiciel Cast3M.

**Mots clés** : coefficient de comportement, les règlements parasismiques, dissipation d'énergie, dissipative hystérétique, PUSHOVER, une approche globale, cisaillement



# Abstract

This work concerns the behavior of reinforced concrete walls under seismic loadings. The main objective is to propose a reliable modeling approach that can address the nonlinear response of a wide variety of walls under seismic loadings and to identify the possible contributions of such modeling to the design.

At first we will address the characteristics of the behavior of these walls under earthquake. The principles of design as well as the various modeling choices are discussed. The gaps identified justify the structural typology chosen and the modeling approach adopted. Two types of shear walls are chosen for study:

1) a shear wall (less slender walls) and 2) a slender wall.

Later, after the identification of the global responses, we will be interested in the computation of the behavior factors that is introduced in the seismic regulations to reduce the elastic forces obtained to take into account the dissipation of energy during seismic loading. This behavior factor takes into account globally the hysteretic dissipative capacity of the structure.

Then we will estimate the lengths of the plastic hinges of the two walls that were used to perform the Push over analysis. A comparison between experimental-numerical results and regulation formulas is proposed.

The calculations are performed on a macroscopic scale using Cast3M software.

**Key words:** behavior factor, seismic regulations, energy dissipation, hysteretic dissipation, PUSHOVER, a global approach, shear.



## Liste des Tableaux

Tableau 1. 1 : valeur de $\beta$ pour les murs non-raidi latéralement.....	26
Tableau 1. 2 : valeur de $\beta$ pour les murs raidi latéralement.....	27
Tableau 2. 1 : Valeurs des paramètres a et b .....	42
Tableau 2. 2 :Facteur de redondance. ....	46
Tableau 2. 3 : Comparaison du facteur de comportement établi par les codes de calcul parasismiques avec celui de la nouvelle formulation. ....	48
Tableau 2. 4 : Valeurs du coefficient de comportement dans le RPA . ....	48
Tableau 2. 5 : Valeurs du coefficient de comportement dans le RPS 2011 . ....	49
Tableau 2. 6 : Valeurs du coefficient de comportement dans le règlement Canadian.....	50
Tableau 2. 7 : La valeur du coefficient de comportement des structures en voile dans le règlement américain (UBC)-92. ....	51
Tableau 3. 1 : description de la maquette ( T10) SAFE.....	67
Tableau 3. 2 : description de la maquette BC80.....	69
Tableau 3. 3 : caractéristique géométrique et mécanique des maquettes. ....	73
Tableau 4. 1 : Valeurs du coefficient $C_0$ .....	90
Tableau 4. 2 : Valeurs du coefficient $C_m$ .....	91
Tableau 4. 3 : Valeurs du coefficient $C_2$ .....	92
Tableau 4. 4 : Paramètres utilisés pour le calcul du coefficient de comportement (voilesT10). ....	94
Tableau 4. 5 : Valeurs du coefficient de comportement (voileT10).....	95
Tableau 4. 6 : Comparaison de coefficient de comportement de voile T10(SAFE) avec l'UBC et l'RPA.....	95
Tableau 4. 7 : résultat de la longueur plastique pour le voile non élancé .....	96
Tableau 4. 8 : Paramètres utilisés pour le calcul du coefficient de comportement (voilesBC80). ....	103
Tableau 4. 9 : Valeurs du coefficient de comportement (voile BC80). ....	104
Tableau 4. 10 : Comparaison des coefficients de comportement de voile BC80 avec l'UBC et l'RPA .....	104
Tableau 4. 11 : résultat de la longueur plastique pour le voile élancé .....	105

## Liste des Figures

Figure 1.1 : Dégradation des structures en voile au niveau de la zone critique face aux séismes.....	2
Figure 1. 2 : Les ruptures et les fissurations subis par les voiles.....	5
Figure 1. 3 : Dégâts subis par les voiles .....	5
Figure 1. 4 : Modes de rupture des voiles élancés.....	7
Figure 1. 5 : Modes de rupture des voiles courts.....	8
Figure 1. 6 : Modes de rupture des voiles courts.....	9
Figure 1. 7: Discrétisation globale d'une structure – Projet Ecoleader - Structure Camus.....	13
Figure 1. 8 : Discrétisation locale tridimensionnelle d'une structure – Projet Ecoleader -Structure Camus .....	14
Figure 1. 9 : Discrétisation semi-globale d'une structure – Projet Ecoleader - Structure Camus .....	15
Figure 1. 10 : la disposition de ferrailage d'un voile.....	17
Figure 1. 11 : Schéma d'un voile plein et disposition du ferrailage .....	23
Figure 1. 12 : Cisaillement d'un voile faiblement armé (Séisme d'Anchorage, 1964).....	24
Figure 1. 13 : Dimensionnement d'un voile similaire au dimensionnement d'un poteau.....	25
Figure 1. 14 : mur raidi latéralement.....	26
Figure 1. 15 : état d'un mur en compression .....	28
Figure 2. 1 : Signification physique de la courbe push over. ....	33
Figure 2. 2 : Définition de paramètres non linéaires.....	36
Figure 2.3 : La différence de déformabilité entre voile et portique .....	37
Figure 2. 4 : Établissement du spectre de réponse inélastique à partir du spectre élastique d'un SDOF .....	38
Figure 2. 5 : Principe d'égalité des accélérations .....	39
Figure 2. 6 : Principe d'égalité des déplacements .....	39
Figure 2. 7 : Principe d'égalité des énergies.....	40
Figure 2. 8 : Spectre de réponse classique .....	41
Figure 2. 9 : Relation bilinéaire Force – Déplacement pour un système SDOF .....	42
Figure 2. 10 : La longueur de la rotule plastique $l_p$ .....	52
Figure 2. 11 : Courbure d'une section par rapport à sa distance de l'axe neutre.....	53
Figure 2. 12 : Courbure d'une section par rapport à sa distance de l'axe neutre.....	54
Figure 2. 13 : représentation des déformations de l'acier (en haut) et du béton (en bas) avec l'axe de la barre d'acier en abscisse dans le cas de la fissuration accidentelle. ....	60

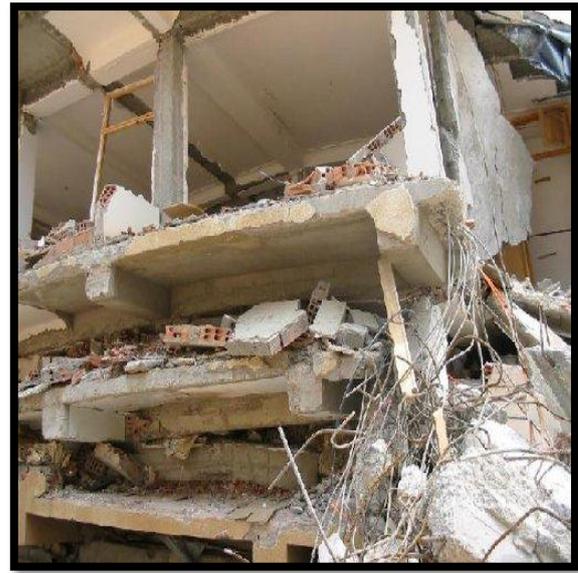
Figure 2. 14 : Représentation des déformations de l'acier et du béton avec l'axe de la barre d'acier en abscisse dans le cas de la fissuration symétrique .....	60
Figure 3. 1 : caractéristique géométrique du voile en béton armé SAFE (T10) .....	67
Figure 3. 2 : (a) plan de ferrailage (T10) , (b) la disposition du ferrailage horizontal (18T10), le ferrailage vertical 2× (25T10) pour le voile (T10).....	68
Figure 3. 3 : caractéristique géométrique du voile en béton armé (BC 80) .....	69
Figure 3. 4 : (a) plan de ferrailage (BC 80) , (b) le ferrailage horizontal (14T6) et vertical 2×(19T6 ) pour le voile (BC80) .....	70
Figure 3. 5 : Dispositif de chargement pour les maquettes du programme SAFE.....	71
Figure 3. 6 : Essai dynamique sur table vibrante de référence avec deux masses M1 et M2, la masse M2 étant située hors de la table.....	72
Figure 3. 7 : (a) le maillage du voile (T10) SAFE, (b) le maillage du voile BC 80 a l'échelle macroscopique.....	75
Figure 3. 8 : comportement uni axiale du modèle [la borderie, 2003].....	76
Figure 3. 9 : Courbes effort-déplacement .....	77
Figure 3. 10 : Modèle Elasto-Plastique parfait .....	78
Figure 3. 11 : Modèle Elasto-Plastique avec écrouissage.....	79
Figure 3. 12 : la réponse global (expérimental avec numérique (quasi statique)) pour voile T10 par une Approche Multicouche. ....	80
Figure 3. 13 : Réponse Déplacement –temps (T10) .....	81
Figure 3. 14 : la réponse cyclique (expérimental Vs. numérique ) pour le voile T10.....	82
Figure 3. 15 : La courbe push over de voile (BC 80) .....	84
Figure 3. 16 : la réponse global (expérimental vs numérique (statique) pour le voile BC80) .....	85
Figure 4. 1 : modèles bilinéaire équivalents. ....	89
Figure 4. 2 : Idéalisation selon le FEMA – 356 .....	89
Figure 4. 3 : Courbe PUSHOVER pour le voile T10. ....	93
Figure 4. 4 : Répartition des courbures en fonction de la hauteur (sollicitée en cisaillement pure).....	97
Figure 4. 5 : déformé initiale et finale du voile T10 (SAFE).....	98
Figure 4. 6 : évolution d'endommagement pour différent cycle T10 et comparaison avec l'expérimental. (a) La carte d'endommagement pour un déplacement élastique $\Delta_e$ de 0.9 mm, (b) évolution des ouvertures de fissures d'un voile T10 expérimentalement, (c) La carte d'endommagement pour un déplacement cible $\Delta_t$ de 5.3 mm, (d) évolutions des ouvertures des fissures du voile T10 (SAFE) expérimentalement. ....	100
Figure 4. 7 : La carte de l'ouverture de fissures pour un déplacement élastique de 0.9 mm. ....	101

Figure 4. 8 : La carte de l'ouverture de fissures pour un déplacement cible de 5.3 mm.....	101
Figure 4. 9 : La carte de l'ouverture de fissures pour un déplacement de 5.7 mm.....	102
Figure 4. 10 : Courbe PUSHOVER pour le voile BC80.....	103
Figure 4. 11 : Distribution de courbure et de déformation le long de la hauteur du mur .....	106
Figure 4. 12 : La carte d'endommagement pour un voile élancé .....	107
Figure 4. 13 : évolution d'ouverture de fissure pour un voile élancé et comparaison avec l'expérimental .....	107

## Introduction générale

Dans la famille des risques naturels, les séismes sont considérés comme les plus meurtriers. Ils provoquent systématiquement des dégâts dans les ouvrages de génie civil (bâtiments, ponts, centrales nucléaires, barrages...), et des pertes humaines. C'est la raison pour laquelle la prévention et la connaissance du comportement des ouvrages sont indispensables.

Plusieurs tremblements de terre ont été enregistrés par le passé. Citons à titre d'exemple : le séisme de San Francisco 1906 qui a causé 3000 morts et 9.5 milliard de dollars, le Séisme Izmit – Turquie en 1999 (magnitude 6.9) qui a causé 16 000 victimes et 24000 disparus (figure I.1). Un violent tremblement de terre a frappé le centre de l'Italie en 2009, faisant plus de 300 morts et des milliers de réfugiés. L'Algérie contemporaine a été frappée par deux puissants séismes : le Séisme d'El Asnam (5000 morts) et de Boumerdes (2278 morts) (figure I.1).



**Figure I.1- A Gauche : le Séisme Izmit (Turquie 1999)- A Droite : Séisme de Boumerdes (Algérie 2003)**

Une structure peut être conçue pour résister à un séisme donné sans subir aucun dommage et ce en absorbant l'énergie sismique par un comportement élastique. Cependant, une telle conception ne serait pas économique, voire même irréaliste. L'incursion dans le domaine non linéaire (plastique) à travers la dissipation plastique des éléments structuraux offre aux structures une capacité d'absorption des sollicitations sismiques.

Les voiles ou murs de contreventement sont devenus les éléments structuraux les plus utilisés dans une conception sismique. Ils peuvent être généralement définis comme des éléments verticaux à deux dimensions dont la raideur hors plan est négligeable. Dans leurs plans, ils présentent une grande résistance et une grande rigidité vis-à-vis des forces horizontales. Par contre, dans la direction perpendiculaire à leur plan, ils offrent très peu de résistance vis-à-vis des forces horizontales et ils doivent être contreventés par d'autres murs ou par des portiques. L'utilité des voiles de contreventement dans les bâtiments en zone sismique est bien reconnue dans le monde, car lorsque ces voiles sont bien disposés dans un bâtiment, ils peuvent former un système de résistance aux forces latérales très efficaces dans le domaine non linéaire.

Dans cette étude, nous nous intéressons particulièrement à l'évaluation des valeurs des coefficients de comportements des voiles. 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 compréhension et la prédiction du comportement sismique des murs voiles en béton armé a pour objectif d'améliorer les codes de calcul et pour vérifier si les règles de conception estiment bien les paramètres locaux.

Le deuxième objectif de cette thèse est d'évaluer la valeur de la longueur de la rotule plastique dans un voile en béton armé sous un chargement sismique. La dissipation dans les éléments structuraux est assurée par des zones jouant le rôle de fusibles. L'apparition des rotules plastiques se fait aux extrémités des éléments structuraux, Le paramètre essentiel qui définit ces rotules dans les lois de comportement, est la longueur de la rotule plastique ( $L_p$ ). Dans ce travail, neuf formules théoriques différentes ont été utilisées afin d'estimer ce paramètre ( $L_p$ ) dans le but d'évaluer son influence sur le comportement global et local des voiles en béton armé.

Le sujet qui nous préoccupe plus particulièrement ici est le comportement local des voiles en béton armé (fissuration, endommagement, ..). L'établissement de ce travail nécessite le recours à des outils puissants permettant une bonne représentation de la géométrie des voiles d'une part et d'atteindre une réponse satisfaisante de leur comportement d'autre part. Pour pouvoir atteindre nos deux objectifs (Évaluation des coefficients de comportement et des rotules plastiques), nous utilisons une modélisation à base d'éléments finis en se basant sur un logiciel de calcul (**CASTEM**). Notre modélisation est validée par des tests expérimentaux issus de programmes internationaux menés sur des voiles en béton

armé. Parmi ces programmes ; le programme **CASSBA** (Conception et Analyse Sismique des Structures en Béton armé), programme qui a permis de suivre les travaux effectués sur les murs en béton banché chaîné. Le programme **CAMUS** (Conception et analyse des murs sous séisme) cette nouvelle recherche a été en mesure de conclure que « ...la bonne tenue sismique des murs convenablement dimensionnés selon les règles du béton armé, telles que formulées dans les règles PS92, paraît acquise.» le programme de recherche expérimental **SAFE** (Structures armées faiblement élancées). Il s'agit d'une série des tests pseudo dynamiques sur des murs de cisaillement réalisés au centre commun de recherche européen à ISPRA (Italie) leur rôle est de préciser les marges inhérentes à la pratique de dimensionnement sismique des voiles de contreventement dans le domaine nucléaire.

La modélisation numérique est basée sur des lois de comportement non linéaire tant pour l'acier que pour le béton. L'objectif général de ce travail est d'aboutir à une technique de modélisation qui puisse contribuer à :

- comprendre les phénomènes et les mécanismes de fonctionnement de voile en béton armé sous une sollicitation sismique,
- améliorer et développer les codes de constructions,
- évaluer la sécurité des structures à voiles porteurs en béton armé.

**Le présent manuscrit est composé de quatre chapitres :**

Après cette présente introduction générale qui a permis de poser la problématique et de montrer l'intérêt de l'étude du comportement des voiles en béton armé. Le premier chapitre est une bibliographie générale sur les voiles en béton armé sous sollicitations sismiques.

Le second chapitre est consacré à la notion de coefficient de comportement et aux méthodes développées et utilisées pour son évaluation. Puis, les propriétés des rotules plastiques sont discutées et les différentes méthodes utilisées pour leurs évaluations sont évoquées en vue de la détermination des lois moment-courbure et des courbes de capacités. Ensuite, nous rappelons également dans ce chapitre les vérifications des résistances de cisaillement par les différents codes de dimensionnement utilisés pour la conception des voiles.

Dans le troisième chapitre est exposée de façon détaillée la démarche de modélisation entreprise dans cette recherche. Le cadre théorique de la modélisation numérique permettant la simulation numérique des voiles en béton armé est évoqué. Il est évident que toute recherche s'appuie sur des hypothèses relatives aux quelques phénomènes qui entrent en jeu dans le cadre de la modélisation du matériau composite béton armé. Les lois de

comportement ont été incorporées dans un programme numérique établi pour l'analyse du comportement non linéaire des structures en béton armé. Le comportement global des voiles est étudié.

Le dernier chapitre est consacré à la validation numérique dans lequel la simulation numérique des voiles élancés et non élancés en béton armé est présentée en vue d'analyser le comportement local en termes de dissipation. On discutera l'évaluation des coefficients de comportement et des rotules plastiques.

Le travail se termine par des conclusions et des perspectives.

# **Chapitre 1**

**Etude bibliographique des voiles en béton armé sous chargement sismique**

## Chapitre 1 Etude bibliographique des voiles en béton armé sous chargement sismique

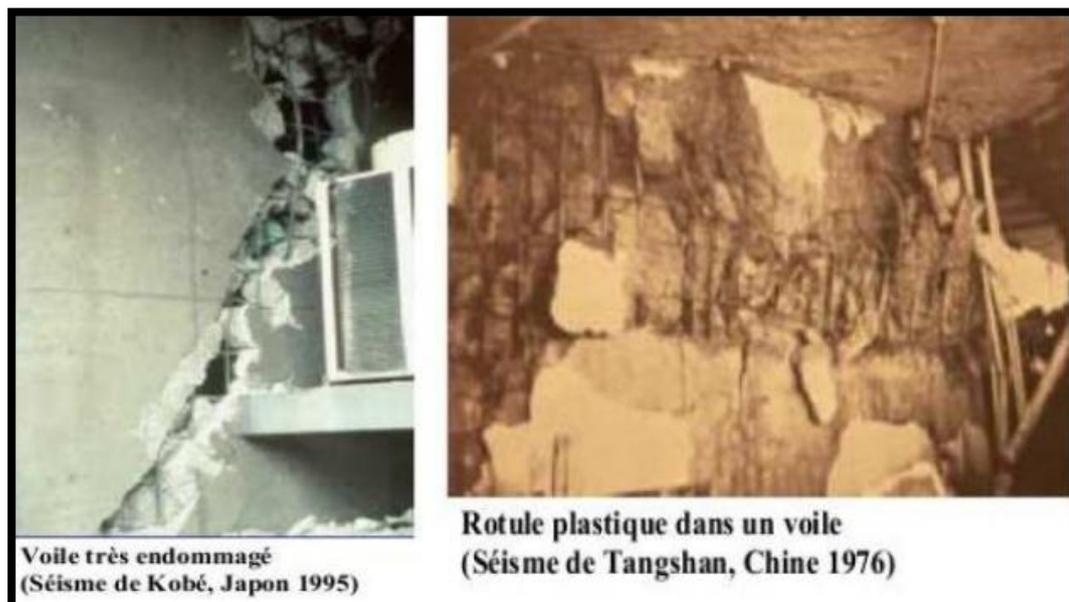
---

### 1.1 Introduction

Pour les voiles en béton armé, les recommandations parasismiques leur confèrent un intérêt particulier. En effet, un séisme de forte intensité, la prise en compte de mauvaises hypothèses de calculs ou des erreurs de mise en œuvre fait que certaines structures peuvent être « mal dimensionnées ».

Dans de nombreux pays qui sont exposés au risque sismique, les structures des murs en cisaillement (voile) ont été pratiquées depuis 1960 pour les immeubles moyens et grands hauteur et pour les ouvrages spéciaux (les ouvrages nucléaires). L'utilité des voiles dans les bâtiments en zone sismique est bien reconnue dans le monde, car lorsque ces voiles sont bien disposés dans un bâtiment, ils peuvent former un système de résistance à forces latérales très efficaces dans le domaine non linéaire.

Leur rôle dans les structures courantes en béton armé consiste principalement dans le transfert des charges sismiques. Souvent, ce sont les voiles qui supportent la majorité des charges sismiques.



**Figure 1.1** : Dégradation des structures en voile au niveau de la zone critique face aux séismes (1) .

## **1.2 Qu'est-ce qu'un mur de cisaillement, a quoi sert-il ?**

Les murs de cisaillement résistent aux charges latérales comme un tremblement de terre ou un ouragan. Ce sont des éléments principaux structurels qui sont utilisés pour assurer la stabilité latérale de la structure, limiter la dérive latérale et lui permettre de résister dans le plan horizontal des charges induites (2). Ils ont été essentiellement conçus comme des systèmes de contreventement pour résister à la charge verticale et horizontale.

Les murs en voiles doivent présenter une épaisseur minimale de 15 cm et une largeur au moins égale à quatre fois l'épaisseur. Les éléments ne satisfaisant pas à cette condition sont considérés comme des éléments linéaires. Les voiles ou murs de contreventement ; en anglais « shear-wall » peuvent être généralement définis comme des éléments verticaux à deux dimensions dont la raideur hors plan est négligeable. Dans leur plan, ils présentent généralement une grande résistance et une grande rigidité vis-à-vis des forces horizontales. Par contre, dans la direction perpendiculaire à leur plan, ils offrent très peu de résistance vis-à-vis des forces horizontales et ils doivent être contreventés par d'autres murs ou par des portiques.

Les voiles ont une grande capacité de dissipation d'énergie lors d'un événement sismique. Correctement dimensionnés, ils peuvent être particulièrement efficaces pour assurer la résistance aux forces horizontales, permettant ainsi de réduire les risques. Notons, pour cela, les avantages importants que présente leur utilisation par rapport aux constructions à cadres ou portiques :

### Augmentation de la rigidité de l'ouvrage

Grâce à leur grande rigidité vis-à-vis des forces horizontales, ils permettent de réduire considérablement les dommages sismiques des éléments non structuraux, dont la valeur dépasse généralement les deux tiers de celle de l'ensemble du bâtiment. Leur utilisation permet de diminuer l'influence des phénomènes du second ordre et éloigne la possibilité d'instabilité. Lors de nombreux séismes modérés, les faibles déplacements latéraux permettent de réduire les effets psychologiques sur les habitants des immeubles.

## **Chapitre 1 Etude bibliographique des voiles en béton armé sous chargement sismique**

---

L'utilisation du système constructif à voile peut apporter aussi des avantages économiques:

- La masse élevée des voiles permet un bon isolement acoustique et la bonne capacité calorifique du béton confère au bâtiment une inertie thermique appréciable.

- Une construction à voiles en béton armé est souvent plus économique qu'une construction à poteaux et poutres, puisque les murs remplacent à la fois les poteaux, les poutres et les cloisons, et on économise ainsi les aciers.

### **1.3 Caractéristiques essentielles du comportement des voiles en béton armé**

On peut considérer que les principaux paramètres ayant une influence prépondérante sur le comportement d'un voile sont les suivants :

- l'élanement, défini comme le rapport de la hauteur par la largeur du voile,  $h / l$
- Les caractéristiques géométriques des éléments.
- la disposition et le pourcentage des armatures,
- l'intensité de l'effort normal.
- Type de chargement : statique ou cyclique, monotone.

### **1.4 Dommages et dégâts subis par les voiles :**

Le terme « voile » regroupe des éléments de structures au comportement mécanique très divers, cependant du point de vue de leur fonctionnement, deux grandes familles se distinguent :

1. Voiles courts ( $H/L < 2$ ).
2. Voiles élancés ( $H/L > 2$ ).

Le voile est considéré comme une console parfaitement encastree à sa base, donc il est sollicité par un effort normal (N) et un effort tranchant (V) sur toute sa hauteur, et un moment fléchissant qui est maximal dans sa section d'encastrement , alors il subit

## Chapitre 1 Etude bibliographique des voiles en béton armé sous chargement sismique

essentiellement des ruptures à la base et des fissures ouvertes en (X) dans la section centrale, qui sont représentés dans les figures suivante :

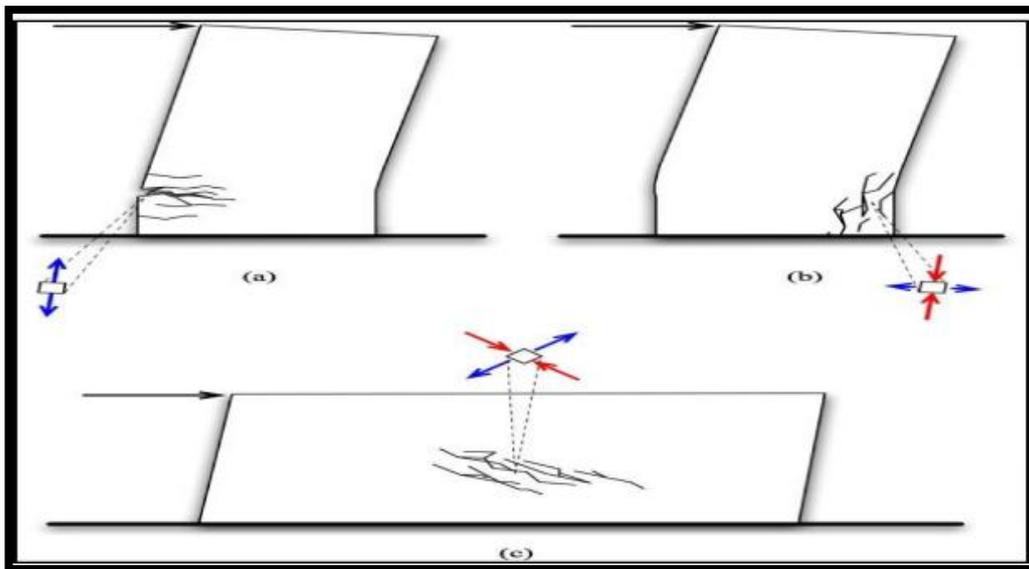


Figure 1. 2 : Les ruptures et les fissurations subis par les voiles (3).



Figure 1. 3 : Dégâts subis par les voiles (3).

### 1.5 Modes de rupture des voiles :

#### 1.5.1 Modes de rupture des voiles élancés :

##### a) Ruptures par flexion :

## Chapitre 1 Etude bibliographique des voiles en béton armé sous chargement sismique

---

**Mode f1** : rupture par plastification des armatures verticales tendues et écrasement du béton comprimé. C'est le schéma de ruine le plus satisfaisant qui correspond à la formation d'une rotule plastique dans la partie inférieure du voile avec une importante dissipation d'énergie. On observe ce mode de ruine dans les voiles très élancés, soumis à un effort normal de compression faible et à un cisaillement modéré.

**Mode f2** : rupture par écrasement du béton. Ce mode de ruine se rencontre pour les voiles assez fortement armés soumis à un effort normal important, ce mode est moins ductile que le mode **f1**, surtout dans le cas d'une section rectangulaire.

**Mode f3** : rupture fragile par ruptures des armatures verticales tendues. C'est un mode de rupture qui se rencontre dans les voiles faiblement armés, lorsque les armatures verticales sont essentiellement réparties et non concentrées aux extrémités. La ductilité et la capacité d'absorption d'énergie peuvent être améliorées en concentrant les armatures verticales aux extrémités.

### b) Ruptures par flexion-cisaillement :

**Mode f/t** : rupture par plastifications des armatures verticales de flexion et des armatures transversales. C'est ce qui se produit dans les voiles moyennement élancés où la flexion n'est plus prépondérante et où les armatures horizontales sont insuffisantes.

### c) Rupture par effort tranchant :

**Mode t** : rupture des bielles de compression développées dans l'âme du voile. On l'observe dans les voiles munis de raidisseurs, fortement armés longitudinalement et transversalement et soumis à des cisaillements élevés.

**Mode g** : rupture par glissement au niveau des reprises de bétonnage. Ce mode de rupture qui est plutôt caractéristique aux voiles courts a été aussi observé dans les cas des voiles moyennement élancés. Ce type de rupture peut apparaître lorsque les armatures verticales réparties sont insuffisantes, la qualité des reprises de bétonnage est mauvaise et la valeur de l'effort normal est faible.

## Chapitre 1 Etude bibliographique des voiles en béton armé sous chargement sismique

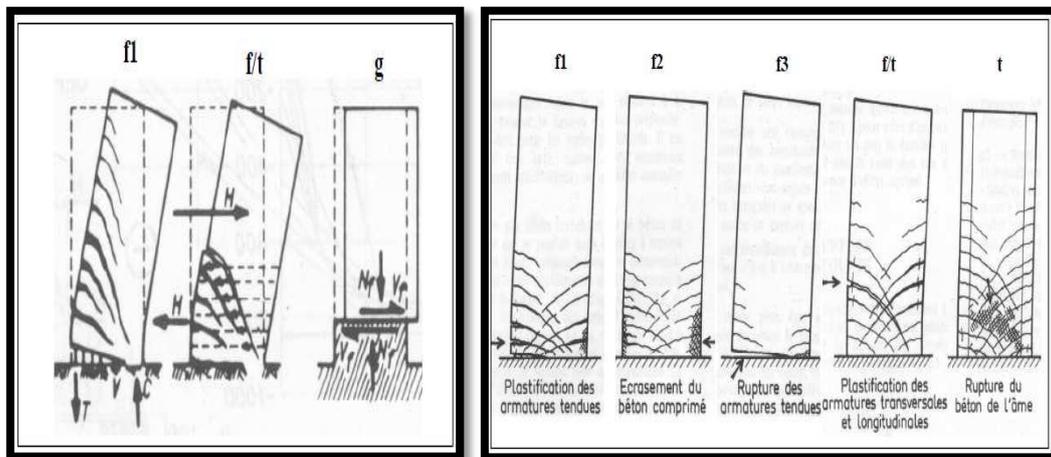


Figure 1. 4 : Modes de rupture des voiles élancés

### 1.5.2 Modes de rupture des voiles courts :

Dans ce cas, l'effort tranchant est généralement prépondérant sur la flexion. On distingue trois cas :

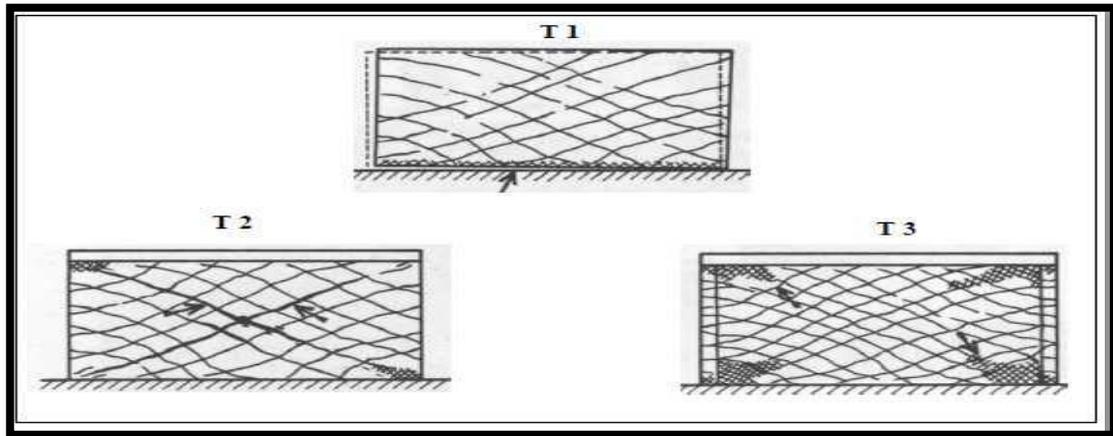
**Mode T1** : rupture par glissement («sliding shear») à l'encastrement. Ce mode de rupture, conséquence de la plastification progressive des armatures verticales est accompagné d'importants glissements qui réduisent d'une façon significative la raideur et la dissipation hystérétique. Ce type de rupture peut aussi être obtenu lorsque les armatures verticales réparties sont insuffisantes.

**Mode T2** : rupture diagonale (« diagonal tension failure») avec plastification ou rupture des armatures le long des fissures diagonales. Ce mode est rencontré dans les voiles moyennement armés sollicités par un faible effort normal.

**Mode T3** : rupture par écrasement (« diagonal compression failure») du béton de l'âme, à la base des bielles transmettant les efforts de compression. C'est un mode de ruine caractéristique des voiles fortement armés, surtout s'ils sont associés à des raidisseurs sur leur bord.

**Chapitre 1 Etude bibliographique des voiles en béton armé sous chargement sismique**

---



**Figure 1. 5 :** Modes de rupture des voiles courts.

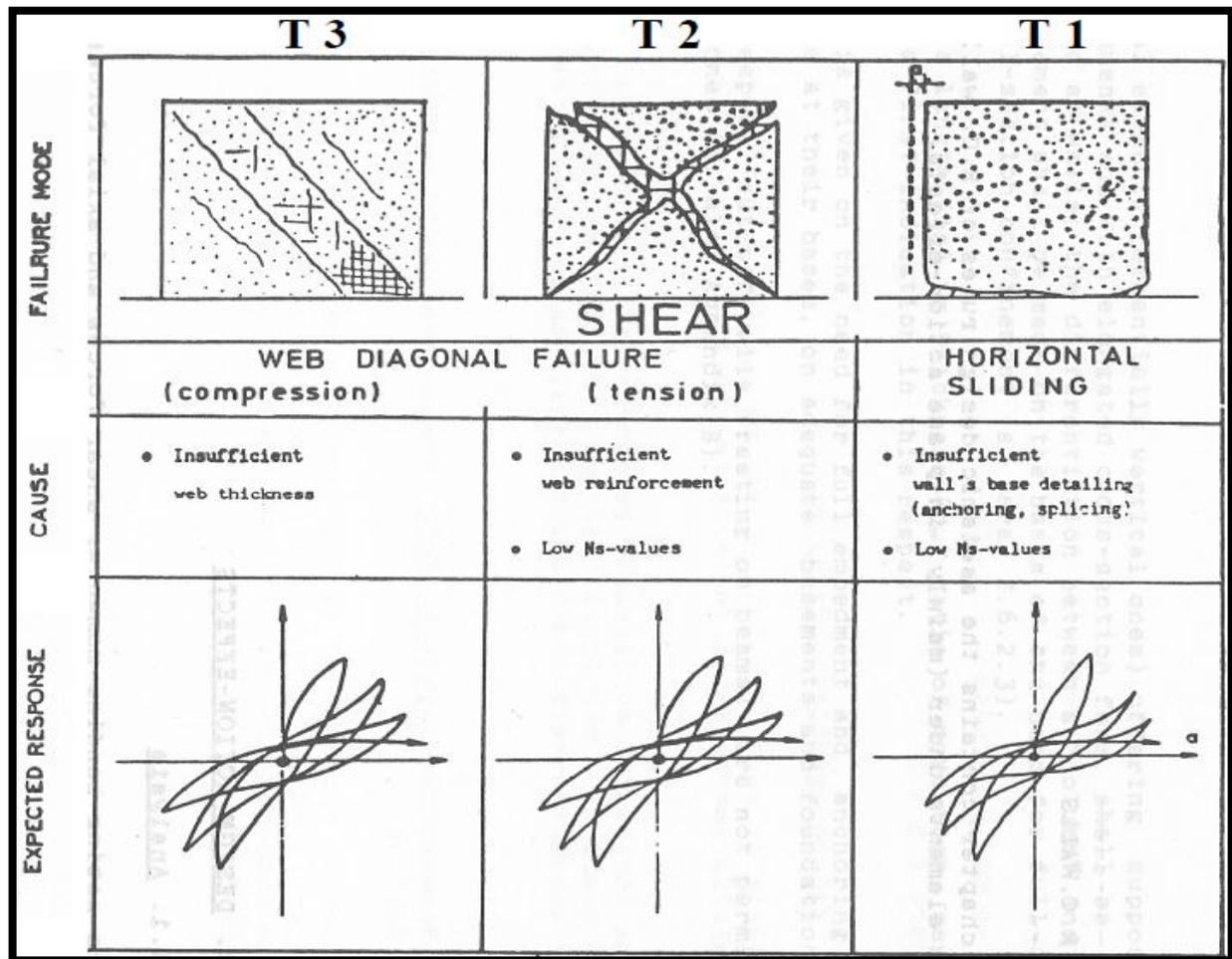


Figure 1. 6 : Modes de rupture des voiles courts (2).

### 1.6 Quelques principes de dimensionnement :

La plupart des codes de constructions proposent de dimensionner des bâtiments au séisme de façon à ce que l'énergie sismique apportée puisse être absorbée et dissipée par des déformations inélastiques (plastiques, fissuration, ..). Ces déformations sont bien supérieures à celles qui sont généralement admises sous d'autres chargements, mais en contrepartie les efforts sismiques sont plus faibles que ceux qui seraient calculés en supposant un comportement parfaitement élastique (2).

## **Chapitre 1 Etude bibliographique des voiles en béton armé sous chargement sismique**

---

Le concept en vigueur dans la plupart des codes dont **l'Eurocode8** et celui de «capacity design» qui prévoit la formation d'un mode de rupture par création d'une rotule plastique à la partie inférieure d'un voile supposé encastré à sa base. Une grande capacité de déformation ductile est concentrée dans cette région (zone fusible) tout en assurant un comportement élastique au-dessus de la zone critique. Pour atteindre une grande capacité d'absorption et de dissipation d'énergie, les sources potentielles de rupture fragile par effort tranchant doivent être éliminées en s'assurant que la plastification de la zone critique intervient en premier. L'augmentation de la ductilité dans une section passe par la présence des cadres disposés autour des armatures verticales dans les zones confinées (4).

S'agissant des structures de type voiles, les **règles françaises PS 92** adoptent un principe de conception différent : le fonctionnement d'un voile doit permettre de mobiliser à la fois une dissipation d'énergie par endommagement du béton et plastification des aciers et une transformation d'énergie par soulèvement des masses. On admet ainsi que la fissuration et la plastification de l'acier peuvent se produire sur une hauteur plus grande que la zone critique. Dans la zone critique, le béton n'est pas confiné, mais en contrepartie les contraintes dans le béton doivent rester limitées. Des dispositions sont également prises pour éviter une rupture fragile par effort tranchant. Cette méthode alternative permet alors de concevoir des voiles faiblement armés. Sous l'action sismique, ces voiles devraient avoir un fonctionnement «multi fusible », résultant d'une ductilité répartie et d'une fissuration distribuée sur la hauteur du voile (5).

À côté de la réglementation parasismique, la modélisation numérique reste un outil très puissant qui permet de trancher de la validité ou non des règles parasismiques de conception de voiles.

### **1.7 Choix de modélisation :**

Pour établir un modèle de calcul, différentes stratégies de modélisation ont été développées. Quatre approches peuvent être adoptées afin de modéliser le comportement

## **Chapitre 1 Etude bibliographique des voiles en béton armé sous chargement sismique**

---

d'un élément de structure soumise à des chargements mécaniques de type cyclique: modèles géologiques, modèles globaux, modèles intermédiaires ou semi-locaux, et modèles locaux.

### **1.7.1 Les modèles géologiques :**

Ils visent à traiter une structure dans un environnement naturel par référence à des données géologiques. Les principales caractéristiques de l'ouvrage sont prises en compte même si sa géométrie peut être simplifiée. Le but de ce type de modélisation est de déterminer les déformations du sol et celles de l'ouvrage. Ce niveau de modélisation est bien adapté à la simulation des ouvrages géotechniques comme les ouvrages des soutènements, les barrages-poids ... (6).

### **1.7.2 Les modèles globaux :**

À ce niveau de modélisation, l'état de l'art des modèles globaux développés pour le calcul des voiles semble moins avancé que celle des modèles construits pour le calcul des poutres et des poteaux. Ceci est dû au fait qu'une contrainte supplémentaire de modélisation doit être prise en compte: le comportement non linéaire en cisaillement. En effet, comme l'élancement des voiles est inférieur à celui des poutres ou des poteaux (2). La contribution des sollicitations de cisaillement complique davantage l'établissement d'un modèle global simple pour la prédiction.

### **1.7.3 Les modèles semi-locaux :**

Ils permettent d'utiliser les lois de comportement locales de comportement du béton et de l'acier, dans le cadre d'une cinématique simplifiée, associée aux éléments finis de type poutre, plaque ou coque. Les modèles de ce type permettent d'une part d'exploiter les caractéristiques des éléments de structure en réduisant la taille du système d'équations, et d'autre part favorisent une intégration plus rapide de la loi de comportement (2).

### **1.7.4 Les modèles locaux :**

Ils ne mettent en œuvre aucune hypothèse sur la forme des distributions spatiales du champ de déplacement. Comme pour les modèles semi-locaux, la rhéologie est exprimée en

## **Chapitre 1 Etude bibliographique des voiles en béton armé sous chargement sismique**

---

variables locales : contraintes et déformations. Cette loi de comportement est en général indépendante de la géométrie de la structure (2).

### **1.8 Échelles de discrétisation**

Plusieurs approches peuvent être adoptées afin de modéliser le comportement des éléments des structures par éléments finis soumis à des chargements mécaniques : En plus des quatre niveaux de modélisation, nous pouvons aussi distinguer trois approches de discrétisation : approche globale, approche semi-globale et approche macroscopique.

#### **1.8.1 Approche globale**

À partir de lois de comportement du matériau, le comportement d'une section courante, prise dans son ensemble peut être défini. Ces lois sont formulées en reliant les contraintes généralisées (effort normal – moment fléchissant – effort tranchant...) et les déformations généralisées (allongement – rotation – courbure). Plusieurs types de lois existent : lois pour la flexion, pour le cisaillement, et pour la traction – compression. Bien que quelques lois prennent en compte les interactions entre deux efforts généralisés, toutes les lois (modèles) disponibles dans cast3M ne comportent aucun couplage entre les différents modes de fonctionnement (ex : moment fléchissant et effort tranchant). Cette approche conduit en général à un temps de calcul réduit, mais elle ne permet pas de définir précisément les comportements locaux, par ailleurs, par exemple dans le cas du béton armé, le caractère composite de ce matériau ainsi que les mécanismes de formation, d'ouverture et de fermeture de fissures ne peuvent être considérés (7).

##### **✓ Parmi les avantages d'approche globale**

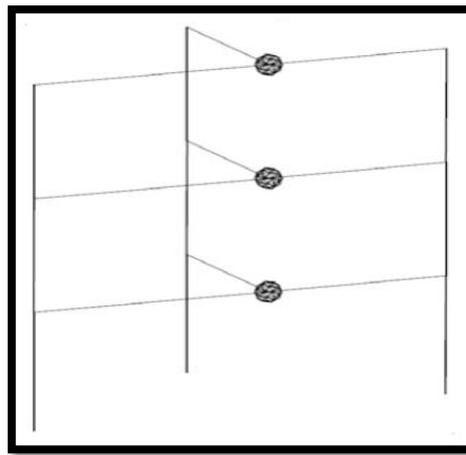
- Elle est adaptée à la modélisation des structures minces de type coque (dalle et voile).
- elle est peu coûteuse en temps CPU et en taille mémoire.
- elle peut être combinée à l'emploi d'autres éléments de structure (coques multicouches, ...).

##### **✓ Les inconvénients d'approche globale**

## Chapitre 1 Etude bibliographique des voiles en béton armé sous chargement sismique

---

- Elle ne permet pas de représenter finement les phénomènes mécaniques et les réponses locales.
- la mise en œuvre de modèles de comportement globaux nécessite une identification des paramètres pouvant être difficile.



**Figure 1. 7:** Discrétisation globale d'une structure – Projet Ecoleader - Structure Camus (8).

### 1.8.2 Approche macroscopique

Ce type de modélisation basé sur la théorie de thermodynamique et l'approche locale très utile pour la validation du comportement expérimental d'un élément de structure et pour confirmer les modèles globaux. Les lois de comportement des matériaux sont entièrement décrites par des variables locales (contrainte –déformation), ce type de modélisation est en général indépendant de la géométrie de la structure. Ce type de modélisation donne des informations locales sur l'état de la fissuration et de l'endommagement. L'analyse est relativement lourde, prenant un temps plus important à cause de l'élaboration de modèle théorique et l'implémentation dans le code de calcul par le modélisateur.

Parmi les avantages et les inconvénients de l'approche locale.

## Chapitre 1 Etude bibliographique des voiles en béton armé sous chargement sismique

---

- elle permet de représenter finement des géométries complexes du type nœuds d'ossatures ou zones que l'on cherche à modéliser avec précision (y compris l'ensemble du ferrailage longitudinal et transverse).
- elle permet de représenter tous les types de chargement.
- elle permet d'accéder aux grandeurs globales et locales.
- elle est plus coûteuse en temps CPU et en taille mémoire que les modélisations semi-globales et globales (9).



**Figure 1. 8 :** Discrétisation locale tridimensionnelle d'une structure – Projet Ecoleader -Structure Camus (8)

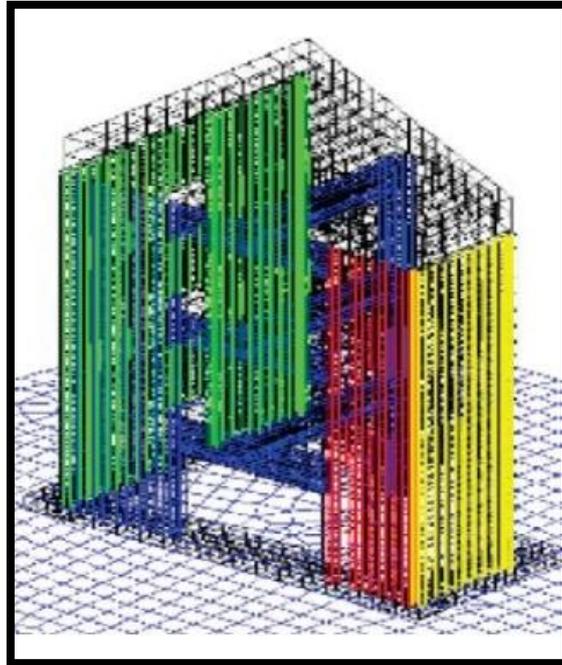
### 1.8.3 Approche semi-globale

Cette approche est un compromis entre les deux approches précédentes. Elle permet de simplifier la modélisation d'une structure par rapport à une approche locale tout en apportant un degré d'analyse supérieur à une approche globale. Chaque élément de la structure est décomposé en plusieurs éléments poutres possédant un nœud à chaque extrémité. Les déplacements à chaque nœud peuvent être utilisés pour déterminer les déformations généralisées au niveau de la poutre. La théorie des poutres suivant l'hypothèse de Bernoulli ou de Timoshenko permet d'accéder aux déformations locales au niveau de

## Chapitre 1 Etude bibliographique des voiles en béton armé sous chargement sismique

---

chaque fibre. Ces déformations sont alors utilisées pour calculer les contraintes, dont l'intégration sur la section conduit aux efforts généralisés (9).



**Figure 1. 9 :** Discretisation semi-globale d'une structure – Projet Ecoleader - Structure Camus (8)

### 1.9 Ferrailages des voiles (10) :

#### 1.9.1 Introduction :

Le voile est un élément structural de contreventement soumis à des forces verticales et, des forces horizontales. Donc, le ferrailage des voiles consiste à déterminer les armatures en flexion composée sous l'action des sollicitations verticales dues aux charges permanentes (G) et aux surcharges d'exploitation (Q), ainsi que sous l'action des sollicitations horizontales dues aux séismes (10). Pour faire face à ces sollicitations, on prévoit trois types d'armatures :

- Armatures verticales
- Armatures horizontales

## Chapitre 1 Etude bibliographique des voiles en béton armé sous chargement sismique

---

- Armatures transversales

Après avoir fait le calcul du ferrailage pour tous les voiles, nous avons constaté qu'il est possible d'adopter le même type de ferrailage pour un certain nombre de niveaux, pour cela nous ferrailons nos voiles par zones :

- **Zone I** : Niveaux RDC, 1 et 2

- **Zone II** : Niveaux 3, 4 et 5

- **Zone III** : Niveaux 6, 7, 8 et 9

➤ **Combinaison d'action :**

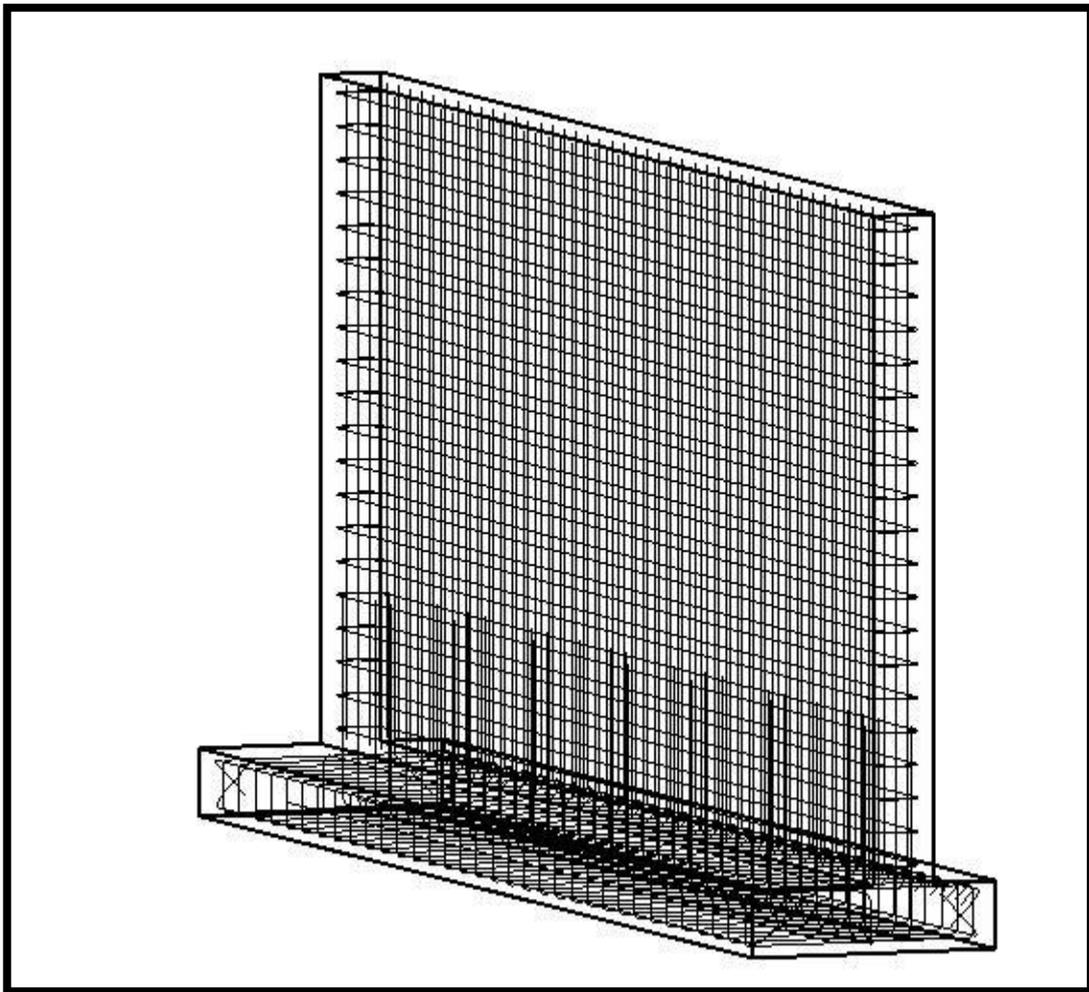
Les combinaisons d'actions sismiques et d'actions dues aux charges verticales à prendre sont données ci-dessous :

$$\text{Selon le BAEL 91} \begin{cases} 1,35 G + 1,5 Q \\ G + Q \end{cases}$$

$$\text{Selon le RPA révisé 2003} \begin{cases} G + Q \pm E \\ 0,8 G \pm E \end{cases}$$

### 1.9.2 Les méthodes pour le Ferrailage des voiles :

La méthode utilisée est issue de la RDM. Elle se base sur la notion d'une bande de largeur (d).



**Figure 1. 10 :** la disposition de ferrailage d'un voile

### 1.9.2.1 Exposé de la méthode

La méthode consiste à déterminer le diagramme des contraintes à partir des sollicitations les plus défavorables (N, M) en utilisant les formules suivantes.

$$\sigma_{max} = N/B + (M \times V)/I \quad (1.1)$$

$$\sigma_{min} = N/B - (M \times V)/I \quad (1.2)$$

Avec :

$B$  : Section du béton

## Chapitre 1 Etude bibliographique des voiles en béton armé sous chargement sismique

---

$I$  : Moment d'inertie du trumeau

$V$  et  $V'$  : Bras de levier ;

$$V = V' = \frac{L_{voile}}{2} \quad (1.3)$$

Le découpage de diagramme des contraintes se fait par en bandes de largeur ( $d$ ) donnée par :

$$d \leq \min\left(\frac{h_e}{2}; \frac{2L_c}{3}\right) \quad (1.4)$$

Avec :

$h_e$  : Hauteur entre nus des planchers du voile considéré

$L_c$  : La longueur de la zone comprimée

$$L_c = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{max} + \sigma_{min}} L \quad (1.5)$$

$L_t$  : Longueur tendue :  $L_t = L - L_c$

Les efforts normaux dans les différentes sections sont donnés en fonction des Diagrammes des contraintes obtenues :

❖ **Section entièrement comprimée:**

$$N_i = \frac{\sigma_{max} + \sigma_1}{2} \times d \times e \quad (1.6)$$

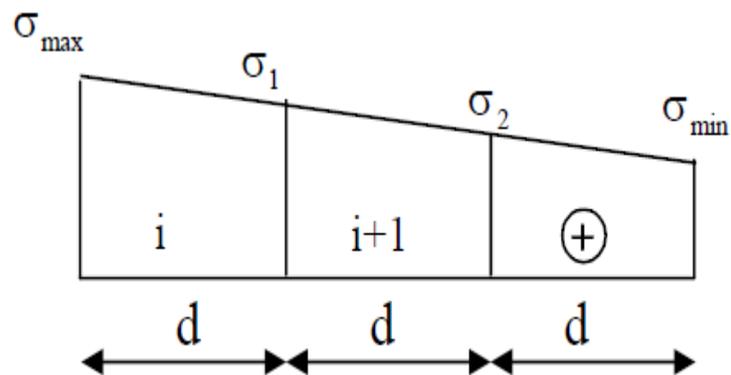
$$N_{i+1} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \times d \times e \quad (1.7)$$

Avec :

$e$  : épaisseur du voile

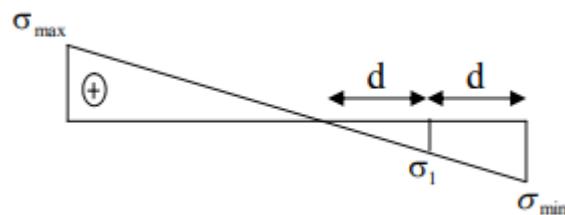
**Chapitre 1 Etude bibliographique des voiles en béton armé sous chargement sismique**

---



❖ **Section partiellement comprimée :**

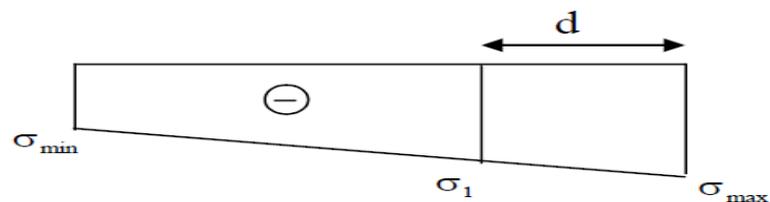
$$N_i = \frac{\sigma_{max} + \sigma_1}{2} \times d \times e \quad (1.8)$$



$$N_i = \frac{\sigma_1}{2} \times d \times e \quad (1.9)$$

❖ **Section entièrement tendue :**

$$N_i = \frac{\sigma_{max} + \sigma_1}{2} \times d \times e \quad (1.10)$$



**1.9.2.2 Armatures verticales :**

❖ **Section entièrement comprimée :**

## Chapitre 1 Etude bibliographique des voiles en béton armé sous chargement sismique

---

$$A_V = \frac{N_{1+B} \times f_{c28}}{\sigma_{s2}} \quad (1.11)$$

$B$  : section du voile

$$\sigma_{s2} = 348 \text{ MPA}$$

❖ **Section entièrement tendue :**

$$A_V = \frac{N_i}{\sigma_{s2}} \quad (1.12)$$

$$\sigma_{s2} = 348 \text{ MPA}$$

### 1.9.2.3 Armatures minimales :

✓ **Compression du béton :**

$A_{min} > 4 \text{ cm}^2$  Par mètre de parement mesuré perpendiculaire à ces armatures.

$$0.2\% \leq \frac{A_{min}}{B} \leq 0.5\% \quad (1.13)$$

Avec

$B$  : Section du béton comprimée.

✓ **Traction simple :**

$$A_{min} \geq \frac{B \times f_{c28}}{f_e} \quad (1.14)$$

Avec :

$B$  : Section du béton tendue

## **Chapitre 1 Etude bibliographique des voiles en béton armé sous chargement sismique**

---

Le pourcentage minimum des armatures verticales de la zone tendue doit rester au moins égale à 0.2 % de la section horizontale du béton tendu.

### **1.9.2.4 Exigences de RPA 99 (V 2003) :**

Le pourcentage minimum d'armatures verticales et horizontales des trumeaux est donné comme suit :

- Globalement dans la section du voile 15 %.
- En zone courantes 10 %.

### **1.9.2.5 Armatures horizontales :**

Les barres horizontales doivent être munies de crochets à 135° ayant une longueur de  $10 \Phi$ . D'après le BEAL 91 :

$$A_H = \frac{A_V}{4} \quad (1.15)$$

D'après le RPA 2003 :  $A_H \geq 0,15 \% \times B$

Les barres horizontales doivent être disposées vers l'extérieur. Le diamètre des barres verticales et horizontales des voiles ne devrait pas dépasser **1/10** de l'épaisseur du voile.

### **1.9.2.6 Armatures transversales :**

Les armatures transversales sont perpendiculaires aux faces des refends. Elles retiennent les deux nappes d'armatures verticales, ce sont généralement des épingles dont le rôle est d'empêcher le flambement des aciers verticaux sous l'action de la compression d'après l'article 7.7.4.3 du RPA99 révisé 2003.

Les deux nappes d'armatures verticales doivent être reliées au moins par 04 épingles au mètre carré.

### **1.9.2.7 Armatures de coutures :**

## Chapitre 1 Etude bibliographique des voiles en béton armé sous chargement sismique

---

Le long des joints de reprise de coulage, l'effort tranchant doit être repris par les aciers de coutures dont la section est donnée par la formule :

$$A_{Vj} = 1.1 \frac{T}{f_e} \quad (1.16)$$

Avec  $T = 1.4 \times V_U$

$V_U$ : Effort tranchant calculé au niveau considéré

Cette quantité doit s'ajouter à la section d'acier tendue nécessaire pour équilibrer les efforts de traction dus au moment de renversement.

### ❖ **Espacement :**

D'après l'article 7.7.4.3 du RPA révisé 2003, l'espacement des barres horizontales et verticales doit être inférieur à la plus petite des deux valeurs suivantes :

$$S_t \leq 1,5 \times e \text{ et aussi } S_t \leq 30 \text{ cm} \quad (1.17)$$

$$S_t \leq \min \{ 37,5 \text{ cm}, 30 \text{ cm} \} \Rightarrow S_t \leq 30 \text{ cm} \quad (1.18)$$

Avec :

$e$  = épaisseur du voile

À chaque extrémité du voile, l'espacement des barres doit être réduit de moitié sur 1/10 de la longueur du voile, cet espacement d'extrémité doit être au plus égale à 15 cm.

### ❖ **Longueur de recouvrement :**

Elles doivent être égales à :

-40Φ pour les barres situées dans les zones où le renversement du signe des efforts est possible.

## Chapitre 1 Etude bibliographique des voiles en béton armé sous chargement sismique

-20Φ pour les barres situées dans les zones comprimées sous l'action de toutes les combinaisons possibles de charges.

### ❖ Diamètre maximal:

Le diamètre des barres verticales et horizontales des voiles ne devrait pas dépasser 1/10 de l'épaisseur du voile.

### 1.9.3 La disposition du ferrailage

la figure 1.11 présente la disposition du ferrailage.

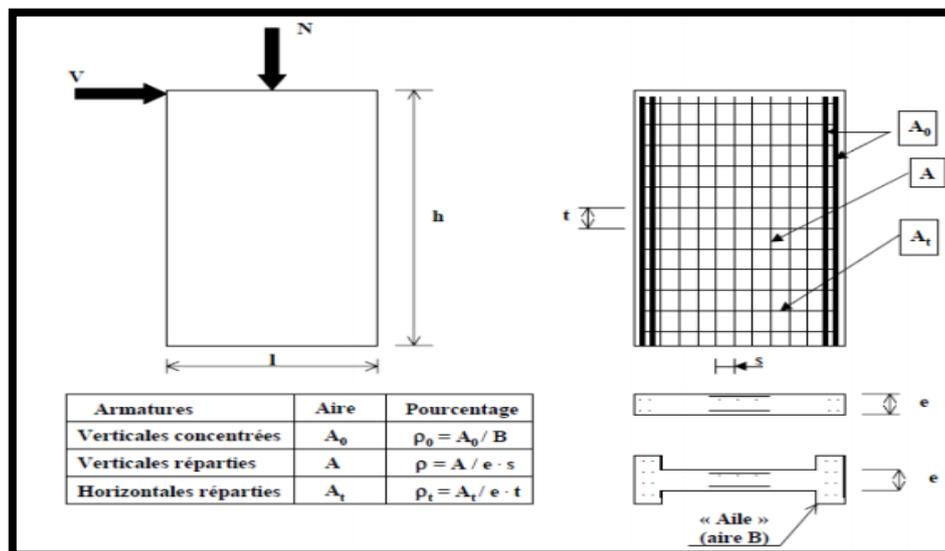


Figure 1. 11 : Schéma d'un voile plein et disposition du ferrailage (11)

### 1.9.4 Vérification au cisaillement :

La vérification de la résistance au cisaillement se fait avec majoration de 40% de la contrainte de cisaillement.

La contrainte de cisaillement est limitée comme suit :

$$\tau = \frac{1.4 V}{b d} \quad (1.19)$$

Avec  $V$ : effort tranchant à la base du refond.

## Chapitre 1 Etude bibliographique des voiles en béton armé sous chargement sismique

---

$b$  : La longueur de la section (épaisseur du voile).

$$\bar{\tau} = \min \{0.13 f_{c28} ; 4\} \quad (1.20)$$

$$\tau < \bar{\tau} \dots CV$$

$d = 0.9h$ . Avec  $h$  = hauteur de la section

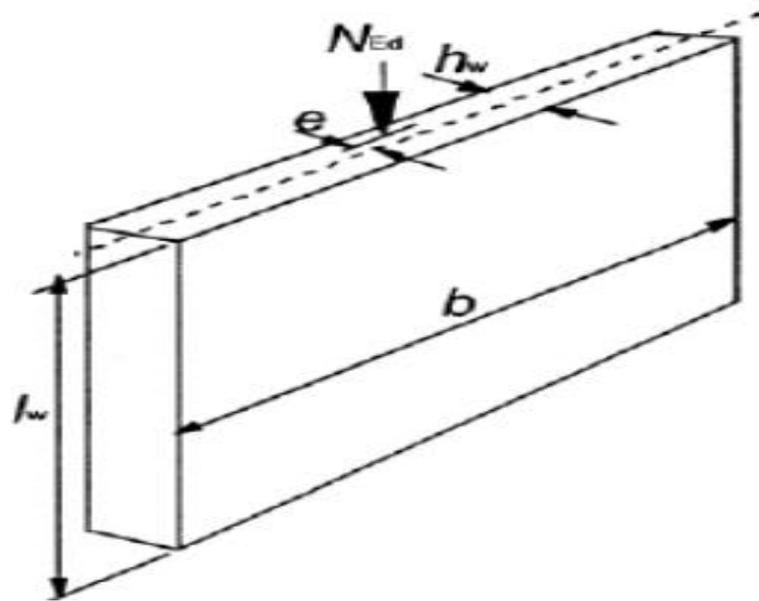


**Figure 1. 12 :** Cisaillement d'un voile faiblement armé (Séisme d'Anchorage, 1964)

### 1.10 Flambement des murs de contreventement (12) :

#### 1.10.1 Longueur de flambement

Le dimensionnement d'un voile est similaire au dimensionnement d'un poteau selon la figure 1.13. Il est donc nécessaire de pouvoir estimer son élancement et sa longueur de flambement. La convention de notation est la suivante (issue de l'EC2) :



**Figure 1.13 :** Dimensionnement d'un voile similaire au dimensionnement d'un poteau

$l_w$  : Hauteur libre du voile,  $b$  : Longueur du voile libre ;  $h_w$  : Épaisseur du voile

$l_0$  : Longueur de flambement du voile

Pour déterminer la longueur de flambement d'un mur, on fait la distinction entre deux cas de figure :

- Mur raidi ou non en dehors du plan, par des voiles perpendiculaires par exemple.
- Mur armé ou non-armé.

Dans tous les cas, on peut exprimer la longueur de flambement à partir de la formule :

$$l_0 = \beta l_w \quad (1.21)$$

#### 1.10.1.1 Valeur de $\beta$ pour les murs non-raidi-latéralement :

Dans ce cas le coefficient  $\beta$  est déterminé à partir du tableau ci-dessous :

**Chapitre 1 Etude bibliographique des voiles en béton armé sous chargement sismique**

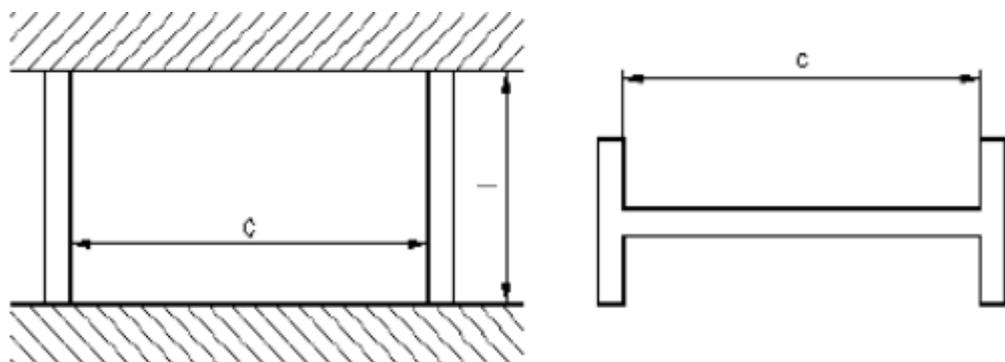
Voile ou bandes de voiles	
Armés verticalement	Non Armés verticalement
En continuité en tête et pied avec un plancher	0.90
De part et d'autre 0,85	
D'un seul coté 0,90	0.95
Sans continuité en tête et en pied avec un plancher	1,00

**Tableau 1. 1 :** valeur de  $\beta$  pour les murs non-raidi latéralement

**1.10.1.2 Valeur de  $\beta$  pour les murs raidis latéralement :**

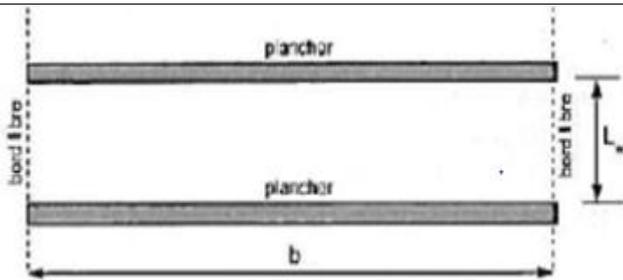
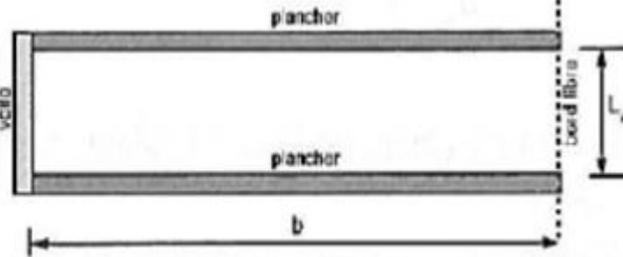
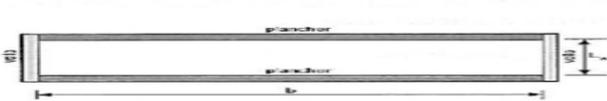
on représente un mur raidi latéralement sur la figure suivante ,Si  $c$  représente la distance entre nus intérieurs des raidisseurs, on pose :

$$b = c$$



**Figure 1. 14 :** mur raidi latéralement

**Chapitre 1 Etude bibliographique des voiles en béton armé sous chargement sismique**

Poteau et voile libre a une extrémité		$\beta = 2$
Voiles encastrés sur 2 rives (planchers)		$\beta = 1$
Voiles encastrés sur 3 rives (2 plancher + 1 voile transversal)		$\beta = \frac{1}{1 + \left(\frac{l_w}{3b}\right)^2}$
Voile encastrés sur 4 rives (2 plancher + 2 voiles transversaux)		$\beta = \frac{1}{1 + \frac{l_w}{b}}$ Si $b \geq l_w$
		$\beta = \frac{b}{2 l_w}$ Si $b < l_w$

Le coefficient  $\beta$  est alors donné par le tableau suivant :

**Tableau 1. 2 : valeur de  $\beta$  pour les murs raidi latéralement**

**1.10.2 Élancement mécanique du voile :**

À partir de la longueur de flambement du voile, on peut déterminer son élancement mécanique noté, en utilisant la formule suivante :

## Chapitre 1 Etude bibliographique des voiles en béton armé sous chargement sismique

$$\lambda = \frac{l_0 \times \sqrt{12}}{h_w} \quad (1.22)$$

### 1.10.3 La vérification vis à vis du flambement d'un voile :

Lorsque  $P_u$  est un effort de compression axial le voile est excentré de :  $e \leq a/6$ ,

le voile est stable vis-à-vis du flambement si on vérifie que

$$P_u \leq \Phi P_n$$

$$P_n = 0.55 \cdot f_{bc} \cdot A_g \left[ 1 - \left( \frac{k h_s}{32 a} \right)^2 \right] \quad (1.23)$$

Avec :

$P_u$  : Effort normal ultime de compression de la combinaison la plus défavorable.

$P_n$  : Effort nominal limite de la section transversale du voile.

$\Phi$  : Facteur de réduction ( $\Phi=0,70$ ),  $A_g$  : Section transversale brute du voile.

$k$  : coefficient de flambement,  $h_s$  : hauteur libre de chaque niveau

$a$  : étant l'épaisseur du mur,  $f_{bc}$  : Contrainte admissible du béton

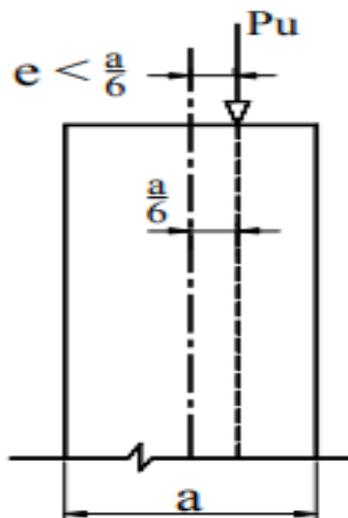


Figure 1. 15 : état d'un mur en compression

## **Chapitre 1      Etude bibliographique des voiles en béton armé sous chargement sismique**

---

### **1.11 Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons présenté des généralités sur les voiles en béton armé sous chargement sismique. Nous avons, dans un premier temps, présenté le comportement des voiles, quelques principes de dimensionnement et les modes de ruines associés ce genre d'éléments. Les différentes stratégies de modélisation ont été également évoquées. À la fin du chapitre nous avons donné une vue générale sur le ferrailage et le flambement des voiles.

Dans le deuxième chapitre on va exposer les différents règlements permettant l'évaluation des coefficients de comportement. La notion de rotule plastique dans les voiles sera également évoquée.



## **Chapitre 2**

**Les différentes approches pour le calcul des coefficients de comportement et l'estimation des rotules plastiques dans les voiles en béton armé**

## **Chapitre 2 Les différentes approches pour le calcul des coefficients de comportement et l'estimation des rotules plastiques dans les voiles en béton armé**

---

### **2.1 Introduction**

Le principe de base du calcul parasismique consiste essentiellement à assurer un degré de sécurité acceptable permettant de réduire les risques relatifs aux défaillances, aux catastrophes et aux pertes de vie. Un outil performant souvent utilisé dans ce domaine est fourni par l'analyse non linéaire (statique ou dynamique). Les méthodes élastiques classiques s'avèrent insuffisantes.

L'objectif de ce chapitre est de présenter certains paramètres liés au comportement non linéaire des voiles sus chargement sismique et à leurs comportements à l'état limite ultime. La notion de coefficient de comportement sera évoquée ainsi que certaines méthodes développées et utilisées pour son évaluation. Plus tard, les notions de rotules plastiques seront discutées. Nous évoquerons les différentes méthodes de calcul des rotules plastique.

Ensuite, nous rappelons les vérifications de cisaillement par les différents codes de dimensionnement utilisé pour les voiles à l'état limite ultime. On conclut notre chapitre par évoquer la notion de fissuration dans les voiles et le lien avec la notion de rotule plastique.

### **2.2 Analyse statique non linéaire :**

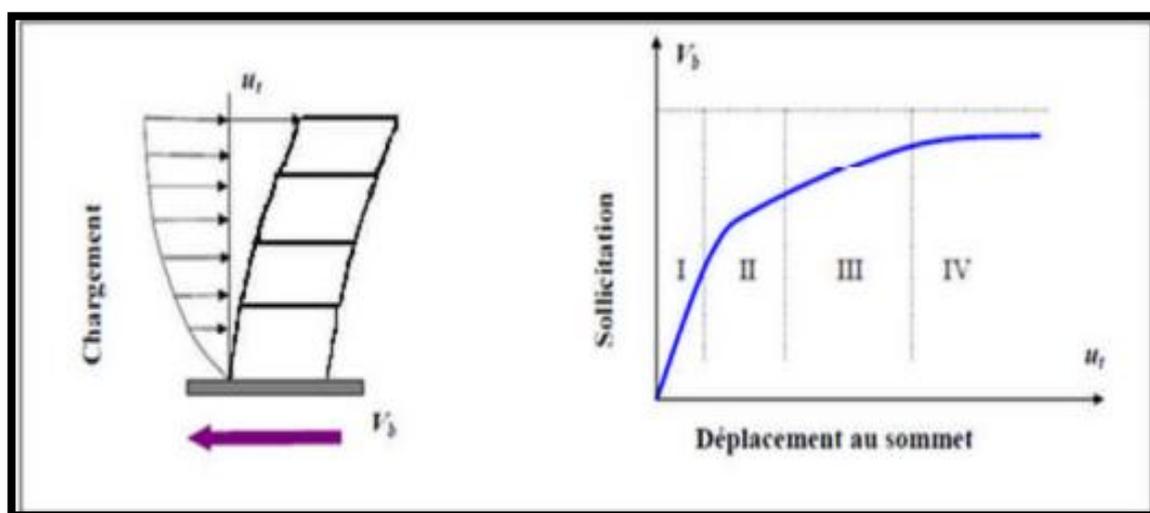
L'analyse du comportement non linéaire des voiles soumis à des charges latérales nécessite l'utilisation d'une méthode d'analyse permettant d'évaluer la réponse non linéaire en termes de déplacement, ductilité, distribution de dommage, mode de ruine... etc. Certaines règles telles que l'ATC40 (13) et le FEMA273 (14) recommandent l'utilisation des méthodes statiques non linéaires. Une analyse statique non linéaire en poussée progressive "Push over" pourrait donner de bonnes indications sur le comportement sismique des voiles.

### **2.3 Définition de l'analyse PUSHOVER**

L'analyse push over ou « PUSHOVER ANALYSIS », est une procédure d'analyse originalement développée par Freeman et al en 1975 (3). C'est une procédure statique non-

## Chapitre 2 Les différentes approches pour le calcul des coefficients de comportement et l'estimation des rotules plastiques dans les voiles en béton armé

linéaire, dans laquelle la structure subit des charges latérales suivant un certain modèle prédéfini en augmentant l'intensité des charges jusqu'à l'atteinte d'un état d'endommagement plastique considéré comme représentant la limite de ce qui est acceptable pour la sécurité. Les résultats de cette analyse sont représentés sous forme de courbe (figure 2.1) reliant l'effort tranchant à la base au déplacement du sommet de la structure. Cette courbe caractérise donc le comportement de la structure face à n'importe quelle sollicitation horizontale, indépendamment de son intensité (15).



**Figure 2. 1 :** Signification physique de la courbe push over.

Bien évidemment, le déplacement de la structure augmente avec la force jusqu'au moment où elle perd complètement sa capacité de résistance. Ainsi plusieurs niveaux d'endommagement (I, II, III, IV) peuvent être distingués à travers cette représentation graphique (figure 2.1).

**Niveau I :** correspond au comportement élastique de la structure et représente le niveau de conception habituel. Il indique par conséquent un état d'endommagement superficiel.

**Niveau II :** correspond à un niveau de dommage contrôlé. La stabilité de la structure n'est pas en danger, mais un endommagement mineur est susceptible de se développer.

**Niveau III :** représente un état d'endommagement avancé, sa stabilité étant en danger.

## **Chapitre 2 Les différentes approches pour le calcul des coefficients de comportement et l'estimation des rotules plastiques dans les voiles en béton armé**

---

**Niveau IV** : la structure, fortement dégradée, est susceptible d'atteindre la ruine.

### **2.3.1 But de l'analyse Push over (15) :**

L'objectif de l'analyse "push over" est d'évaluer la performance de la structure à travers l'estimation des efforts et des déplacements susceptibles d'être atteints sous l'action d'un séisme; elle tend également à fournir des informations sur plusieurs caractéristiques de la réponse, qui ne peuvent être obtenues par une simple analyse élastique, ou dynamique linéaire, telles que:

- L'estimation des déformations inélastiques afin de dissiper de l'énergie.
- La détermination des sollicitations réelles sur les éléments fragiles.
- Les Conséquences de la détérioration de la résistance des éléments.
- L'identification des zones critiques siège de grandes déformations.

## **2.4 Coefficient de comportement :**

### **2.4.1 Définition :**

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 (et même de type statique). Il est défini comme le rapport entre la force latérale maximale élastique ( $V_e$ ) et la force latérale inélastique de dimensionnement ( $V_d$ ).

Il est donné par l'expression suivante :

$$R = \frac{V_e}{V_d} \quad (2.1)$$

## Chapitre 2 Les différentes approches pour le calcul des coefficients de comportement et l'estimation des rotules plastiques dans les voiles en béton armé

---

L'évaluation du coefficient de comportement est bien souvent assez arbitraire ; de plus, la conversion entre la ductilité estimée et le coefficient de comportement est souvent faite sur la base d'une, hypothèse de comportement élastique parfaitement plastique du bâtiment (16).

### 2.4.2 Paramètre du facteur de comportement

Le facteur de comportement dans les règlements américains est noté  $R$ . Ses valeurs sont comprises entre 1 et 8. Dans les années 1980, un programme de recherche expérimental conduit par l'université de Berkeley a permis de formuler le facteur de comportement comme le produit de trois facteurs tenant respectivement compte de la ductilité, de la sur-résistance et de l'amortissement visqueux (17). Une définition appropriée du facteur  $R$  est basée sur un composant dépendant de la ductilité, un composant dépendant de la sur-résistance, et un composant dépendant de l'amortissement:

$$R = R_{\mu}R_S R_{\varepsilon} \quad (2.2)$$

$R_S$  : est un facteur de réduction de la résistance définit comme le rapport entre la résistance latérale réelle de la structure et la résistance latérale de conception.

$R_{\mu}$  : Le facteur de réduction de la ductilité est le rapport de résistance latérale minimum requis pour éviter la déformation inélastique au rapport de demande de ductilité  $\mu$ , lorsque ce système est soumis à un mouvement du sol donné à sa base.

$R_{\varepsilon}$  : Le facteur de réduction d'amortissement est généralement réglé à 1.0, car on suppose en général le même rapport d'amortissement pour les réponses linéaires et non linéaires (18).

Ces paramètres sont représentés dans une courbe dans la figure 2.2

Par la suite, beaucoup de recherches (Freeman 1990 (19); ATC 1995a (13) et ATC 1995b (20)) ont été menées depuis la première proposition de  $R$  dans la moitié des années 1980. En effet, des études de l'ATC 1995a (13) soutiennent une nouvelle formulation similaire, là où  $R$  est exprimée comme étant le produit de trois facteurs : facteur de résistance résiduelle  $R_S$ , facteur de ductilité  $R_{\mu}$ , et facteur de redondance  $R_R$  (21):

## Chapitre 2 Les différentes approches pour le calcul des coefficients de comportement et l'estimation des rotules plastiques dans les voiles en béton armé

$$R = R_{\mu} R_S R_R \quad (2.3)$$

Avec :

$R_{\mu}$  : Le facteur de ductilité.  $R_S$  : Le facteur de sur-résistance.  $R_R$ : Le facteur de redondance

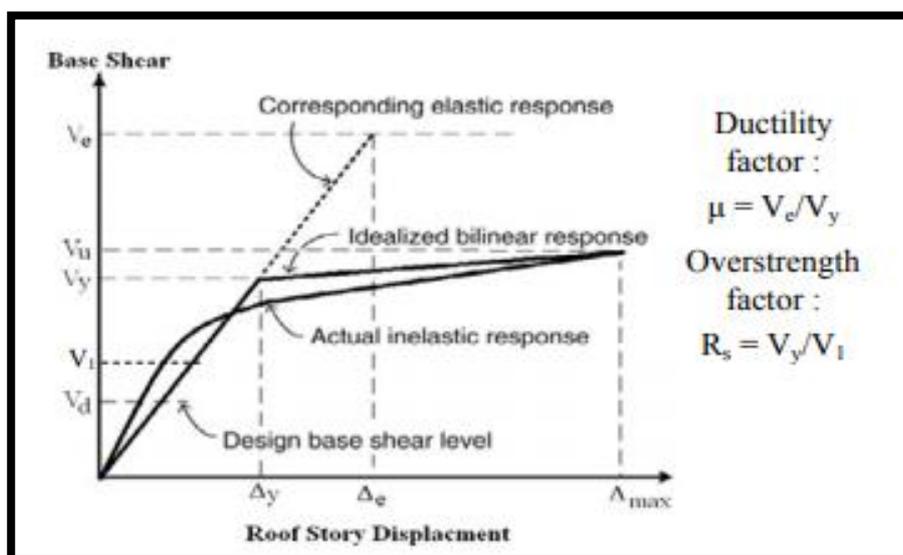


Figure 2. 2 : Définition de paramètres non linéaires (22).

### 2.4.2.1 Facteur de ductilité $R_{\mu}$

La ductilité est la capacité du système à subir une déformation plastique. Le système structural se déforme avant l'effondrement sans perte de résistance importante mais avec une dissipation d'énergie importante (23). Le facteur de ductilité est une mesure de la réponse non linéaire globale d'un système de contreventement et non pas celle de ces éléments constituants (24). Il exprime le rapport entre la force latérale maximale élastique ( $V_e$ ), et l'effort tranchant maximal à la base  $V_u$  obtenu à partir d'une analyse non linéaire (ex: PUSHOVER) (7). Cuesta et al. (Cuesta et al. 2003) ont unifié les résultats tirés de deux approches différentes pour déterminer les rapports  $R - \mu - T$ , où le contenu fréquentiel des mouvements du sol est considéré (17).

## Chapitre 2 Les différentes approches pour le calcul des coefficients de comportement et l'estimation des rotules plastiques dans les voiles en béton armé

La figure (2.3) : montre que le voile possède une faible déformabilité alors qu'il est plus ductile comparativement au portique qui est plus déformable et moins ductile (25).

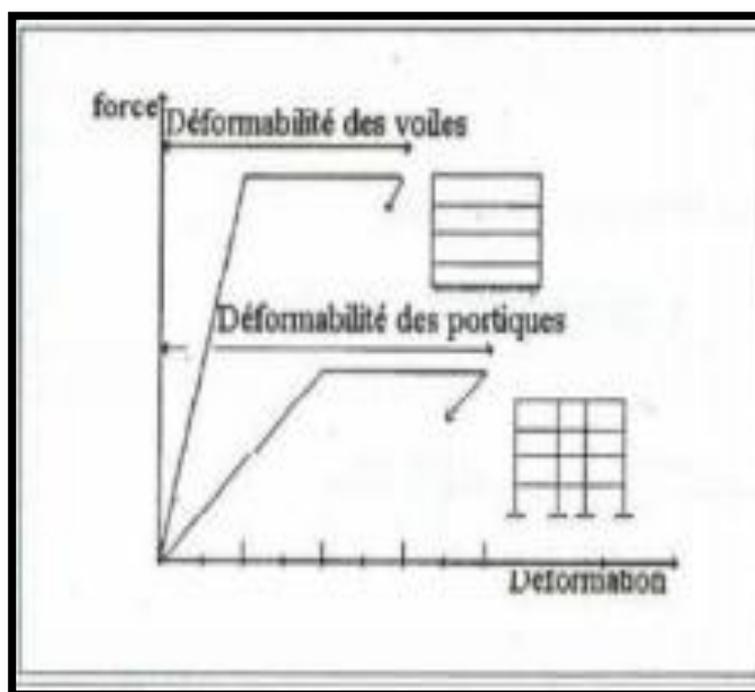


Figure 2.3 : La différence de déformabilité entre voile et portique

### ✚ Méthodes d'évaluation

Elles sont classées suivant trois classes principales :

- Méthodes basées sur la ductilité
- Méthode basée sur l'approche énergétique
- Méthodes basées sur l'accumulation des dommages

### ✓ Méthodes basées sur la ductilité

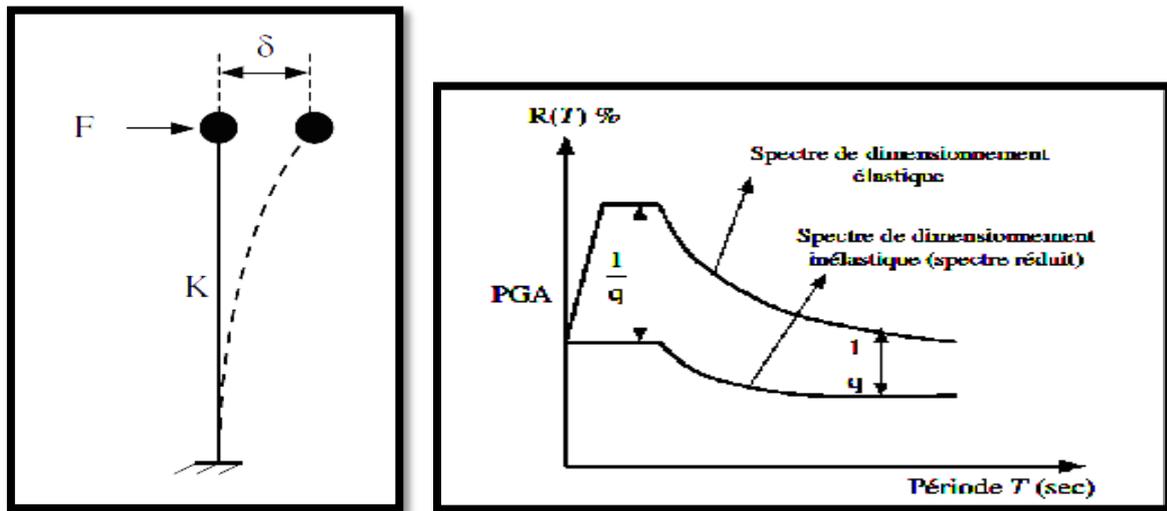
La théorie du facteur de ductilité qui est basé sur l'hypothèse de l'équivalence des déplacements maximums d'un système à un seul degré de liberté à comportement élasto-plastique parfait et celui d'un oscillateur similaire à comportement indéfiniment élastique linéaire, conduit à la définition d'un coefficient de comportement qui coïncide

## Chapitre 2 Les différentes approches pour le calcul des coefficients de comportement et l'estimation des rotules plastiques dans les voiles en béton armé

substantiellement avec la ductilité globale, à moins que celle-ci ne soit pas limitée par des mécanismes locaux (26).

### ➤ *Méthode de Newmark et Hall, 1982 (27)*

La méthode de NEWMARK et HALL est la plus simple de toutes les méthodes. Ils ont été les premiers à avoir tenté d'estimer le facteur de comportement. En se basant sur la réponse d'un système à un degré de liberté, ils ont établi une corrélation entre les spectres de réponse élastique et inélastique dans une courbe sur la figure suivante.

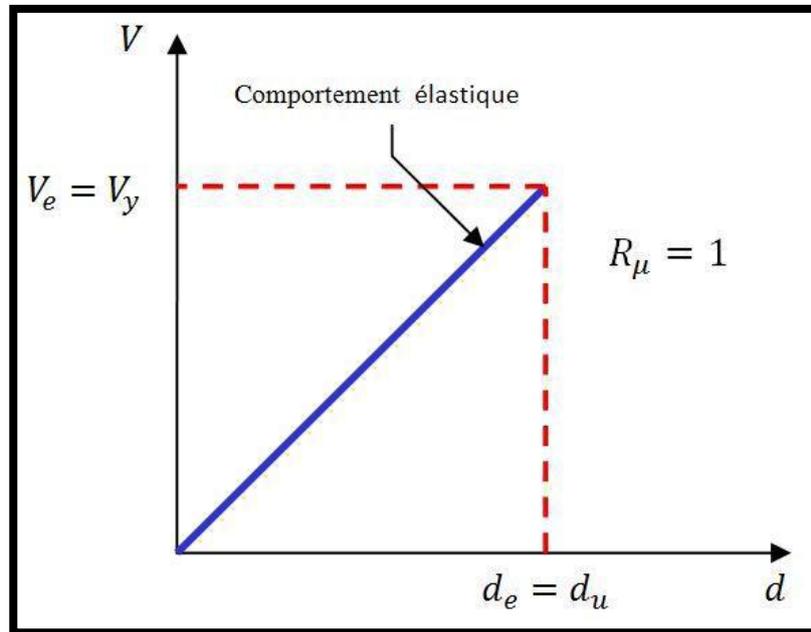


**Figure 2. 4 :** Établissement du spectre de réponse inélastique à partir du spectre élastique d'un SDOF

Dans les hautes fréquences ( $f > 33$  Hz), c'est-à-dire quand la période  $T$  de la structure est inférieure ou égale à  $0.03s$ , le principe d'égalité des accélérations est applicable, autrement dit :

$$R_u = 1 \quad \text{si } T < 0.03s \quad (2.3)$$

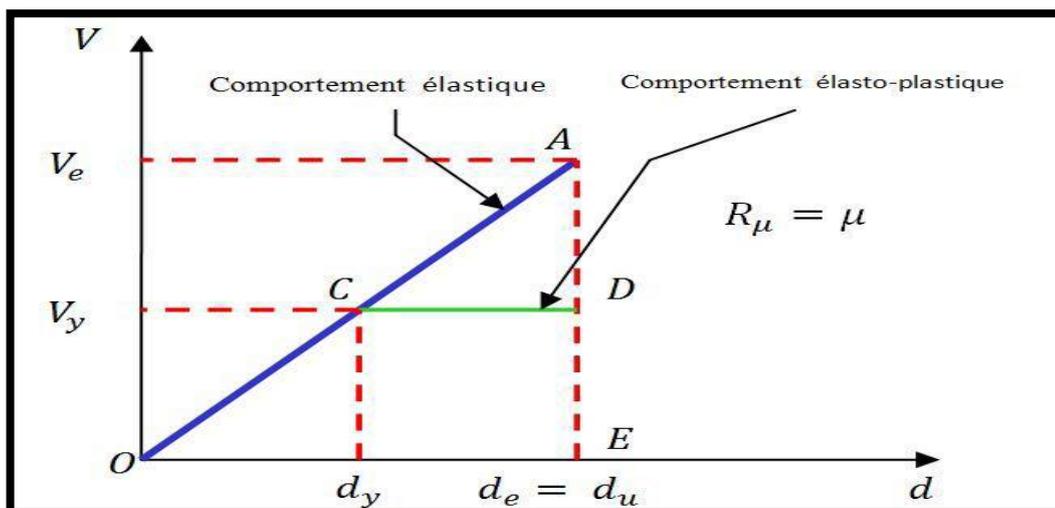
**Chapitre 2 Les différentes approches pour le calcul des coefficients de comportement et l'estimation des rotules plastiques dans les voiles en béton armé**



**Figure 2. 5 :** Principe d'égalité des accélérations

Dans les basses fréquences ( $f < 2$  HZ), c'est-à-dire quand les périodes sont supérieures à 0.5s, on applique le principe d'égalité des déplacements, ce qui donne :

$$R_\mu = \mu \quad \text{si } T > 0.5s \quad (2.4)$$



**Figure 2. 6 :** Principe d'égalité des déplacements

## Chapitre 2 Les différentes approches pour le calcul des coefficients de comportement et l'estimation des rotules plastiques dans les voiles en béton armé

Dans les moyennes fréquences ( $2 \text{ Hz} < f < 8 \text{ Hz}$ ), c'est-à-dire quand les périodes sont comprises entre 0.2s et 0.5s, le principe d'égalité des énergies est applicable, en d'autres termes :

$$R_\mu = \sqrt{2\mu - 1} \quad \text{si } 0.2 \text{ S} < T < 0.5 \text{ S} \quad (2.5)$$

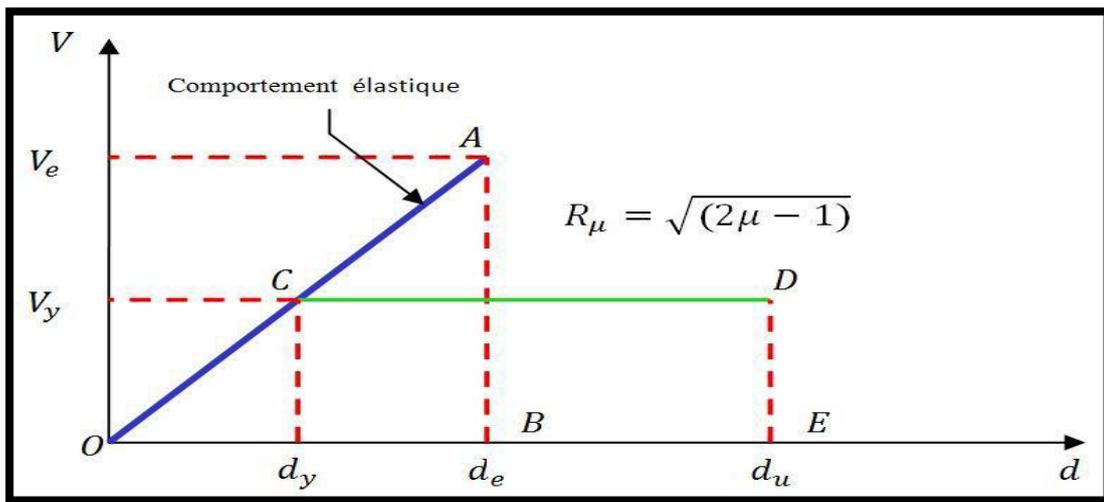


Figure 2. 7 : Principe d'égalité des énergies

Avec  $\mu = \frac{\delta_e}{\delta_u}$  : Ductilité du matériau, qui pour le béton armé provient de la plastification de l'acier en traction et par déformation plastique du béton comprimé. ( $\delta_e$  : Déplacement élastique et  $\delta_u$  : Déplacement ultime).

### ➤ Méthode de Giuffre et Giannini (27)

GIUFFRE et GIANNINI ont proposé des expressions approchées du facteur de comportement  $q$ , en fonction de la ductilité globale  $\mu$  de la structure et de sa période fondamentale de vibration  $T$ .

$$q = 1 + (\mu - 1)^{0.87 - 0.05T} \quad \text{si } T \geq T_0 \quad (2.6)$$

$$q = 1 + 2(q_0 - 1) \frac{T}{T_0} \left(1 - 0.5 \frac{T}{T_0}\right) \quad \text{si } T \leq T_0 \quad (2.7)$$

## Chapitre 2 Les différentes approches pour le calcul des coefficients de comportement et l'estimation des rotules plastiques dans les voiles en béton armé

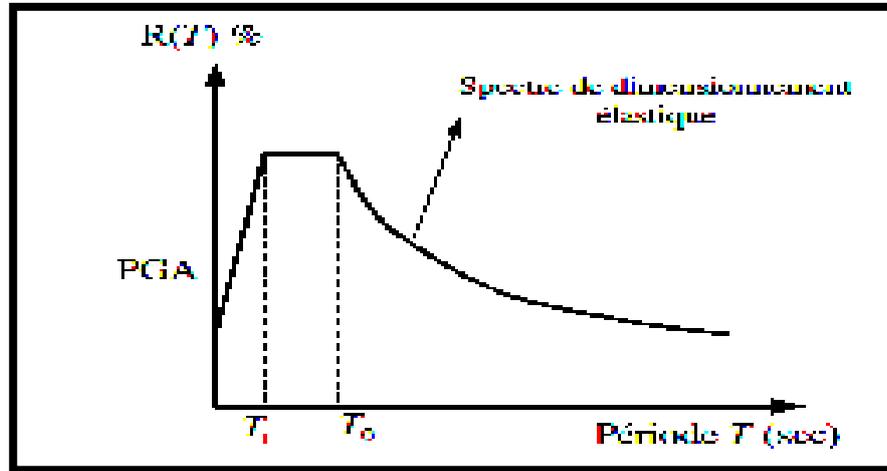


Figure 2. 8 : Spectre de réponse classique

$q_0$ : la valeur de  $q$  pour  $T = T_0$  obtenue en remplaçant  $T$  par  $T_0$  dans la formule (2.7).

$T_0$  : la période de transition.

### ➤ Méthode de Krawinkler et Nassar , 1992 (28)

Ils ont étudié l'influence sur le facteur de réduction de la distance épacentrale ainsi que des paramètres du système structural, tels que la période naturelle de vibration, le coefficient d'érouissage (Strain – Hardening), la ductilité et la loi de comportement inélastique (bilinéaire et de dégradation de la rigidité). La relation  $R_y$  , pour le système bilinéaire et pour un amortissement de  $\varepsilon = 5\%$  est donnée par :

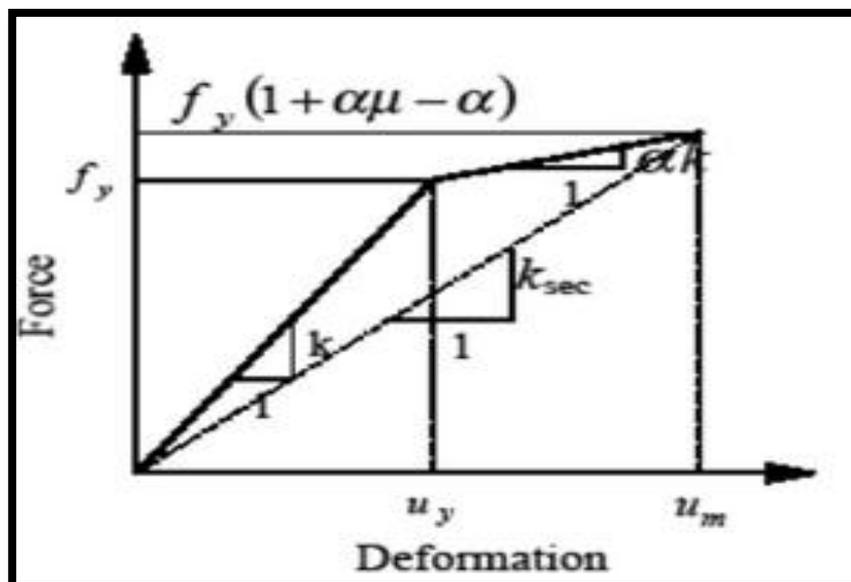
$$R_y = (1 + C(\mu - 1))^{1/c} \quad (2.8)$$

Ou :

$$C(T, \alpha) = \frac{T_a}{1+T_a} + \frac{b}{T} \quad (2.9)$$

$\alpha$  : est le pente post-élastique, elle est égale au rapport entre la rigidité plastique et la rigidité élastique.

## Chapitre 2 Les différentes approches pour le calcul des coefficients de comportement et l'estimation des rotules plastiques dans les voiles en béton armé



**Figure 2. 9 :** Relation bilinéaire Force – Déplacement pour un système SDOF

a et b : sont des paramètres de régression qui dépendent de  $\alpha$ . Ces valeurs de a et b sont regroupées dans le tableau ci-après :

Rigidité post – élastique $\alpha$ en (%)	paramètres de régression	
	A	B
0	1	0.42
2	1	0.37
10	0.8	0.29

**Tableau 2. 1 :** Valeurs des paramètres a et b

➤ **Méthode de Fajfar et Vidic** (28)

Ils ont proposé une autre formulation comme suit :

## Chapitre 2 Les différentes approches pour le calcul des coefficients de comportement et l'estimation des rotules plastiques dans les voiles en béton armé

$$R_y = \begin{cases} 1 + (\mu - 1) \frac{T}{T_0} & T_n \leq T_0 \\ \mu & T_n \geq T_0 \end{cases} \quad (2.10)$$

Avec:

T: La période fondamentale de la structure.  $T_0$ : La période caractéristique du sol définie à la fin du palier du spectre de réponse,  $\mu$ : Ductilité,  $R_y$ : Coefficient de comportement

### ➤ Méthode de Cosenza, De Luca, Faella et Mazzolani (27)

Cette méthode est basée sur la théorie du facteur de ductilité et sur l'hypothèse de ruine de la structure par formation d'un mécanisme plastique de type global tenant compte de l'effet  $-\Delta$ , le coefficient de comportement est donné par la relation suivante :

$$R = \mu_\delta = \frac{\delta_\mu}{\delta_e} = \alpha_c \left( \frac{\alpha_u}{\alpha_e} \beta \right) + \beta \quad (2.11)$$

ou  $\mu_\delta = \frac{\delta_\mu}{\delta_e}$ : la ductilité globale de la structure

$\delta_\mu$ : Déplacement ultime horizontale en tête de la structure,  $\delta_e$ : Déplacement élastique ultime,  $\alpha_c$ : Le multiplicateur élastique critique de charges verticales,  $\frac{\alpha_u}{\alpha_e}$ : exprime la capacité de redistribution plastique,  $\beta$ : Coefficient dépendant de la période propre de vibration de la structure.

Si on pose  $\beta = \beta' \frac{\alpha_u}{\alpha_e} \Rightarrow R = \frac{\alpha_\mu}{\alpha_e} = (1 - \beta') \alpha_c + \beta'$  avec

$$\beta' = 1 - T \text{ avec } \beta' > 0.5$$

Où  $T$ : la période propre du système. Compte tenu de ce qui précède, le coefficient de comportement  $R$  est constant pour  $T > 0.5s$ . Il est une fonction linéaire de  $T$  dans le cas opposé.

## Chapitre 2 Les différentes approches pour le calcul des coefficients de comportement et l'estimation des rotules plastiques dans les voiles en béton armé

---

### ✓ Méthodes basées sur l'approche énergétique (27)

#### ➤ Méthode de Como et Lanni

Une méthode simplifiée fondée sur l'approche énergétique a été proposée par COMO et LANNI. Cette méthode est basée sur un modèle simplifié des échanges d'énergie survenant dans une structure durant un tremblement de terre. L'évolution complexe du mouvement sismique d'une structure, est divisée en une série de cycles simplifiés d'échange d'énergie. Chaque cycle prévoit une première phase d'emmagasinement d'énergie durant laquelle on a une augmentation progressive des oscillations élastiques de la structure, et une deuxième phase dans laquelle l'énergie accumulée dans la première phase est transformée en travail élasto-plastique. En définissant la capacité d'une structure à résister à des séismes majeurs comme dépendant d'une propriété qui est combinaison de résistance et de ductilité, les auteurs de cette méthode ont proposé la formulation suivante de  $R$  :

$$R = \frac{W_p}{W_y} \quad (2.12)$$

Avec  $W_y$ : énergie de déformation élastique emmagasinée par la structure à l'état de la première plastification.  $W_p$ : L'énergie emmagasinée et dissipée par déformation plastique jusqu'à la ruine.

### ✓ Méthodes basées sur l'accumulation de dommage

L'évaluation du coefficient de comportement  $R$  selon les méthodes qui se basent sur un état limite ultime de fatigue, ces méthodes d'une part, nécessite la disponibilité des courbes de fatigues des éléments constitutifs de la structure, d'autre part l'application de ces méthodes comporte plusieurs étapes de calcul qui sont à la fois longues et difficiles (26). Dans ce cas, une étude paramétrique complète est nécessaire, c'est-à-dire que le facteur de comportement doit tenir compte de l'accumulation des dommages (27)

#### 2.4.2.2 Facteur de sur-résistance $R_S$

La résistance résiduelle d'une structure est la capacité de celle-ci à développer une résistance au-delà de l'initiation de la plastification. En effet, lors de l'apparition de la

## Chapitre 2 Les différentes approches pour le calcul des coefficients de comportement et l'estimation des rotules plastiques dans les voiles en béton armé

---

première rotule plastique, la capacité de la structure n'est pas encore dépassée, mais elle continue à développer une capacité de résistance et de déformation (21). En général il est observé que les structures ont une capacité de résistance latérale maximale ( $V_u$ ) supérieure à l'effort tranchant qu'avec lequel elle a été dimensionnée ( $V_d$ ) (7). Cela, amène à définir  $R_S$  comme étant :

$$R_S = \frac{V_u}{V_d} \quad (2.13)$$

Trois valeurs du facteur de sur-résistance de paroi ont été sélectionnées dans l'analyse dynamique à l'aide d'ABAQUS: 1,5, 2,5, élastique. FEMA 450 spécifie un facteur de sur-résistance de 2,5 pour les murs de cisaillement en béton armé. La valeur de sur-résistance de 1,5 a été choisie pour l'étude de la structure ayant un facteur de sur-résistance de paroi inférieur à la valeur de FEMA 450 (29).

Cette réserve de résistance dépend de plusieurs facteurs, parmi lesquelles : la redondance de la structure, limitation du déplacement latérale exigée par les codes de calculs, présence des éléments non structuraux, l'ignorance de l'effet tridimensionnelle et la ductilité de la structure qui est le facteur le plus important (21).

### 2.4.2.3 Facteur de redondance $R_R$

La redondance structurelle dans la conception parasismique est fortement recommandée. Un facteur de fiabilité et de redondance ( $\rho$ ) est ajouté dans le livre bleu du SEAOC de 1996 et adopté dans les programmes NEHRP 97 et UBC 97. Le facteur est défini en fonction à la fois du taux de cisaillement maximal entre éléments et de la surface du sol. Ce facteur compris entre 1 et 1,5 est appliqué à la charge sismique de calcul horizontal (30).

Les murs de cisaillement avec un rapport hauteur sur longueur supérieure à 1,0 sont inclus dans les considérations de redondance pour aider à garantir qu'un nombre adéquat d'éléments de mur est inclus ou que le facteur de redondance approprié est appliqué.

## Chapitre 2 Les différentes approches pour le calcul des coefficients de comportement et l'estimation des rotules plastiques dans les voiles en béton armé

---

Si la structure dans chaque direction orthogonale à chaque étage résistant à plus de 35% du cisaillement de base, alors  $\rho = 1$ . Significatif, le nombre de baies pour un mur de cisaillement doit être calculé comme la longueur du mur de cisaillement divisée par la hauteur du plancher ou deux fois la longueur du mur de cisaillement divisée par la hauteur du plancher pour les constructions à structure légère. Ainsi, la longueur de la paroi de cisaillement joue un rôle majeur et l'avantage de la construction à structure légère (31).

La redondance est étudiée en termes de configuration de la paroi de cisaillement (nombre et disposition), de la capacité de ductilité de la paroi de cisaillement, de la corrélation de résistance et de l'incertitude de chargement et de résistance (30). Il reste toujours difficile de faire séparer la redondance et la résistance résiduelle des structures, ce qui oblige quelques chercheurs d'introduire le facteur de redondance à travers celui de la réserve de résistance.

Nombre de lignes	Facteur de redondance
2	0.71
3	0.86
4	1.0

**Tableau 2. 2 :** Facteur de redondance (32).

Le règlement parasismique algérien RPA99 – version 2003 introduit cette pénalité à travers un coefficient de qualité égal 1.1 (majoration de l'effort tranchant de 10%), ce qui donne un coefficient  $R_R = \frac{1}{1.1} = 0.9$  très proche de la moyenne des valeurs du tableau précédemment cité ( $R_{Rmoy} = 0.857$ ) (7)

## Chapitre 2 Les différentes approches pour le calcul des coefficients de comportement et l'estimation des rotules plastiques dans les voiles en béton armé

---

### 2.4.2.4 Facteur d'amortissement $R_\varepsilon$ :

L'amortissement fait référence à la quantité d'énergie dissipée dans une structure, sans tenir compte du fait que l'amortissement est dû à un comportement hystérétique ou à des dispositifs d'amortissement visqueux installés dans le système, Les recherches indiquent que les murs de contreventement ont un amortissement naturel d'environ 7% à 8% (33).

Le facteur de réduction d'amortissement est généralement réglé à 1,0, car on suppose en général le même rapport d'amortissement pour les réponses linéaires et non linéaires (18).

### 2.4.3 Comparaison entre codes parasismiques

Afin de clarifier l'importance accordée au facteur de comportement préconisé par les codes parasismiques en vigueur, une analyse comparative entre le facteur que préconisent le code Algérien (26), l'Eurocode 8 'version 1994 (31) et 2004' (14), code Canadien 'version 1995 (33) et 2005' (16); avec celui de la nouvelle formulation, qui tient compte de la ductilité, la résistance résiduelle, et la redondance a permis de faire les constatations suivantes (tableau 2.3) :

Code	Classe de ductilité	$R_\mu$	$R_s$	$R_R$
<b><i>RPA 99/version 2003</i></b>	Une seule classe	Observé	Non observé	Observé
<b><i>EC8 EN1998-1994)</i></b>	Trois classes	Observé	Non observé	Observé
<b><i>EC8 EN1998-2004)</i></b>	Trois classes	Observé	Observé	Observé
<b><i>CNBC 1995</i></b>	Trois classes	Observé	Non observé	Non Observé

## Chapitre 2 Les différentes approches pour le calcul des coefficients de comportement et l'estimation des rotules plastiques dans les voiles en béton armé

<i>CNBC 2005</i>	Trois classes	Observé	Observé	Observé
------------------	---------------	---------	---------	---------

**Tableau 2. 3 :** Comparaison du facteur de comportement établi par les codes de calcul parasismiques avec celui de la nouvelle formulation (21).

### 2.4.4 Valeurs du coefficient de comportement pour les structures en voile selon les règlements internationaux :

#### 2.4.4.1 Règlement parasismique algérien RPA99/version2003 :

Le RPA99 donne pour chaque système de contreventement un coefficient de comportement global de la structure. Ce coefficient dépend de la classification des systèmes de contreventement et de ductilité des structures. La plus petite valeur de R est retenue dans le cas d'utilisation de système de contreventement différent dans les deux directions.

#### Structure en béton armé : Valeurs du coefficient de comportement : R

Catégorie	Type de contreventement	La valeur R
<b>2</b>	Voiles porteurs	<b>3.5</b>
<b>4a</b>	Mixte portiques/voiles avec interaction	<b>5</b>
<b>4b</b>	Portiques contreventés par des voiles	<b>4</b>
<b>15</b>	Ossature métallique contreventée par voiles en béton armé	<b>3.5</b>

**Tableau 2. 4 :** Valeurs du coefficient de comportement dans le RPA (34).

## Chapitre 2 Les différentes approches pour le calcul des coefficients de comportement et l'estimation des rotules plastiques dans les voiles en béton armé

### 2.4.4.2 Règlement de construction parasismique (R.P.S 2011) :

Le facteur de comportement, ou coefficient de ductilité  $K$ , caractérise la capacité de dissipation de l'énergie vibratoire de la structure qui lui est transmise par les secousses sismiques. Ce coefficient est donné par le tableau ci- après en fonction du type du système de contreventement et du niveau de ductilité choisi.

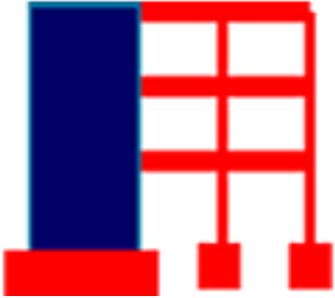
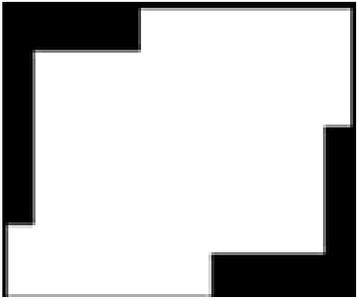
Système de contreventement	Schéma	ND1	ND2	ND 3
Voile et portique en béton armé		2.0	3.0	4.0
Voile		1.4	2.1	2.8
voile couplé		1.8	2.5	3.5

Tableau 2. 5 : Valeurs du coefficient de comportement dans le RPS 2011 (35).

## Chapitre 2 Les différentes approches pour le calcul des coefficients de comportement et l'estimation des rotules plastiques dans les voiles en béton armé

### 2.4.4.3 Règlement Canadian :

Le Code national du bâtiment (édition de 1995) donne la valeur du facteur de comportement R par le tableau ci- après :

La classe des bâtiments	La valeur R
Les bâtiments à murs de cisaillement en systèmes de murs nominale- ment (faiblement) ductiles	2
Les bâtiments à murs de cisaillement ductiles	3.5

**Tableau 2. 6 :** Valeurs du coefficient de comportement dans le règlement Canadian (36).

Un renfort réparti horizontalement et verticalement (ratio 0,25%) est requis pour tous les murs de cisaillement. En cas de murs de cisaillement ductiles, il faut au moins 4 barres (0,25% de la surface du mur) dans chaque zone d'extrémité.

### 2.4.4.4 Règlement américain UBC-97 (Uniform buildings Code) :

Le facteur de comportement R est utilisé dans les codes du bâtiment actuels pour estimer les exigences de résistance, Sa valeur unique est donnée par le tableau ci- après.

Le système de la structure	Description du système de contreventement	La valeur de R
Système à voiles	voiles	4.5
Porteurs	Portiques contreventés où les voiles reprennent la totalité des charges verticales	2.8
Système de portiques	Voiles	5.5
Système à contreventement	voiles (béton et SMRF)	8.5
	voiles (béton et acier OMRF)	4.2

## Chapitre 2 Les différentes approches pour le calcul des coefficients de comportement et l'estimation des rotules plastiques dans les voiles en béton armé

---

	Voiles (béton et IMRF)	6.5
Système portique-voile avec interaction	Béton	5.5

**Tableau 2.7 :** La valeur du coefficient de comportement des structures en voile dans le règlement américain (UBC)-92 (37).

### 2.4.4.5 Règlement français PS-92 (38)

Le PS-92 a créé un nouveau développement pour les murs en béton armé pour lesquels le facteur de comportement  $q$  est choisi en fonction de la quantité de ferrailage et du niveau de contraintes dans le mur. Les valeurs de base des facteurs de comportement sont données pour divers matériaux tels que la maçonnerie, le béton, l'acier, le bois et divers types de structures.

Par exemple pour un mur voile en béton armé :  $q = 2$  à  $3.5$ .

## 2.5 Notion de rotules plastiques :

À la suite des divers séismes survenus et des essais réalisés, plusieurs chercheurs ont constaté que pendant les déplacements, les structures présentent de grandes déformations inélastiques et des courbures élevées dans la région où le moment est le plus élevé. Cette région est appelée rotule plastique (39). Les modèles de rotule plastique sont largement utilisés en génie parasismique pour prédire les relations charge-déformation des éléments en béton armé.

La rotule plastique est la région de l'élément où des courbures de flexion inélastiques se produisent dans les murs de contreventement en béton armé qui sont continus le long de la hauteur du bâtiment, cette région est située à la base des murs sous une charge latérale importante. , comme illustré sur la figure 2.10

## Chapitre 2 Les différentes approches pour le calcul des coefficients de comportement et l'estimation des rotules plastiques dans les voiles en béton armé

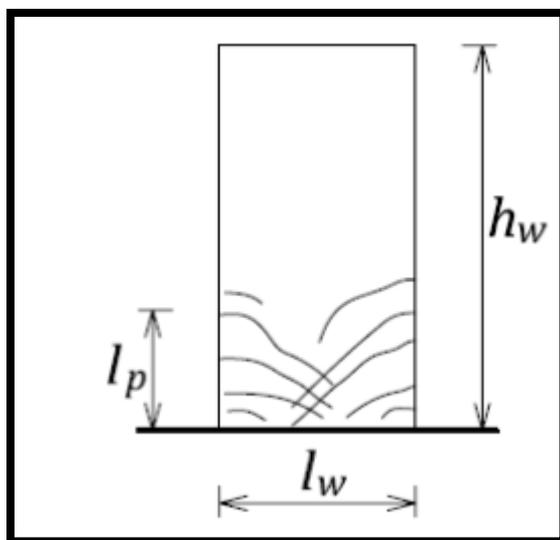


Figure 2. 10 : La longueur de la rotule plastique  $l_p$

Où  $l_w$ : est la longueur du mur,  $h_w$ : est la hauteur du mur

Les propriétés des rotules plastiques ont été utilisées pour exécuter l'analyse de Push over. Pour définir les propriétés de rotule par le concepteur, la procédure se fera par la détermination des lois moment-courbure (40).

### 2.6 Loi moment-courbure pour un mur de cisaillement :

L'Absorption et la dissipation d'énergie sous une déformation inélastique est la principale philosophie d'une conception parasismique. Si le comportement d'une paroi (mur) est linéaire élastique, la relation moment-courbure est linéaire et la courbure est obtenue comme suit :

$$\phi = \frac{M}{EI} \quad (2.14)$$

où  $EI$  est la rigidité en flexion du mur et  $M$  le moment

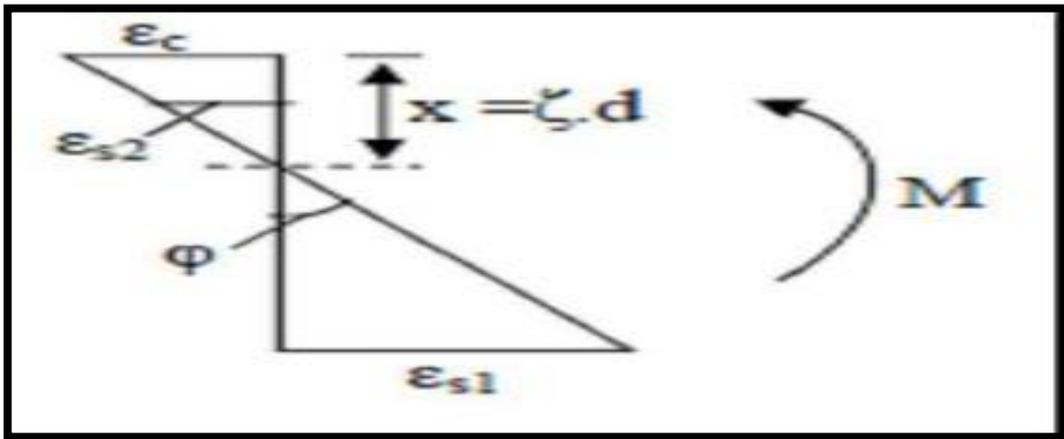
Au stade linéaire comme au stade non linéaire, la courbure est obtenue sous la forme:

## Chapitre 2 Les différentes approches pour le calcul des coefficients de comportement et l'estimation des rotules plastiques dans les voiles en béton armé

$$\phi = \frac{\varepsilon_t + \varepsilon_c}{d} \quad (2.15)$$

où  $d$  = distance entre les barres de traction et de compression à laquelle les déformations ( $\varepsilon_t$  et  $\varepsilon_c$  respectivement) sont mesurées (41).

Selon la théorie classique de flexion, une courbure est égale au ratio de la déformation correspondante à certaine fibres de cette section par rapport à sa distance de l'axe neutre (figure 2.11) (42).



**Figure 2. 11 :** Courbure d'une section par rapport à sa distance de l'axe neutre.

La courbure est donnée par la relation suivante :

$$\phi = \frac{\varepsilon_c}{x} \quad (2.16)$$

Avec :  $\varepsilon_c$  est la déformation (raccourcissement) correspondant à la fibre comprimée du béton.  $x$ : est la distance à partir de l'axe neutre.

De même :

$$\phi = \frac{\varepsilon_{sl}}{d - x} \quad (2.17)$$

## Chapitre 2 Les différentes approches pour le calcul des coefficients de comportement et l'estimation des rotules plastiques dans les voiles en béton armé

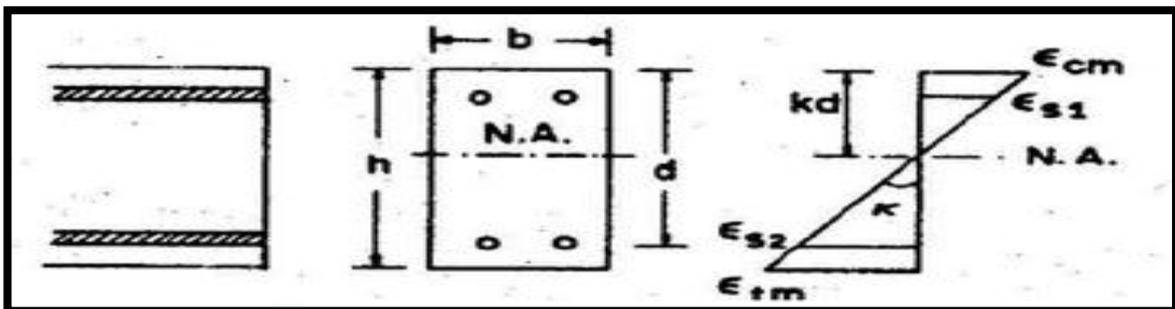
Avec :  $\varepsilon_{sl}$  : est la déformation (allongement) des aciers tendus,  $d$ : est la profondeur effective de la section

À partir des deux équations précédentes, la courbure pourrait être donnée également par:

$$\phi = \frac{\varepsilon_c + \varepsilon_{sl}}{d} \quad (2.18)$$

• La courbure du mur de cisaillement peut également être exprimée par le rapport de déformation de compression du béton ( $\varepsilon_{cm}$ ) à la profondeur de l'axe neutre ( $k_d$ ) figure 2.12 (42).

$$\kappa = \frac{\varepsilon_{cm}}{k_d} \quad (2.19)$$



**Figure 2. 12 :** Courbure d'une section par rapport à sa distance de l'axe neutre

La capacité d'une rotule plastique à supporter les déformations plastiques déterminera si un élément structural est capable de fonctionner à un certain niveau de ductilité. La valeur de la longueur de la rotule  $l_p$  dépend du gradient de moment, de la hauteur du mur, de sa longueur et du niveau de charge axiale, Il existe plusieurs équations différentes pour estimer la valeur de  $l_p$  à utiliser dans les calculs de courbure. Dans ce qui suit, on citera quelques formules tirées de la littérature.

## Chapitre 2 Les différentes approches pour le calcul des coefficients de comportement et l'estimation des rotules plastiques dans les voiles en béton armé

---

### 2.6.1 Mattock (1967) et Priestley et al. (1996) (43)

La longueur de la rotule plastique qui permet une rotation plastique précise peut être facilement déterminée à partir des données expérimentales. Mattock (1967) et Priestley et al. (1996) ont proposé une approche similaire, l'expression pour estimer la longueur de la rotule plastique en fonction des propriétés des éléments en béton armé est donnée sous la forme :

$$L_p = \alpha L + \beta D + \xi f_y d_b \quad (2.20)$$

Où  $L$  : est la longueur du membre entre deux joints (étendue de cisaillement dans le cas de murs de cisaillement,  $L_v$ ),  $D$  : est la profondeur de l'élément (sur la section transversale),  $d_b$  : est le diamètre de la barre de l'armature longitudinale, respectivement.

Les coefficients pour les murs de cisaillement sont  $\alpha = 0,08$ ,  $\beta = 0$  et  $\xi = 0,022$ , et l'équation se lit comme :

$$L_p = 0.08L_v + 0.022f_y d_b \quad (2.21)$$

Sur la base d'une recherche spécifiquement applicable aux murs ont proposé une longueur de rotule plastique équivalente,  $L_p$ , réglable à 0,2 fois la longueur du mur,  $L_w$ , plus 0,07 fois le moment de cisaillement (également connu sous le nom de durée de cisaillement,  $L_v$ ),  $M/V$ , qui est :

$$L_p = 0.2L_w + 0.07 \left(\frac{M}{V}\right) \quad (2.22)$$

### 2.6.2 ICBO [1997]

Pour les composants en béton armé, la longueur de la rotule plastique équivalente peut être simplement supposée égale à la moitié de la longueur de mur

$$L_p = 0.5 l_w \quad (2.23)$$

Où  $l_w$  est la longueur du mur (43)

## Chapitre 2 Les différentes approches pour le calcul des coefficients de comportement et l'estimation des rotules plastiques dans les voiles en béton armé

---

### 2.6.3 Thomsen and Wallace [2004]

$$L_p = 0.33 L_w \quad (2.24)$$

Cependant, ces équations utilisées pour déterminer la longueur de la rotule plastique ont été dérivées de résultats numériques ou expérimentaux pour des murs béton armé qui ne sont pas représentatifs puisque les murs sont légèrement renforcés. Dans les régions de sismicité faible à modérée. Par exemple, la plupart des résultats expérimentaux utilisés pour dériver ces équations provenaient d'essais sur des murs en béton armé avec des propriétés bien confinées (43).

### 2.6.4 Euro-code 8 (2005)

(43) Diverses expressions ont été proposées pour le calcul de la longueur de la rotule plastique. Pour les composants en béton armé, la longueur de la rotule plastique équivalente peut être simplement supposée égale à la moitié de la profondeur du membre,  $L_p = 0.5 l_w$ , où  $l_w$  est la longueur du mur. L'ASCE 41 (2007) indique que pour les modèles analytiques de murs en cisaillement et de segments de murs, la valeur de  $L_p$  doit être égale à 0,5 fois la profondeur de flexion de l'élément, mais inférieure à une hauteur de plancher pour les murs de cisaillement et moins de 50% de la longueur de l'élément pour les segments de mur.  $L_e$  La profondeur de flexion recommandée est de  $0,8 L_w$  dans l'Eurocode 8 (2005). L'expression proposée pour la longueur de la rotule plastique dans Eurocode 8 se lit comme suit :

$$L_p = \frac{L_v}{30} + 0.2 L_w + 0.11 \frac{d_b L f_y (MPa)}{\sqrt{f'_c (MPa)}} \quad (2.25)$$

### 2.6.5 Priestley et al. [2007] :

Pour les modèles analytiques de murs en cisaillement et de segments de murs, la valeur de  $L_p$  doit être égale :

$$L_p = k H_e + 0.1 L_w + L_{sp} \quad (2.26)$$

## Chapitre 2 Les différentes approches pour le calcul des coefficients de comportement et l'estimation des rotules plastiques dans les voiles en béton armé

---

Où  $k$  est une constante reflétant la distribution de la plasticité en fonction du rapport des résistances ultimes à la limite d'élasticité de l'acier d'armature ( $k = 0,2 (f_u / f_y - 1) \leq 0,08$ ).  $H_e$  : est la hauteur effective, et  $L_{sp}$  est la longueur de pénétration de la contrainte définie comme suit:

$$L_{sp} = 0.022 f_{ye} d_{bl} \quad (2.27)$$

$f_{ye}$ : est la limite d'élasticité attendue de l'acier ( $1.1 f_y$ )

Où  $L_v$  est la plage de cisaillement (rapport moment / cisaillement,  $M / V$ ),  $d_{bl}$  : est le diamètre (moyen) du renforcement en traction,  $f_y$  et  $f'_c$  sont la limite d'élasticité du renforcement longitudinal et résistance à la compression du béton, respectivement (43).

### 2.6.6 Bohl et Adebar 2011

(43) Dans une étude très récente basée sur les résultats de l'analyse par éléments finis non linéaire, une expression a été proposée pour  $L_p$  en fonction de la longueur de la paroi, du rapport moment / cisaillement et de la compression axiale (Bohl et Adebar 2011) comme :

$$L_p = (0.2L_w + 0.05 L_v) \left(1 - 1.5 \frac{P}{A_w f'_c}\right) \leq 0.8 L_w \quad (2.28)$$

Où :  $P$  est la force axiale sur la section et  $A_w$  est la surface de la paroi.

### 2.6.7 Kazaz [2013]

$$L_p = (0.27L_w) \left(1 - \frac{P}{A_w f'_c}\right) \left(1 - \frac{f_y \rho_{wh}}{f'_c}\right) \left(\frac{M}{L_w V}\right)^{0.45} \quad (2.29)$$

Où  $f_y$  : est la limite d'élasticité de l'acier et  $\rho_{wh}$ , le ferrailage horizontal (transversal) dans le mur (43).

## Chapitre 2 Les différentes approches pour le calcul des coefficients de comportement et l'estimation des rotules plastiques dans les voiles en béton armé

---

### 2.6.8 Wibowo et al. [2013]

(43) Wibowo et al. [2013] ont proposé une alternative exprimée dans l'Eq. (2.31) pour calculer la longueur de la rotule plastique lorsque  $M_{cr}$  est plus grand que  $M_u$  au niveau de la section critique dans les murs en béton armé. reconnaître la possibilité d'une fissure unique pour certains murs légèrement renforcés ce qui permet de réduire « la longueur de la rotule plastique en fonction de la pénétration de la longueur élastique »

$$L_p = 15 d_{bl} \quad (2.30)$$

Une analyse de régression linéaire multiple a été utilisée pour calculer la longueur de la rotule plastique, l'expression pour les murs rectangulaires légèrement renforcés non confinés [Eq. (2.32)]:

$$L_p = (0.10L_w + 0.075H_e) \left( 1 - 6.0 \left( \frac{P}{A_g f_{cmi}} \right) \right) \leq 0.5 L_w \quad (2.31)$$

### 2.6.9 Altheeb et al. [2015]

Dans une étude récente, Altheeb et al. [2015] ont utilisé des expériences réduites sur des éléments légèrement renforcés pour obtenir une longueur de la rotule plastique sur la base de la longueur de pénétration de la contrainte dès la formation d'une seule fissure (43):

$$L_p = \frac{(f_u - f_y) d_{bl}^{1.2}}{4 \sqrt{f'_c}} \quad (2.32)$$

## 2.7 Fissuration des murs en béton armé

### 2.7.1 Introduction

Dans les sections précédentes, les notions de coefficient de comportement et de rotule plastiques ont été discutées. La création d'une rotule plastique est le résultat de fissuration des sections en béton armé siège de sollicitations élémentaires ou combinées. Pour

## Chapitre 2 Les différentes approches pour le calcul des coefficients de comportement et l'estimation des rotules plastiques dans les voiles en béton armé

---

l'appréhension de la longueur de rotule plastique, il est nécessaire de comprendre le phénomène de fissuration et d'endommagement. La réglementation se base en générale sur les résultats expérimentaux pour formuler des relations empiriques. L'étude de la fissuration du béton a débuté par celle des tirants du fait de la simplicité apparente de ces éléments travaillant dans une seule direction. Ce sont les résultats de ces premières études qui ont donné lieu aux premières formulations codifiées dans la réglementation française sur la fissuration.

### 2.7.2 Estimation des ouvertures de fissure (44)

#### 2.7.2.1 Formation des fissures

La formation d'une fissure a pour conséquence l'augmentation soudaine de la contrainte dans l'acier due à un transfert de charge, augmentation qui va elle-même faire croître la largeur de la fissure. Pour qu'il y ait fissure, il faut un glissement de l'acier dans le béton sur une longueur  $l_s$ : ce glissement est le résultat du différentiel de déformation acier-béton intégré sur cette longueur de glissement. L'ensemble de ces grandeurs étant variables le long de la barre (et dans le temps, en fonction du chargement), nous abordons la physique du phénomène en retenant les grandeurs moyennes suivantes :

Ouverture de fissure :

$$w = l_s \times (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \quad (2.34)$$

Avec:

$\varepsilon_{sm}$  déformation moyenne des aciers sur la longueur de glissement

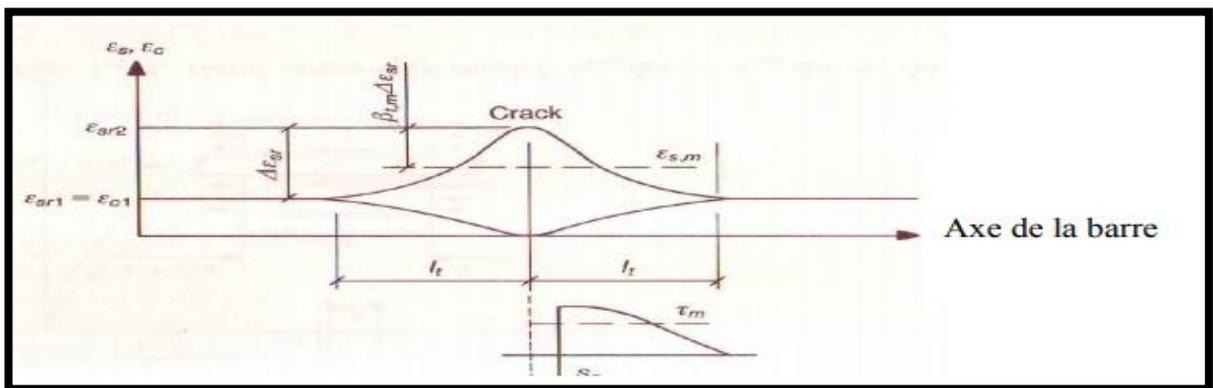
$\varepsilon_{cm}$  déformation moyenne du béton sur la longueur de glissement

Ces deux grandeurs physiquement simples sont en fait non accessibles par un calcul direct et d'autant moins qu'il faut distinguer deux cas très différents, celui de la fissuration « accidentelle » et celui de la fissuration « systématique », ces deux notions étant explicitées ci-dessous.

## Chapitre 2 Les différentes approches pour le calcul des coefficients de comportement et l'estimation des rotules plastiques dans les voiles en béton armé

### a) cas de la fissuration accidentelle

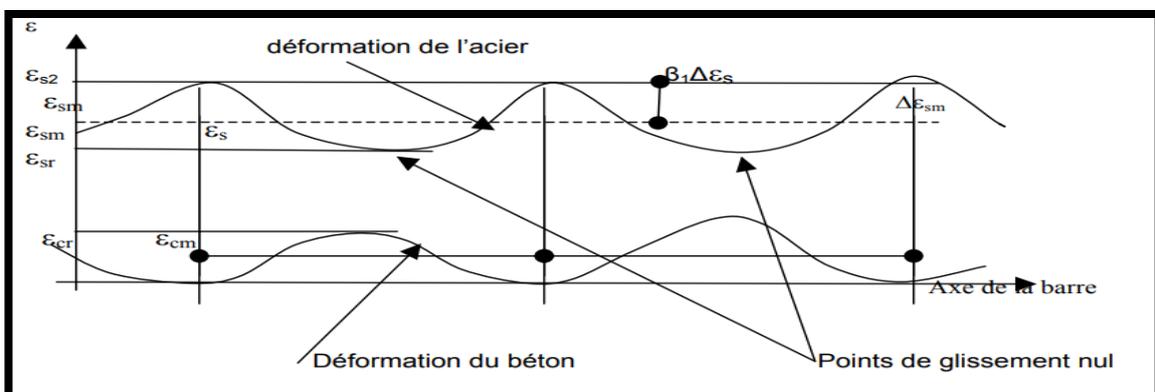
Ce cas donne lieu au schéma de déformation de l'acier en fonction de son abscisse sur la barre pouvant être représenté sur la figure 2.13:



**Figure 2. 13 :** représentation des déformations de l'acier (en haut) et du béton (en bas) avec l'axe de la barre d'acier en abscisse dans le cas de la fissuration accidentelle (44).

### b) Cas de la fissuration systématique

c) Lorsque la fissuration est systématique, on obtient le schéma donné par la figure 2.14 :



**Figure 2. 14 :** Représentation des déformations de l'acier et du béton avec l'axe de la barre d'acier en abscisse dans le cas de la fissuration systématique (44).

## Chapitre 2 Les différentes approches pour le calcul des coefficients de comportement et l'estimation des rotules plastiques dans les voiles en béton armé

---

On remarque que les déformations du béton et de l'acier ne sont pas identiques aux points de non glissement.

### 2.7.3 Évaluation des ouvertures des fissures (45)

Les codes des structures en béton armé proposent des relations empiriques pour décrire les ouvertures de fissures sous chargement de service prenant en considération le type d'exposition environnemental. Les relations basées sur l'expérimentation sont applicables aux structures simples et ne peuvent pas être généralisées particulièrement quand la structure est exposée aux environnements agressifs.

#### 2.7.3.1 Approche des codes (EC2- CEB) fissuration

##### EC2

L'approche de l'EC2 concernant l'ouverture des fissures est finalement extrêmement simple et repose sur la seule hypothèse de comportement élastique des aciers :

Elle part de l'expression de la différence de contrainte entre les aciers au droit de la fissure et au point de non glissement :

$$\Delta\sigma_s A_s = f_{ct} A b \quad (2.35)$$

Considérant que par adhérence, les aciers ne peuvent pas transmettre au béton plus d'effort que celui que le béton peut reprendre en traction sur la section considérée, on en déduit le différentiel de déformation des aciers :

$$\Delta\varepsilon_s = f_{ct} \rho E_s \quad (2.36)$$

Et donc une estimation de la valeur moyenne de la déformation des aciers

$$\varepsilon_{sm} = \varepsilon_{s2} - k_1 f_{ct} \rho E_s \quad (2.37)$$

avec :  $k_1$  facteur d'intégration de l'ordre de 0,5

## Chapitre 2 Les différentes approches pour le calcul des coefficients de comportement et l'estimation des rotules plastiques dans les voiles en béton armé

---

Puis en considérant que la déformation maximale du béton au point de non glissement des aciers est proche de sa déformation à la rupture, on obtient une estimation de la déformation moyenne du béton qui peut s'écrire:

$$\varepsilon_{cm} = k_2 f_{ct} / E_s \quad (2.38)$$

Avec :  $k_2$  facteur d'intégration de l'ordre de 0,5

### CEB

Pour le terme différentiel de déformation acier-béton, le CEB propose une formulation identique (présentation différente seulement), mais ne rajoute pas l'inégalité  $\geq 0.6\sigma_{s2}/E_s$  puisque le cas de la fissuration accidentelle est traité séparément. Le terme longueur de glissement est donné par l'expression  $\Phi / (3,6 \rho)$  pour le cas de la fissuration systématique.

Les formulations de l'EC2 et du CEB sont donc très voisines, l'EC2 donnant des longueurs de glissement de l'ordre de 25% supérieures dans le cas de la traction pure.

## **Chapitre 2 Les différentes approches pour le calcul des coefficients de comportement et l'estimation des rotules plastiques dans les voiles en béton armé**

---

### **2.8 Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons évoqué les notions de coefficients de comportement et de rotules plastiques. Les différentes méthodes issues de la littérature ont été exposées. Deux résultats essentiels peuvent en être tirés :

- Le coefficient de comportement dépend fortement de la ductilité et la période de la structure ainsi que la sollicitation sismique et les caractéristiques du sol.
- La valeur de  $l_p$  dépend du gradient de moment, de la hauteur du mur, de sa longueur et du niveau de charge axiale.

La notion de fissuration associée à la création de rotules plastique a été évoquée d'un point de vue réglementaire. Dans ce qui suit, le travail de modélisation numérique sera exposé. Les différents paramètres évoqués antérieurement (rotule plastique, coefficient de comportement) seront investigués numériquement avec comparaison avec les résultats expérimentaux.



# **Chapitre 3**

**simulation par une approche macroscopique du comportement des voiles en  
béton armé**

### **3.1 Introduction**

Le travail présenté dans ce chapitre concerne l'approche de modélisation adoptée ainsi que les tests expérimentaux qui feront l'objet de simulation. Le modèle numérique une fois validé sera en mesure d'apporter des informations nécessaires à l'évaluation des coefficients de comportement et des longueurs de rotules plastiques. Nous nous limiterons dans le présent chapitre à des comparaisons numérique- expérimental en termes de réponse globale, le logiciel utilisé dans cette recherche c'est le logiciel **CASTEM**.

\***CASTEM** c'est un logiciel de simulation numérique utilisé en mécanique des Structures, et développé par le Département de Modélisation des Systèmes et Structures (DM2S), autrefois Département Mécanique et Technologie (DMT), du Commissariat français à l'Energie Atomique et aux énergies alternatives (CEA). Il est mis à disposition gracieusement pour l'enseignement et la recherche. Il utilise la méthode des éléments finis pour résoudre différents types de problèmes scientifiques.

### **3.2 Programme SAFE :**

#### **3.2.1 Mur non élancé (T10) :**

Le programme expérimental SAFE a été mené en 1998 au CCR/Ispra sur divers voiles en béton armé, à l'aide d'essais pseudo-dynamiques, réalisés avec le mur de réaction du laboratoire ELSA. Le voile référencé T10 (voir figure3.1) a été choisi ici comme base de comparaison des simulations par éléments finis.

Le voile possédant un élancement ( $h/l = 0.4$ ) a été testé en cisaillement pur au mur de réaction du laboratoire ELSA .La structure est un mur porteur de (1.20m) de haut, une longueur de (3.00m ), avec une section constante en forme de T, le voile a l'épaisseur de l'âme et des nervures égales à 20 cm, il est renforcé par deux murs de refend, ferrillés de la même manière. Le ferrailage du voile T10 consiste en deux nappes d'armatures identiques orthogonales. Le mur, ses nervures ainsi que les longrines supérieures et inférieures sont présentés dans la Figure 3.1.

### Chapitre 3 simulation par une approche macroscopique du comportement des voiles en béton armé

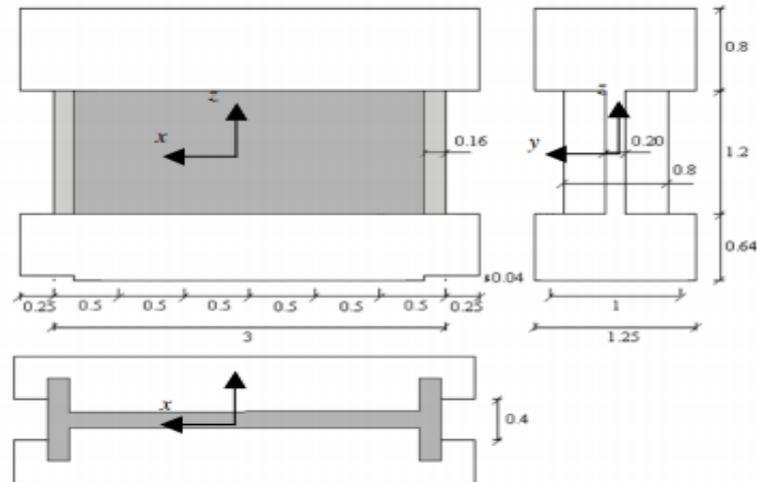


Figure 3. 1 : caractéristique géométrique du voile en béton armé SAFE (T10) (46)

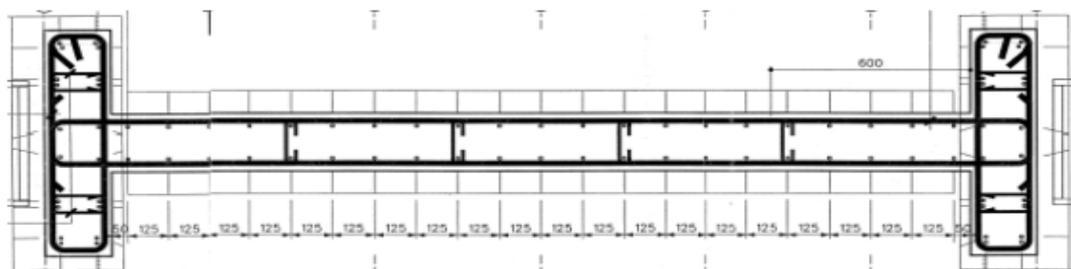
Maquette	A	B	H	S	M	$\rho_v$	$\rho_h$	$\sigma_v$	$\tau_d$	K	$\varepsilon$	F
Unité	(m)	(m)	(m)	( $m^2$ )	(tonne)	(%)	(%)	(Mpa)	(Mpa)	(MN/m)	%	(HZ)
T10	3	0.4	1.2	0.799	39576.96	0.49	0.39	3	0	7120	10	12.85

Tableau 3. 1 : description de la maquette (T10) SAFE.

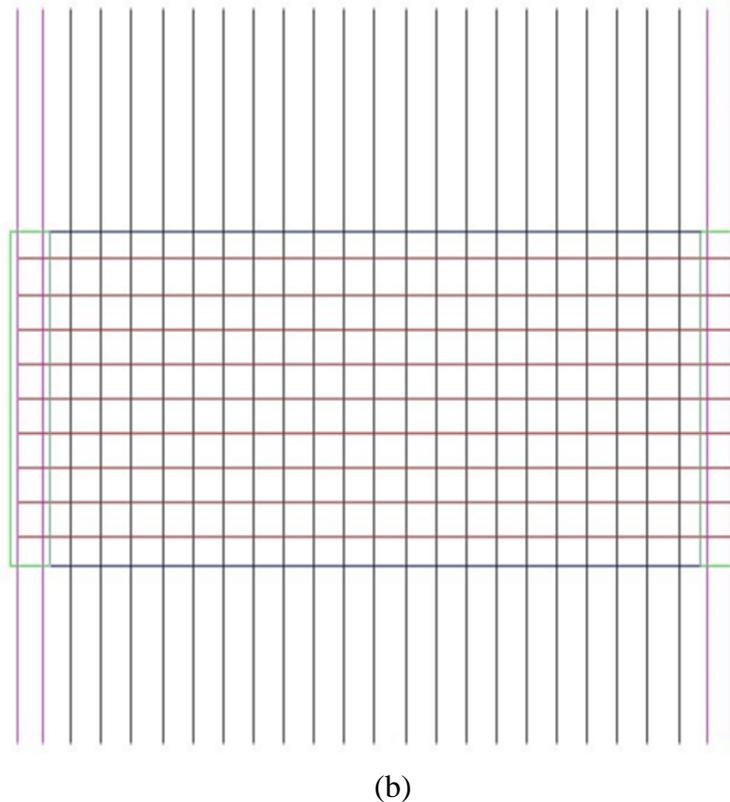
Avec :

A : largeur de voile, B : l'épaisseur de l'âme de voile, H : hauteur de voile  
S : section de voile, M : masse volumique.

#### 3.2.2 La disposition de ferrailage du voile non élancé (T10) :



(a)



**Figure 3. 2 :** (a) plan de ferrailage (T10) (46), (b) la disposition du ferrailage horizontal (18T10), le ferrailage vertical  $2 \times (25T10)$  pour le voile (T10)

### **3.3 Mur élancé (BC80) :**

Le voile possédant un élancement ( $h/l = 1.6$ ) a été testé en cisaillement avec flexion pur. La structure est un mur porteur de (2.8m) de haut, une longueur de (1.75m), avec une section constante en forme de T, le voile a une épaisseur de l'âme et des nervures égales à 8 cm, il est renforcé par deux murs de refend, ferrailés de la même manière. Le ferrailage du voile BC 80 consiste en deux nappes d'armatures identiques orthogonales. Le mur, ses nervures ainsi que les longrines supérieures et inférieures sont présentées dans (la Figure 3.3)

### Chapitre 3 simulation par une approche macroscopique du comportement des voiles en béton armé

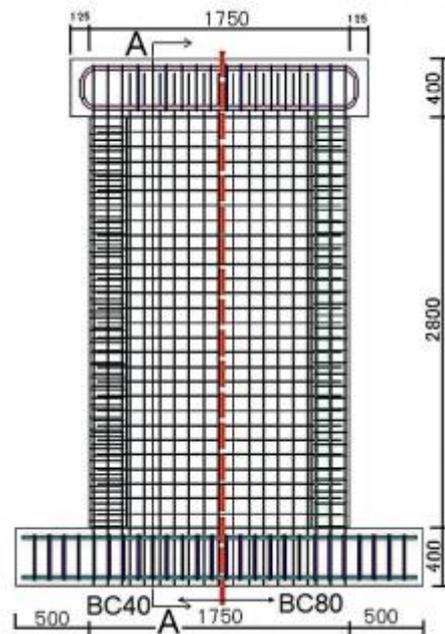
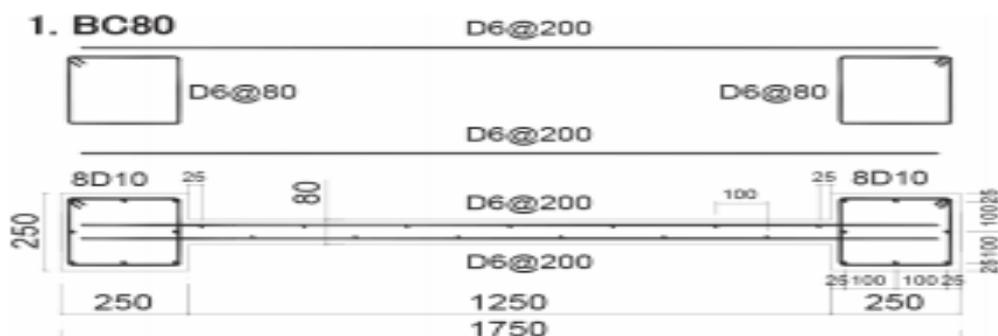


Figure 3. 3 : caractéristique géométrique du voile en béton armé (BC 80) (47)

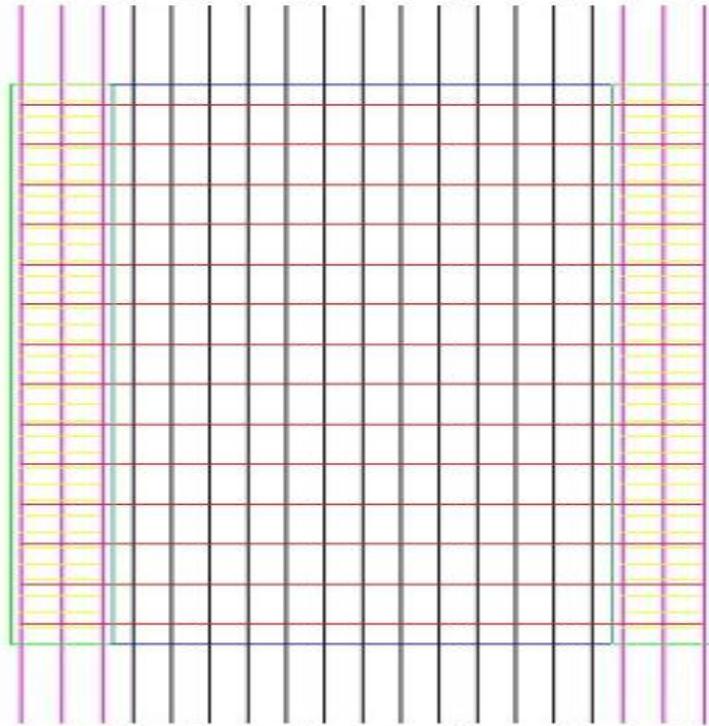
Maquette	A	B	H	S	M	$\rho_v$	$\rho_h$	$\sigma_v$	$\tau_d$	K	$\epsilon$	F
Unité	(m)	(m)	(m)	( $m^2$ )	(tonne)	(%)	(%)	(Mpa)	(Mpa)	(MN/m)	(%)	HZ
BC 80	1.75	0.08	2.8	0.225	81243.7	0.162	0.079	3	0	4506	10	13.7 63

Tableau 3. 2 : description de la maquette BC80

#### 3.3.1 La disposition du ferrailage de voile élancé (BC80) :



(a)



(b)  
**Figure 3. 4 :** (a) plan de ferrailage (BC 80) (47), (b) le ferrailage horizontal (14T6) et vertical 2×(19T6 ) pour le voile (BC80)

- Pour le voile T10 on a :  
 $f_{c28} = 40Mpa, f_y = 500Mpa$
- Pour le voile BC80 on a :  
 $f_{c28} = 59.5Mpa, f_y = 387Mpa$   
 $f_{c28}, f_y$ : La résistance caractéristique de béton, nuance d'acier.  
 $a, b, h$  : La géométrie des voiles.  
 $\rho_v$  et  $\rho_h$  : taux d'armature suivant les deux directions.  
 $\sigma_v, \tau_d$  et  $K$  : contrainte de compression, contrainte de cisaillement rigidité conventionnelle.  
 $\xi, f$  : amortissement, fréquence excitation.

### 3.4 Condition aux limites :

Tous les murs sont encastrés à la base. Des masses additionnelles posées en tête de voile sont à l'origine de la contrainte verticale moyenne à la base. Un dispositif de chargement a été conçu et construit de telle façon que la rotation de la longrine supérieure soit empêchée. Ce dispositif est réutilisé pour chacun des tests (Figure 3.5). On remarque le contrefort additionnel du côté Est, qui permet de solliciter le dispositif de chargement des deux côtés à la fois. On remarque également le dispositif de blocage à la base, qui empêche le spécimen de glisser. Des contrevents latéraux ont été introduits, de façon à empêcher les éventuels mouvements hors plan.

### 3.5 Chargement :

Le chargement est composé d'un chargement dynamique correspondant à l'accélérogramme imposé, d'une part et d'un chargement statique, constant au cours de l'excitation, d'autre part. A cet effet, la masse totale en translation correspondante à chaque cas étudié a été affectée aux nœuds du maillage éléments finis situés sur le côté horizontal supérieur du voile. Le poids propre de la longrine supérieure, du dispositif du chargement et des surcharges éventuelles est représenté par des forces verticales constantes appliquées aux mêmes nœuds.

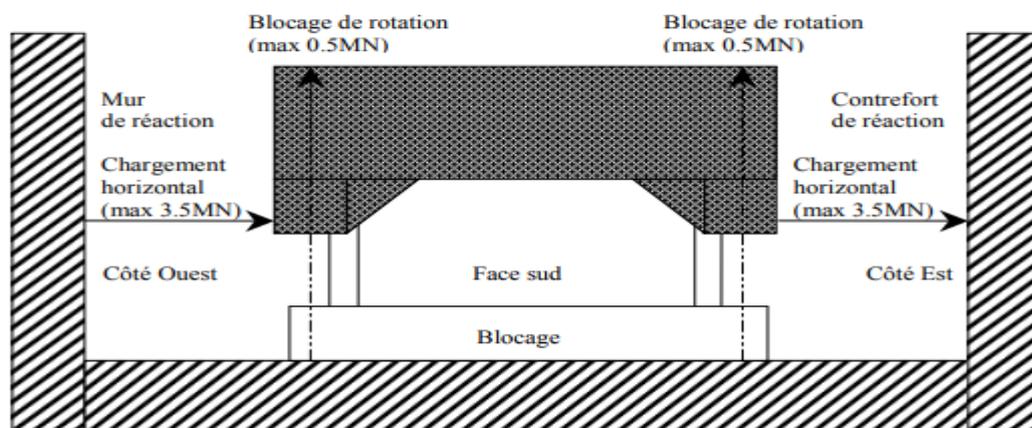


Figure 3.5 : Dispositif de chargement pour les maquettes du programme SAFE (46)

### 3.6 Essais pseudo dynamiques

Les essais sont effectués de façon pseudo dynamique. Contrairement à un essai dynamique sur table vibrante (figure 3.6), la méthode pseudo dynamique est une méthode hybride numérique/expérimentale qui combine le calcul du déplacement de la structure (ici un degré de liberté de translation horizontale) et la mesure de la force employée pour imposer ce déplacement. Les forces d'inertie (et éventuellement d'amortissement visqueux) d'un tel essai sont calculées numériquement, ce qui permet de réaliser le test avec une échelle de temps dilatée. Il devient ainsi très simple de varier la fréquence propre du système en changeant simplement la valeur de la masse de translation.

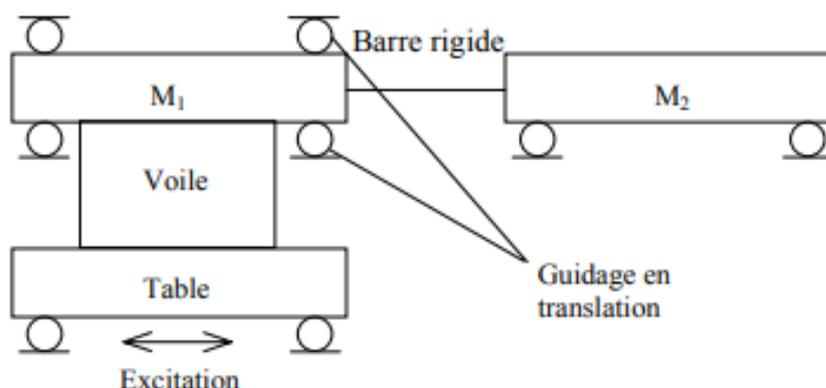


Figure 3. 6 : Essai dynamique sur table vibrante de référence avec deux masses M1 et M2, la masse M2 étant située hors de la table (48).

### 3.7 Modélisation macroscopique du comportement des deux voiles :

La plupart des études concernant la modélisation non linéaire, dans la littérature, supposent des modèles très simplifiés qui adoptent des lois de comportement simplifiées. Le voile court testé (T10) dans le cadre de SAFE et un autre voile élancé ( BC80) sont modélisés à l'échelle macroscopique. Nous exposerons dans cette partie les principes de modélisation qui nous ont guidés pour simuler numériquement le comportement de ces deux types de structure avec différentes discrétisations. Les caractéristiques géométrique et mécanique sont représentées dans le tableau (tableau 3.3)

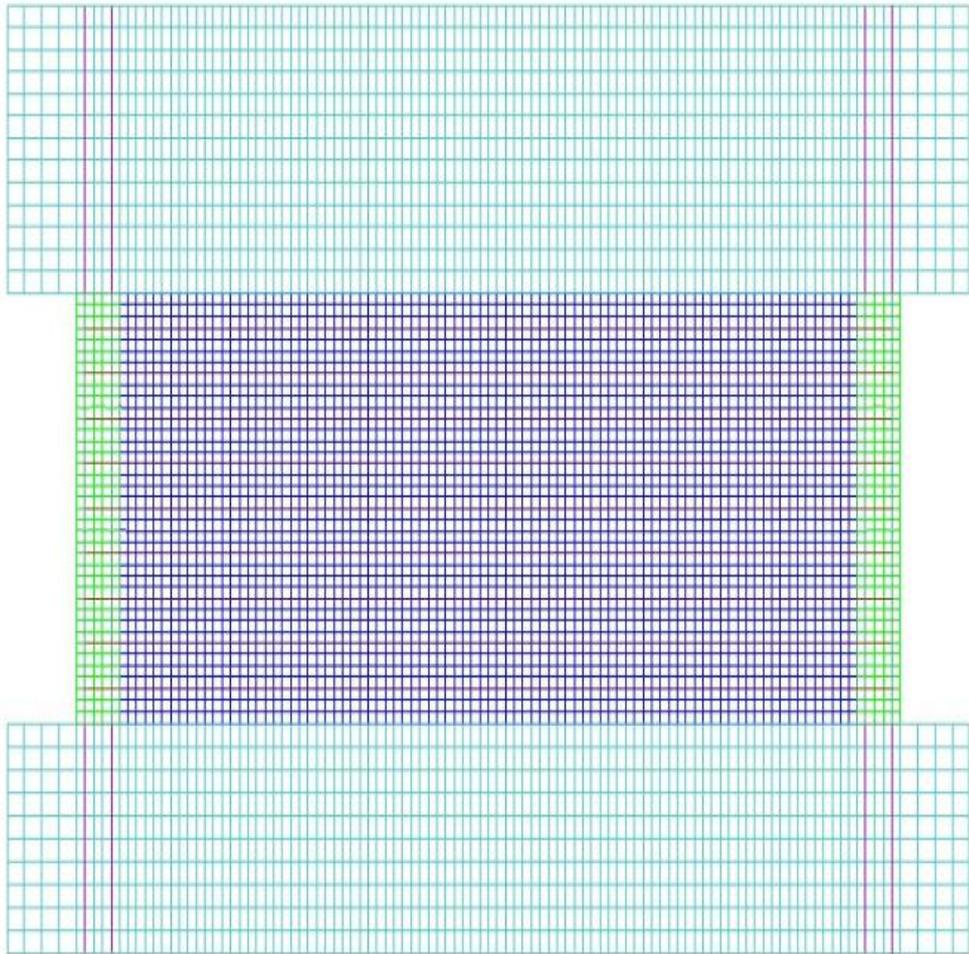
Maquette	T10	BC80
Type de test	Essai PSD	Essai PSD
Condition aux limites	Rotation en tête bloquée	Rotation en tête bloquée

### Chapitre 3 simulation par une approche macroscopique du comportement des voiles en béton armé

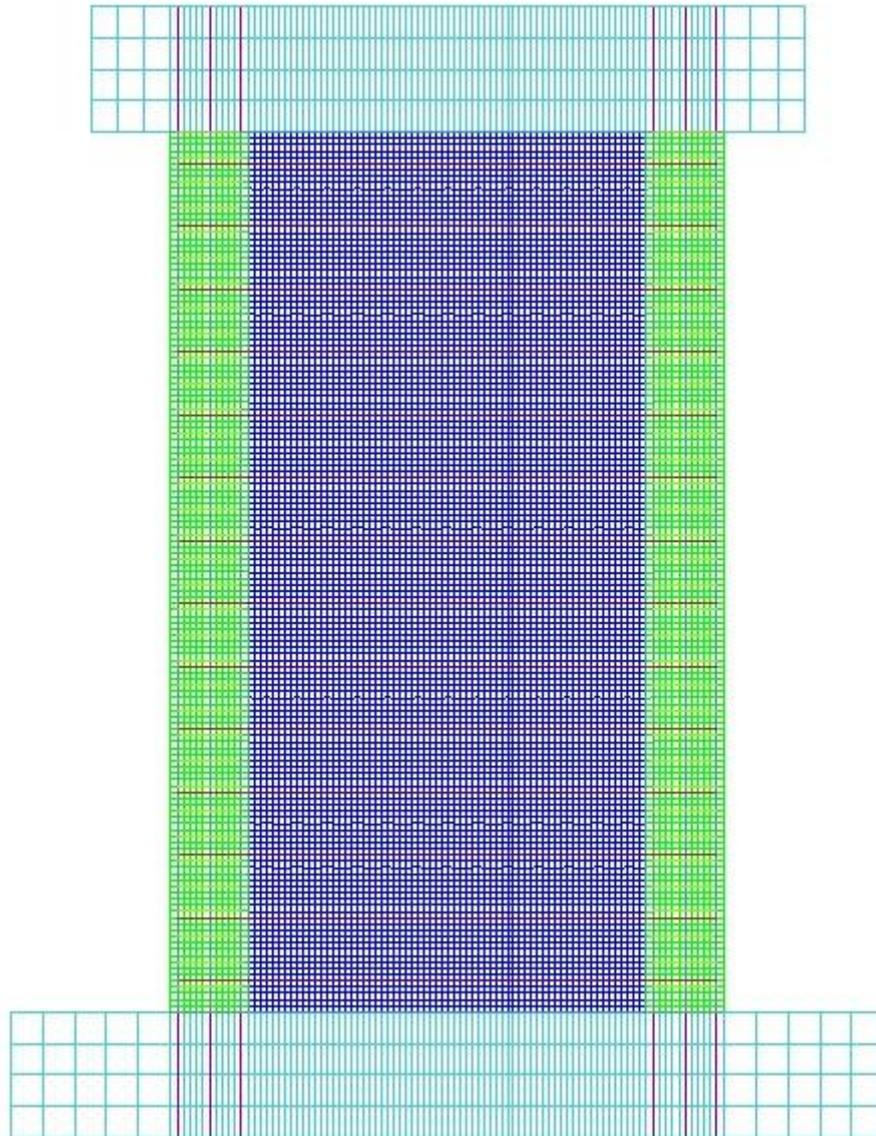
Élancement		0.46	1.6
Section du voile	m <sup>2</sup>	0.799	0.225
Section de nervure	m <sup>2</sup>	0.128	0.218
Renforcement Horizontal	%	0.39	0.079
Renforcement Vertical	%	0.49	0.162
Espacement	Mm	125	250
Résistance en compression	Mpa	40	59.5
Résistance en traction	Mpa	3	3
Module de Young béton	Mpa	30000	30900
Limite élasticité	Mpa	500	387
Module de Young acier	Mpa	200000	189000
Contrainte normale en base	Mpa	0.34	0.11

**Tableau 3. 3 :** caractéristique géométrique et mécanique des maquettes.

Dans la modélisation macroscopique des voiles (a) T10 SAFE et (b) BC80 (figure 3.7), des éléments finis bidimensionnels pour le béton et de type coques pour l'acier sont utilisés. Les lois de comportement sont basées sur le mécanique endommagement de béton et de la plasticité parfait avec écrouissage pour les aciers.



(a)



(b)  
**Figure 3. 7 :** (a) le maillage du voile (T10) SAFE, (b) le maillage du voile BC 80  
à l'échelle macroscopique

### 3.8 Les modèles utilisés pour la simulation :

#### 3.8.1 Modèle non linéaire du béton (modèle d'endommagement de fichant) :

Pour la modélisation macroscopique on a choisi le modèle de fichant et al (1996) (49) basée sur la théorie de plasticité et de l'endommagement. Les auteurs ont développé une famille de modèles d'endommagement : un modèle d'endommagement isotrope et un modèle orthotrope pour résoudre les problèmes des chargements plus complexes et des matériaux anisotropes. Dans les deux modèles, le couplage est réalisé avec la plasticité et les effets unilatéraux sont pris en compte (Figure 3.8). L'endommagement affecte la partie élastique du comportement à partir de la relation contrainte –déformation :

$$\sigma_{ij} = c_{ijkl}^{endom} \varepsilon_{kl}^e \quad (3.1)$$

ou  $c_{ijkl}^{endom}$  est la raideur du matériau endommagé  $\sigma_{ij}$  et  $\varepsilon_{kl}^e$  sont respectivement les composantes du tenseur des contraintes et du tenseur des déformations élastiques.

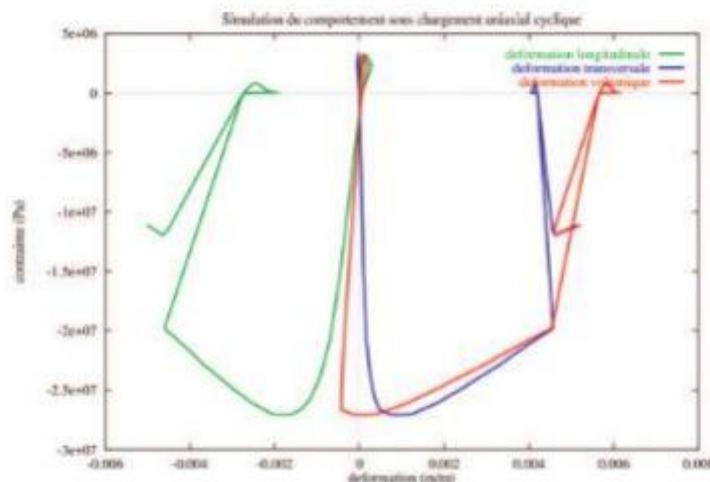


Figure 3. 8 : comportement uni axiale du modèle [la borderie, 2003].

#### 3.8.2 Modèle élasto-plastique pour l'Acier :

ce modèle est constitué de deux types de modèle, le modèle Elasto-Plastique parfait et le modèle Elasto-Plastique écrouissable :

### Chapitre 3 simulation par une approche macroscopique du comportement des voiles en béton armé

#### a) Modèle Elasto-Plastique parfait

Le comportement du type de la figure (3.9.b), est complexe et délicat à modéliser. Par contre, celui de la figure (3.9.a) peut être schématisé comme indiqué sur la figure (3.10). Sous chargement cyclique, la courbe effort-déplacement est approchée par un diagramme bilinéaire dit « Elasto-plastique parfait », comportant une pente initiale jusqu'à un déplacement  $u_y$  correspondant à une force  $f_y$  dite limite d'élasticité, puis un plateau à effort constant au-delà de  $u_y$  (écoulement plastique libre).

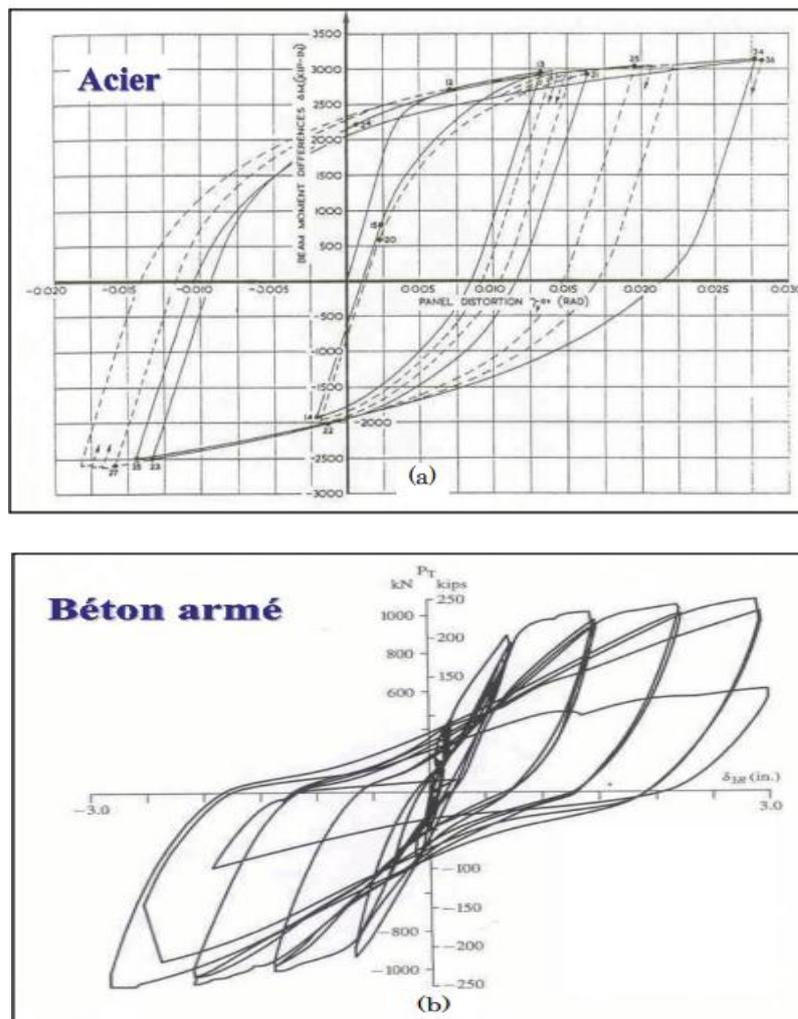
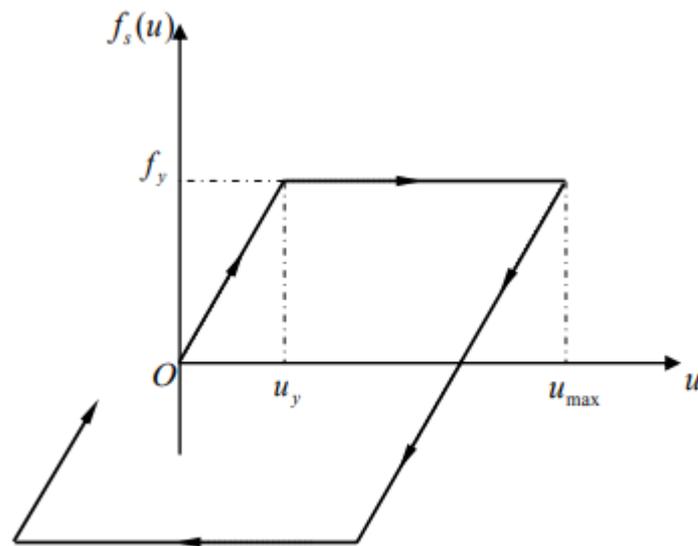


Figure 3. 9 : Courbes effort-déplacement

(a) Acier (Krawinkler-Bertero-Popov)

(b) Béton armé (Popov-Bertero)



**Figure 3. 10 :** Modèle Elasto-Plastique parfait

La décharge qui intervient pour la valeur  $u_{max}$  du déplacement, s'effectue suivant un trajet parallèle à celui du chargement initial ; la décharge se poursuit jusqu'à l'atteinte d'une force égale à  $f_y$ , valeur pour laquelle un plateau apparaît dans la courbe. Le chargement à partir d'un point de ce plateau suit de nouveau un trajet parallèle à celui du chargement initial, et ainsi de suite.

#### b) **Modèle Elasto-Plastique écrouissable**

Ce modèle est une amélioration du modèle précédent, il est constitué de deux segments de droites (figure 3.11), l'un décrit la phase élastique où la pente de la droite représente la rigidité initiale de la structure, et l'autre décrit la phase plastique, mais contrairement au modèle élasto-plastique parfait, ce segment de droite n'est plus un plateau, mais présente une pente  $k_p$  couramment appelée rigidité plastique. Ce modèle est encore mieux adapté pour schématiser le comportement de la figure (3.9.a) (26).

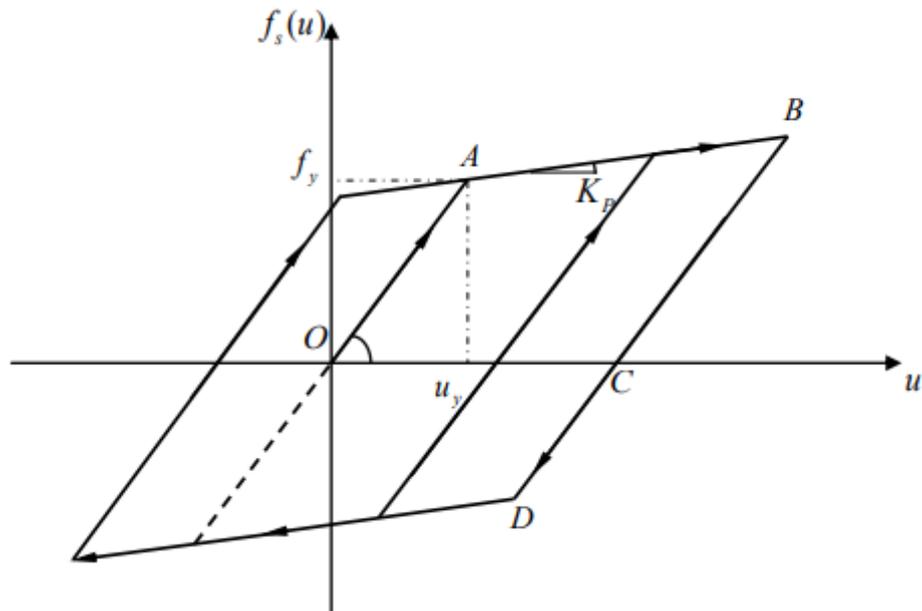


Figure 3. 11 : Modèle Elasto-Plastique avec écrouissage

### 3.9 Les résultats du voile SAFE (T10) :

#### 3.9.1 Push-over (quasi statique monotone)

Par la suite, la figure 3.12 présente la réponse globale (effort-déplacement). C'est une courbe enveloppe qui doit passer par le maximum de chaque cycle. La comparaison avec l'expérimental montre une assez bonne corrélation.

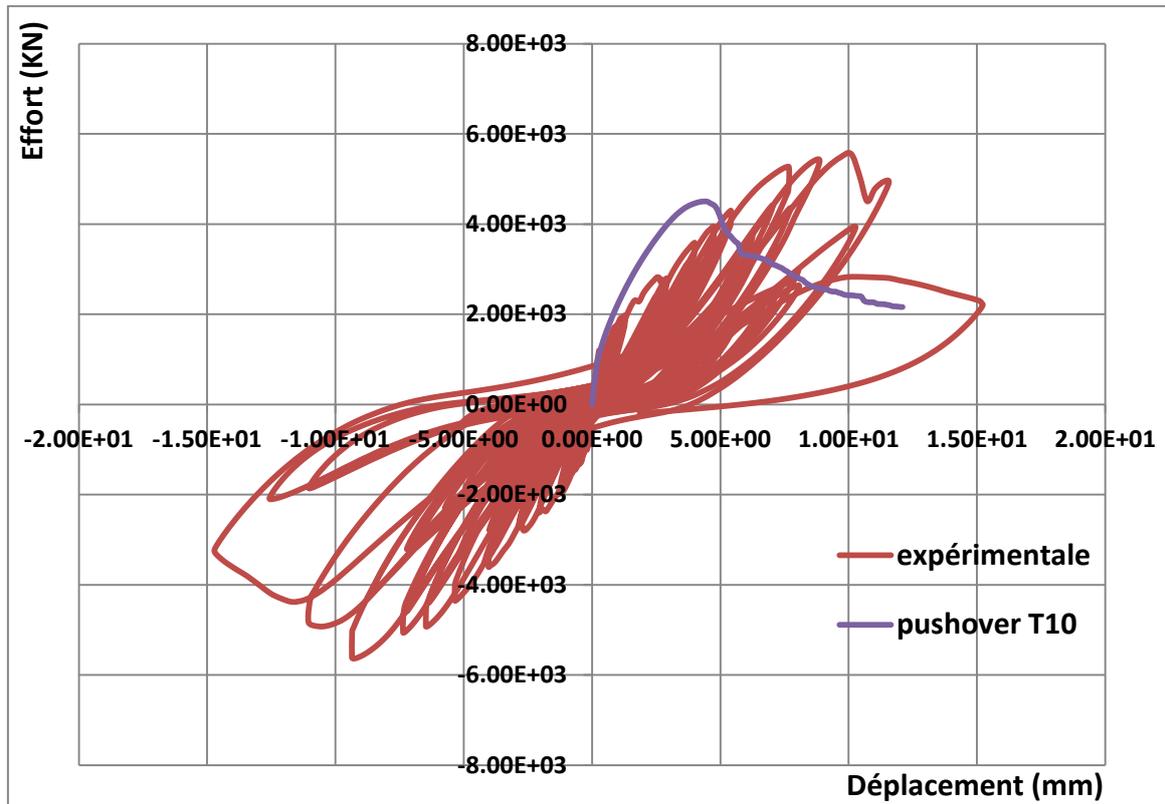


Figure 3. 12 : la réponse globale (expérimental avec numérique (quasi statique)) pour voile T10 par une Approche Multicouche.

**Commentaire :**

La figure 3.12 présente la courbe Effort -déplacement obtenues à partir d'un essai expérimental par le programme SAFE. Elle montre clairement que la plastification commence à un déplacement de 0.09cm. La force est sous-estimée par rapport à l'expérimentation. Cependant, le palier plastique numérique est plus petit que l'expérimental.

**3.9.2 Réponse cyclique**

Nous allons présenter les réponses des voiles sous chargement cyclique. La figure 3.13 présente les résultats des calculs cycliques pour le mur T10 (courbes déplacements - temps).

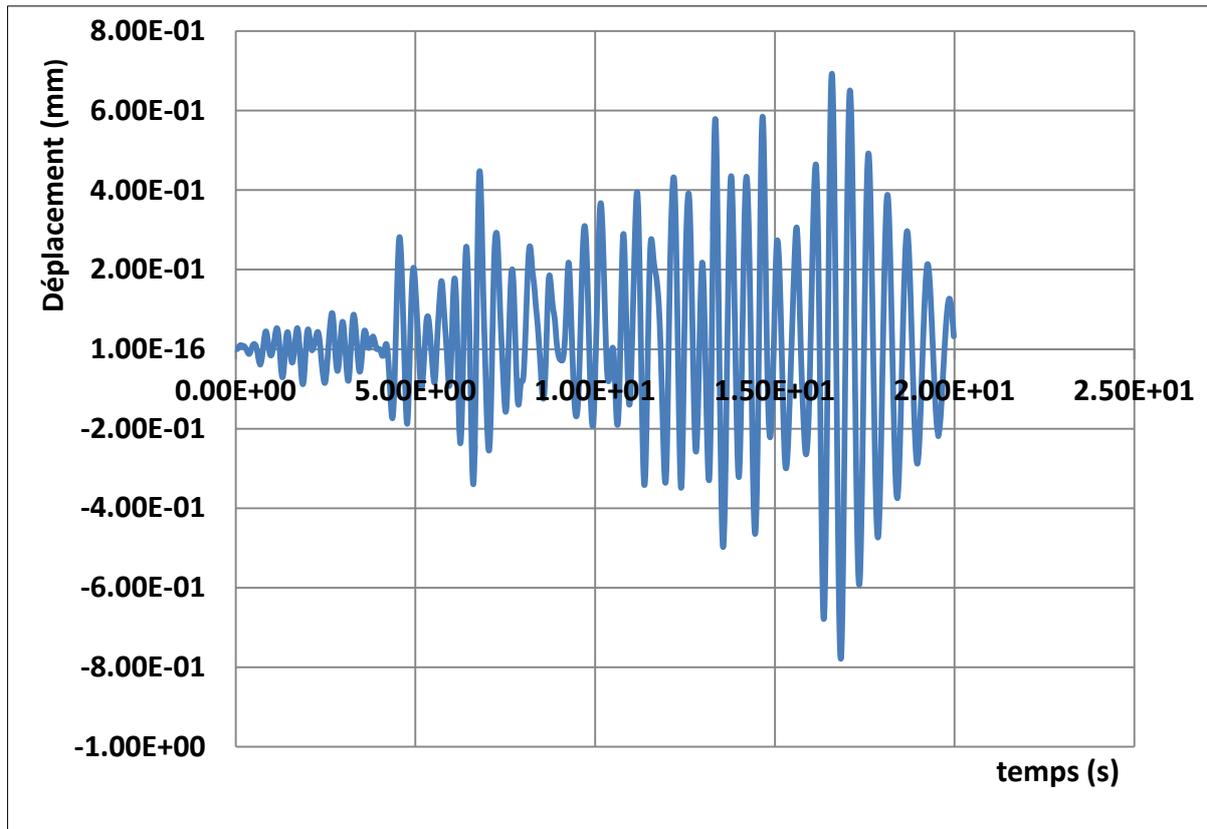


Figure 3. 13 : Réponse Déplacement –temps (T10)

**Commentaires :**

(La Figures 3.13) présente la comparaison des évolutions temporelles du déplacement en tête du spécimen SAFE T10. Les résultats présentés concernent un intervalle de temps de forte amplitude compris entre 0.0 sec et 2.00+01 sec avec une fréquence de 12.82 HZ.

Les figures 3.14 présentent la comparaison expérimentale-numérique des courbes cycliques (force-déplacement) et force-temps enregistrées durant l'essai de SAFE T10 .

### Chapitre 3 simulation par une approche macroscopique du comportement des voiles en béton armé

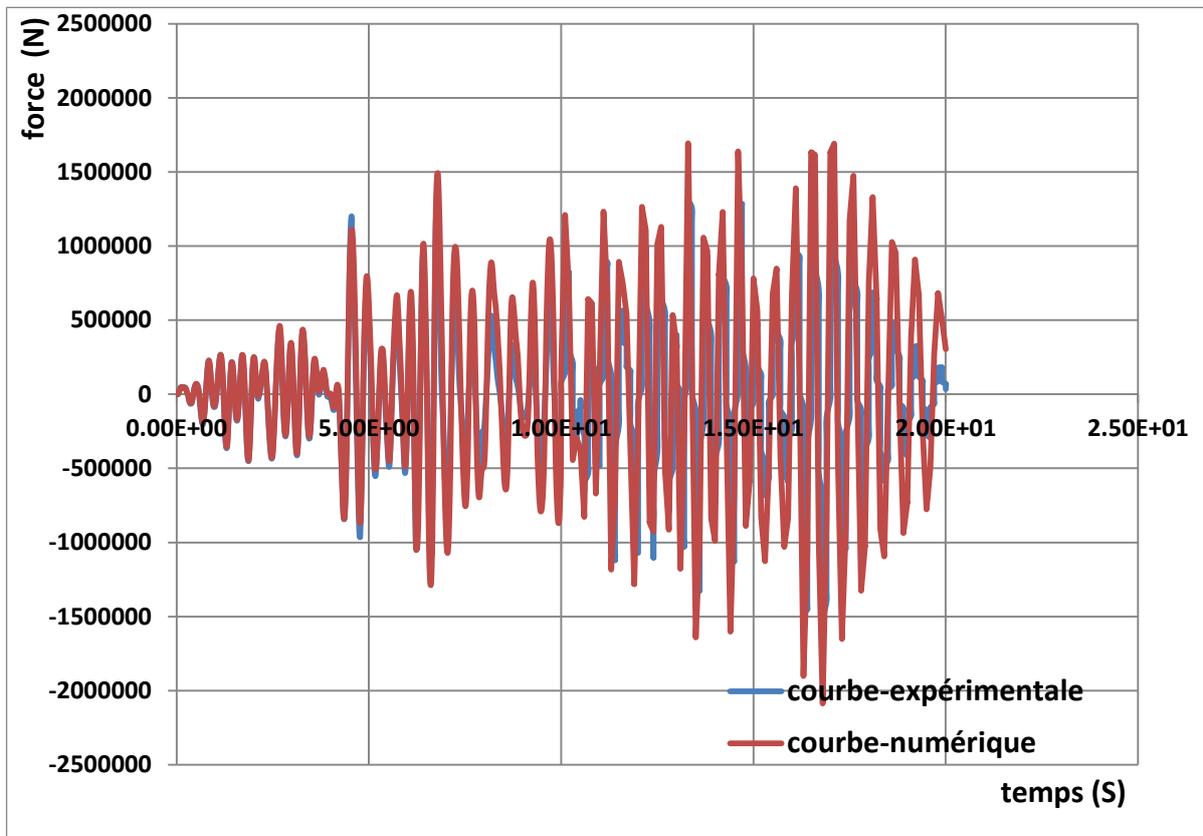
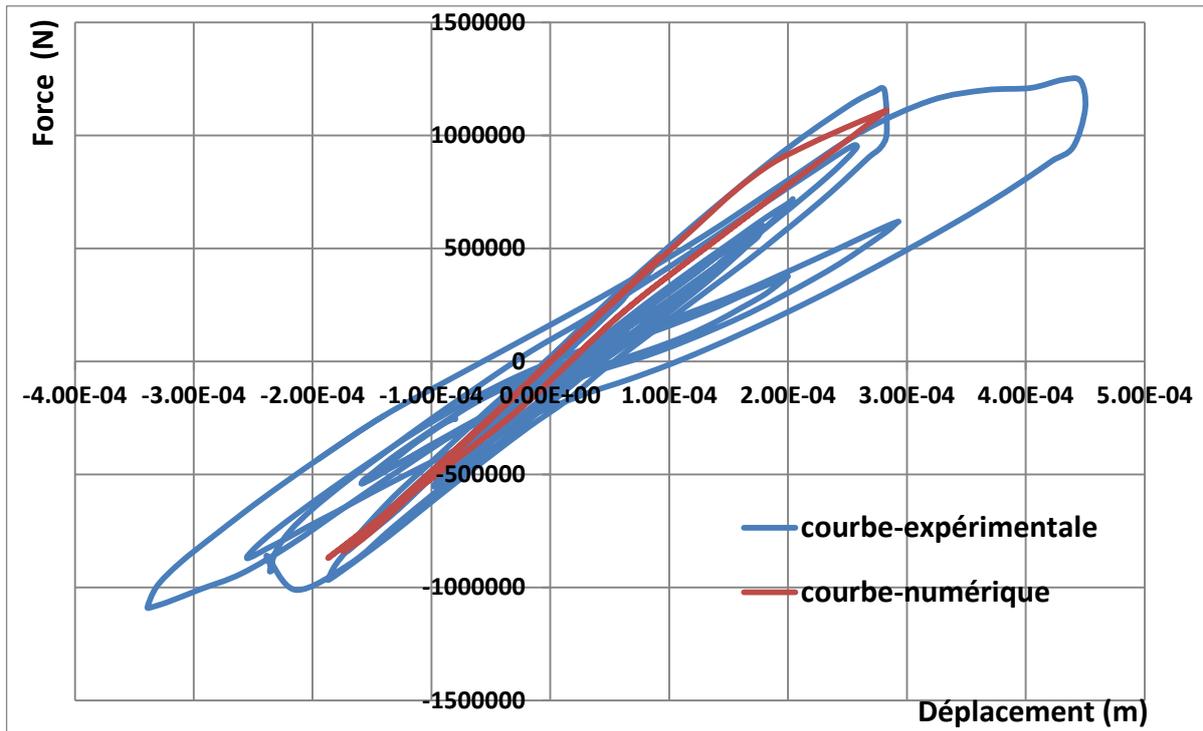


Figure 3. 14 : la réponse cyclique (expérimental Vs. numérique) pour le voile T10

### **Chapitre 3 simulation par une approche macroscopique du comportement des voiles en béton armé**

---

#### **Commentaires :**

Dans le cas de l'essai SAFE de voile T10 le modèle expérimental indique une perte de résistance pour un niveau de force et de déplacement qui correspond assez bien avec celui constaté numériquement (figure 3.14). L'examen de la forme des boucles d'hystérésis dans les courbes expérimentales et numériques permet de constater la faible quantité d'énergie dissipée, une fois il y a une plastification des aciers on remarque qu'il y a une dissipation d'énergie par le mode de cisaillement, les courbes ayant d'ailleurs un aspect très pincé. Cela est dû à une refermeture des fissures diagonales plus tardive, la diagonale en compression se referme lorsque le chargement change de signe, les fissures sur l'autre direction étant déjà ouvertes. La raideur du voile est donc très faible lors du changement de signe, puisque c'est l'acier qui participe majoritairement à la reprise de l'effort tranchant dans cette phase. De plus, les lèvres des fissures peuvent glisser l'une par rapport à l'autre du à l'accroissement de fissuration.

### 3.10 Les résultats du voile (BC 80) :

#### 3.10.1 La courbe force – déplacement (push –over) :

La courbe force – déplacement calculée est présentée dans (la figure 3.15)

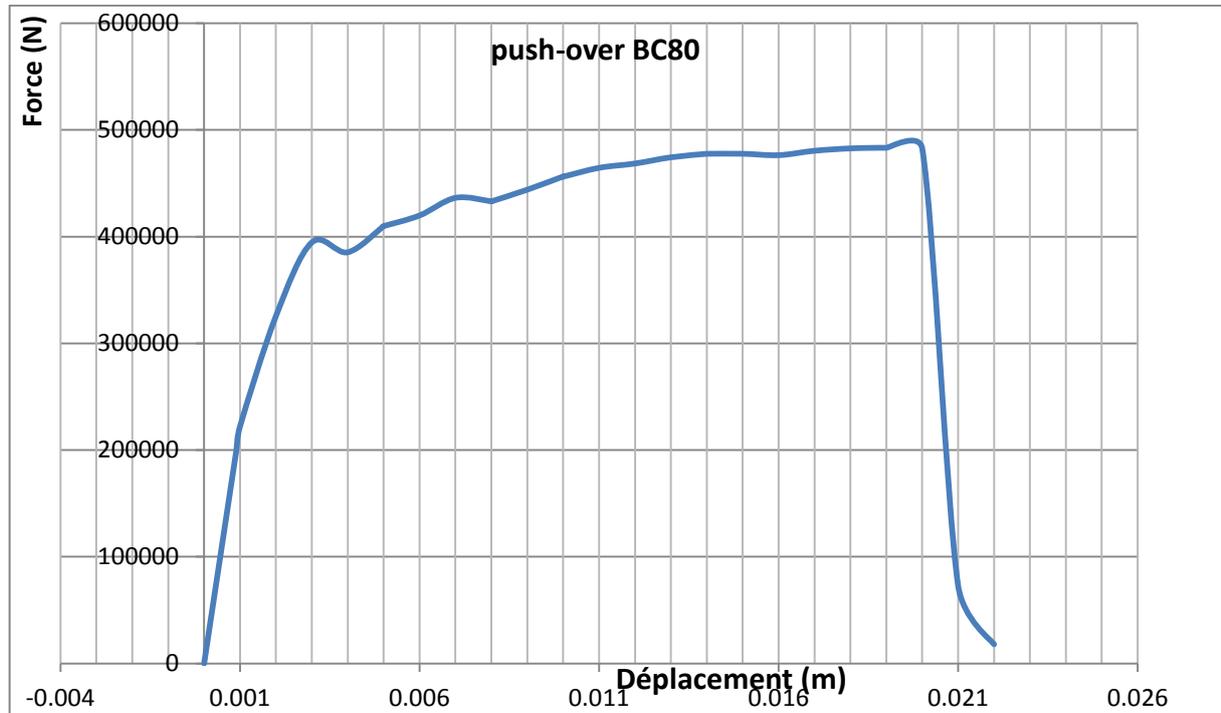
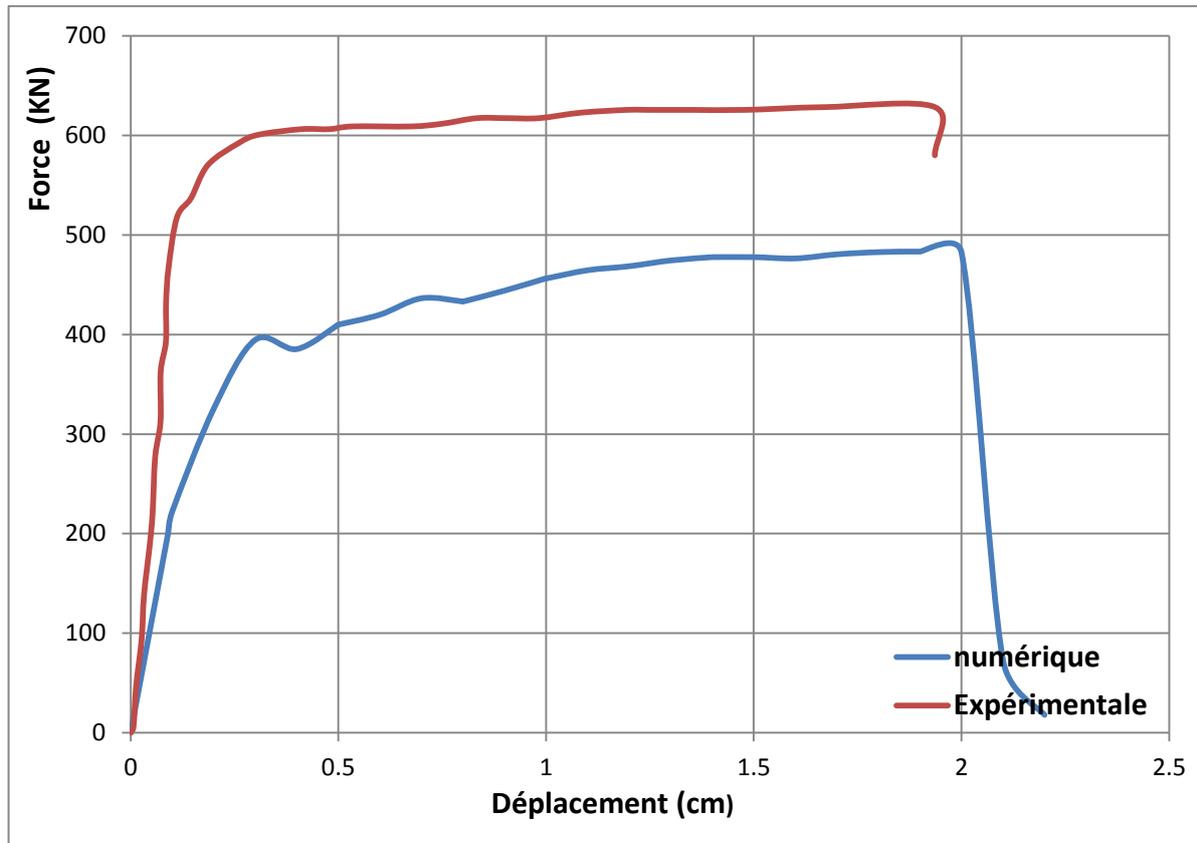


Figure 3. 15 : La courbe push over de voile (BC 80)

#### 3.10.2 Comparaison Expérimentale-Numérique :

Par la suite, la figure 3.16 présente une comparaison des résultats numériques avec l'expérimental.



**Figure 3. 16 :** la réponse globale (expérimental vs numérique (statique)) pour le voile BC80)

**Commentaire :**

La courbe PUSH OVER relative au voile BC80 est illustrée dans la figure 3.16. Les coordonnées du point indiquant l'entrée au domaine plastique sont obtenues par une idéalisation de la courbe et ils sont décrits par un déplacement  $\Delta_e = 0.16 \text{ cm}$  et un effort  $v_y = 394 \text{ KN}$ . Le déplacement cible qui est égale à  $\Delta_c = 2 \text{ cm}$  correspond à un effort  $v_y = 489 \text{ KN}$ .

(La figure 3.16) présente la réponse globale expérimentale avec le numérique, le modèle numérique indique une perte de résistance pour un niveau de force 483KN et d'un déplacement de 2cm qui est en dessous de celui constaté expérimentalement avec une force de 628 KN et un déplacement de 1.93 cm.

### **3.11 Conclusion :**

D'après les résultats obtenus dans cette partie, on s'est intéressé principalement à la reproduction numérique du comportement global (courbe de capacité, réponse cyclique, ..) des murs voiles (élané et non). L'approche de modélisation adoptée s'est révélée plus au moins capable de reproduire le comportement global. Dans le prochain chapitre, le comportement local sera illustré afin de pouvoir évaluer le coefficient de comportement et les longueurs de rotules plastiques.

## **Chapitre 4**

### **ÉVALUATION DES COEFFICIENTS DE COMPORTEMENT ET DES LONGUEURS DES ROTULES PLASTIQUES**

## **Chapitre 4      EVALUATION DES COEFFICIENTS DE COMPORTEMENT ET DES LONGUEURS DE ROTULES PLASTIQUES**

---

### **4.1 Introduction**

L'objectif principal de ce chapitre est de valider la procédure de calcul pour le coefficient de comportement ainsi que la longueur de rotule plastique pour les voiles en béton armé à l'échelle macroscopique.

Ces analyses ont été faites pour deux voiles qui présentent différentes géométries. Pour ce faire, on a pris deux voiles un non élancé et l'autre élancé.

Dans un premier temps, des courbes PUSHOVER ont été élaborées. Dans ce qui suit, nous allons expliquer la méthode de bi linéarisation qui permet l'évaluation des coefficients de comportement.

Ensuite, on présentera la méthode de calcul des longueurs de rotule plastiques. Les différentes formules réglementaires seront évoquées.

Le lien entre la notion de rotule plastique et les champs de fissuration et d'endommagement sera également évoqué.

### **4.2 Méthode d'Idéalisation de la courbe de capacité :**

On commence à chercher une représentation bilinéaire équivalente du diagramme de capacité. Cette idéalisation permet de calculer le rapport de ductilité  $\mu$  ainsi que les paramètres du coefficient de comportement.

## Chapitre 4 EVALUATION DES COEFFICIENTS DE COMPORTEMENT ET DES LONGUEURS DE ROTULES PLASTIQUES

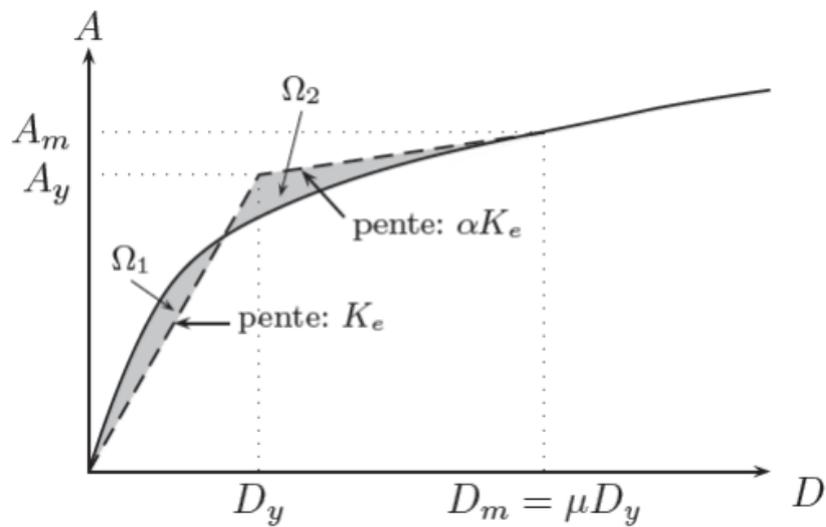


Figure 4.1 : modèles bilinéaire équivalents (50).

➤ Dans notre travail on a prend le chemin de la bi-linéarisation de la courbe PUSHOVER suivant les recommandations du FEMA 356 (14).

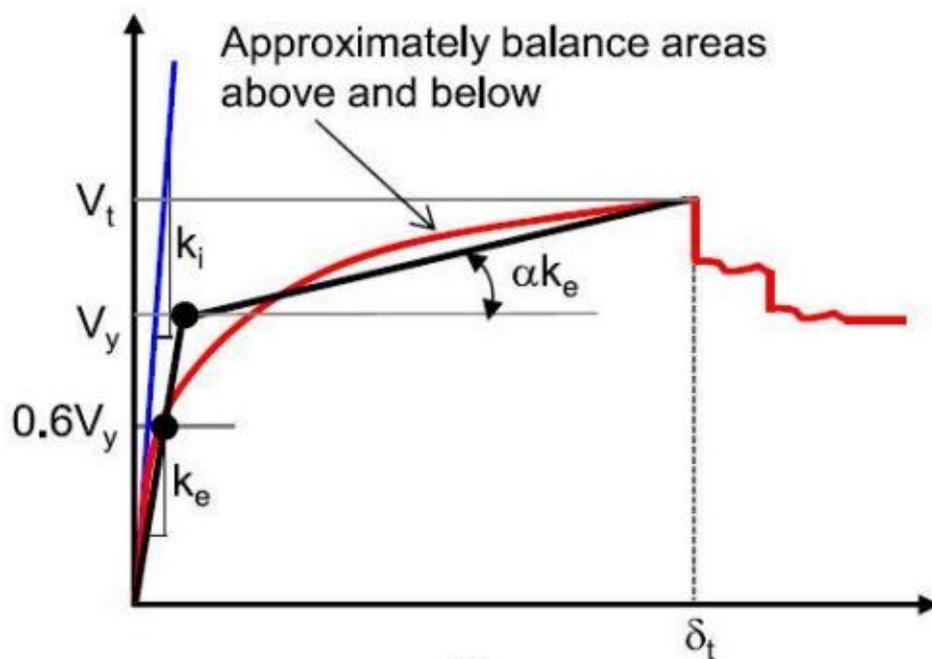


Figure 4.2 : Idéalisation selon le FEMA - 356 (14)

## Chapitre 4      EVALUATION DES COEFFICIENTS DE COMPORTEMENT ET DES LONGUEURS DE ROTULES PLASTIQUES

FEMA- 356 Recommande que la relation Force – déplacement doit être bilinéaire, avec une pente initiale élastique ( $K_e$ ) et une pente post-élastique( $\alpha$ ). Les segments de ligne de la courbe idéalisée doivent être fixés après un calcul graphique itératif de façon à ce que les surfaces au-dessus et au-dessous de la courbe réelle soient approximativement égales.

La rigidité latérale effective  $K_e$  doit être prise comme la rigidité sécante calculée à 60% de l'effort élastique effectif( $V_y$ ).

La pente post-élastique  $\alpha$  , doit être déterminée à travers un segment de ligne qui coupe la courbe réelle à un déplacement cible (14).

### 4.2.1      Le déplacement cible :

Le déplacement cible peut être défini comme le déplacement attendu de la structure lors d'un séisme. Le FEMA 356 exprime le déplacement cible comme suit :

$$\delta_t = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g \quad (4.1)$$

Avec :

$C_0$  : coefficient modificateur qui relie le déplacement d'un SSDDL équivalent au déplacement du système réel SPDDL. Les valeurs de  $C_0$  sont regroupées dans le tableau 4.1 ci-après :

Valeurs du coefficient $C_0$			
Nombre d'étages	Bâtiment de cisaillement		Autres bâtiments
	Chargement triangulaire	Chargement Uniform	Tout chargement
1	1.0	1.0	1.0
2	1.2	1.15	1.2
3	1.2	1.2	1.3
5	1.3	1.2	1.4
10+	1.3	1.2	1.5

**Tableau 4. 1 : Valeurs du coefficient  $C_0$  (14)**

$C_1$  : Est un facteur qui prend en compte la différence entre le déplacement inélastique et celui obtenu d'une analyse linéaire.

Les valeurs de  $C_1$  sont données par les équations citées ci-dessous :

## Chapitre 4 EVALUATION DES COEFFICIENTS DE COMPORTEMENT ET DES LONGUEURS DE ROTULES PLASTIQUES

$$C_1 = 1 \text{ Si } T_e \geq T_0 \quad (4.2)$$

$$C_1 = \left[ 1 + (R - 1) \frac{T_0}{T_e} \right] / R \quad (4.3)$$

$$\text{Si } T_e \leq T_0$$

Où :

$T_e$  : la période de vibration fondamentale effective de la structure. Elle est calculée par la formule suivante :

$$T_e = T_i \sqrt{\frac{K_i}{K_e}} \quad (4.4)$$

Avec :

$T_i$  : la période de vibration fondamentale de la structure.

$K_i$  : La rigidité initiale de la structure.

$K_e$  : La rigidité (pente) élastique de la structure.

$T_0$  : La période caractéristique du sol définie à la fin du palier du spectre de réponse.

$R$  : Un coefficient qui exprime le rapport de l'effort sismique sur l'effort élastique effectif.

Il est donné par la formule suivante :

$$R = \frac{S_a}{V_y/w} C_m \quad (4.5)$$

Avec :

$C_m$  : le coefficient des masses effectives. Les valeurs de  $C_m$  sont regroupées dans le tableau ci-après :

Valeurs du coefficient $C_m$							
Nombre d'étages	Portiques en B.A	Voiles en B.A	Spandrel de béton	Portique métallique	Portique métallique à contreventement centré	Portique métallique à contreventement excentré	autres
1-2	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
3 et plus	0.9	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	1.0

**Tableau 4. 2 : Valeurs du coefficient  $C_m$  (14)**

## Chapitre 4      EVALUATION DES COEFFICIENTS DE COMPORTEMENT ET DES LONGUEURS DE ROTULES PLASTIQUES

$V_y$  : L'effort élastique calculé à partir de l'idéalisation de la courbe PUSHOVER.

$w$  : Le poids sismique effectif. Il est calculé à partir de la formule suivante :

$$w = G + \beta Q \quad (4.6)$$

Où :

$G$  : Le poids propre de la structure.

$Q$  : Les surcharges d'exploitations.

$\beta$  : Coefficient de minoration des charges d'exploitations. Dans notre cas (bâtiment), il est pris égal à 0.2.

$C_2$ : Coefficient modificateur pour tenir compte de la dégradation de rigidité et de la résistance au déplacement maximum. Les valeurs de  $C_2$  sont regroupées dans le tableau suivant :

Valeurs du coefficient $C_2$				
Niveau de performance structurelle	$T \leq 0.1s$		$T \geq T_0$	
	Portiques type1	Portiques type2	Portiques type1	Portiques type2
Occupation immédiate	1.0	1.0	1.0	1.0
Sécurité des vies	1.3	1.0	1.1	1.0
Prévention contre la ruine	1.5	1.0	1.2	1.0

**Tableau 4. 3 : Valeurs du coefficient  $C_2$  (14)**

Avec :

Portique type1 : structures dont plus de 30% des efforts latéraux sont repris par une combinaison des systèmes suivants : portiques, portiques avec contreventement centré, portiques avec connections partiellement restreintes, contreventements, murs en maçonnerie, pierres.

Portique type2 : toutes les structures qui ne sont pas mentionnées dans portique type1. Pour des valeurs de période qui sont intermédiaires, les valeurs de  $C_2$  sont obtenues par une interpolation linéaire.

## Chapitre 4 EVALUATION DES COEFFICIENTS DE COMPORTEMENT ET DES LONGUEURS DE ROTULES PLASTIQUES

$C_3$  : Coefficient modificateur pour tenir compte de l'effet dynamique. Pour les structures qui ont une pente post-élastique positive, il est pris égal à 1. Pour celles qui ont une pente négative, il sera calculé selon la formule suivante :

$$C_3 = 1 + \frac{|\alpha|(R - 1)^{3/2}}{T_e} \quad (4.7)$$

$g$  : L'accélération de la pesanteur.

$S_a$  : Sollicitation sismique, obtenue à partir du spectre de réponse.

### 4.3 Les résultats obtenus pour le Voile non élancé SAFE T10:

La courbe force – déplacement calculée par une approche globale est présentée dans la figure 4.3

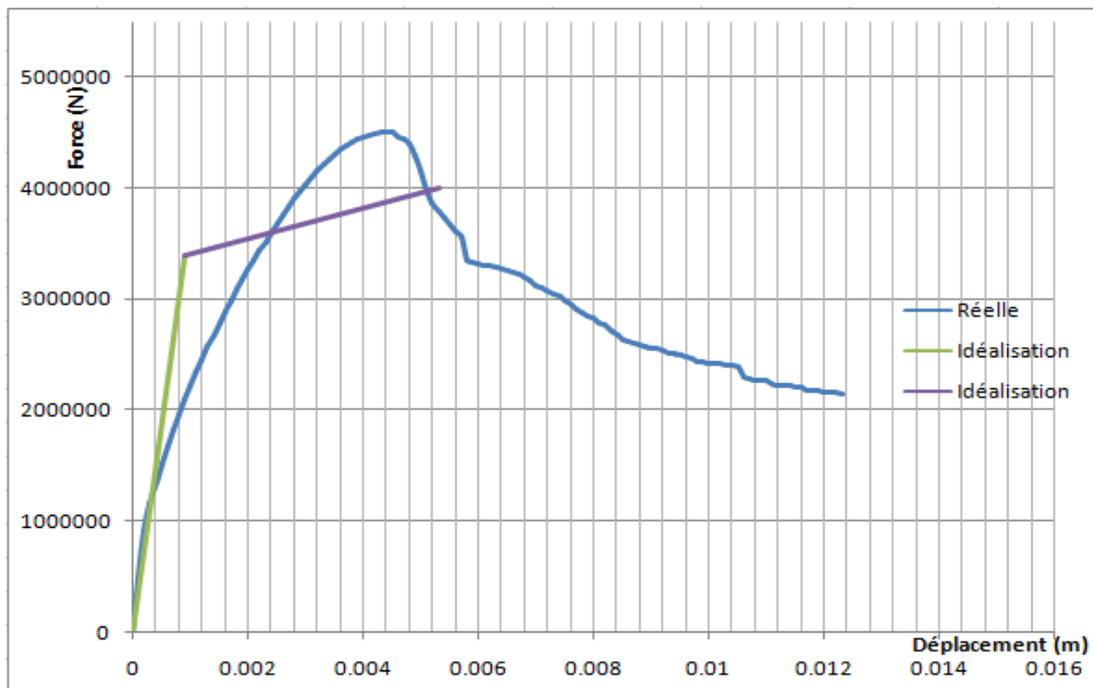


Figure 4. 3 : Courbe PUSHOVER pour le voile T10.

Après l'idéalisation de cette courbe, il est clair que le déplacement cible calculé par la formule est de l'ordre de 0,53cm. L'idéalisation nous a permis aussi de trouver que la partie plastique commence à partir d'un déplacement égal à 0,09cm. Les principaux

## Chapitre 4 EVALUATION DES COEFFICIENTS DE COMPORTEMENT ET DES LONGUEURS DE ROTULES PLASTIQUES

paramètres utilisés pour le calcul du coefficient de comportement sont regroupés dans le tableau 4.4:

paramètre	$\Delta_t(cm)$	$\Delta_e(cm)$	$K_i(N)$	$K_e(N)$	$T_e(S)$	$\mu$	$\alpha$	$V_u(N)$
Valeur	0.53	0.09	3.37E9	3.77E9	7.37E-2	5.8	0.036	3789140

**Tableau 4. 4 :** Paramètres utilisés pour le calcul du coefficient de comportement (voilesT10).

### Vérification de l'effort tranchant :

- **Voile T10**

On opte pour 2 nappes d'armatures en T10, avec  $e = 20cm$

on  $v_u = 4492 KN$

$$Mmax = v * hw \Rightarrow 4492 \times 1.2 = 5390.4 KN.m$$

On vérifie que :  $\emptyset v_n > v_u$

$$\text{avec } \emptyset = 0.75, \text{ et } v_n = Acv(\alpha_c \times 0.083\sqrt{f_{bc}} + \rho_n f_y) \quad (4.8)$$

$$Acv = lw \times a \Rightarrow (2.68 \times 0.2 + (0.16 \times 0.8 \times 2))$$

$$Acv = 0.792 m^2, Acv = 7920 cm^2$$

$$\alpha_c = \left(\frac{hw}{lw}\right) \quad (4.9)$$

$$\alpha_c = \left(\frac{1.2}{3}\right) \quad \alpha_c = 0.4 \leq 1.5$$

et donc  $\alpha_c = 3$

pour une distance de 100 cm :  $2 \times 25 T10 = 39.25cm^2$

$$\rho_n = \left(\frac{39.25}{300 \times 20}\right) \Rightarrow \rho_n = 6.54 \times 10^{-3}$$

$$f_{bc} = \frac{0.85 f_{c28}}{\gamma_b} \quad (4.10)$$

$$f_{bc} = \frac{0.85 \times 40}{1.5}$$

$$f_{bc} = 22.67 Mpa$$

$$\emptyset v_n = 0.75 \times 7920 \times 10^2 (3 \times 0.083 \times \sqrt{22.67} + 6.54 \times 10^{-3} \times 500) \times 10^{-3}$$

## Chapitre 4 EVALUATION DES COEFFICIENTS DE COMPORTEMENT ET DES LONGUEURS DE ROTULES PLASTIQUES

$$\phi v_n = 2599.65KN < 4492KN$$

et donc on a trouvé que  $\phi v_n < v_u$

D'après les calculs faits par les différentes méthodes qui sont déjà cités, le tableau ci-dessus nous montre les résultats obtenus pour un voile non élané.

### 4.3.1 Calcul du coefficient de comportement :

D'après les calculs faits par les différentes méthodes qui sont déjà citées, le tableau ci-dessus nous montre les résultats obtenus pour un voile non élané.

Méthode	$R_s$	$R_\mu$	$R$	$R_{moyen}$
Newmark et Hall	1.72	5.00	8.60	8.21
Giuffre et Giannini		4.32	7.43	
Fajfar et Vidić		5.00	8.60	

**Tableau 4.5 :** Valeurs du coefficient de comportement (voile T10).

### Commentaires

En analysant les résultats présentés dans le tableau 4.5, on observe que la valeur du facteur de sur-résistance  $R_s = 1.72$  est fixe, tandis que la valeur du facteur de ductilité varie entre 4.32 et 5.00. La multiplication entre ces facteurs donne des valeurs du coefficient de comportement avec une moyenne de  $R=8.21$ .

### 4.3.2 Comparaison avec les règlements :

Type du voile	Valeur du coefficient de comportement	Valeur donnée dans l'UBC-97	Différence par rapport à l'UBC-97 (%)	Valeur donnée dans le RPA (%)	Différence par rapport à l'RPA
Voile T10 (non élané)	8.21	4.5	45.19%	3.5	57.36%

**Tableau 4.6 :** Comparaison de coefficient de comportement de voile T10(SAFE) avec l'UBC et l'RPA

## Chapitre 4 EVALUATION DES COEFFICIENTS DE COMPORTEMENT ET DES LONGUEURS DE ROTULES PLASTIQUES

### Commentaire :

On remarque qu'il y'a une différence importante entre le coefficient de comportement de la réglementation et le R calculé par la méthode FEMA 356

### 4.3.3 Méthode d'Estimation des longueurs de rotules plastiques

Lorsque des déformations inélastiques surviennent dans les structures en béton armé, ces déformations sont localisées sur une longueur déterminée définie comme la rotule plastique. Ils sont généralement dimensionnés de manière à contenir la zone de rotule plastique à la base des murs. Par ailleurs, la rotule plastique représente la zone où les états limites seront observés et où l'endommagement sera le plus sévère

#### 4.3.3.1 Les valeurs analytiques de la longueur plastique pour le voile non élancé :

Selon les formules déjà exprimées dans le chapitre précédent, le tableau ci-dessus nous montre les résultats obtenus pour le voile T10 (SAFE).

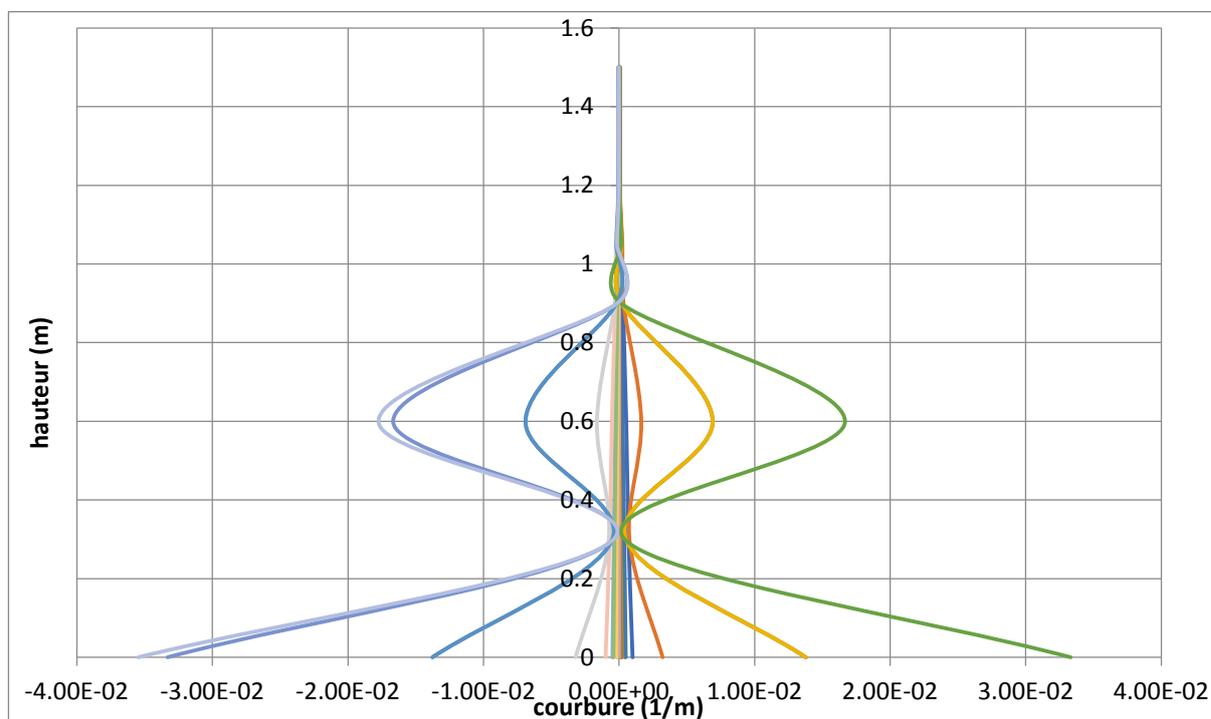
Référence des chercheurs	Equation	Lp(m)
Mattock (1967) et Priestley et al. (1996)	(2.22)	0.206
	(2.23)	0.684
Thomsen and Wallace [2004]	(2.25)	0.990
Euro-code 8 (2005)	(2.26)	0.726
Priestley et al. (2007)	(2.27)	0.445
Bohl et Adebar (2011)	(2.29)	0.659
Kazaz [2013]	(2.30)	0.504
Wibowo et al. [2013]	(2.31)	0.150
Altheeb et al. [2015]	(2.33)	0.246

**Tableau 4. 7 :** résultat de la longueur plastique pour le voile non élancé

### 4.3.4 Moment courbure :

Numériquement, on peut estimer la longueur de rotules plastique en traçant l'évolution de la courbe (Moment-Courbure), elle renseigne sur l'évolution des rotations (courbures) le long de la hauteur du mur. La figure suivante donne une indication sur la répartition des courbures sur la hauteur du mur.

## Chapitre 4 EVALUATION DES COEFFICIENTS DE COMPORTEMENT ET DES LONGUEURS DE ROTULES PLASTIQUES



**Figure 4. 4 :** Répartition des courbures en fonction de la hauteur (sollicitée en cisaillement pure).

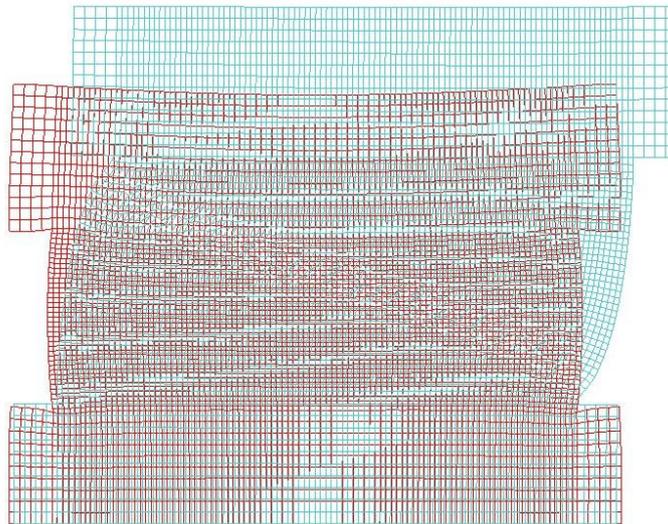
D'après la courbe dans la figure 4.4 on remarque que la rotule plastique numérique du voile T10 égale à 0.3(m), et donc c'est une valeur logique est comparable avec celle du calcul analytique qui est déjà exprimé dans le tableau 4.6.

Le problème des murs en cisaillement c'est qu'ils sont dominés par des modes rigides de cisaillement. La figure suivante montre les réponses d'un mur soumis au cisaillement et ou la flexion n'est pas dominante. Ceci complique le calcul des longueurs de rotule plastiques, car la dissipation par rotule plastique suppose l'existence d'un mode de flexion (ou de flexion cisaillement)

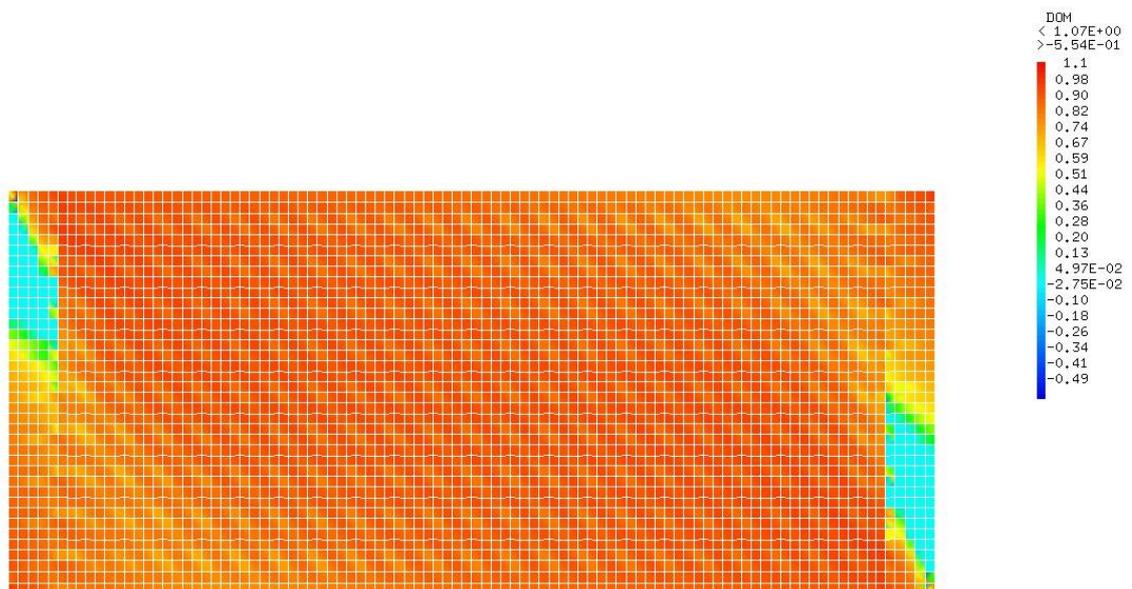
On peut aussi appuyer cette constatation en traçant les cartes de fissuration et d'endommagement. Les figures suivantes montrent clairement que la rupture d'un mur voile non élancé est dominée par un mode de cisaillement.

## Chapitre 4 EVALUATION DES COEFFICIENTS DE COMPORTEMENT ET DES LONGUEURS DE ROTULES PLASTIQUES

---



**Figure 4.5 :** déformé initiale et finale du voile T10 (SAFE)

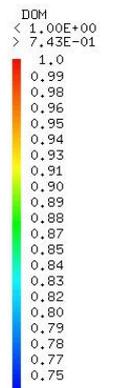
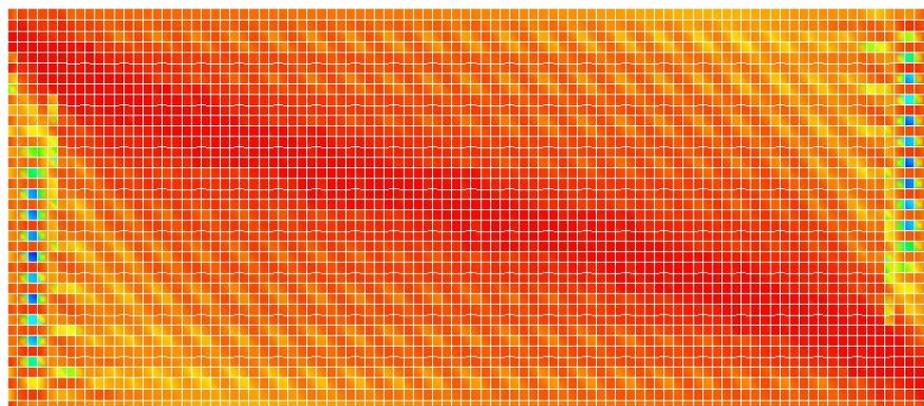


(a)

## Chapitre 4 EVALUATION DES COEFFICIENTS DE COMPORTEMENT ET DES LONGUEURS DE ROTULES PLASTIQUES



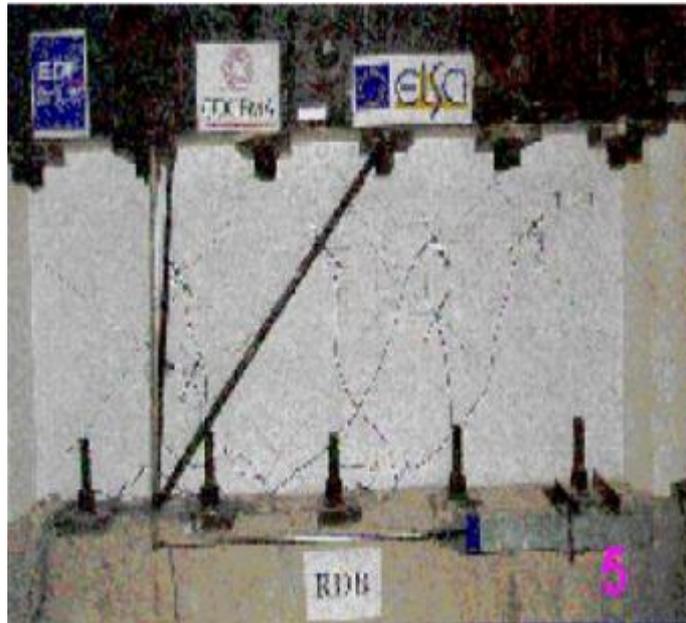
(b)



(c)

## Chapitre 4 EVALUATION DES COEFFICIENTS DE COMPORTEMENT ET DES LONGUEURS DE ROTULES PLASTIQUES

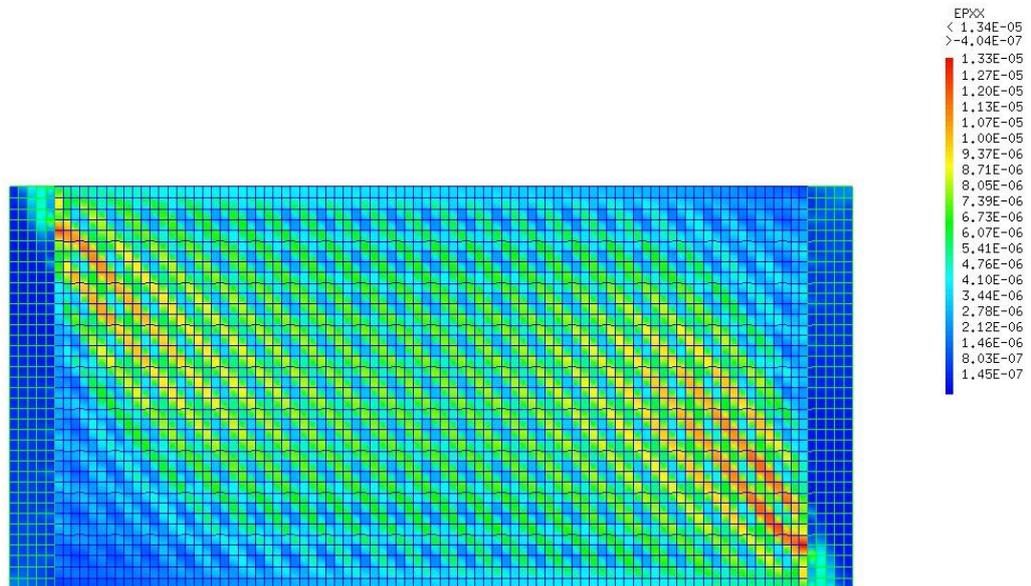
---



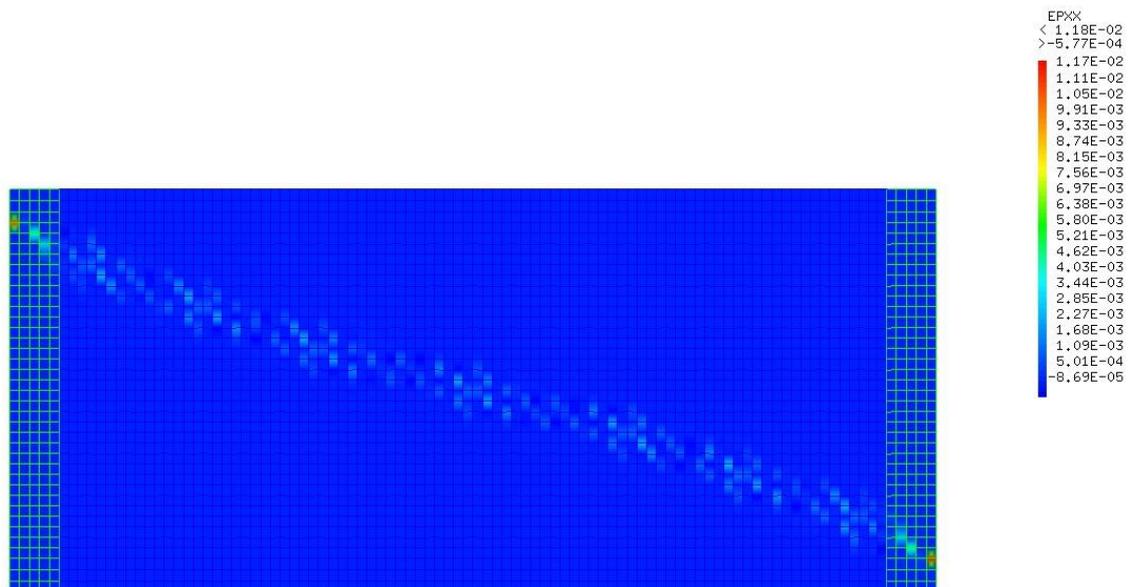
(d)

**Figure 4. 6 :** évolution d'endommagement pour différent cycle T10 et comparaison avec l'expérimental. **(a)** La carte d'endommagement pour un déplacement élastique  $\Delta_e$  de 0.9 mm, **(b)** évolution des ouvertures de fissures d'un voile T10 expérimentalement, **(c)** La carte d'endommagement pour un déplacement cible  $\Delta_t$  de 5.3 mm, **(d)** évolutions des ouvertures des fissures du voileT10 (SAFE) expérimentalement.

## Chapitre 4 EVALUATION DES COEFFICIENTS DE COMPORTEMENT ET DES LONGUEURS DE ROTULES PLASTIQUES



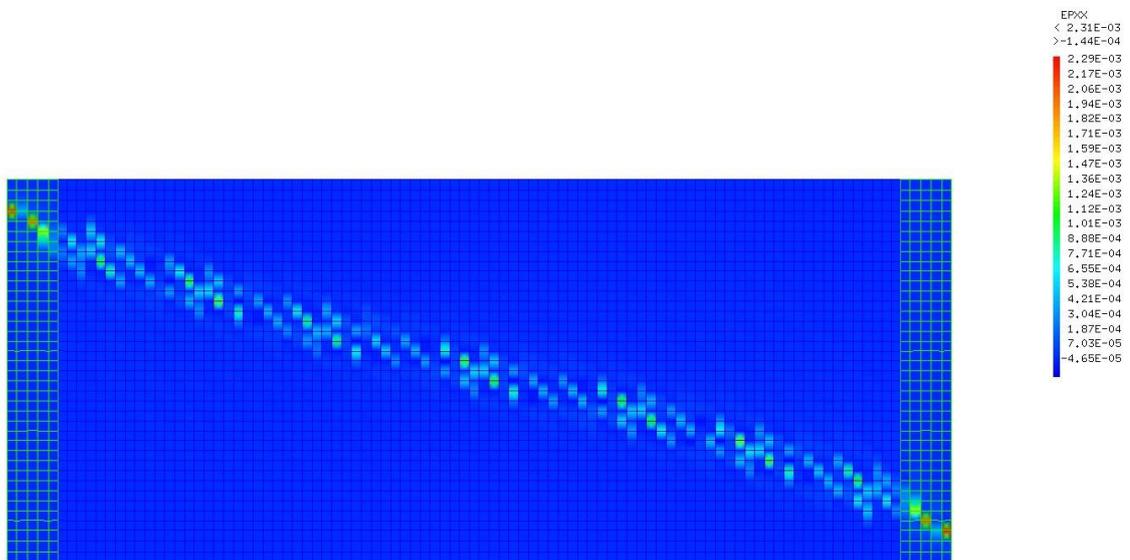
**Figure 4. 7 :** La carte de l'ouverture de fissures pour un déplacement élastique de 0.9 mm.



**Figure 4. 8 :** La carte de l'ouverture de fissures pour un déplacement cible de 5.3 mm.

## Chapitre 4 EVALUATION DES COEFFICIENTS DE COMPORTEMENT ET DES LONGUEURS DE ROTULES PLASTIQUES

---



**Figure 4. 9 :** La carte de l'ouverture de fissures pour un déplacement de 5.7 mm.

#### 4.4 Résultat pour le mur élané BC80

La bi-linéarisation de la courbe PUSHOVER, nous a permis de tirer les paramètres regroupés dans le tableau 4.6 qui contient aussi les paramètres tirés à partir de la méthode spectrale :

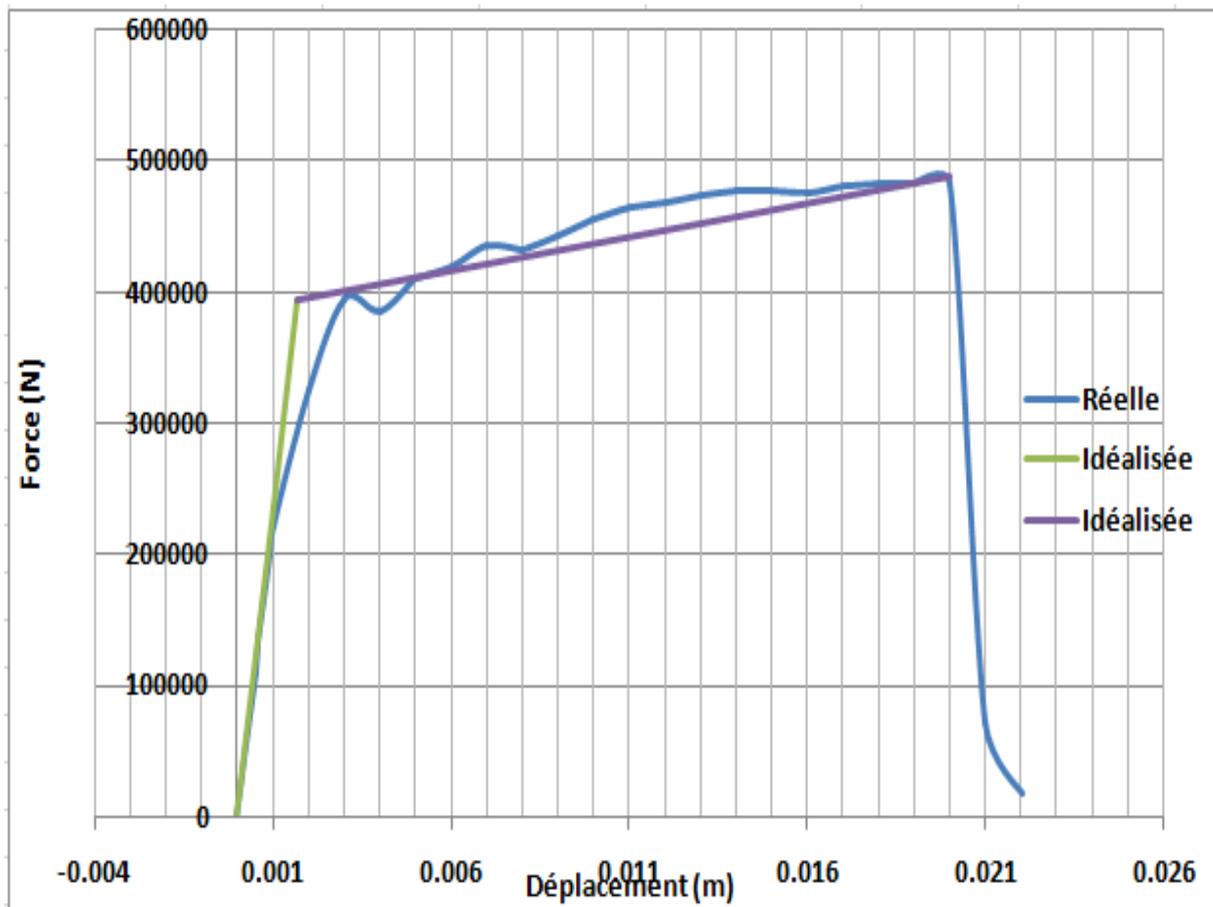


Figure 4. 10 : Courbe PUSHOVER pour le voile BC80.

Paramètre	$\Delta_t(cm)$	$\Delta_e(cm)$	$K_i(N)$	$K_e(N)$	$T_e(S)$	$\mu$	$\alpha$	$V_u(N)$
Valeur	0.2	0.016	2.22E+08	2.36E+08	7.08E- 2	12.5	0.022	489200

Tableau 4. 8 : Paramètres utilisés pour le calcul du coefficient de comportement (voilesBC80).

## Chapitre 4 EVALUATION DES COEFFICIENTS DE COMPORTEMENT ET DES LONGUEURS DE ROTULES PLASTIQUES

- **Vérification de l'effort tranchant :**

- **Voile BC80**

Selon la même méthode de calcul

$$\phi v_n = 398.93KN < 420KN \text{ , et donc on a trouvé que } \phi v_n < v_u$$

### 4.4.1 Calcul du coefficient de comportement :

D'après les calculs faits par les différentes méthodes qui sont déjà citées, le tableau ci-dessus nous montre les résultats obtenus pour un voile élancé.

Méthode	$R_s$	$R_\mu$	$R$	$R_{moyen}$
Newmark et Hall	<b>1.2</b>	<b>12.5</b>	<b>15</b>	<b>13.7</b>
Giuffre et Giannini		<b>9.29</b>	<b>11.148</b>	
Fajfar et Vidiç		<b>12.5</b>	<b>15</b>	

**Tableau 4. 9 :** Valeurs du coefficient de comportement (voile BC80).

#### Commentaires

En analysant les résultats présentés dans le tableau 4.9, on observe que la valeur du facteur de sur-résistance  $R_s = 1.2$  est fixe tandis que la valeur du facteur de ductilité varie entre 9.29 et 12.5. La multiplication entre ces facteurs donne des valeurs du coefficient de comportement avec une moyenne de  $R=13.7$ .

### 4.4.2 Comparaison avec les règlements :

Type du voile	Valeur du coefficient de comportement	Valeur donnée dans l'UBC-97	Différence par rapport à l'UBC-97 (%)	Valeur donnée dans le RPA (%)	Différence par rapport à l'RPA
Voile BC80 (élancé)	13.7	4.5	67.15%	3.5	74.45%

**Tableau 4. 10 :** Comparaison des coefficients de comportement de voile BC80 avec l'UBC et l'RPA

## Chapitre 4 EVALUATION DES COEFFICIENTS DE COMPORTEMENT ET DES LONGUEURS DE ROTULES PLASTIQUES

---

### Commentaire :

On remarque qu'il y'a une différence de 67.15% et 74.45% entre le coefficient de comportement de la réglementation (UBC-97 & RPA) respectivement, et le R calculé par la méthode FEMA 356

### 4.4.3 Les valeurs analytiques de la longueur plastique pour le voile BC80

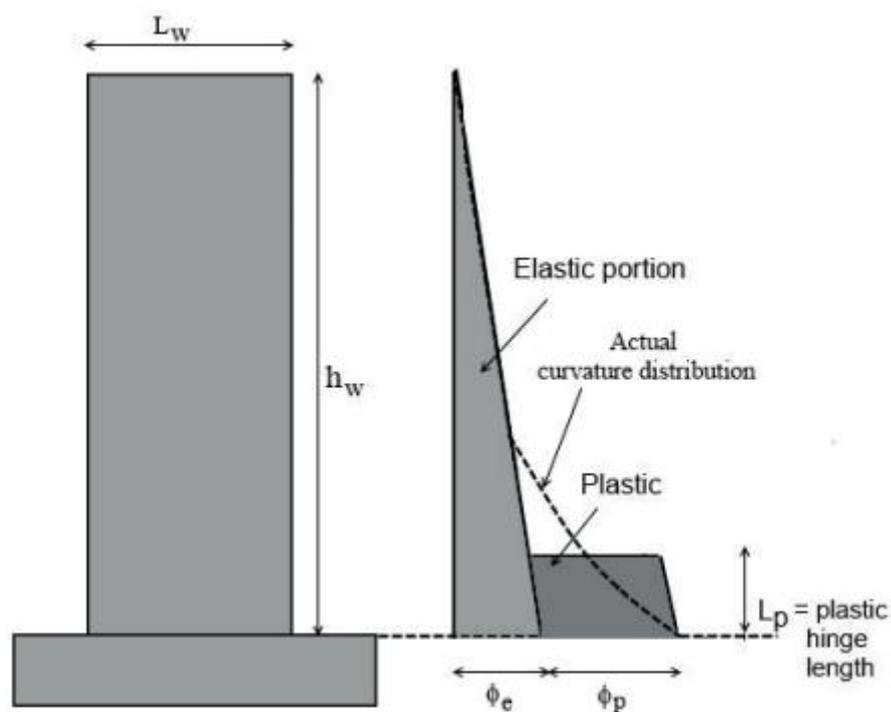
Le tableau ci-après donne les valeurs des longueurs des rotules plastiques obtenues par les différentes formules réglementaires.

Référence des chercheurs	Equation	Lp(m)
Mattock (1967) et Priestley et al. (1996)	(2.22)	0.275
	(2.23)	0.546
Thomsen and Wallace [2004]	(2.25)	0.577
Euro-code 8 (2005)	(2.26)	0.476
Priestley et al. (2007)	(2.27)	0.523
Bohl et Adebar (2011)	(2.29)	0.486
Kazaz [2013]	(2.30)	0.572
Wibowo et al. [2013]	(2.31)	0.09
Altheeb et al. [2015]	(2.33)	0.455

**Tableau 4. 11 :** résultat de la longueur plastique pour le voile élancé

Pour l'estimation de la longueur de rotule plastique à partir des résultats de modélisation. On se base sur les cartes de fissuration et d'endommagement. La figure suivante montre une schématisation de cette procédure.

## Chapitre 4 EVALUATION DES COEFFICIENTS DE COMPORTEMENT ET DES LONGUEURS DE ROTULES PLASTIQUES



**Figure 4. 11 :** Distribution de courbure et de déformation le long de la hauteur du mur (47)

En traçant les cartes de fissuration de l'endommagement de fissuration du mur élancé. On eut s'aperçoit que pour les murs élancés, la flexion est dominante (contrairement aux murs non élancés). En évaluant la hauteur approximative des fissures de flexion, on peut avoir une estimation de l'ordre de  $L_p=1.14$  m.

Cette valeur est très supérieure à celles indiquées dans la réglementation. Néanmoins, si on se restreint aux deux fissures de flexion traversantes, on obtient une longueur de rotule plastique de l'ordre de 0.5m comparable à celle obtenue par la réglementation.

Chapitre 4 EVALUATION DES COEFFICIENTS DE  
COMPORTEMENT ET DES LONGUEURS DE ROTULES PLASTIQUES

---

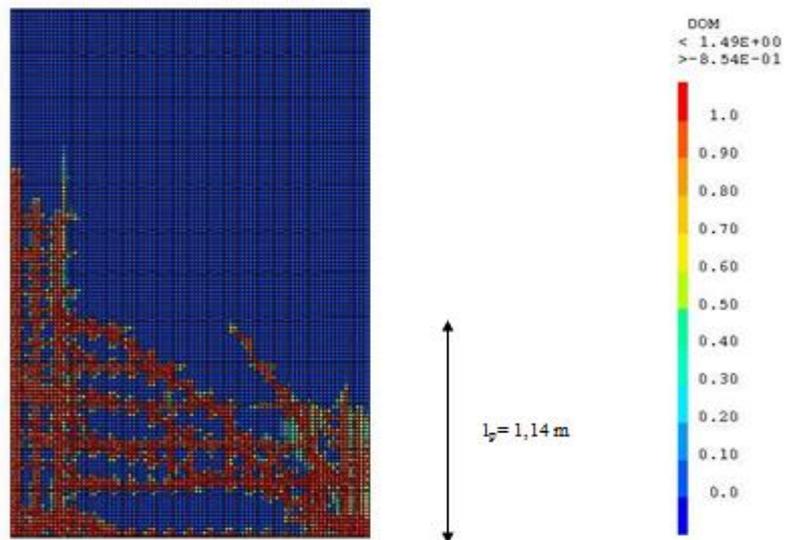


Figure 4.12 : La carte d'endommagement pour un voile élancé

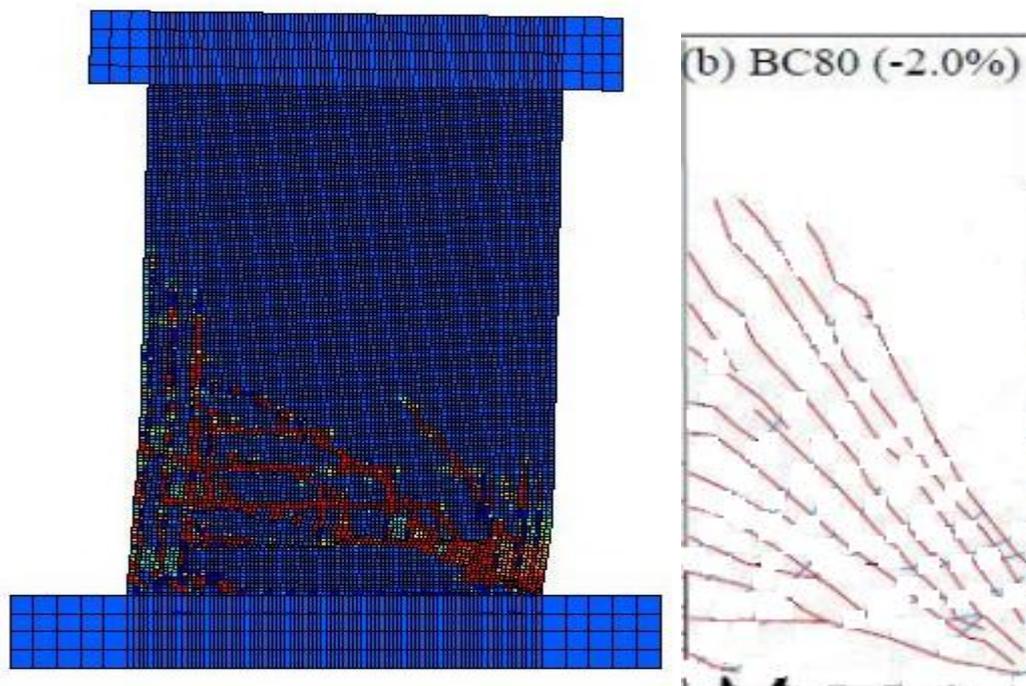


Figure 4.13 : évolution d'ouverture de fissure pour un voile élancé et comparaison avec l'expérimental (47).

## **Chapitre 4      EVALUATION DES COEFFICIENTS DE COMPORTEMENT ET DES LONGUEURS DE ROTULES PLASTIQUES**

---

### **4.5 Conclusions :**

Dans ce chapitre, nous avons évalué plusieurs résultats pour les deux voiles en béton armé, par une approche macroscopique.

Dans un premier temps en se basent surtout sur des analyses PUSHOVER, une évaluation des coefficients de comportements  $R$  a été proposée avec une comparaison avec la réglementation (RPA & UBC80). Puis, un calcul des rotules plastiques a été réalisé numériquement et comparé avec le calcul analytique.

Les résultats montrent que pour les voiles non élancés, la flexion n'est pas dominante et les méthodes de calcul des coefficients de comportement et de rotules plastiques ne sont pas vraiment applicables. Pour les voiles élancés, des fissures de flexion cohabitent avec des fissures de cisaillement et les résultats de calcul sont exploitables.

# Conclusion générale

Cette recherche comportait trois buts principaux :

- ✓ La mise en œuvre des modèles, leur confrontation et leur validation sur une typologie structurelle assez variée.
- ✓ La discussion détaillée des résultats expérimentaux et numériques et la mise en relief des divers facteurs influencent le mode de comportement des voiles étudiés.
- ✓ l'exploitation de la richesse de la modélisation à l'échelle locale pour l'évaluation des coefficients de comportement et des longueurs de rotules plastiques nécessaires pour un dimensionnement sismique.

Les principales conclusions tirées à la fin de ce travail sont les suivantes :

- En comparant les résultats obtenus avec ceux trouvés précédemment expérimentalement, il est clair que l'approche modélisation macroscopique constitue un outil puissant pour la prédiction des courbes de capacités des voiles en BA.
- Les valeurs du coefficient de comportement pour les deux voiles T10 SAFE et BC 80 sont plus au moins supérieures à celle de réglementation.
- Les résultats expérimentaux des longueurs des rotules plastiques trouvées sont comparables avec les résultats analytiques pour les voiles élancés.
- Pour les voiles non élancés soumis au cisaillement, la flexion n'est pas dominante. Ainsi les méthodes d'évaluation de coefficients de comportement et des rotules plastiques ne sont pas directement applicables.

Ainsi, pour les travaux futurs, d'autres simulations sont à réaliser principalement pour les voiles non élancés. Ce type de voiles ont un comportement fragile qui est dangereux pour une conception en béton armé. Leurs comportement doit être évalué finement pour pouvoir statuer sur leur capacité dissipative.



# Bibliographie

1. **ZACEK, M.** constructions et vulnérabilité des batiments existants,. *Risque sismique*,. publier dans L'ENSA Marseille, architecture,ingénieur : s.n., le 21 octobre 2008.
2. **Nicolae, I.** *Construbution à la compréhension du fonctionnement des voiles en béton armé sous sollicitation sismique*. France : l'institut national des sciences , 2000.
3. **ZEBECHI, R.** *Etude comparative d'une structure en béton armé dans le domaine non linéaire au moyen d'un modèle en fibres et un autre en rotules plastiques*. boumerdes : s.n., 2013.
4. Eurocode 8:Règles générales,actions sismique et règles pour les batiments. *Calcul des structures pour leur résistances aux séismes* .
5. Norme française dites règles PS-92. *Règles de construction parasismique*.
6. **Nguyen, X.H.** Vulnérabilité des structures en béton armé à voiles porteurs:Expérimentation et modélisation. *Thèse de doctorat*. France, Institutie national polytechnique de Grenoble : s.n., 2006. p. 186.
7. **Tadjiti, A.** Évaluation des coefficients de comportement des structures par une approche semi-globale. *Mémoire pour l'obtention du diplome de master en génie civil, ingénierie des structures*. 2017.
8. **Desprez, C.** Analyse et réduction de la vulnérabilité sismique des structures existantes:Renforcement par collage de tissus de fibres de carbone (TFC). *Thèse de ctorat*. france, Institut national polytechnique de Grenoble-INPG : s.n., 2010. p. 161.
9. **Zirar A., Taïbi A.** Évaluation l'endommagement /fissuration des voiles en béton armé sous chargement:Comparaison avec les règlements internationaux . *Mémoir pour l'obtention du diplome de master ,Option:ingénierie des structures* . 2017.
10. WANADO87,10 chapitre ferrailages des voiles. *Category:Shear stress,bending,civil engineering, applied and interdisciplinary physics,contium mechanics*. 28 09 2017.
11. **Belazouz, L.** Influence de la disposition des voiles sur le comportement dynamique des structures. *Mémoire de magister*. Université Mouloud Mammeri Tizi-ouzou, génie civil ,option: structure et matériaux : s.n., 2016.
12. **Pais, G.** Béton armé. *Chapitre 18:Murs et voiles de contreventements*. 2013. (Code CCV109).

13. Applied technology council ATC.40. *Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings*. 1996.
14. FEMA356:Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings federal emergency management agency. novembre 2000.
15. **Boubegtiten L., Bouziane.** Modélisation non linéaire et evaluation de la capacité sismique des voiles. 2014. p. 49.
16. **Kbaili, B et Redjel ,B.** Etude critique des règles parasismiques Algériennes RPA99. Annaba , université badji mokhetar, département de genie civil : s.n., 2009.
17. **Mekki, M.** Approche probabiliste dans la détermination des courbes de vulnérabilité des structures en genie civil. *publier dans l'école doctorale*. 2015.
18. **Ferraioli, M et al.** Behaviour factor for seismic design of moment-resisting steel frames. 2012.
19. **Freeman, S.A.** On the correlation of code forces to earthquake demands.proc. Japan, Applied technology council,Redwood city, Calif : s.n., 1990.
20. Applied technology council(ATC). *A critical review of current approaches to earthquake-resistant design*. Calif : s.n., 1995. ATC-34.
21. **Boutaoutaou, E et al.** The new formulation of the behavior factor's "theoretical-regulatory Aspect". *Université de Mentouri,Laboratoire de mécanique des sols et des structures*. constantine, génie civil, Algérie : s.n., 2014.
22. **Branci, T et Bourada,S.** Accounting for ductility and overstrength in seismic design of reinforced concrete structures. Chlef,hai es-salam, civil engineering and architectural , University hassiba benbouali : s.n., 2014.
23. **Stephanos, E.** Seismic design of new R.C. *Structures,Publier dans l'université de Patras,Greece*. 2015.
24. **Louzai, A.** Évaluation du facteur de comportement des structures en portique en béton armé sur la base d'analyse statique et dynamique non-linéaires. *Thèse en vue de l'obtention du doctorat en génie civil*. Tiziouzou, génie civil, Algérie : s.n., 2016. p. 118.
25. **Kassoul, A et al.** Aspect qualitatifs de la ductilité dans les constructions en béton armé. Chlef, Génie civil, Alger : s.n., 2001. p. 01.
26. **Belhamdi, N.** Etude de la réponse sismique non linéaire et de l'évaluation du coefficient de comportement global des structures. *Publiée dans l'université A.MIRA de Bejaia*. 2009.

27. **Mouzzoun, M et al.** Évaluation du facteur de comportement pour le calcul parasismique des batiments en béton armé. *Publiée dans école Mouhammedia d'ingénieurs*. Rabat, génie civil, Maroc : s.n., 2012.
28. **Cheikh, B et Hadid.** Evaluation des demandes sismique des structures en béton armé par l'approche en ductilité de la méthode du spectre de capacité. *publiée dans école national supérieur des travaux publics ENSTP*. Alger : s.n., 2009.
29. **Ho Jung, L et Kuchma.** Seismic Overstrength of shear wals in Parking Structures with flexible Diaphragms. *Publiée dans le journal of Earthquake Engeneering*. 2007. Vol. 11, p. 9.
30. **al, S.H Song et.** Redudancy of dual systems under earthquake loads. *University of Illinois ,URBANA,*. 2000. IL 61801.
31. **Ghosh, S.K.** Redundancy cofficient. 2014.
32. **Djebbar, N.** Contribution à l'étude de la performance parasismique des éléments linéaires en béton. *Thèse pour l'obtention du doctorat en génie civil*. Constantine, Université de constantine , Algérie : s.n. p. 238.
33. **Samantha, K.A.** Study of the seismic response modification factor for log shear walls. *A thesis of submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree*. Kansas, Département of architectural engineering and construction science college of engineering KANSAS STATE UNIVERSITY Manhattan : s.n., 2010. p. 42.
34. Règlement parasismique algérie (RPA99,Version 2003). *Centre nationale de la recherche appliquée en génie parasismique,Algérie*.
35. Règlementation parasismique au Maroc,RPS(2011).
36. **Ofelia Maroni, M.** Concrete shear walls construction. Santiago, University of Chile, Chile : s.n.
37. Uniform nbuilding code (UBC 1997).
38. **Jalil, W.** Earthquake engineering .Tenth world conference balkema rotterdam. *New frensh seismic code orientations,SOCOTEC*. Paris, France : s.n., 1992. ISBN 90 5410 060 5.
39. **Carvalho, E.** Determination de la longueur de la rotule plastique dans des poteaux confines avec des PRFC. *Publiée dans l'université de Sherbrooke*. 2012. p. 25.
40. **Donald, A et Svetlana.** Seismic design guide for masonry building,CCMPA:Canadian concrete masonry producers association. 2009. p. 91.
41. Analytical investigation ,Chapter 4,Anna University,Chennai. p. 05. 600 025.

42. **Parulekarl, Y.M et al.** Evaluation of strength and drift of RCC shear walls using nonlinear analysis,1:Reactor safety division,Bhabha atomic research centre,Mumbai,India-400085,2:Structural engineering research centre,Chennai,India-600113. 2011. p. 04.
43. **Hoult, R et al.** Plastic hinge length for lightly reinforced rectangular concrete walls. *disponible sur <http://www.tandfonline.com/loi/ueqe20>*. [En ligne] 10 may 2017. ISSN:1363-2469,p9.
44. **Etienne, G.** Fissuration des voiles courts en béton armé soumis à des sollicitations sismique -Évaluation des ouvertures de fissures :Contribution à l'amélioration des connaissances ,des données expérimentales aux pratique d'ingénierie. *Pour obtenir le grade de docteur , Ecole doctorale:MEGA*. 2008.
45. **Medjahed, A.** Approche semi-globale 3D pour le calcul des structures en béton armé. *Mémoire pour l'obtention du diplôme de magistère option:Seismic risk & Earthquake engineering*. 2012.
46. **Pegon, P et al.** Programme SAFE : Rapport du teste T10,Unité mécanique des structures ,Intstiut des systèmes de l'informatique et de la sécurité. 21020 Ispra (Varese).
47. **Taleb, R et all.** Numerical study on the Ultimate deformation of RC structural walls with confined boundary regions,Periodica polytechnica civil engineering. <https://doi.org/10.3311/PPci.10554>,. [En ligne] 05 may 2017. pp.191-199,2018.
48. **Pegon, P et al.** "Programme SAFE" .Rapport du teste T5.JRC.
49. **Fichant, S.** Endommagement et anisotropie induite du béton des structures . *Modélisation approchées*. 1996.
50. **Badla, W.** Analyse pushover des portique en B.A Etude comparative. *Publiée dans l'université Mohamed Kheider-Biskra*. 2011.