

République Algérienne Démocratique et Populaire



Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL
N° :



DOMAINE : SCIENCES ET
TECHNOLOGIES
FILIERE : GENIE CIVIL
OPTION : STRUCTURES

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par:

BELHOCINE SOUNDOUS
KHARKHACHE CHAHINEZ

Intitulé :

**Etude de la ductilité sismique des structures en
béton armé
-Application aux structures à portique et mixte-**

Encadré par :

Dr. MENASRI YUCEF

Année universitaire : 2022 /2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

REMERCIEMENT

Tout d'abord, nous remercions Dieu, le Tout puissant, de nous avoir donné la volonté, le courage, la santé et la patience afin d'arriver à la finalité de ce modeste travail.

Nous remercions nos parents qui nous ont soutenus beaucoup pendant toute la vie et qui continueront à nous aider dans tous les projets de l'avenir. Ainsi que tous les membres de nos familles qui ont participé de près ou de loin à nous encourager et nous aider dans notre vie.

Nous remercions très sincèrement notre encadreur Dr. MENASRI Youcef nous encadrer et diriger au cours de nos projet de fin d'étude.

Notre pensée va à tous les enseignants qui ont contribués à notre formation de Génie Civil.

Nos remerciements vont également aux membres du jury pour avoir accepté d'évaluer notre modeste travail.

Soundous et Chahinez



اهداء

قال الله تعالى: (قل اعملوا فسيرى الله عملكم ورسوله و المؤمنون)

- صدق الله العظيم -

الهي لا يطيب الليل الا بشرك ولا يطيب النهار الا بطاعتك و لا تطيب اللحظات

الا بذكرك و لا تطيب الاخرة الا بعفوك و لا تطيب الجنة الا برويتك

الله جل جلاله

الى من بلغ الرسالة و ادى الامانة و نصح الامة الى نبي الرحمة و نور العالمين

سيدنا محمد صلى الله عليه و سلم

الى صاحب السيرة العطرة و الفكر المستنير فلقد كان له الفضل الاول في بلوغي التعليم العالي

والذي الحبيب اطال الله في عمره

الى من افضلها عن نفسي التي ضحت من اجلي و حملتني في رحمها تسعة اشهر و راعتني حتى صرت

كبيرة الى من وضع المولى عز و جل الجنة تحت قدميها

امي الحبيبة اطال الله في عمرها

الى اخواتي اللواتي سرت معهن في دروب الحياة بطلوها و مرها

الى عائلتي حيث ايقنت ان العائلة هي هدوء القلب

الى احبائي و صديقاتي البعيدين عن العين القريبين بالروح و القلب

الى صديقات الدرب و رفيقات الروح اللواتي عشت معهن اجمل فترات عمري

بتوفيق من الله لم يبق سوى خطوات قليلة لإنهاء مسيرتي الدراسية شكرا لكل من

مد لي يد العون

اللهم اجعلني ممن علمتهم فاستخلفتهم و اصلحت بهذا العلم اعمالهم و قلوبهم

اللهم انفعني بما علمتني و زدني علما



اهداء

الى الايادي الطاهرة التي ازلت من طريقي اشواك الفشل

الى من ساندني بكل حب عند ضعفي ...

الى من رسموا لي المستقبل بخطوط من الحب والثقة وامنوا بي حتى

النهاية..

اليكم عائلتي ...

الى من كلل العرق جبينه و علمني ان النجاح لا يأتي الا بالصبر والإصرار الى مدرستي في الحياة ابي

والى تلك العظيمة التي لطالما تمننت ان تقر عينها بأول خريجة لها امي

الى اخوتي الذين كانوا الملجأ في لحظات الضعف

الى اول من انتظر هذه اللحظات ليفتخر بي الى سندي وشريكي في الحياة زوجي

والى كل من كانوا داعمين لي بالأوقات الصعبة صديقاتي رفيقات الدرب كل باسمها

الى عائلتي الثانية اهل زوجي

اللهم اجعلني ممن علمتهم فاستخلفتهم واصلحت بهذا العلم اعمالهم وقلوبهم اللهم انفعني بما علمتني

وزدني علما

وأخيرا النهاية

Soundous



RESUME

La ductilité est un facteur important pour les structures en béton armé soumissent aux efforts horizontales comme les séismes et son importance est dissiper les forces sismiques.

Dans ce travail on a étudié la ductilité des structures en béton armé et comparer entre la ductilité de structure portiques (auto stable) et structure mixtes (portique + voile).

Et à été utilisé la méthode statique non linéaire (Pushover), la méthode utilisée dans logicielle SAP 2000/ version 16 qui fonctionne dans la méthode d'éléments finis .

ملخص

المطاوعة عامل مهم لمنشآت الخرسانة المسلحة التي تتعرض لقوى افقية كالزلازل و تكمن أهميتها في امتصاص و تبديد القوى الزلزالية القوية.

وقد قمنا في هذا العمل بدراسة المطاوعة ومقارنتها بين منشأة اطارية من الخرسانة المسلحة و أخرى مختلط (اطارية + جدران القص). وقد استعملنا في ذلك طريقة التحليل الستاتيكي اللاخطي بواسطة برنامج التحليل SAP2000/ V16 الذي يعمل بطريقة العناصر المحددة

Abstract

Ductility is an important factor, for reinforced concrete structures that are effected by horizontal forces such as Earthquakes and its importance to absorb and dispersal seismic forces.

In this work, the ductility of reinforced concrete structures is studied and a comparison between the ductility of portico structures and mixed structures (portico+sail). And was used the nonlinear static method (Pushover) software SAP 2000/V16 which works in a finite element method .

Table de matières

Remerciement

1اهداء

2اهداء

Liste des tableaux

Listes des figures

Notations et symboles

Résumé

ملخص

Abstrad

Introduction générale

Chapitre I : Notions sur la ductilité

I.1 Introduction.....	1
I.2 Notions de base sur la ductilité.....	1
I.3 Relation déformabilité – ductilité.....	2
I.4 Types de la ductilité.....	4
I.4.1 Ductilité de déformation.....	4
I.4.2 Ductilité de courbure.....	5
I.4.3 Ductilité de déplacement.....	6
I.5 Ductilité vis-à-vis chargement statique.....	7
I.6 Ductilité en chargement dynamique alterné.....	8
I.7 Ductilité des matériaux.....	9
I.7.1 Acier.....	9
I.7.2 Béton.....	10
I.8 Comparaison entre la ductilité du béton et de l'acier	11
I.9 Conclusion.....	11

Chapitre II : comportement des structures (portique et mixte) vis-à-vis du séisme

II.1 Introduction.....	12
II.2 Généralités sur les séismes.....	12
II.2.1 Notion des séismes.....	12
II.2.2 Cause des séismes.....	13
II.2.3 L'enregistrement des séismes.....	13
II.2.3.1 Les sismographes.....	14
II.2.3.2 Le sismogramme.....	15
II.2.4 Classification des séismes	15
II.2.5 Zones sismique en Algérie.....	16
II.2.7 Définition du risque sismique.....	17
II.3 Les Structures en béton armé.....	18
II.4 Différents type de structures en béton armé.....	18
II.4.1 Structures auto stables.....	18
II.4.1.1 Structure en portique auto stable (poteau + poutre).....	18
II.4.1.2 Structure mixte (portique +voile)	20
II.5 Comportement des structures durant les séismes.....	21
II.6 Comportement linéaire et non-linéaire.....	22
II.7 Comportement non-linéaire.....	25
II.7.1 Mécanismes plastiques.....	25
II.7.2 Rotule plastique.....	25
II.8 Comportement des structures.....	27
II.8.1 Comportement des portiques.....	27
II.8.2 Comportement voiles – portique.....	27
II.9 La rigidité des structures.....	29
II.10 Conclusion.....	29

Chapitre III : Méthode statique non linéaire (Pushover)

III.1 Introduction.....	31
III.2 Méthodes d'analyse non linéaire.....	31

III.2.1 Analyse dynamique non-linéaire temporelle.....	31
III.2.2. Analyse Pushover.....	32
III.3 Principe.....	32
III.3.1 Définition de la méthode Pushover.....	32
III.3.2 Hypothèses d'élaboration de la méthode.....	33
III.3.3 But de l'analyse Pushover.....	34
III.3.4 Les étapes générales de la méthode Pushover.....	35
III.4 Origine de l'analyse PUSHOVER.....	35
III.5 Procédure d'analyse par la méthode Pushover.....	36
III.6 Courbe de capacité "Pushover".....	37
III.6.1 Niveaux d'endommagement décrits par une courbe de capacité	40
III.6.2 Point de performance.....	40
III.7 Avantages, Inconvénients et Limites de la méthode.....	42
III.8 Conclusion.....	44

Chapitre IV : Modélisation et analyse

IV.1 Introduction.....	46
IV.2 Modélisation des structures.....	46
IV.2.1 Présentation et description de l'ouvrage	46
IV.2.2 Caractéristique géométrique.....	46
IV.2.4 Conception structurale.....	47
IV.2.5 Les plans de notre structure.....	47
IV.2.6 Les règles utilisées.....	49
IV.2.7 Matériaux utilisés.....	50
IV.2.8 Pré dimensionnement des sections (poutres et poteaux , voile) <i>(Selon BAEL et vérification selon RPA 99 V/2003)</i>	53
IV.2.9 Définition les charges et les surcharges.....	55
IV.3 Loi de comportement non linéaire de la structure.....	58
IV.3.1 Loi de comportement non linéaire des poutres et poteaux.....	58
IV.3.2 Loi de comportement non linéaire des voiles.....	61
IV.4 Résultats et comparaisons	63
IV.4.1 Résultats d'analyse statique non linéaire (Pushover).....	63
IV.4.1.1 Structure portique auto stable.....	63

IV.4.1.2 Structure Mixte.....	64
IV.4.1.3 Comparaison des courbes de capacités de structure portique (auto stable) avec structure mixte.....	66
IV.4.2 Comparaison du résultant.....	67
IV.4.2.1 Pour la structure portique auto stable.....	68
IV.4.2.2 Pour la structure mixte.....	68
IV.4.2.3 Structure portique avec structure mixte.....	68
IV.5 Rotules plastiques.....	68
IV.6 Conclusion.....	69

Conclusion générale

Références bibliographiques

Liste des figures

Chapitre I : Notions sur la ductilité

Figure I.1 : Déformation d'une tour de grande hauteur. (a) Vue en perspective. (b) Vue en coupe au droit du voile central.....	2
Figure I.2 : Représentation schématique des implications du choix entre comportement non-ductile et comportement ductile lors du dimensionnement parasismique.....	2
Figure I.3 : Courbe charge-déformation (Relation déformabilité – ductilité)	3
Figure I.4 : Déformabilité et ductilité des voiles et portiques en béton armé.....	3
Figure I.5 : Ductilité de déformation.....	4
Figure I.6 : Ductilité de courbure.....	5
Figure I.7 : Ductilité de déplacement.....	6
Figure I.8 : comportement élasto-plastique en chargement.....	7
Figure I.9 : comportement élasto-plastique en chargement.....	8
Figure I .10 : Diagramme "contrainte-déformation" pour l'acier	9
Figure I .11 : Diagramme "contrainte-déformation" pour le béton.....	10
Chapitre II : comportement des structures (portique et mixte) vis-à-vis le séisme	
Figure II.1 : Représentation du schéma d'un séisme.....	13
Figure II.2 : Exemple de sismogramme terme d'amplitude de la vibration : le sismogramme.....	14
Figure II. 3 : sismographes (© R. Tavernier & J. Lamarque, Enseigner la biologie et la géologie à l'école élémentaire, Bordas, 1996, p. 429).....	15
Figure II. 4 : carte de zonage sismique du territoire national.....	16
Figure II.5 : Structure portique en béton armée.....	18
Figure II.6 : Structure en portique auto stable.....	19
Figure II.7 : Portique auto stable en béton arme.....	20
Figure II.8 : portique auto stable en béton arme avec voile.....	21
Figure II.9 : Comportement de structure durant de séisme a)réponse en cisaillement (portiques) ; b) réponse en flexion (murs porteurs).....	22
Figure II.10 : Comportement linéaire et non linéaire des structures.....	24
Figure II.11 : Réponse d'un oscillateur simple : a) oscillateur élastique et b) oscillateur élasto-plastique	24

Figure II.12 : Mécanisme plastique approprié (à gauche) et inapproprié (à droite).....	25
Figure II. 13 : La hauteur de la rotule plastique.....	26
Figure II.14 : Comportement ductile dominé par la flexion (à gauche) et fragile dominé par l'effort tranchant (à droite) de refends en béton armé.....	26
Figure II.15 : Exemple de mécanisme de rupture en portique par rotule plastique sous l'action de charges latérales.....	27
Figure II.16 : le modèle le plus simple d'un voile.....	28

Chapitre III : Méthode statique non linéaire (Pushover)

Figure III.1 méthodes d'analyse structurelle.....	33
Figure III.2 : Le système équivalent d'une structure à plusieurs degrés de libertés.....	34
Figure III.3 : Transformation de la courbe de capacité vers le spectre de capacité.....	39
Figure III.4 : Illustration des niveaux de performances d'une structure.....	40
Figure II.5 : Point de performance selon EC 8 et principe d'évaluation de la courbe de capacité.....	41
Figure III.6 : Point de performance – principe de réduction du spectre	42

Chapitre IV : Modélisation et analyse numérique

Figure IV.1 : Plan d'architecte RDC et 1-2-3 ème étages.....	47
Figure IV.3 : Géométrie de la structure portique auto stable.....	48
Figure IV.4 : Géométrie de la structure Mixte.....	49
Figure IV.5 : Diagramme de contrainte – déformation de béton.....	51
Figure IV.6 : Diagramme de contrainte – déformation d'acier	52
Figure IV.7. Dimension des poutres.....	53
Figure IV.8. Dimension des poteaux	53
Figure IV.9 : Coupe de voile en élévation.....	55
Figure IV.10 : Distribution des charges latérales des structures a) pour la structure auto stable et b) pour la structure Mixte.....	57
Figures IV.11: Introduction des rotules plastiques des poutres.....	59
Figures IV.12 : Affectation des rotules plastiques aux poteaux.....	60
Figure IV.13 : Loi de comportement de rotule de cisaillement de type M3.....	61

Figure IV.14 : Modèle " Poteau-Poutre équivalent".....	62
Figure IV.15 : Exemple loi de comportement voile (0.2mx1.2m) ferrailé en double nappe (T12/10cm) soumis à un effort normal de compression.....	62
Figure IV. 16: Courbe de capacité de la structure portique (auto stable) : effort tranchant à la base - déplacement au sommet selon le sens longitudinal (x).....	63
Figure IV.17 : Courbe de capacité de la structure portique (auto stable) : effort tranchant à la base - déplacement au sommet selon le sens transversal (y).....	64
Figure IV. 18 : Courbe de capacité de la structure mixte : effort tranchant à la base - déplacement au sommet selon le sens longitudinal (x).....	65
Figure IV.19: Courbe de capacité de la structure mixte : effort tranchant à la base - déplacement au sommet selon le sens transversal (y).....	65
Figure IV. 20 : Comparaison des Courbes de capacités de structure portique (auto-stable) avec structure mixte (effort tranchant à la base - déplacement au sommet selon le sens longitudinal x).....	66
Figure IV. 21 : Comparaison des résultats de la structures portique et mixte selon le sens longitudinal x.....	67
Figure IV.22 : Comparaison des Courbes de capacités de structure portique avec structure mixte (effort tranchant à la base - déplacement au sommet selon le sens transversale y).....	67
Figure IV.23 : Comparaison des résultats de la structures portique et mixte selon le sens longitudinal y.....	68
Figure IV.24 : Formation des rotules plastiques structure portique sens (x).....	71
Figure IV.25 : Formation des rotules plastiques structure portique sens (y).....	71
Figure IV.26 : Formation des rotules plastiques structure mixte sens (x).....	72
Figure IV.27 : Formation des rotules plastiques structure mixte sens (y).....	72

Liste des tableaux

Chapitre IV : Modélisation et analyse

Tableau IV.1 : Les caractéristiques géométriques des bâtiments étudiés.....	46
Tableau IV.2 : Propriété de l'acier en fonction du type.....	52
Tableau IV.3 : Les valeurs des charges gravitaires.....	56
Tableau IV.4 : Les données sismiques.....	56
Tableau IV. 5 : Distribution des charges latérales.....	57.
Tableau IV.6: Résultats d'efforts tranchants, déplacements et ductilités.....	67

Notations et symboles

μ_ε : Le facteur de ductilité du matériau (de déformation)

ε_y : La déformation élastique du matériau.

ε_u : La déformation maximale du matériau.

μ_ϕ : Le facteur de ductilité en courbure

ϕ_y : La courbure élastique

ϕ_u : La courbure maximale.

Δu : est le déplacement ultime disponible

Δy : le déplacement à la fin de la phase élastique.

$\mu\Delta$: Le facteur de ductilité en déplacement.

R: Coefficient de comportement de la structure.

M: la matrice de masse

C: l'amortissement

K: la rigidité

$\ddot{\mathbf{u}}_r(t)$, $\dot{\mathbf{u}}_r(t)$ et $\mathbf{U}_r(t)$: sont les vecteurs de l'accélération relative

$\ddot{\mathbf{u}}_g(t)$: est l'accélération

(Sa-Sd): Format accélération spectrale – déplacement spectrale.

ADRS: Accélération-Déplacement de la Réponse Spectrale.

f_{c28} : Résistance caractéristique à la compression

E_b : Module de Young

f_{bu} : Contrainte limite du béton en compression « ELU ».

θ : Le coefficient dépend de la durée d'application des charges

γ_b : Est le coefficient de sécurité.

ν : Coefficient de poisson.

f_{t28} : Résistance limite en traction du béton

ϵ_{be} : déformation limite élastique. $\epsilon_{be} = 2\text{‰}$

ϵ_{bu} : déformation ultime $\epsilon_{bu} = 3,5\text{‰}$

E_s : Module d'élasticité de l'acier.

f_e : Résistance limite élastique de l'acier Haute adhérence.

f_{es} : Résistance limite élastique de l'acier Rond lisse.

ϵ_{se} : Déformation limite élastique.

ϵ_{su} : Déformation ultime.

h : hauteur de poutre est donnée par la formule suivant.

L : longueur de la poutre.

B : Section transversale du poteau.

N : Effort de compression repris par le poteau le plus sollicité.

G : Charge permanente.

Q : surcharge d'exploitation.

σ_{bc} : Contrainte limite de service du béton en compression.

Bc : Section de béton du poteau.

Wi : Poids de chaque étage.

WGi : Poids permanent de chaque étage.

β : Coefficient de pondération.

WQi : Poids exploitation de chaque étage.

W : Poids total de la structure.

FJ : Force appliquée en chaque niveau.

Vb: Pseudo force sismique.

Ca : coefficient sismique d'accélération.

Cv : coefficient sismique de vitesse.

Fy : Effort élastique.

D : Déplacement élastique.

Fu : Effort Rupture.

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

L'action sismique est un déplacement imposé variable dans le temps, qui induit dans la structure des forces d'inertie. Au cours du mouvement, le séisme « injecte » dans la structure une certaine quantité d'énergie, une partie est restituée au sol, par le phénomène sol-structure, une autre partie est dissipée par amortissement le surplus se retrouve dans la structure sous forme d'énergie cinétique et d'énergie de déformation élastique et inélastique des éléments structuraux [1]. Cependant l'analyse dynamique des structures répondant à des séismes sévères a montré que les forces élastiques d'inertie sont beaucoup plus grandes que celles préconisées par les normes et que cette différence est trop grande pour qu'elle soit compensée par des coefficients de sécurité[2].

La ductilité est une propriété mécanique importante des structures qui se réfère à leur capacité à se déformer plastiquement avant de se rompre. Dans les structures portiques et mixtes, la ductilité joue un rôle crucial dans leur capacité à résister aux charges et aux déformations importantes.

Des distributions de dommages par analyse dynamique non-linéaire sont en effet observées lorsque les modèles sont soumis à des séismes d'amplitudes croissantes, cette méthode d'analyse peut être limitée par le temps de calcul nécessaire pour obtenir les résultats d'un modèle complet. C'est pourquoi, afin de réduire le temps de calcul, des modèles analytiques simplifiés sont également proposés. De nombreux chercheurs ont proposé, au lieu d'une analyse dynamique non-linéaire, l'utilisation de procédures d'analyse statique non-linéaire (Pushover). L'analyse Pushover est une analyse statique non linéaire conçue pour étudier la vulnérabilité des structures existantes vis-à-vis du séisme, elle est basée sur le suivi chronologique de la formation des rotules plastiques dans une structure soumise à un chargement vertical et un chargement latéral (séisme) croissant jusqu'à effondrement. [3].

Dans ce mémoire, nous avons étudié la ductilité des structures en béton armé et on a utilisé la méthode statique non linéaire (Pushover), et comparer entre la ductilité des structures portique (auto stable) et les structures mixte (portique + voile). Puis pour finir une conclusion générale et un résumé des résultats d'étude avec des suggestions sur les pistes pour les futures chercheurs dans notre domaine.

Position du problème :

Dans la construction parasismique, la conception et le calcul des structures de bâtiments en béton armé sont réalisés dans le but d'obtenir un comportement ductile et d'éviter tout risque de rupture fragile et brutale.

Le concept de ductilité constitue, par conséquent, une philosophie de conception largement répandue dans le domaine de la protection parasismique.

Par ailleurs, un comportement ductile permet à la structure de dissiper une bonne partie de l'énergie qui lui est transmise au cours d'un séisme. Si la structure présente une ductilité suffisante, il est possible de réduire les efforts de dimensionnement et donc le coût global de l'ouvrage sans remettre en cause sa survie lors d'un séisme.

Objectifs

L'objectif de ce mémoire est l'étude de la ductilité sismique des structures portiques et mixte (portique + voile) en béton armé en utilisant la méthode d'analyse statique non linéaire (Pushover), en outre, le travail vise à fournir une bonne compréhension des comportements des structures en béton armé vis-à-vis du séisme.

Structure du document : Ce mémoire est organisé selon les chapitres suivants :

Le premier chapitre Présentation général sur la ductilité

Le deuxième chapitre : Découvrir le comportement des structures vis-à-vis le séisme

Le troisième chapitre : Définition de la méthode statique non linéaire (Pushover)

Le quatrième chapitre : Modélisation et analyse

CHAPITRE I

NOTIONS SUR LA DUCTILITE

I.1 Introduction :

Les séismes de forte magnitude sollicitent la structure en dehors du domaine élastique, cette structure devrait présenter non seulement une résistance appropriée aux actions sismiques appliquées, mais une ductilité suffisante pour garantir absorption de l'énergie sismique sans qu'elle subisse de ruine. Ainsi plusieurs chercheurs, ont essayé de mettre en évidence l'effet avantageux de la ductilité dans le comportement dynamique des structures et d'améliorer la résistance aux sollicitations sismique [4].

Le terme "ductilité" dans la conception parasismique est utilisé pour désigner la capacité d'une structure à subissent des déformations cycliques de grande amplitude dans le domaine inélastique sans réduction substantielle de la force. Ductile les structures sont généralement capables de dissiper d'importantes quantités d'énergie pendant ces déformations cycliques.

La nécessaire ductilité d'une structure répondant à une un tremblement de terre sévère peut être estimé analytiquement par l'histoire temporelle non linéaire analyse dynamique ou plus approximativement par la prise en compte des mécanismes statiques de déformations inélastiques. Alternativement la ductilité requise d'une structure répondre à un tremblement de terre grave peut être estimé expérimentalement par table vibrante tests ou tests pseudo-dynamiques. Le la ductilité d'une structure doit être telle que pour s'assurer que la ductilité disponible est au moins égale à la ductilité requise. Ce chapitre examine les définitions qui permettre de déterminer les besoins et la ductilité disponible, et des procédés pour évaluer la ductilité disponible de structures et assemblages structuraux de essais en laboratoire. [5]

I.2 Notions de base sur la ductilité :

La ductilité est le paramètre clé du comportement parasismique, la ductilité est définie comme le rapport entre la déformation totale et la déformation à l'initiation de la plastification, cette définition s'applique aux déformations au sens large du terme. [6]

Par définition, la ductilité est la capacité de la structure (élément) de subir une déformation après la fin de la phase élastique avec une dégradation significative de sa

résistance et de sa rigidité. Par contre, la déformabilité est la capacité d'un élément de la structure ou de la structure entière de se déformer avant l'effondrement. Par conséquent, le facteur de ductilité est le rapport entre la déformation maximale et la déformation obtenue à la fin de la phase élastique. [7]

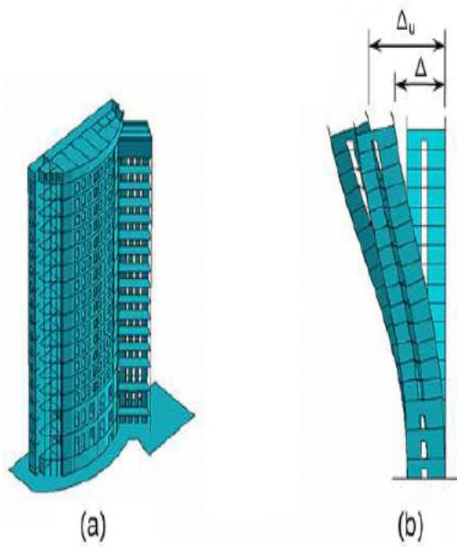


Figure I.1 : Déformation d'une tour de grande hauteur. (a) Vue en perspective. (b) Vue en coupe au droit du voile central. [8]

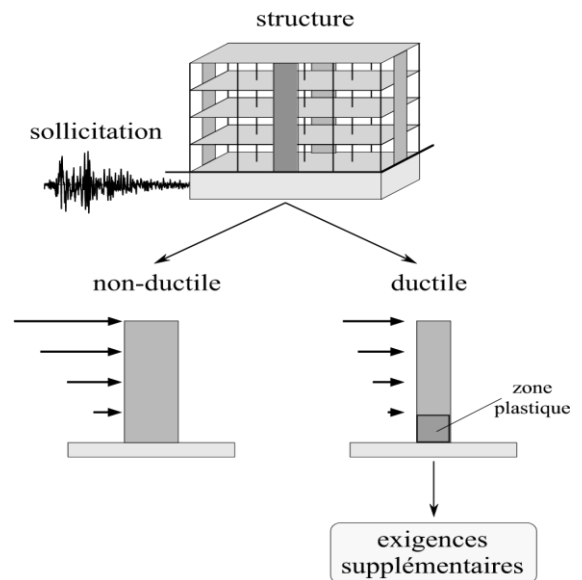


Figure I.2 : Représentation schématique des implications du choix entre comportement non-ductile et comportement ductile lors du dimensionnement parasismique.

I.3 Relation déformabilité – ductilité :

La déformabilité est la capacité d'un matériau, d'un élément de la structure ou d'une structure entière de se déformer avant l'effondrement, par contre, la ductilité est la capacité de subir une déformation après la fin de la phase élastique jusqu' avant la ruine, voir la figure (I. 2) [9]



Figure I.3 : Courbe charge–déformation (Relation déformabilité – ductilité).[9]

Il est à noter qu’une structure peut avoir une grande déformabilité, alors qu’elle est moins ductile comme le montre la figure (I .3), où on constate que les murs en béton armé (voile) possèdent une faible déformation alors qu’ils sont plus ductiles comparativement aux portiques qui sont plus déformables et moins ductiles [9].

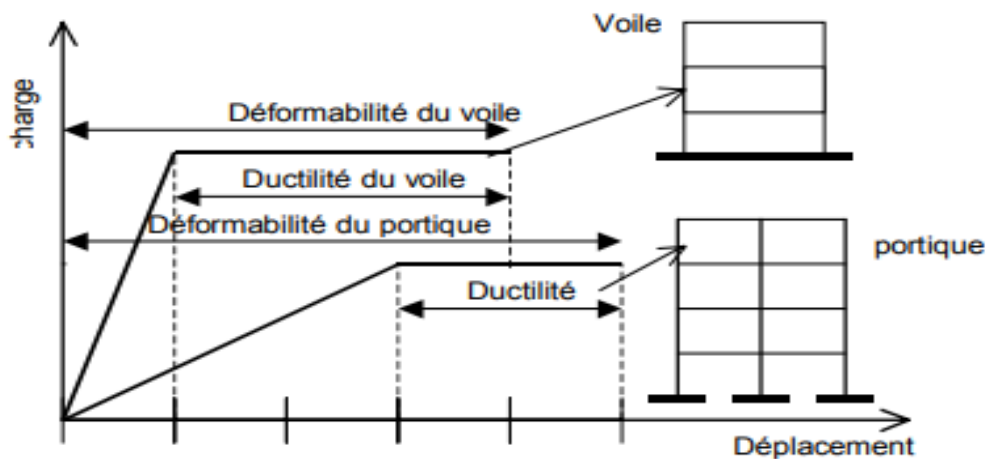


Figure I.4 : Déformabilité et ductilité des voiles et portiques en béton armé.

[9]

I.4 Types de la ductilité :

I.4.1 Ductilité de déformation :

La ductilité de déformation est une propriété mécanique importante des matériaux qui mesure leur capacité à se déformer sans se rompre.

Cela est dû à la capacité des atomes dans les matériaux à se déplacer les uns par rapport aux autres, permettant ainsi aux matériaux de subir une déformation plastique plutôt qu'

La ductilité de déformation est exprimée par rapport de la déformation totale imposée à la déformation élastique une rupture.

$$\mu_{\epsilon} = \frac{\epsilon_u}{\epsilon_y} \quad (\text{I.1})$$

Où :

μ_{ϵ} : Le facteur de ductilité du matériau (de déformation)

ϵ_y : La déformation élastique du matériau.

ϵ_u : La déformation maximale du matériau.

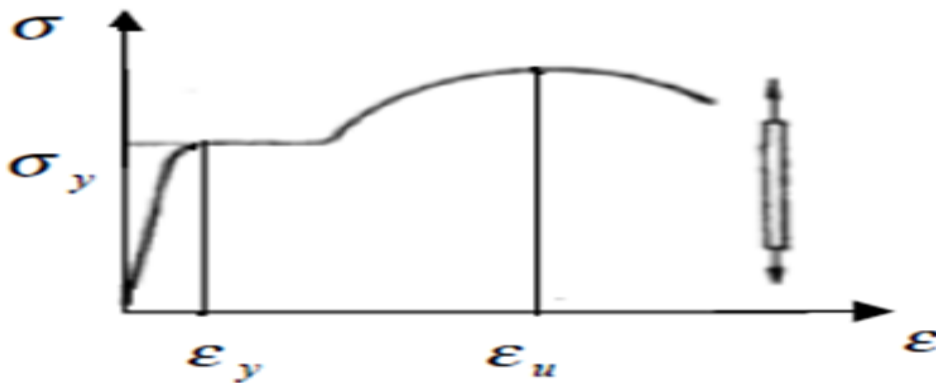


Figure I.5 : Ductilité de déformation

I.4.2 Ductilité de courbure :

La ductilité de courbure est une propriété mécanique importante pour les matériaux qui doivent subir des déformations importantes sans se rompre. Elle est souvent utilisée dans l'industrie automobile, aéronautique et de la construction. Cette propriété permet aux matériaux de résister à des forces extérieures sans se casser ou se fissurer.

Elle caractérise la capacité de rotation des sections. Elle est directement associée à la capacité de déformation de l'élément soit en termes de rotation ou de déplacement. [10]

$$\mu_{\phi} = \frac{\phi_u}{\phi_y} \quad (I.2)$$

Où :

μ_{ϕ} : Le facteur de ductilité en courbure

ϕ_y : La courbure élastique

ϕ_u : La courbure maximale.

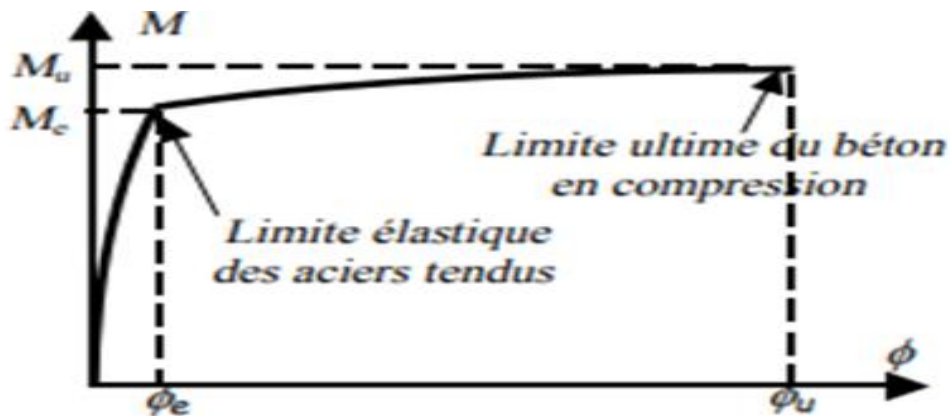


Figure I.6 : Ductilité de courbure [10]

Pour chaque état équilibre de la section nous pouvons calculer le moment résistant $M(\phi)$ correspondant. La procédure de calcul de M pour une courbure donnée ϕ est nécessairement itérative. Nous pouvons déduire la ductilité d'une section de poutre fléchie en fonction des paramètres : ρ , ρ' , f_c et f_e . [11]

I.4.3 Ductilité de déplacement :

La ductilité de déplacement est généralement une mesure de la ductilité globale de l'élément. Elle est définie comme étant le rapport du déplacement latéral total au déplacement latéral élastique.

Dans le cas d'une structure prise dans son ensemble, il est difficile, voir impossible de déterminer la part de la ductilité dans sa capacité à dissiper l'énergie.

$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (I.3)$$

Où :

Δ_u : est le déplacement ultime disponible

Δ_y : le déplacement à la fin de la phase élastique.

μ_{Δ} : Le facteur de ductilité en déplacement.

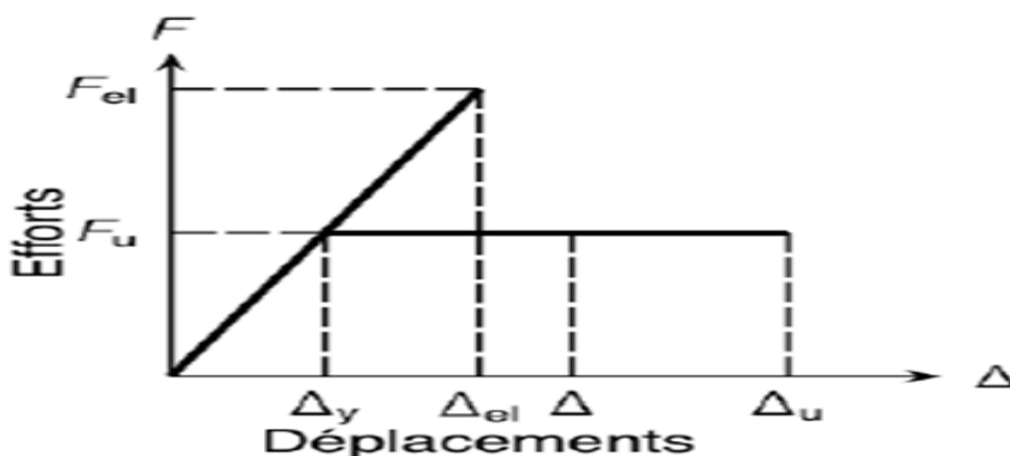


Figure I.7 : Ductilité de déplacement[11]

Dans ce cas le rapport μ_{Δ} est appelé coefficient de comportement ($= R$ selon le RPA)

Celui-ci dépend naturellement des ductilités locales. Ainsi la dissipation d'énergie dans une structure soumise à une action sismique a pour effet de réduire les charges sismiques.

Cependant, quel niveau de ductilité doit on adopter pour une certaine catégorie de Structure. Une simple réponse à cette question est quasi impossible vu la grande diversité dans les formes de structures et le grand nombre d'incertitudes impliqués. [12]

I.5 Ductilité vis-à-vis chargement statique :

La "ductilité" d'un élément représente son aptitude à subir, avant la ruine, des déformations importantes dues à une consommation élevée d'énergie.

Si on considère les diagrammes sollicitation-déformation suivants :[13]

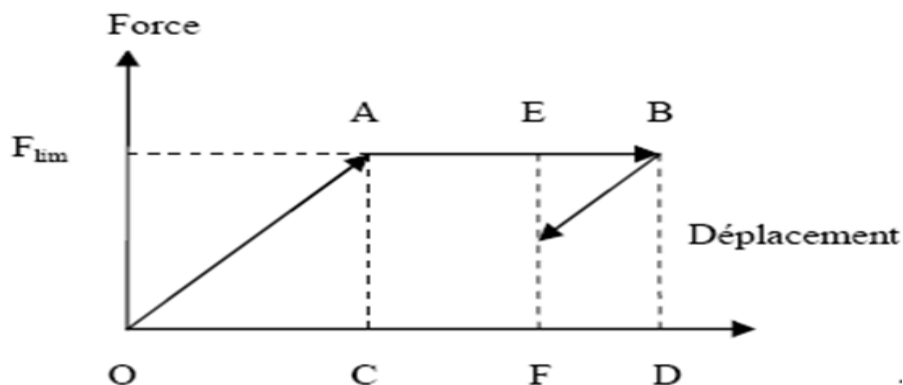


Figure I.8 : comportement élasto-plastique en chargement

On remarque que :

-(I), qui est une droite, traduit un comportement fragile ; il peut s'agir d'une pièce non armée.

-(II), qui présente un certain palier de plasticité, pourrait être le diagramme d'un acier à haute résistance.

-(III), qui présente un palier plus important, pourrait être le diagramme d'un acier doux.

I.6 Ductilité en chargement dynamique alterné :

L'argument précédent montre le comportement d'un point de vue statique, par contre la capacité des structures ductiles est plus significative lorsqu'on les considère en régime dynamique. En effet, la courbe représentée sur la figure va présenter plusieurs cycles qui proviennent des accélérogrammes sismiques, ceci permet à la structure d'absorber une grande partie d'énergie apportée par le séisme, à condition que son matériau présente une ductilité suffisante dans les deux sens comme le montre la figure suivantes : [13]

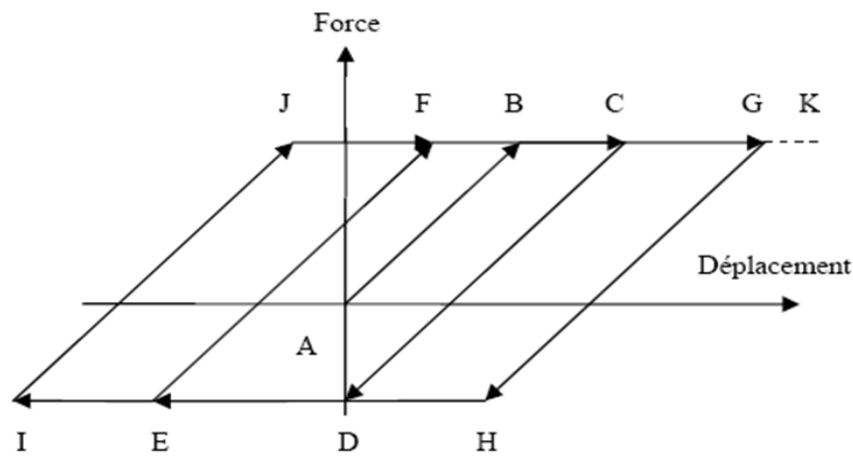


Figure I.9 : comportement élasto-plastique en chargement

I.7 Ductilité des matériaux :

La ductilité est la capacité d'un matériau à se déformer sans se rompre lorsque des forces sont appliquées. Le béton et l'acier sont deux matériaux qui ont une grande ductilité, ce qui les rend très utiles dans la construction.

Le béton a une grande résistance à la compression, mais il est également capable de se déformer sous des charges de flexion. L'acier, quant à lui, est un matériau élastique qui

peut se plier sans se rompre. Ces caractéristiques permettent aux ingénieurs de concevoir des structures plus légères et plus résistantes.

I.7.1 Acier :

L'acier est un matériau métallique qui est largement utilisé dans la construction pour sa grande résistance et sa ductilité élevée. Contrairement au béton, l'acier est un matériau élastique qui peut se plier sans se rompre. Cette propriété est due à la structure cristalline de l'acier, qui lui permet de se déformer sans perdre sa résistance.

Les ingénieurs peuvent utiliser la ductilité de l'acier pour concevoir des structures complexes qui nécessitent une grande résistance et une grande flexibilité. Par exemple, les ponts suspendus sont construits avec des câbles en acier qui peuvent se déformer sous des charges de vent et de circulation, tout en restant solides et stables.

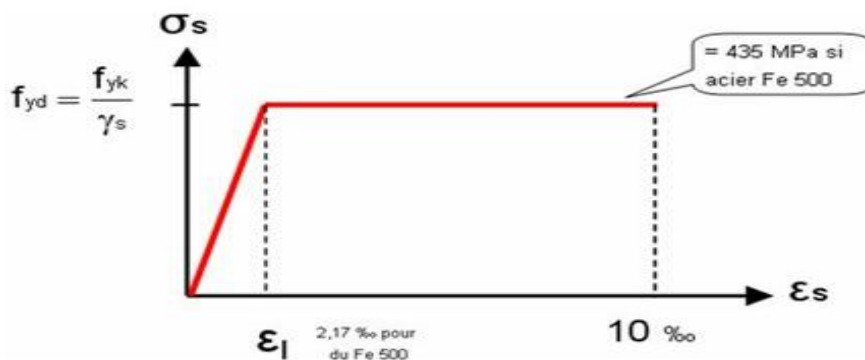


Figure I .10 : Diagramme "contrainte-déformation" pour l'acier

I.7.2 Béton :

Le béton est un matériau composite composé de ciment, de granulats et d'eau. Il est largement utilisé dans la construction pour sa grande résistance à la compression et son coût relativement faible. Cependant, le béton est également capable de se déformer sous des charges de flexion, ce qui lui confère une grande ductilité.

La ductilité du béton est due à la présence de fissures microscopiques dans la matrice de ciment. Lorsque des forces sont appliquées, ces fissures s'ouvrent et permettent au béton de se déformer sans se rompre. Les ingénieurs peuvent utiliser cette propriété pour concevoir des structures plus légères qui peuvent supporter des charges plus importantes.

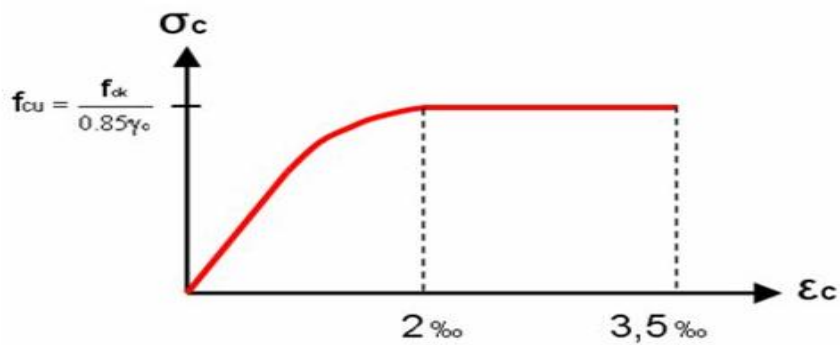


Figure I .11 : Diagramme "contrainte-déformation" pour le béton

I.8 Comparaison entre la ductilité du béton et de l'acier :

Bien que le béton puisse devenir ductile grâce à l'ajout d'armatures en acier, il reste moins ductile que l'acier.

En effet, l'acier peut se déformer beaucoup plus avant de se rompre, ce qui lui permet de mieux résister aux charges importantes.

La comparaison des diagrammes contraintes-déformations pour l'acier de construction d'usage courant E24 (contrainte élastique limite $\sigma_e = 240 \text{ MPA}$) et pour un béton de résistance en compression $\sigma_b' = 30 \text{ MPA}$, traduit la ductilité importante de l'acier par rapport au béton.

I.9 Conclusion :

En conclusion, la ductilité est une propriété mécanique importante des matériaux qui leur permet de se déformer sans se rompre sous l'effet d'une contrainte. Elle est influencée par plusieurs facteurs, tels que la composition chimique, la microstructure et la température.

La ductilité est cruciale pour de nombreuses applications industrielles, telles que l'industrie automobile et la construction. Cependant, elle présente également des limites, telles que la déformation permanente et la sensibilité à la fatigue et à la corrosion. Il est donc important de comprendre ces limites et de les prendre en compte lors de la conception de structures et de composants qui doivent être ductiles.

CHAPITRE II

***COMPORTEMENT DES
STRUCTURES
(PORTIQUE ET MIXTE)
VIS-A-VIS DU SEISME***

II.1 Introduction :

Les séismes sont des phénomènes naturels qui peuvent causer de graves dommages aux bâtiments, et autres infrastructures. Par conséquent, il est essentiel de comprendre comment les structures se comportent pendant un séisme afin de concevoir des bâtiments et des infrastructures résistant aux tremblements de terre. Et pour cela Le comportement des structures vis-à-vis des séismes est un domaine d'étude important dans le génie civil ; il est dépend de nombreux facteurs, tels que la conception de la structure, la qualité des matériaux, la géométrie de la structure et l'intensité et la durée des secousses sismiques. Les bâtiments peuvent subir différents types de dommages lors d'un séisme, tels que des fissures, des déformations, des ruptures ou même des effondrements complets. Les ingénieurs en génie civil utilisent des techniques de modélisation informatique et des essais en laboratoire pour évaluer le comportement des structures vis-à-vis des séismes. Ils conçoivent également des systèmes de protection sismique pour améliorer la résistance des structures aux secousses sismiques.

Afin d'améliorer le comportement des structures dans les zones sismiques, il est nécessaire de prévoir des éléments de contreventement qui ont pour rôles de s'opposer aux actions horizontales générées par le mouvement du sol, et d'assurer la stabilité latérale des Constructions. Le type de contreventement à mettre en place doit ainsi être choisi de manière Judicieuse, et disposé suivant les directions principales. [14]

II.2 Généralités sur les séismes :

II.2.1 Notion des séismes :

Le mot séisme vient du grec séisme qui signifie « secousse ». C'est une série de secousses du sol, plus ou moins violentes, soudaines, imprévisibles et localisées. On parle également de tremblement de terre. Les séismes mettent en évidence l'activité interne de la planète Terre. [15]

Le séisme est un évènement naturel, dont on ne peut stopper sa récurrence. Ses effets sur l'environnement dépendent de sa sévérité, des conditions de sol et de la vulnérabilité des éléments exposés. Les effets engendrés de séisme sont parfois désastreux, il est

responsable de la destruction de villes entières, causant la mort de milliers de personnes et de pertes économiques parfois insurmontables par le pays touché et sont une des principales causes de destruction des bâtiments et des infrastructures. Les structures doivent être conçues pour résister aux forces sismiques afin de minimiser les dommages causés les séismes. [6]

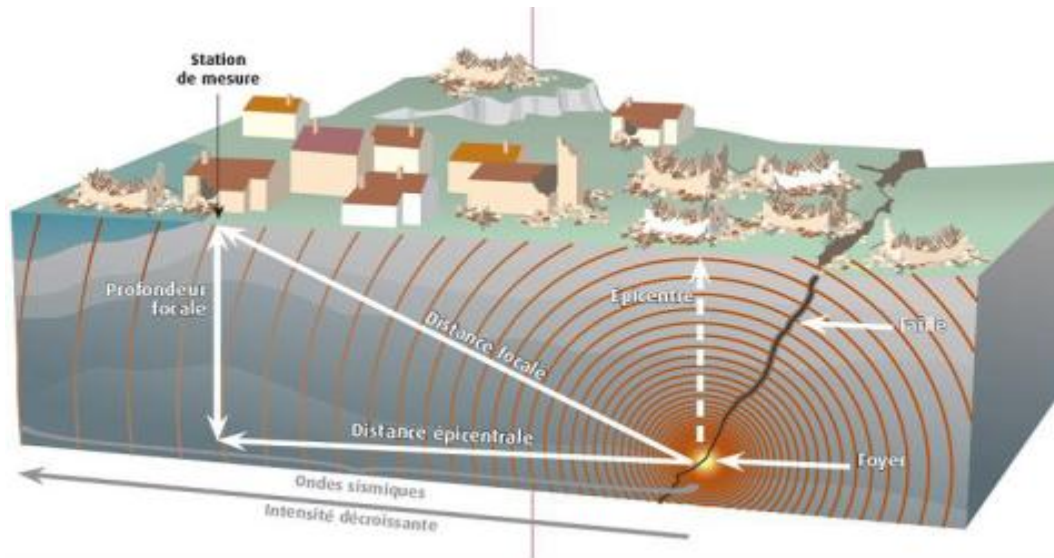


Figure II.1 : Représentation du schéma d'un séisme.

II.2.2 Cause des séismes :

Il faut distinguer ici les séismes qui touchent de grandes zones de la planète des événements d'ébranlements plus locaux. Les premiers sont d'origine tectonique ou volcanique. Les autres, bien moins énergétiques, sont souvent d'origine artificielle (barrages, extractions minières. Pompages profonds, etc.) ; Ils concernent aussi l'ingénieur puisqu'ils peuvent causer des dégâts aux constructions. [16]

II.2.3 L'enregistrement des séismes :

Le séisme se manifeste à la surface du sol par une série de vibrations. Elles peuvent être enregistrées au moyen d'un appareil appelé sismomètre.

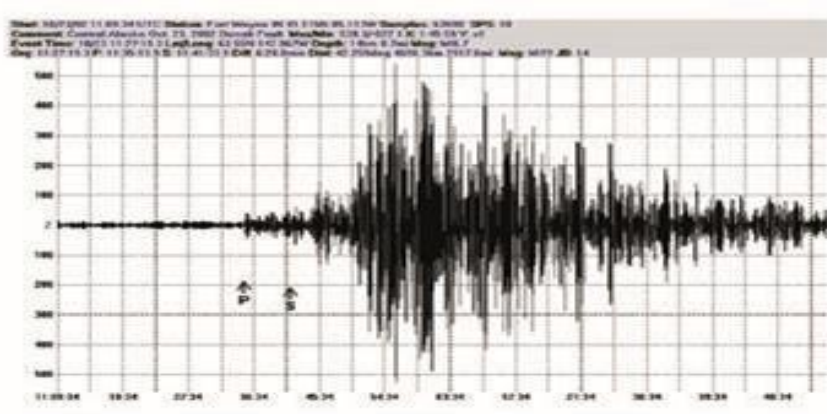


Figure II.2 : Exemple de sismogramme terme d'amplitude de la vibration : le sismogramme.

Pour un même séisme, les différents sismogrammes obtenus, au niveau de toutes les stations sismologiques, permettent de localiser l'épicentre du séisme, par lecture des délais d'arrivée des ondes et méthode des cercles [voir ci-contre][17]

II.2.3.1 Les sismographes :

Les sismographes sont des appareils très sensibles. Lors d'un séisme, le mouvement enregistré est très amplifié par rapport au mouvement réel du sol sismique il faut enregistrer ses deux composantes horizontales et sa composante verticale. Pour cela on utilise des sismographes à inertie dits "horizontaux" et des sismographes à in "verticaux"

Le sismographe horizontal est construit de telle sorte qu'il ne peut enregistrer le mouvement du sol que dans une seule direction horizontale. Le sismographe vertical est conçu de telle sorte qu'il ne peut enregistrer le mouvement que dans la direction verticale. Dans d'observation sismographiques il faut, au minimum, trois sismographes : 2 horizontaux et 1 vertical.

Les 2 sismographes horizontaux sont disposés de telle sorte que l'un enregistre la composante X (Nord-Sud) et l'autre la composante Y (Est composante)

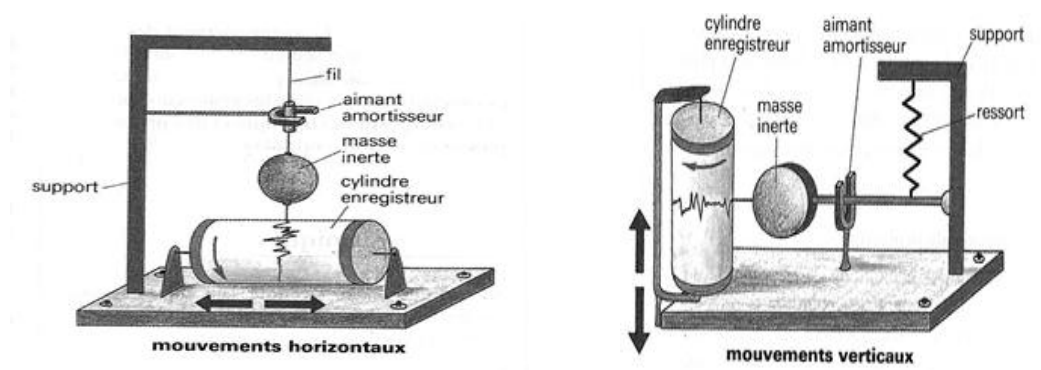


Figure II. 3 : sismographes (© R. Tavernier & J. Lamarque, Enseigner la biologie et la géologie à l'école élémentaire, Bordas, 1996, p. 429)

II.2.3.2 Le sismogramme :

Un sismogramme est l'enregistrement obtenu à partir des sismographes courbe qui varie en fonction de l'énergie libérée à la distance foyer - station sismographique, de la nature et de la structure du milieu traversé par les ondes et, enfin, du type de sismographe utilisé.

Le fait que les ondes sismiques arrivent aux stations d'énergie seulement les ondes qui ont suivi le chemin le plus direct entre le foyer et la station mais aussi des ondes qui n'y sont parvenues qu'après une série de réflexions et/ou réfractions sol. Pour connaître le mouvemente Est-Ouest) ; le sismographe vertical enregistre la composante Z.

Malgré cette grande diversité dans le détail des sismogrammes, les sismologues parviennent à y distinguer deux, parfois trois, secteurs principaux ; correspond à une brusque augmentation de l'amplitude du mouvement enregistré. Ces secteurs correspondent aux arrivées successives et de deux - parfois trois - trains d'ondes [18]

II.2.4 Classification des séismes :

- **Séismes superficiels :** La croûte terrestre étant rigide, elle peut casser. Etant donné que les plaques lithosphériques ont une épaisseur moyenne d'environ 70 Km, la

majorité des séismes sont évidemment superficiels c'est à dire que les foyers ne dépassent pas une profondeur de quelques dizaines de kilomètre (0 – 70 Km environ).

- **Séismes intermédiaires** Ce sont des ébranlements dont la profondeur des foyers est comprise entre 70 et 350 Km. Cette catégorie de séismes constitue environ 25% de la totalité des séismes.
- **Séismes profonds** : Ils sont rares que les deux catégories précédentes et ne représentent qu'environ 5%. Les séismes profonds ont des foyers qui se situent entre 350 et 700 Km [19]

II.2.5 Zones sismique en Algérie :

Le territoire national est divisé en quatre (04) zones de sismicité croissante, définies sur la carte des zones de sismicité, Cet article est modifié comme suit : [20]

« Le territoire national est divisé en cinq (05) zones de sismicités Croissante,..... », Soit :

Zone 0 : sismicité négligeable.

Zone I : sismicité faible.

Zones IIa et IIb : sismicité moyenne.

Zone III : sismicité élevé.

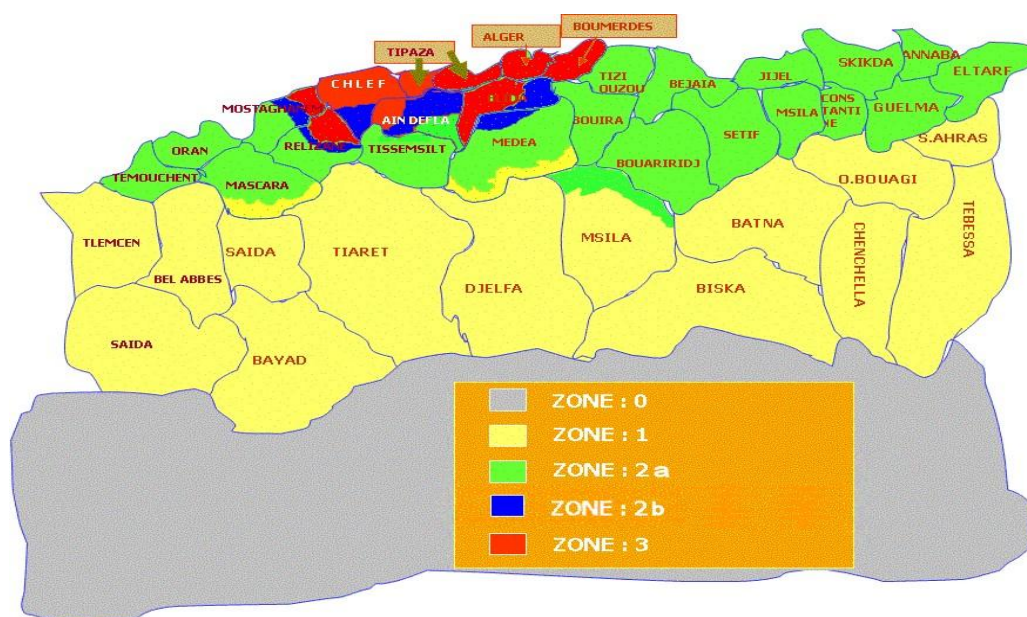


Figure II. 4 : carte de zonage sismique du territoire national [8]

II.2.6 Effets et conséquences d'un séisme :

Un séisme se traduit à la surface terrestre par des vibrations du sol et parfois par des décalages de la surface du sol de part et d'autre des failles. L'ampleur des vibrations dépend en premier lieu de la quantité d'énergie libérée, de la profondeur de la rupture et de la distance à laquelle on se trouve.

En plus des mouvements vibratoires, d'autres phénomènes peuvent aggraver les conséquences d'un phénomène sismique : tsunamis, mouvements de terrain, liquéfaction des sols.

L'épicentre est le point en surface correspondant à la rupture qui a eu lieu en profondeur. [21]

II.2.7 Définition du risque sismique :

Le séisme est la rupture soudaine d'une faille par l'entremise d'une libération énorme d'énergie. Lorsqu'il se produit, les conséquences peuvent être catastrophiques. Ce phénomène expose les structures existantes au risque de dommages allant jusqu'à l'effondrement. En premier lieu, on s'intéresse aux structures construites par l'homme, mais ce risque touche aussi des structures naturelles comme les sols, résultant de la liquéfaction ou du tassement différentiel. La physique des mouvements du terrain ou l'émission des ondes sismiques fait intervenir la notion de risque sismique, donnant lieu à une très abondante littérature. La notion de risque sismique indiquée ci-dessous est très réductrice si l'on tient compte de la diversité d'interprétation de chaque auteur. [22]

II.3 Les Structures en béton armé :



Figure II.5 : Structure portique en béton armée [3]

II.4 Différents type de structures en béton armé :

II.4.1 Structures auto stables :

Les descentes de charges dynamiques horizontales passent par les mêmes éléments de structure que les charges statiques verticales (murs, coques, treillis tridimensionnels, portiques croisés...

II.4.1.1 Structure en portique auto stable (poteau + poutre) :

Les structures en béton armé contreventés par portiques autos-tables sont relativement répandues dans les constructions courantes de bâtiment, vu la simplicité de leurs exécutions ainsi que l'économie sur les matériaux utilisés. Cependant, ce type de structure les matériaux utilisés. Cependant, ce type de structure ne convient pas pour des bâtiments élancés étant donnée leur flexibilité.

Le choix de la forme et le dimensionnement des portiques devraient être faits de sorte que les zones plastifiées (rotules plastique) ne puissent se former qu'entre les appuis des poutres, c'est à dire que la résistance des poteaux et des nœuds soit supérieure à celle des poutres ; le cas contraire pourrait avoir pour conséquence l'instabilité de la structure (l'effondrement prématuré de la structure) [23]

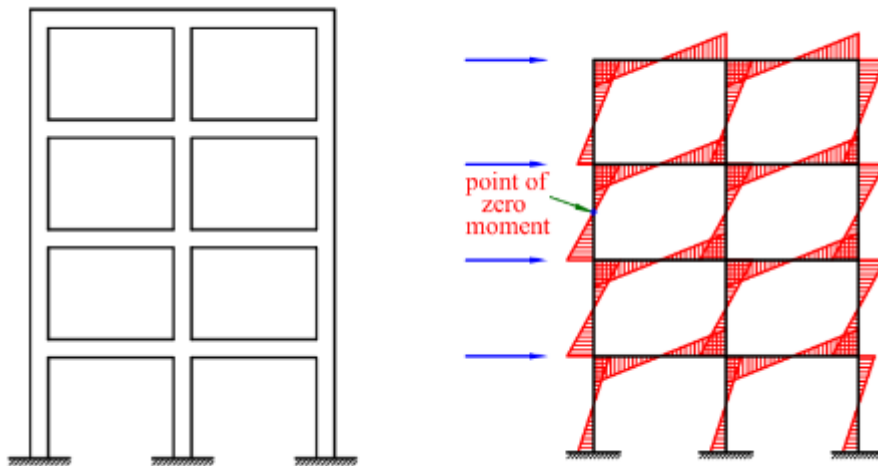


Figure II.6 : Structure en portique auto stable.

Généralement, dans les zones de moyen à faible sismicité, les bâtiments en béton armé se composent en portiques auto stables tridimensionnelles, qui sont liés rigidement et capable de reprendre la totalité des forces verticales et horizontales [24]. Dans la pratique, on trouve deux types de contreventement auto stable :

- **Contreventement par portique auto stable sans remplissage en maçonnerie rigide :**

L'ossature est constituée uniquement de portiques capables de reprendre la totalité des sollicitations dues aux charges verticales et horizontales. Pour cette catégorie, les éléments de remplissage ne doivent pas gêner les déformations des portiques. D'après le règlement parasismique RPA99/v2003 les bâtiments concernés ne doivent pas dépasser 5 niveaux ou 17 m en zone I, 4 niveaux ou 14 m en zone IIa et 3 niveaux ou 11 m en zone IIb et III.

- **Contreventement par portique auto stable avec remplissage en maçonnerie rigide :**

L'ossature est constituée de portiques capables de reprendre la totalité des sollicitations dues aux charges verticales et horizontales. D'après le règlement parasismique RPA99/v2003 les bâtiments concernés ne doivent pas dépasser 5 niveaux

ou 17 m en zone I et 4 niveaux ou 14 m en zone IIa et 3 niveaux ou 11m en zone IIb et 2 niveaux ou 8 m en zone III.

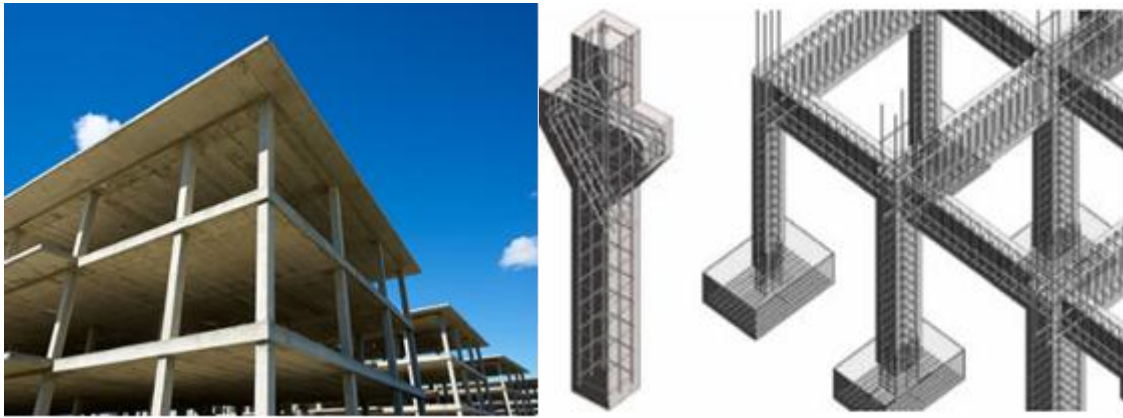


Figure II.7 : Portique auto stable en béton armé

II.4.1.2 Structure mixte (portique +voile) :

Les voiles sont des éléments de structure généralement verticaux, porteur rigide en béton- armé destiné à transmettre les charges latérales dans les fondations avec une section transversale allongée, avec un rapport longueur/épaisseur. [25]

La meilleure façon de rendre les bâtiments en poteaux-poutres parasismiques est de les contreventer par des voiles en béton armé. Les voiles deviennent ainsi la structure principale, dont le rôle est de résister aux forces horizontales [26]. Les bâtiments formés par l'interaction des portiques et des voiles en béton armé sont connus sous le nom d'un system mixte où hybride.

Généralement, les voiles supportent la majorité des charges sismiques et une partie des charges verticales, cependant les portiques supportent une partie des charges horizontales et le reste des charges verticales revenant. Aujourd'hui, la majorité des constructions en zone sismique emploi largement ce type de contreventement [27]



Figure II.8 : portique auto stable en béton armé avec voile.

II.4.2 Structures contreventées :

Les descentes de charges horizontales passent par des dispositifs spécifiques (contreventements triangulés par exemple...)

II.5 Comportement des structures durant les séismes :

En situation de séisme, les différents éléments d'un bâtiment sont tous soumis à une force identique, la « poussée » des secousses à un moment donné. Cependant, ils se déforment de manière différente, en fonction de plusieurs facteurs : leurs formes (un poteau se déforme plus qu'un mur), leurs matériaux (le bois se déforme plus que le béton armé), leurs masses (qui engendrent des forces d'inertie différentes) et la nature des liaisons entre les éléments.

Les secousses d'un séisme génèrent des forces alternées dans toutes les directions, forces qui déforment le bâtiment de façon aléatoire, mais selon ses caractéristiques architecturales. Les déformations peuvent être de deux sortes. Premièrement, il y a les déformations élastiques, sensiblement proportionnelles à la force qui les provoque. Ces dernières sont réversibles, c'est à dire qu'elles disparaissent après la suppression des charges qui les ont provoquées. Ces déformations n'auront donc pas les conséquences les plus graves. Mais pour chaque sollicitation et chaque corps, il existe une force limite fixée ; au-delà de celle-ci, les déformations cessent d'être élastiques : c'est la limite d'élasticité. Lorsque la force appliquée dépasse cette limite, une partie de la déformation subsiste

après l'arrêt de l'action extérieure : on parle alors d'une déformation plastique (ou post-élastique), qui elle sera permanent. [28]

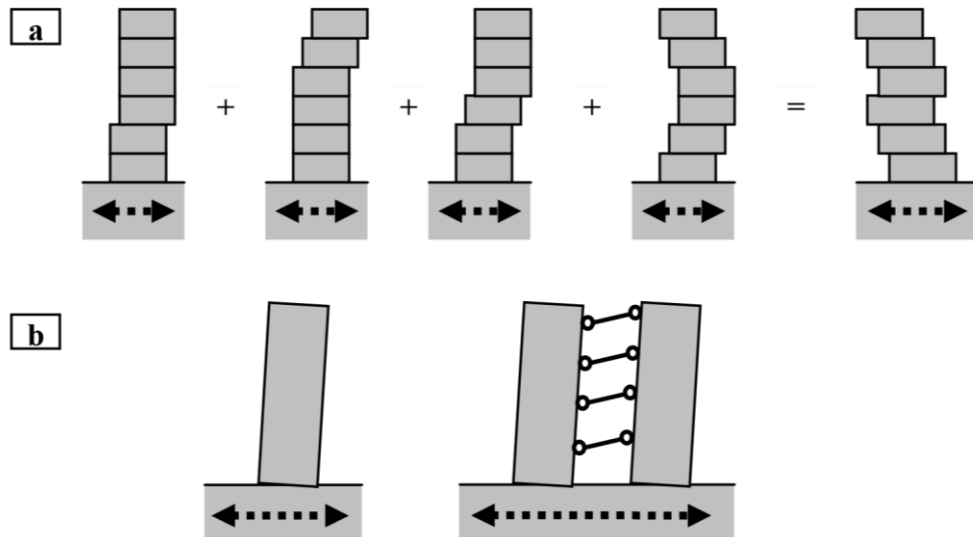


Figure II.9 : Comportement de structure durant de séisme a) réponse en cisaillement (portiques) ; b) réponse en flexion (murs porteurs)

Dans le cas d'un séisme important, le caractère cyclique de la sollicitation conduit à l'éclatement du béton de couverture dans les zones de grandes déformations plastiques. Quant au caractère dynamique de l'action sismique, il implique notamment que la rigidité de la structure influence le niveau de sollicitation. Lorsqu'une structure se déforme plastiquement pendant un séisme, la diminution de sa rigidité entraîne généralement une réduction de la sollicitation. Une ductilité suffisante permet le développement de ce phénomène favorable.

II.6 Comportement linéaire et non-linéaire :

Il est connu que les accélérations produites sur les constructions pendant les séismes majeurs sont de l'ordre de 0.3 g à 0.8 g plutôt que 0.1 g à 0.3 g imposé par les

règlements (g étant l'accélération terrestre et valant 10 m/s^2). Comment expliquer donc la résistance de la plupart de ces constructions ?

Les déformations subies par la structure en phase post élastique ont pour effet de diminuer les forces agissant sur la structure et interviennent de ce fait comme dès l'imitateur d'efforts. En contrepartie les déformations sont considérablement amplifiées par rapport à celles que la structure subirait sous ces mêmes forces en phase élastique. Les sollicitations sismiques sont essentiellement du type déformation imposée, ce qui entraîne que le mode de ruine est généralement associé à une limite de déformation plutôt qu'à une limite de résistance qui détermine la sécurité des constructions.

Les forces d'inerties qui apparaissent du fait des actions sismiques dans un élément donné résultent des actions transmises par les liaisons de cet élément avec le reste de la structure. Ces forces ne peuvent donc excéder la capacité de résistance, en termes de forces, de ces liaisons. Les déformations qui leur correspondent peuvent par contre atteindre un niveau inacceptable pour lequel la ruine est inévitable par instabilité plastique. La plupart des matériaux présentent une capacité importante de déformation plastique avant rupture, il est donc possible d'obtenir une sécurité acceptable en autorisant des incursions significatives dans le domaine plastique (post-élastique), cette propriété fondamentale est appelée ductilité.

La figure (II.10 a) représente le cas d'une structure élastique, la courbe ne possède pas de palier de plasticité et par conséquent la ruine est brusque quand la structure atteint sa résistance maximale, par contre la figure (II.10.b) présente le cas d'une structure ductile avec un prolongement du palier au-delà de la limite élastique. [28]

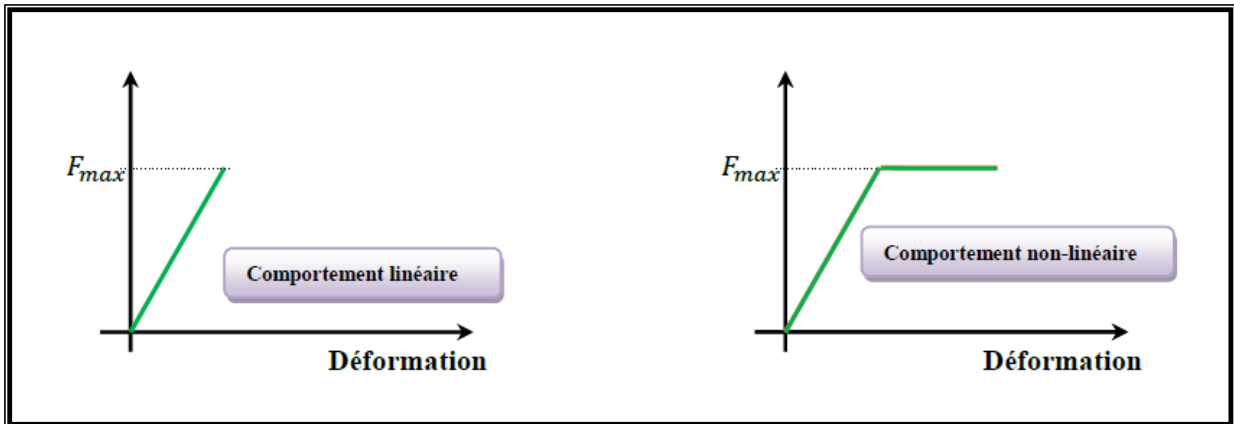


Figure II.10 : Comportement linéaire et non linéaire des structures. [29]

La compréhension du comportement de la structure nous amène à assimiler la structure à un oscillateur simple soumis à des accélérations horizontales, la figure II.11 montre l'évolution des déformations :

- Pour un oscillateur élastique (figure II.11.a).
- Pour un oscillateur élasto-plastique avec une rotule plastique formée à sa base (Figure II.11. b).

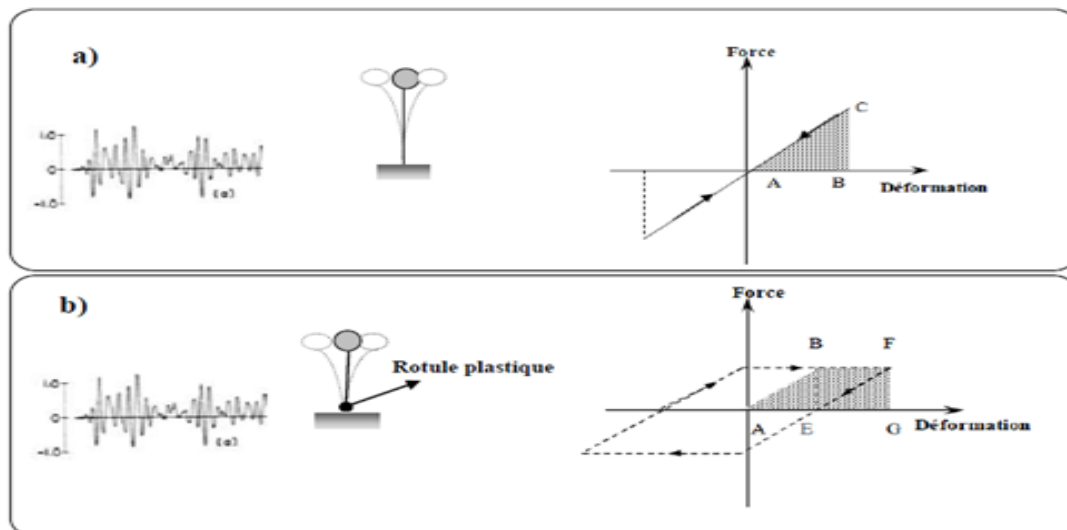


Figure II.11 : Réponse d' un oscillateur simple : a) oscillateur élastique et b) oscillateur élasto-plastique. [29]

II.7 Comportement non-linéaire :

II.7.1 Mécanismes plastiques :

Dans le cadre du dimensionnement en capacité, le premier pas est de choisir un mécanisme plastique approprié. Ce mécanisme doit permettre les déformations plastiques globales de la structure en minimisant les rotations locales des rotules plastiques. La figure II.12 illustre le cas d'un mécanisme plastique approprié et d'un mécanisme plastique inapproprié pour un cadre. [30]

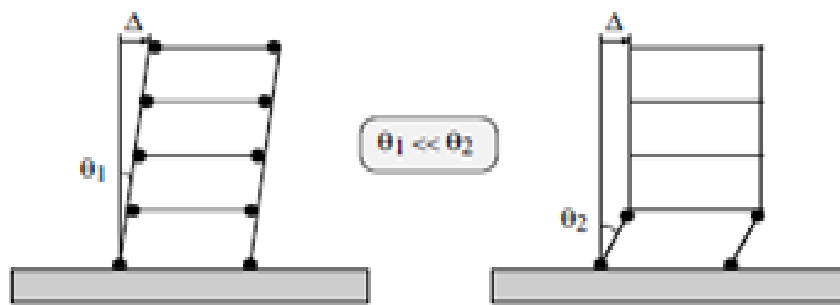


Figure II.12 : Mécanisme plastique approprié (à gauche) et inapproprié (à droite). [30]

II.7.2 Rotule plastique :

Zone d'un élément de structure (poutres, poteaux, voiles,) subissant des déformations irréversible et capables de dissiper de l'énergie sous sollicitations alternées. Au-delà d'un seuil, de sollicitation, elle se comporte comme une articulation autorisant la rotation des autres parties de l'élément. Ces rotule plastique de préférence dans les éléments horizontaux (poutres...) plutôt que verticaux (poteaux, voile.) de façon à ne remettre en cause ni le cheminement des forces verticales, ni la stabilité de la structure et/ou de ses éléments porteurs. Quant aux éléments porteurs qui ne participent pas au contreventement ils doivent pouvoir conserver leur capacité portante sous l'effet des déformations imposées [6].

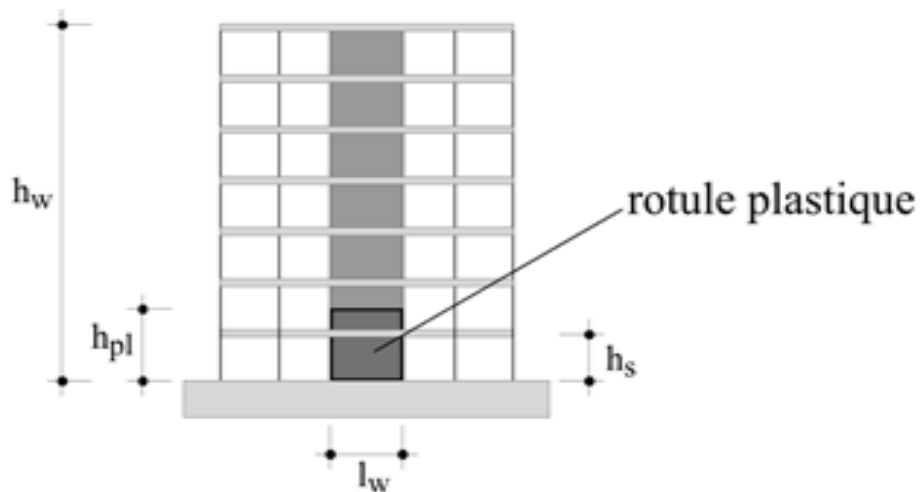


Figure II. 13 : La hauteur de la rotule plastique [31]

Pour les refends, qui se comportent généralement comme des consoles, la rotule plastique

est normalement située dans la partie inférieure. Il s'agit alors de s'assurer que le mécanisme plastique est bien contrôlé par la flexion et non pas par l'effort tranchant

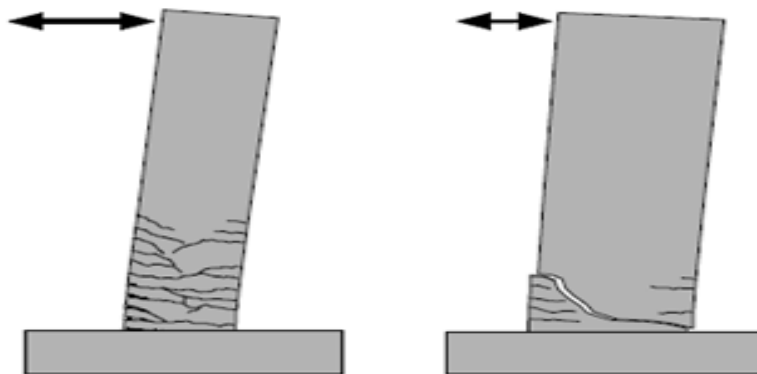


Figure II.14 : Comportement ductile dominé par la flexion (à gauche) et fragile dominé par l'effort tranchant (à droite) de refends en béton armé. [30]

II.8 Comportement des structures :

II.8.1 Comportement des portiques

La structure en portique est une ossature constituée uniquement de portiques capables de reprendre la totalité des sollicitations dues aux charges verticales et horizontales, dans lequel la résistance aux charges verticales et aux charges latérales est assurée uniquement par des ossatures en portique, ce système est caractérisé par sa haute capacité en ductilité (elle subit à des déplacements importants avant l'endommagement) Pour ces structures composées d'éléments linéaires, la dissipation d'énergie se fait par des déformations importantes au droit des zones comportant des rotules plastiques. (FigureII.15).

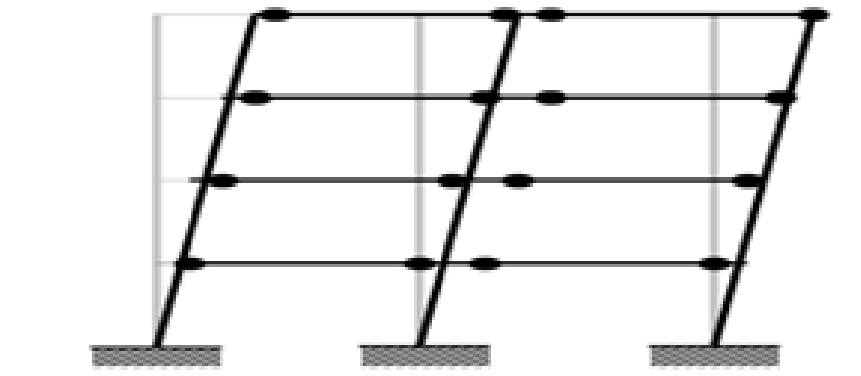


Figure II.15 : Exemple de mécanisme de rupture en portique par rotule plastique sous l'action de charges latérales. [31]

II.8.2 Comportement voiles – portique :

Dans le cas des systèmes, les voiles et les portiques participent à la résistance aux charges horizontales. Dans un premier temps, en raison de leur rigidité les voiles reprennent presque la totalité de ces charges. Après l'apparition de zones plastifiées dans les voiles, une plus grande part des charges se reporte sur les portiques qui, si les dispositions constructives des règles parasismiques sont respectées, possèdent une grande

capacité à dissiper l'énergie des oscillations. Autre avantage ; les déformations des voiles sont minimales en pied de la structure, ou celles des portiques sont maximales ; la situation sera inverse au sommet de l'ouvrage. L'interaction des voiles et des portiques est donc très favorable, à condition que les assemblages poutre – voiles soient ductiles et acceptent donc une certaine déformation avant rupture. Sous l'action des forces horizontales (vent ; séisme), un voile et un portique présentent des déformées fondamentalement différentes. La déformation du refend étant régie par la flexion d'ensemble et celle du portique par la flexion des barres, la liaison entre un refend et un portique a pour résultat de former une structure mixte. La distribution de l'effort tranchant entre le voile et le portique varie sur toute la hauteur du bâtiment.

La meilleure façon de rendre les bâtiments en poteaux-poutres parasismiques est de les contreventer par des voiles en béton armé. Les voiles deviennent ainsi la structure principale dont le rôle est de résister aux forces horizontales.

Les bâtiments formés par l'interaction des portiques et des voiles en béton armé sont connus sous le nom d'un système mixte ou hybride.

Généralement, les voiles supportent la majorité des charges sismiques et une partie des charges verticales, cependant les portiques supportent une partie des charges horizontales et le reste des charges verticales revenant.

Aujourd'hui, la majorité des constructions en zone sismique emploie largement ce type de contreventement. [15]

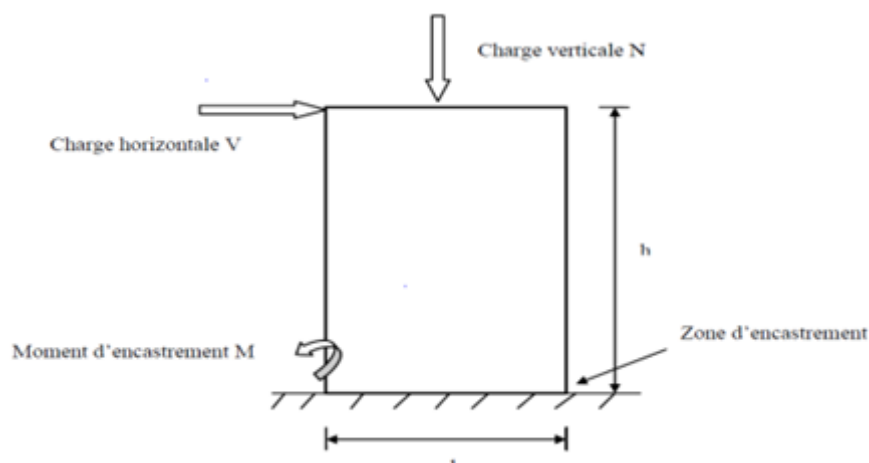


Figure II.16 : le modèle le plus simple d'un voile

II.9 La rigidité des structures :

Vis-à-vis du mouvement du sol, la structure se comporte comme un oscillateur dont les modes propres d'oscillation dépendent entre autres de la raideur (ou raideur) des éléments structuraux. La raideur des différents éléments de la structure est un des paramètres fondamentaux du comportement dynamique de la structure, qui doit être pris en compte dans le projet de construction en amont des calculs de validation. La rigidité d'un élément structurel est fonction de quatre paramètres sur lesquels le concepteur structurel peut agir.

- **La nature de l'assemblage** (joint, insert, etc.) détermine la raideur. Il est représenté par le coefficient de signe "n"

- **L'inertie de la section** (dans la direction demandée) détermine la raideur de l'élément. Le paramètre "Section Inertia" de raideur est un facteur majeur dans la conception des structures, en pratique la raideur augmente avec le cube de la dimension considérée, c'est énorme, nous verrons que ce paramètre est la source de la plupart des dommages s'il n'est pas correctement maîtrisé, ces Les dommages ont été causés par une mauvaise conception structurelle.

- **Le matériau** (module de déformation) détermine la raideur. La rigidité augmente avec le module de déformation du matériau.

- **La longueur de l'élément détermine la raideur** (nous considérerons la hauteur des éléments porteurs d'une structure verticale soumise à l'action horizontale d'un séisme). La raideur diminue en fonction du cube de la longueur, qui est également énorme, et nous verrons également que ce paramètre est la source de beaucoup de dégâts s'il n'est pas contrôlé correctement, dont la racine est la mauvaise conception de structure.

II.10 Conclusion :

En conclusion, la compréhension du comportement des structures vis-à-vis des séismes est essentielle pour la conception et le renforcement des bâtiments en béton armé. Les séismes peuvent causer des dommages importants aux structures, mais une conception appropriée peut minimiser les risques pour les personnes et les biens. Les normes de conception sismique énoncent les exigences minimales pour garantir la sécurité des structures, tandis que les méthodes de renforcement peuvent améliorer la capacité des structures existantes à résister aux séismes.

La période propre de vibration, l'amortissement, la ductilité, la résistance, la géométrie et la configuration du système structurel sont tous des facteurs importants qui influencent la réponse sismique des structures. Comprendre l'interaction entre ces facteurs peut aider à concevoir des structures plus résistantes aux séismes.

Enfin, la sécurité des structures vis-à-vis des séismes est un enjeu critique pour la protection des personnes et des biens. Il est donc essentiel de continuer à développer et à améliorer les normes de conception sismique, ainsi que les techniques de renforcement des structures existantes, pour garantir leur sécurité à long terme. [7]

CHAPITRE III

***METHODE DANALYSE
STATIQUE NON LINEAIRE
(PUSHOVER)***

III.1 Introduction

Les méthodes d'analyse classiques, citées dans la plupart des codes parasismique utilisées dans la conception sismique pour les structures, parmi elles, celles de l'étage souple elles ne représentent pas les mécanismes de rupture d'une manière adéquate. Ces mécanismes seraient fréquemment la cause de l'effondrement des structures.

Ce cas a conduit à l'intérêt de définir les procédures d'analyse, capable de fournir une prédiction précise de tels mécanismes d'effondrement non élastique, et ce en évitant l'effort du calcul excessif. Parmi ces procédures, les procédures statiques non linéaires qui apparaissent comme outil attractif, parce qu'elles sont faciles à utiliser et fournissent une représentation simple et efficace de la réponse structurelle par la courbe de capacité, à partir de laquelle on peut déterminer un nombre de paramètres de la réponse attendue.

Cette méthode d'analyse statique non linéaire sera détaillée dans ce chapitre, avec une étude approfondie de l'effet du mode de chargement latéral, sur les résultats d'analyse. [32]

III.2 Méthodes d'analyse non linéaire.

III.2.1 Analyse dynamique non-linéaire temporelle.

Cette méthode surmonte tous les problèmes associés au RSA (RSA : Response Spectrum Analysis), elle est considéré comme étant la méthode la plus précise pour l'évaluation de la conception sismique des structures.

Les propriétés de chaque élément structurel sont correctement modélisées, y compris les non-linéarités des matériaux, avec la solution d'analyse étant calculée par intégration numérique pas à pas de l'équation d'équilibre (Equation III.1) : tel que M , C et K représentent respectivement la matrice de masse, de l'amortissement et de la rigidité $\ddot{u}_r(t)$, $\dot{u}_r(t)$ et $U_r(t)$, sont les vecteurs de l'accélération relative, de déplacement et de vitesse respectivement et $\ddot{u}_g(t)$ est l'accélération.

$$M (\ddot{u}_r(t)) + C (\dot{u}_r(t)) + K (U_r(t)) = -M (\ddot{u}_g(t)) \quad \text{III.1}$$

Par conséquent, elle permet l'évaluation de la réponse dynamique de la structure avec le temps, y compris les réponses locales et globales. Ce fait évite l'utilisation des facteurs de comportement et de leurs effets fallacieux, puisqu'ils ne peuvent pas tenir compte la ductilité de la structure d'une manière correcte. [33]

III.2.2. Analyse Pushover

L'analyse Pushover ou bien l'analyse en poussée progressive est une méthode statique non-linéaire une procédure statique non-linéaire, utilisée pour l'évaluation ou le diagnostic sismique des bâtiments. Elle est proposée par des nombreux règlements parasismiques, la méthode Pushover consiste à appliquer à la structure un système des forces d'intensité croissante. [34]

III.3 Principe

L'analyse de poussée progressive est une procédure statique non linéaire dans laquelle une structure est soumise à des charges latérales selon un certain schéma prédéfini en augmentant l'intensité de la charge jusqu'à ce qu'un mode d'effondrement commence à apparaître dans la structure, les résultats de cette analyse sont exprimés dans le forme selon la structure La courbe du déplacement reliée au cisaillement de fond. L'analyse push over est souvent utilisée pour désigner une procédure statique non linéaire utilisée pour évaluer les performances sismiques des structures existantes et pour la conception de nouveaux bâtiments. Il s'agit d'un outil puissant pour l'approche de conception basée sur les performances et figure dans plusieurs codes et directives sismiques récents. [35]

III.3.1 Définition de la méthode Pushover

Pushover est une méthode d'analyse de structures qui permet d'établir la courbe de capacité d'une structure soumise à un chargement statique croissant.

La forme de la charge appliquée lors de l'analyse est destinée à représenter l'effet du séisme par une force statique de substitution appelée (Equivalent Static Force). A partir de cette charge appliquée pas à pas, le comportement non linéaire de la structure peut être défini. Le

non linéarité est en effet introduit dans la structure par les paramètres des rotules plastiques. (36). C'est un procédé par lequel à chaque pas d'itération, l'équilibre statique est établi, afin d'obtenir la réponse de la structure soumise à un chargement latéral croissant. La résistance structurale est évaluée et la matrice de rigidité est mis à jour à chaque incrément de la force latérale, jusqu'à la convergence. Le calcul continue jusqu'à (1) un état limite prédéfini, (2) l'effondrement structural ou (3) le manque de convergence. [36]

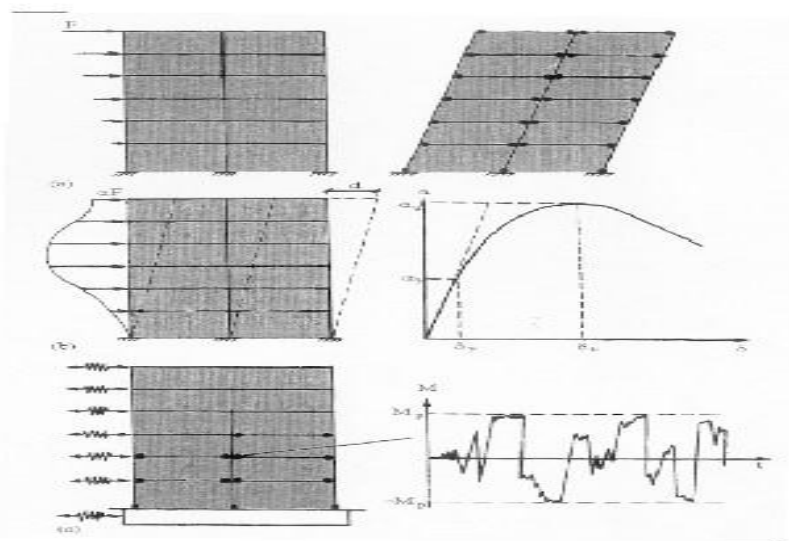


Figure III.1 méthodes d'analyse structurelle

III.3.2 Hypothèses d'élaboration de la méthode

L'analyse push over se base sur une théorie qui se traduit à convertir la réponse de notre structure à un système à un seul degré de liberté, ce qui implique que :

- La réponse est fondamentalement contrôlée par un seul mode de vibration
- La forme de ce mode demeure constante durant la durée du séisme.[36]

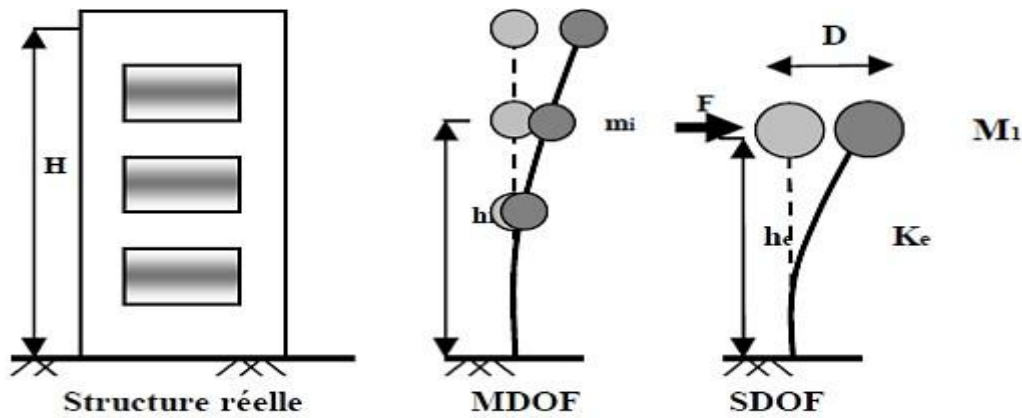


Figure III.2 : Le système équivalent d'une structure à plusieurs degrés de libertés. [37]

III.3.3 But de l'analyse Pushover

Le but de l'analyse Pushover est de décrire le comportement réel de la structure et d'évaluer les différents paramètres en termes de sollicitations et déplacements dans les éléments de la structure. L'analyse Pushover est supposée fournir des informations sur plusieurs caractéristiques de la réponse qui ne peuvent pas être obtenues par une simple analyse élastique, on cite [37] :

- L'estimation des déformations dans le cas des éléments qui doivent subir des déformations inélastiques afin de dissiper de l'énergie communiquée à la structure par le mouvement du sol.
- La détermination des sollicitations réelles sur les éléments fragiles, telles que les sollicitations sur les assemblages de contreventements, les sollicitations axiales sur les poteaux, les moments sur les jonctions poteau-poutre, les sollicitations de cisaillement.
- Les conséquences de la détérioration de la résistance des éléments sur le comportement global de la structure ce qui permet de déterminer les points forts et les points faibles de notre structure.
- L'identification des zones critiques dans lesquelles les déformations sont supposées être grandes.
- L'identification des discontinuités de résistance en plan et en élévation qui entraînent des variations dans les caractéristiques dynamiques dans le domaine inélastique.

- L'estimation des déplacements inter-étage qui tiennent compte des discontinuités de la rigidité et de la résistance qui peuvent être utilisés dans le contrôle de l'endommagement. [3]

III.3.4 Les étapes générales de la méthode Pushover

- Construction de la courbe de capacité à partir de la courbe de Pushover de la structure.
- Conversion du spectre de réponse élastique au spectre de demande (inélastique).
- Détermination du point de performance de la structure.
- Conversion du point de performance à la demande de ductilité sur chaque élément de la structure. [36].

III.4 Origine de l'analyse PUSHOVER.

L'analyse statique PUSHOVER est basée sur l'hypothèse que la réponse de la structure qui peut être assimilée à la réponse d'un système à un seul degré de liberté équivalent, ce qui implique que la réponse est fondamentalement contrôlée par un seul mode de vibration et la forme de ce mode demeure constante durant la durée du séisme.

Les chercheurs ont montré que ces hypothèses donnent de bons résultats concernant la réponse sismique (déplacement maximal) donnée par le premier mode de vibration de la structure simulé à un système linéaire équivalent. [34]

III.5 Procédure d'analyse par la méthode Pushover

L'analyse par la méthode de Pushover peut être réalisée par le contrôle la force ou du déplacement en fonction de la nature de la charge réelle et du comportement prévu de la structure. La première option, contrôle la force, est utile lorsque la charge est connue (comme le chargement gravitaire) et on s'attend à ce que la structure puisse résister à cette charge. La deuxième procédure, contrôle du déplacement, doit être utilisée quand les

spécifiées courantes sont demandées (par exemple dans le chargement sismique), où l'importance de la charge appliquée n'est pas connue à l'avance, ou lorsque la structure peut être prévue pour perdre sa résistance ou devient instable.

Certains programmes informatiques : DRAIN-2DX version non linéaire, de SAP2000, ANSYS, permettent de modéliser le comportement non linéaire et effectuer des analyses par la méthode de Pushover directement pour obtenir la courbe de capacité pour les modèles 2D ou 3D.

Quand de tels programmes ne sont pas disponibles ou que les programmes informatiques disponibles ne pourraient pas effectuer une analyse par la méthode de Pushover directement (par exemple ETABS [13], la RISA, [43], SAP90 [12]), une série d'analyses élastiques séquentielles sont effectuées et superposées afin de déterminer la courbe globale force-déplacement de la structure. Une analyse par la méthode de Pushover de contrôler le déplacement est essentiellement composé des étapes suivantes :

1. Créé de deux ou trois dimensions du modèle qui représente le comportement structural global ;
2. Des diagrammes bilinéaire ou trinéaire de charge-déformation de tous les éléments importants qui influent sur la réponse latérale sont définis ;
3. Charges par gravité (composée des charges permanentes et des charges d'exploitations) est appliquées d'abord au modèle structural ;
4. Un modèle prédéfini de charge latérale qui est distribué le long de la hauteur du bâtiment est alors appliquée ;
5. Les charges latérales sont augmentées jusqu'à une performance des éléments de sous effets combinés de la gravité et les charges latérales ;
6. L'effort de cisaillement à la base et le déplacement de la terrasse sont enregistrés dans un premier temps à partir de l'écoulement ;
7. Le modèle structural est modifié pour tenir compte la rigidité réduite des éléments ;
8. Des charges de gravité sont supprimées et un nouvel incrément de la charge latérale est appliqué au modèle structural modifié telle que la nouvelle performance des éléments. On note qu'une analyse séparée avec zéro (condition initiale) est effectuée sur le modèle de structure modifiée sous chaque incrémentation de chargement latéral. Ainsi, les forces

d'éléments à la fin d'une analyse incrémentielles des charges latérales sont obtenues en additionnant les forces de l'analyse actuelle à la somme de ceux des incréments précédents. En d'autres termes, les résultats de chaque analyse des charges latérales incrémentielles sont superposés ;

9. De même, l'incrément de la charge latérale et l'incrément de déplacement de la terrasse sont ajoutés à toutes les valeurs précédentes correspondantes pour obtenir les valeurs cumulées du cisaillement à la base et le déplacement de terrasse ;

10. Les étapes 7, 8 et 9 sont répétées jusqu'à ce que le déplacement de la terrasse atteigne un certain niveau de déformation ou la structure devienne instable ;

11. Le déplacement de la terrasse est tracé avec le cisaillement à la base pour la courbe globale de capacité (Pushover) de la structure. **[38]**

III.6 Courbe de capacité "Pushover"

L'analyse Pushover est basée sur l'hypothèse que la réponse de la structure peut être reliée à celle d'un système équivalent d'un degré de liberté. Autrement dit, la réponse est contrôlée par seulement un mode, qu'on suppose constant pendant tout le chargement [39]. Dans cette étape, la courbe de capacité obtenue a été transformée en une courbe de capacité équivalente reliant l'accélération d'une structure à un seul degré de liberté à son déplacement spectral.

Pour obtenir cette équivalence on commence par l'équation d'équilibre dynamique linéaire du système réel soumis à une accélération à sa base $\ddot{u}_g(t)$:

$$M \{\ddot{u}(t)\} + \{ \dot{u}(t) \} + K \{u(t)\} = -M \{1\} \ddot{u}_g(t) \tag{III. 2}$$

Où $\{u(t)\}$ est le vecteur de déplacement ; M , C et K et les matrices de masse, amortissement et rigidité respectivement.

Le déplacement $\{u(t)\}$ peut-être décomposé sous forme de n modes propres :

$$\{u(t)\} = \sum_n \{\phi_n\} q_n(t) \tag{III. 3}$$

Où $q_n(t)$ sont les coordonnées modales généralisées.

Substituant l'équation (III.3) dans (III.2) permet d'obtenir l'équation classique :

$$\ddot{q}_n(t) + 2 \xi_n \omega_n \dot{q}_n(t) + \omega_n^2 q_n(t) = -\Gamma_n \ddot{u}_g(t) \tag{III. 4}$$

Où ξ_n le taux d'amortissement du mode et ω_n sa pulsation ; Γ_n le facteur de participation modale donné par :

$$\Gamma_n = M^{L_{2n}} \quad (III. 5)$$

Avec :

$$L_n = \emptyset \{1\} \quad (III. 6)$$

$$M_n = \emptyset_n^t M \emptyset_n \quad (III. 7)$$

Si on fait la substitution $(t) = \Gamma_n D_n$ avec D_n le déplacement associé au mode n on obtient :

$$D(t) + 2 \xi_n \omega_n D(t) + \omega_n^2 D(t) = -\ddot{u}_g(t) \quad (III. 8)$$

L'expression des déplacements de la structure originale en fonction des déplacements modaux donne :

$$\{u(t)\} = \sum_n \emptyset_n \Gamma_n(t) \quad (III. 9)$$

Si on prend seulement le premier mode, on a donc :

$$\{u(t)\} \cong \emptyset_1 \Gamma_1 D_1(t) \quad (III. 10)$$

Dans ce cas la relation entre le déplacement ou sommet u_s et le déplacement de premier mode correspondant est donné par :

$$D_1^1 = \frac{u_s}{\emptyset_{N,1} \Gamma_1} \quad (III. 11)$$

L'effort tranchant à la base V_b peut-être approximé par :

$$(t) = \sum_n V_b^{st},(t) \cong V_b^{st,1} A_1(t) \quad (III. 12)$$

Ou A_n sont les pseudo-accélérations modales, et V_b^{st} , donné par :

$$L_2 \quad V_b^{st}, = M \text{---} n_n = M_n^* \quad (III. 13)$$

Donc,

$$L_2 \quad V_b^{st}, = M \text{---} 1_1 = M_1^* \quad (III. 14)$$

Maintenant, on peut obtenir une correspondance entre l'effort tranchant à la base de la courbe Pushover et l'accélération correspondante à un système d'un degré de liberté par la relation suivante,

$$A_1(t) = \frac{V_b(t)}{M_1} \quad (\text{III. 15})$$

Le spectre de capacité est représenté dans la figure III.3. [34]

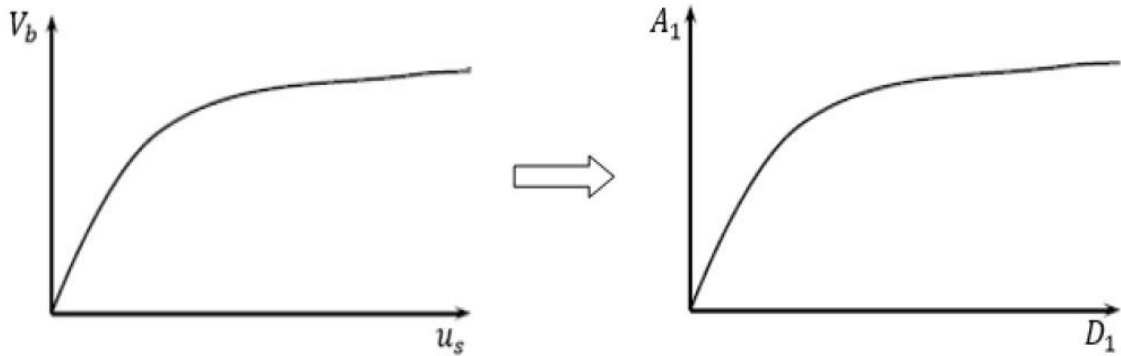


Figure III.3 : Transformation de la courbe de capacité vers le spectre de capacité

III.6.1 Niveaux d'endommagement décrits par une courbe de capacité

La première étape de conception en performance est de définir un niveau d'endommagement acceptable dû à un séisme :

Le premier niveau IO (immédiate occupancy) : comportement élastique, un état de non endommagement.

Le deuxième niveau LS (life safety) : un endommagement mineur est susceptible de se développer.

Le troisième niveau CP (collapse prévention) : un état d'endommagement avancé, sa stabilité étant en danger.

Le quatrième niveau (collapse) : effondrement de la structure, aucune capacité de résistance. [36]

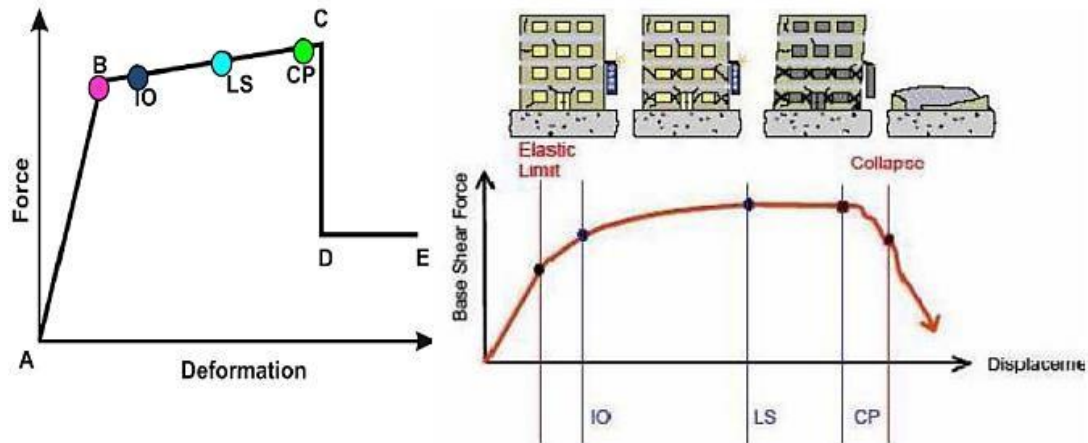


Figure III.4 : Illustration des niveaux de performances d'une structure. [36]

II.6.2 Point de performance

A partir de la courbe de capacité, il devient alors intéressant de comparer celle-ci avec la sollicitation d'un séisme. Pour considérer la demande d'un séisme, on utilise en général des Spectres de réponse en accélération ou en déplacement. Les axes de la courbe de capacité doivent donc être transformés afin d'avoir les mêmes unités :

- Réaction à la base / masse \rightarrow accélération.
- Déplacement / Facteur de participation modale \rightarrow déplacement.

Plusieurs méthodes d'assemblage des deux courbes sont applicables. L'EC 8 par exemple, permet de trouver un point de performance sur la base de la règle des déplacements égaux. Les normes américaines, par contre, prévoient des itérations avec plusieurs spectres représentant différents coefficients d'amortissement visqueux. Dans les deux cas on trouve ce que l'on appelle un « point de performance » qui permet de faire plusieurs considérations concernant le comportement de la structure face au séisme.

Selon les indications de l'EC 8, le déplacement élastique d'une structure équivalente est trouvé par le prolongement de la partie élastique de la courbe de capacité jusqu'au croisement avec le spectre (point A), (Figure III.5). Le déplacement inélastique de la structure réelle est celui qui lui correspond sur la courbe de capacité au point B. Avec cette

construction, on peut par exemple définir si la structure nécessite une augmentation de sa capacité de déformation ou bien une augmentation de sa rigidité.

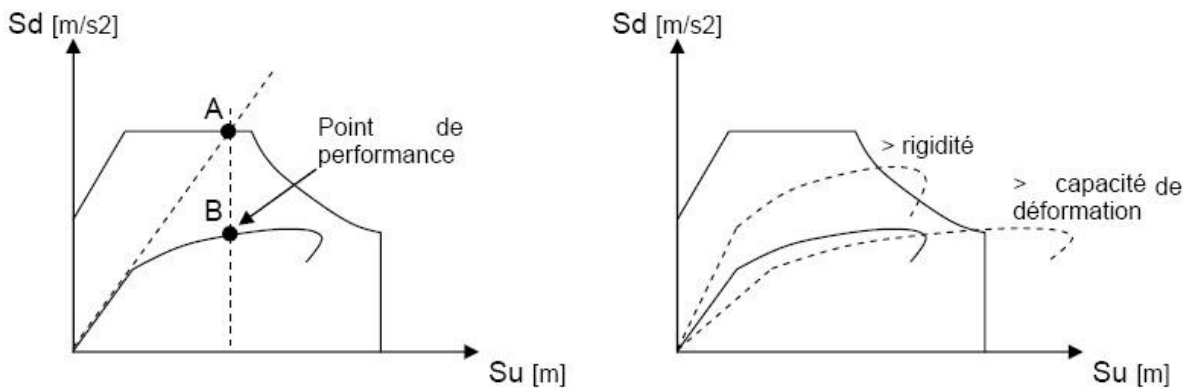


Figure II.5 : Point de performance selon EC 8 et principe d'évaluation de la courbe de capacité

Les normes américaines FEMA-273 prévoient de croiser la courbe de capacité avec plusieurs spectres. Le comportement inélastique est approché par l'accroissement du coefficient d'amortissement visqueux. L'itération consiste en principe à trouver le point d'équilibre entre ductilité demandée et amortissement requis. Le point de croisement de la courbe avec un spectre permet de définir la ductilité nécessaire à la structure (rapport entre point D et point C).

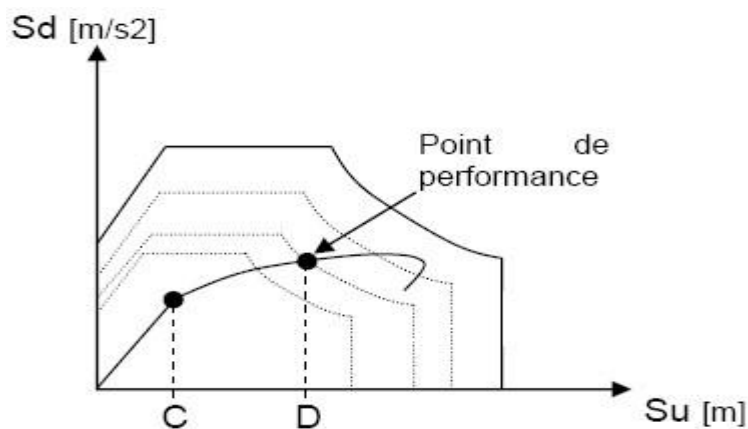


Figure III.6 : Point de performance – principe de réduction du spectre

III.7 Avantages, Inconvénients et Limites de la méthode

En ce qui concerne le renforcement des bâtiments existants, il est parfois difficile d'obtenir des données précises sur les propriétés mécaniques réelles, il est donc nécessaire de faire des hypothèses sur leur valeur selon les règles en vigueur lors de la construction des ouvrages. Exemple, Ces hypothèses seront également étayées par des enquêtes et des échantillons locaux. Outre les propriétés inhérentes au matériau, il est également nécessaire de comprendre l'évolution de ces propriétés dans le temps (dégradation du béton, corrosion de l'acier, etc.). Le comportement du matériau doit être aussi complet que possible, y compris la dégradation de la rigidité et la résistance résiduelle pendant la phase plastique. Cette étape est souvent délicate, d'autant plus que l'analyse Pushover est sensible à ces données.

L'établissement de la courbe de capacité et l'analyse modale requièrent des moyens numériques performants. Une autre difficulté de cette méthode est qu'elle n'est pas déterministe. Elle intervient dans une étape de vérification. Son utilisation en dimensionnement se fait donc de manière itérative.

En revanche, il peut s'affranchir des coefficients comportementaux. En comparant les courbes de capacité avant et après renforcement, l'impact des mesures prises peut être visualisé intuitivement. De plus, il permet de prendre en compte des phénomènes non linéaires tels que la formation de rotules plastiques ou la fissuration du béton. Pour cela, il est cependant nécessaire de pouvoir déterminer les régions où ces phénomènes vont se produire et leur ordre chronologique. Ensuite, il est nécessaire de retirer progressivement du modèle les éléments qui se sont fissurés et ne conservent pas de rigidité résiduelle. Il faut alors s'assurer que cette opération ne remet pas en cause le comportement dynamique du modèle. Par exemple, des algorithmes ont été développés pour déterminer les courbes de capacité des portiques en béton et leurs modèles bilinéaires. Certains logiciels de calcul de structure utilisent la méthode du Pushover (ex : Robot millenium, SAP).

Comme le met en évidence le règlement américain il s'agit d'une méthode statique. Il faut donc s'assurer de la bonne représentativité des efforts statiques équivalents par rapports aux efforts dynamiques .de plus comme les autres méthodes statiques, le Pushover

ne permet pas de tenir compte directement des effets du second ordre liés au caractère dynamique de la sollicitation sismique ni des dissipations d'énergie par hystérésis ou de la fatigue. Le Pushover donne donc des résultats satisfaisants lorsque le comportement de l'ouvrage est essentiellement régi par le mode fondamental. Par contre, là où la contribution des modes plus élevés est non négligeable, il convient de faire une analyse dynamique linéaire pour vérifier leur contribution. Le règlement américain donne quelques réponses à ce sujet. Le dernier stade de l'analyse est l'analyse dynamique non linéaire qui tient compte en plus de l'évolution de l'excitation dans le temps et de son caractère cyclique, ce qui permet de mettre en évidence des ruptures en chaîne par exemple.

Enfin, il convient de remarquer que la méthode du Pushover a été explicitée pour des spectres d'accélération courants et non pour des spectres locaux ou des sollicitons a grands déplacements. [35]

III.8 Conclusion

En conclusion, la méthode d'analyse non linéaire Pushover est une méthode de calcul efficace pour évaluer la capacité de résistance sismique des structures. Elle permet d'évaluer la capacité portante, la ductilité et la résistance des structures en utilisant une d'analyse statique non linéaire.

La méthode Pushover peut être utilisée pour évaluer la capacité sismique d'une structure existante ou pour la conception de nouvelles structures. Elle peut aider les ingénieurs à comprendre la performance de la structure en cas de séisme, à identifier les points faibles et à proposer des solutions de renforcement.

La méthode Pushover est plus rapide et moins coûteuse que les méthodes d'analyse dynamique non linéaire telles que l'analyse temporelle non linéaire, tout en offrant des résultats comparables. Cependant, la méthode Pushover a ses limites et peut ne pas être appropriée pour les structures complexes ou les séismes extrêmes.

Enfin, la méthode d'analyse non linéaire Pushover est une méthode précieuse pour évaluer la capacité de résistance sismique des structures, en particulier pour les structures simples ou modérément complexes. Elle peut aider les ingénieurs à prendre des décisions éclairées en matière de conception et de renforcement des structures pour minimiser les risques de dommages en cas de séisme.

CHAPITRE IV

MODÉLISATION ET ANALYSE

IV.1 Introduction :

Dans cette partie, on va exposer nos résultats issus de l'analyse Pushover cette analyse est une analyse statique non linéaire conçue pour étudier le comportement des structures existantes vis-à-vis du séisme, elle est basée sur le suivi chronologique de la formation des rotules plastiques dans une structure soumise à un chargement vertical et un chargement latéral (séisme) croissant jusqu'à effondrement. Les différents résultats obtenus permettent d'apprécier la vulnérabilité de la structure.

Pour ce faire, nous utilisons le logiciel " SAP2000 ", La modélisation et l'analyse selon les étapes suivantes :

- Modélisation et analyse élastique linéaire de la structure.
- Vérification et ferrailage de la structure.
- Définition du comportement non linéaire des éléments.
- Définition du chargement de l'analyse statique non linéaire (Pushover).
- Analyse statique non linéaire et extraction de la courbe de capacité

IV.2 Modélisation des structures :

IV.2.1 Présentation et description de l'ouvrage :

Le présent projet consiste à la réalisation d'un 100 logement Boussaâda wilaya de M'sila. Il sera implanté de la commune Boussaâda wilaya de M'SILA. Cette ville est classée par le RPA99/version 2003 comme une zone de moyenne sismicité (zone I).

Les deux structures étudiées est un bâtiment en béton armé en (R+4) à usage d'habitation, La première est une structure portique auto stable (poteau + poutre) et la deuxième comporte des voiles de 20 cm de largeur.

IV.2.2 Caractéristique géométrique :

L'ouvrage a les caractéristiques géométriques suivantes :

Tableau IV.1 : Les caractéristiques géométriques des bâtiments étudiés.

Structure	L x (m)	L y (m)	H (RDC) (m)	H De chaque étage (m)	H Totale (m)
Auto stable	21,66	9,30	3,06	3,06	15,3
Mixte	21,66	9,30	3,06	3,06	15,3

IV.2.3 Données du site:

Le bâtiment est implanté dans une zone classée par le RPA99v2003 comme Zone de faible sismicité (zone I).

- L'ouvrage appartient au groupe d'usage 2.
- Le site est considéré comme ferme (S2).
- Contrainte admissible du sol $\sigma = 2$ bars.

IV.2.4 Conception structurale :

Les planchers sont de type de **(16+4) cm** d'épaisseur considérée comme rigide et indéformable dans leurs plans. Les planchers terrasses seront considérer comme inaccessibles.

L'étude sismique sera réalisée à l'aide de logiciel d'analyse des structures **SAP2000, V16**

IV.2.5 Les plans de notre structure :

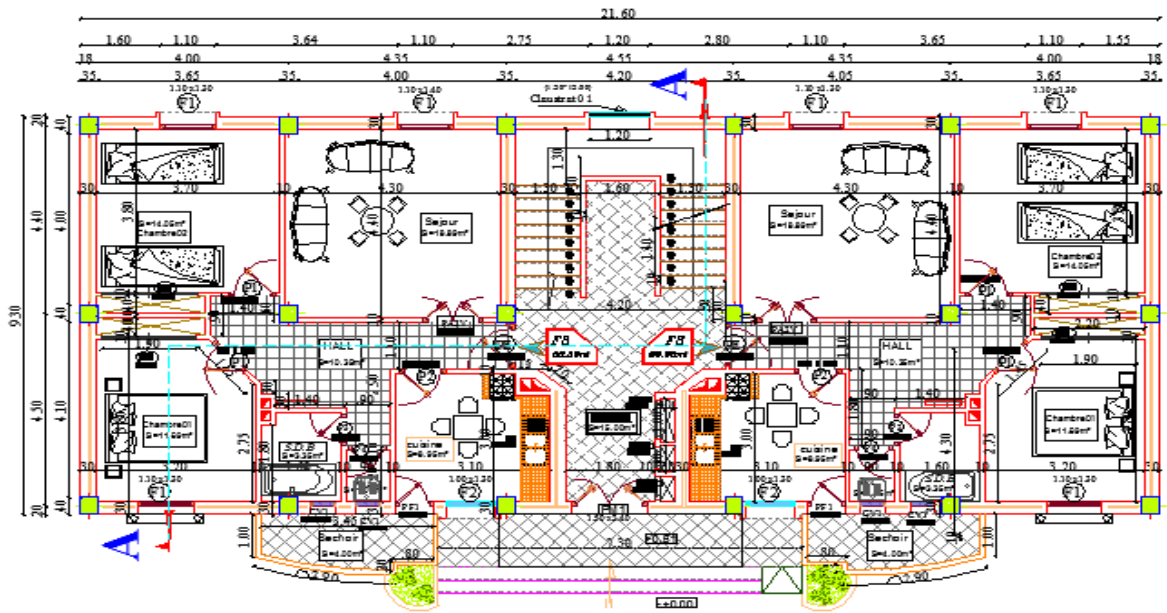


Figure IV.1 : Plan d'architecte RDC et 1-2-3 éme étages

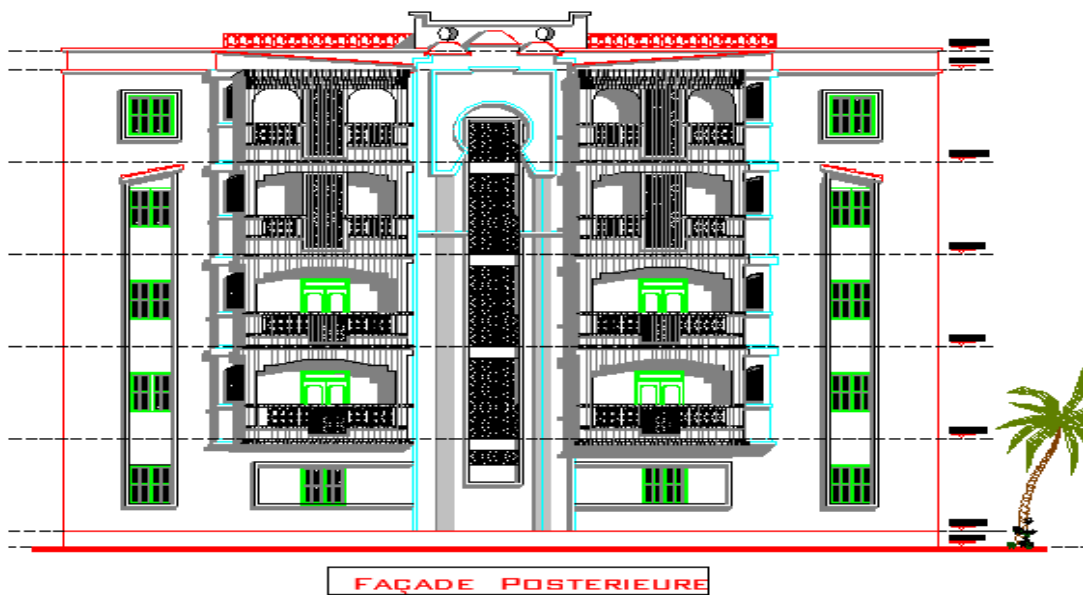
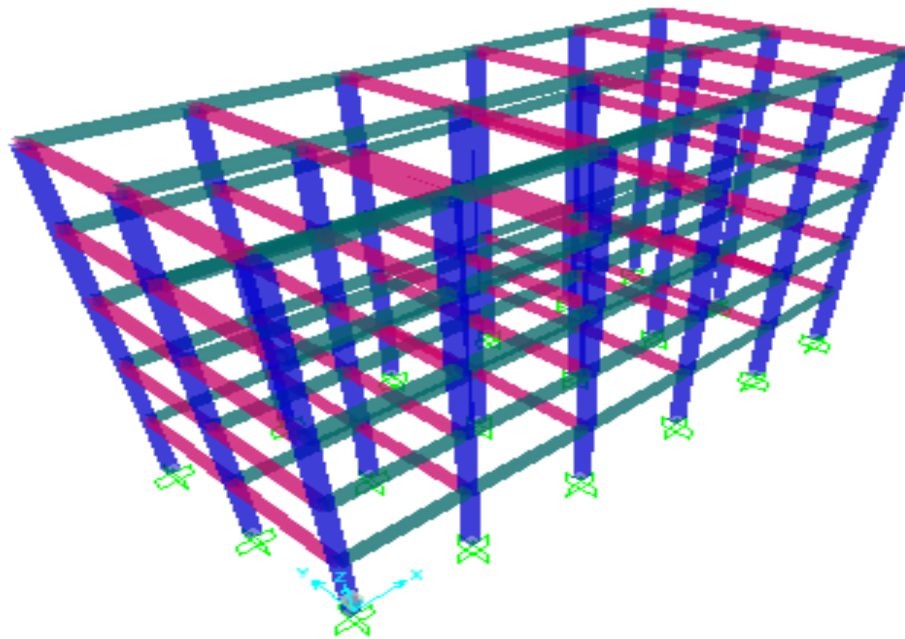
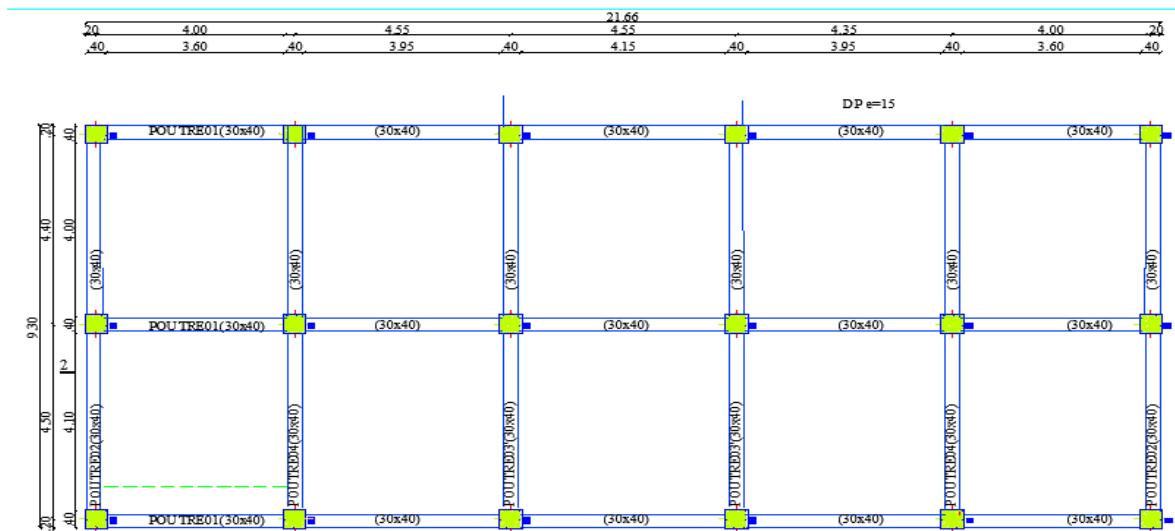


Figure IV.2 : Plan d'architecte de façade



Vue en 3D



Vue en plan

Figure IV.3 : Géométrie de la structure portique auto stable.

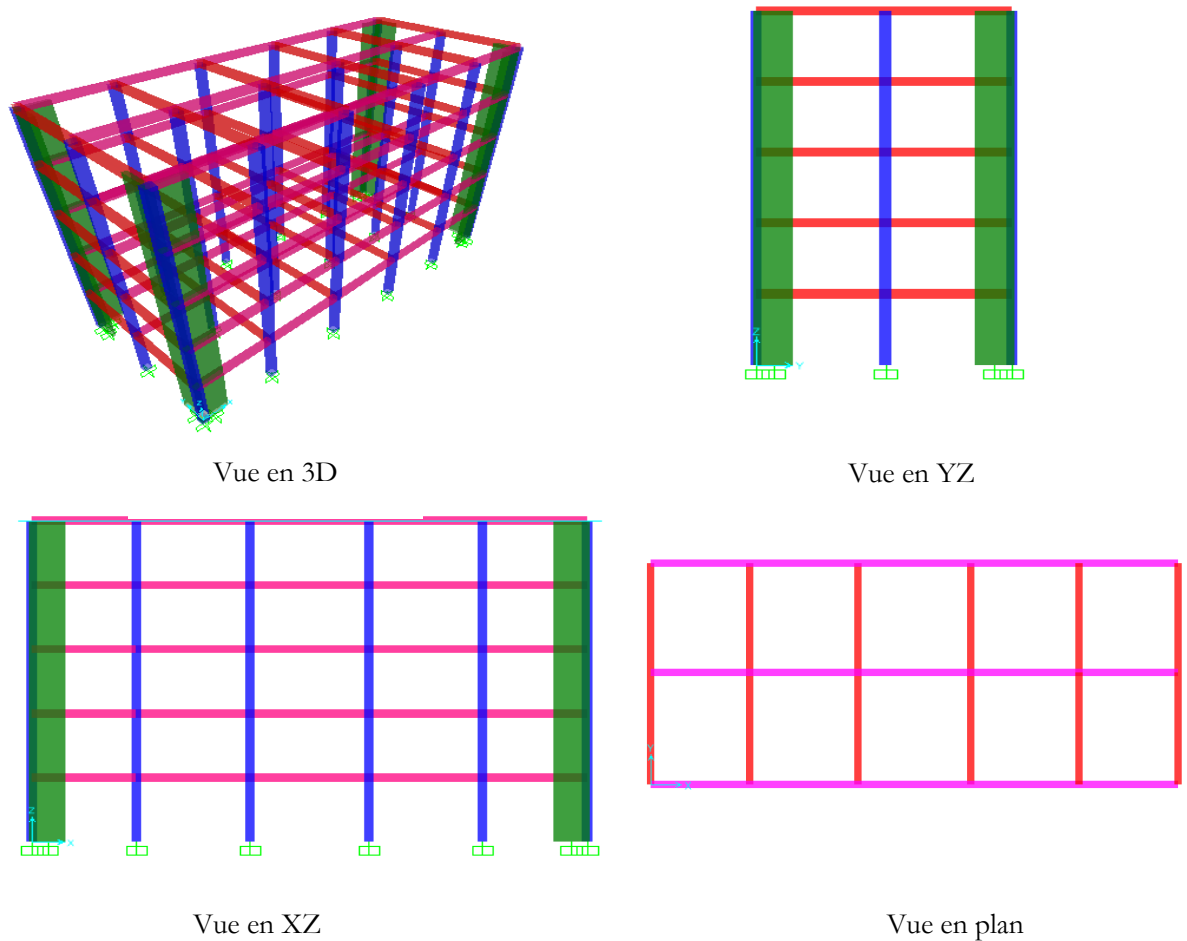


Figure IV.4 : Géométrie de la structure Mixte

IV.2.6 Les règles utilisées :

- BAEL91 [40]
- RPA99 version 2003 [7]
- DTR B.C 2.2 charges permanentes et charges d'exploitation [41]

IV.2.7 Matériaux utilisés :

Le béton armé se compose de béton et d'armatures, il ne représente pas une bonne résistance à la traction ou au cisaillement, l'acier offre une bonne résistance aux efforts de traction et de compression, de l'association de ces deux matériaux, il résulte un matériau composite dans lequel chacun répond au mieux aux sollicitations auxquelles il est soumis.

➤ **Béton :**

On appelle béton le matériau constitué par le mélange, dans les proportions Convenables de ciment, de granulats, d'eau et éventuellement des produits d'addition (Adjuvants). C'est le matériau de construction le plus utilisé au monde, que ce soit en Bâtiment ou en travaux publics.

- f_{c28} : Résistance caractéristique à la compression : $f_{c28}=25000 \text{ KN/m}^2$
- Poids volumique : $\rho= 25 \text{ KN/m}^3$
- E_b : Module de Young: $E_b=32164195 \text{ KN/m}^2$
- f_{bu} : Contrainte limite du béton en compression « ELU »
- $f_{bu}=0.85 f_{cj} / \theta \gamma_b$ est la valeur de calcul de la contrainte du béton.
- Le coefficient dépend de la durée d'application des charges :
 $\theta=1$ si durée >24 h. $\theta=0.9$ si 1 h > durée < 24 h.
- γ_b le coefficient de sécurité : $\gamma_b=1.5$ (cas courants)
 $\gamma_b=1.15$ (combinaisons accidentelles).
- Coefficient de poisson : $\nu=0.2$
- f_{t28} : résistance limite en traction du béton
- ϵ_{be} : déformation limite élastique $\epsilon_{be}=2 \text{ ‰}$
- ϵ_{bu} : déformation ultime $\epsilon_{bu}=3,5 \text{ ‰}$

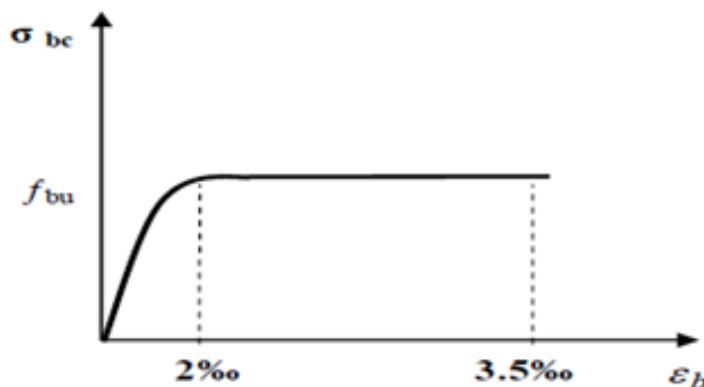


Figure IV.5 : Diagramme de contrainte – déformation de béton

➤ **Acier :**

L'acier est un alliage fer-carbone en faible pourcentage, son rôle est d'absorbé les efforts de traction, de cisaillement et de torsion, le module d'élasticité longitudinal de l'acier est pris égale à : $E_s = 200\ 000\ \text{MPa}$

- Rond lisse de nuance FeE235 pour les armatures transversales.
- Haute adhérence de nuance FeE400 pour les armatures longitudinales.

- E_s : Module d'élasticité de l'acier.

- F_e : Résistance limite élastique de l'acier Haute adhérence.

- f_{es} : Résistance limite élastique de l'acier Rond lisse.

- ϵ_{se} : Déformation limite élastique.

- ϵ_{su} : Déformation ultime

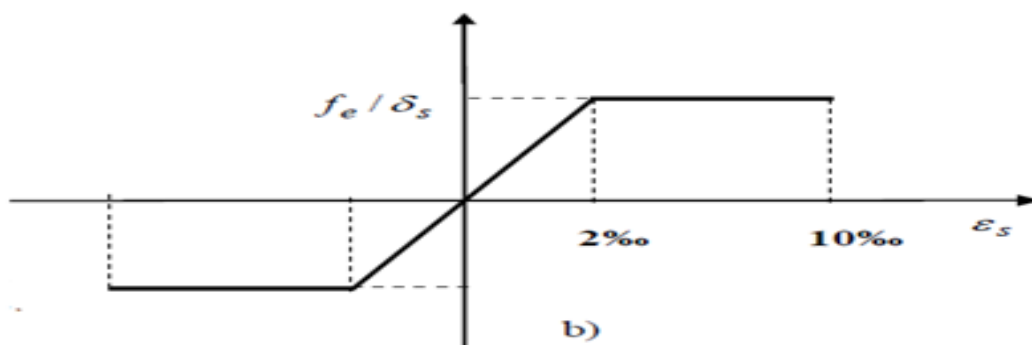


Figure IV.6 : Diagramme de contrainte – déformation d'acier

Tableau IV.2 : Propriété de l'acier en fonction du type.

Désignation	Fe (MPa)	$\epsilon_{su} \%$	$\epsilon_{su} \%$	E_s (MPa)
Fe E235 Rond lisse	235	2	10	$2.1 \cdot 10^5$
Fe E400 (HA)	400	2	10	$2.1 \cdot 10^5$

IV.2.8 Pré dimensionnement des sections (poutres et poteaux, voile)

(Selon BAEL et vérification selon RPA 99 V/2003) :

- **Les poutres :**

Les poutres seront pré dimensionnées selon les formules empiriques données par le BAEL91 :

h : hauteur de poutre est donnée par la formule suivant :

$$\frac{L}{15} \leq h \leq \frac{L}{10}$$

L : longueur de la poutre.

La largeur b de la poutre est donnée comme suit :

$$0.4h \leq b \leq 0.7h$$

Les poutres doivent respecter les dimensions

(RPA/version 2003 article 7.4.3.1)

$$B \geq 20\text{cm} ; h \geq 30\text{cm} ; h/b \leq 4.0$$

$$b_{max} \leq 1,5h + b_1$$

- **Les poteaux :**

Le pré dimensionnement des poteaux est fait à l'ELS en compression simple en considérant un effort N qui sera appliqué sur la section du béton du poteau le plus sollicité ; Cette section transversale est donnée par la relation suivante :

$$B \geq N/\sigma_{bc}$$

Avec :

B : Section transversale du poteau.

$$N = G + Q$$

N : Effort de compression repris par le poteau le plus sollicité.

G : Charge permanente.

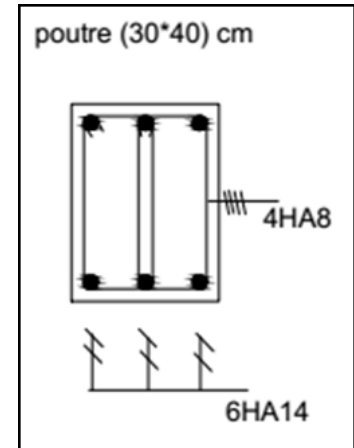


Figure IV.7. Dimension des poutres

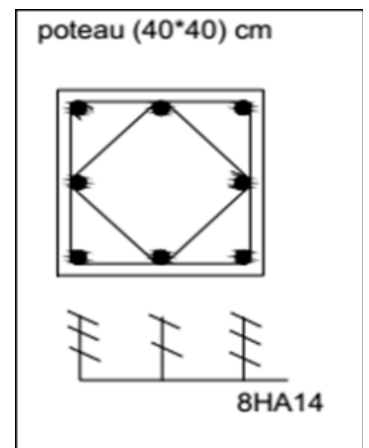


Figure IV.8. Dimension des poteaux

Q : surcharge d'exploitation.

σ_{bc} : Contrainte limite de service du béton en compression.

$$\sigma_{bc} = 0,6 \cdot f_{c28}. \quad (\text{IV.2})$$

$$\sigma_{bc} = 0,6 \times 25 = 15 \text{ MPA}. \quad (\text{IV.3})$$

À l'état limite ultime de résistance, le règlement RPA/version 2003 article 7.4.3.1 ; stipule que dans le but d'éviter ou limiter le risque de rupture fragile d'un poteau en béton armé (Éclatement ou écrasement du béton) sous sollicitation d'ensemble dues au séisme, l'effort normal de compression de calcul, noté N_d , exprimé sous forme réduite (effort normal réduit) est limité par la condition suivante :

$$\frac{N_d}{B_c f_{c28}} \leq 0.30$$

B_c : Section de béton du poteau.

f_{c28} : Résistance caractéristique à la compression du béton à 28 jours ; dans notre cas égale 25Mpa.

Min (b, h) \geq 25cm

- **Les Voiles :**

Les voiles sont des éléments rigides en béton armé coulés sur place ; ils sont destinés d'une part à assurer la stabilité de l'ouvrage sous l'effet de chargement horizontal, d'autre part à reprendre les charges verticales.

D'après l'article 7.7 du RPA 99 version 2003 le pré dimensionnement des voiles se fera comme suite :

- **L'épaisseur du voile « a »** : Elle est déterminée en fonction de la hauteur libre d'étage (h_e) et la condition de rigidité aux extrémités.

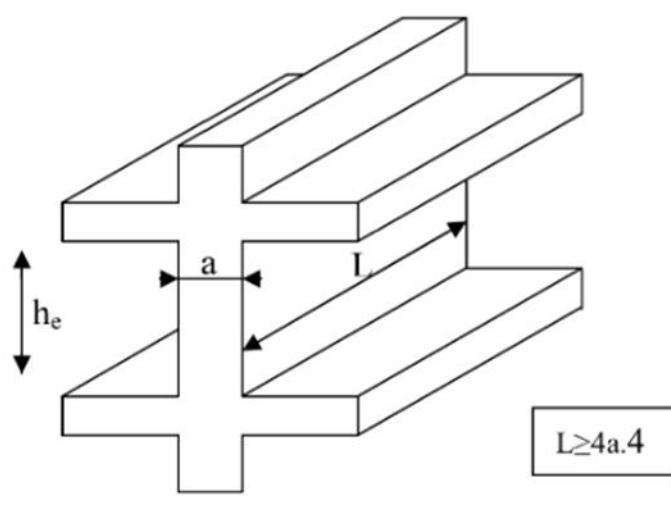


Figure IV.9 : Coupe de voile en élévation.

L'épaisseur minimale est de 15 cm. De plus, l'épaisseur doit être déterminée en fonction de la hauteur libre d'étage h_e et des conditions de rigidité aux extrémités.

On adopte une épaisseur des voiles = **20 cm**. Dans ce cas les voiles reprennent au plus 20% des sollicitations dues aux charges verticales et la totalité des sollicitations dues aux Charges horizontales (vérification. Voir l'annexe) [6].

IV.2.8 Définition les charges et les surcharge :

Les charges que nous allons définir dans cette analyse sont de deux types : les charges gravitaires et les charges latérales.

Les charges gravitaires sont les charges permanentes (G), ainsi que les charges

D'exploitation (Q) multipliées par leur coefficient de pondération ' β ', bâtiment d'habitation. $\beta=0,2$

$$G=5.4 \text{ KN/m}^2$$

$$Q=1.5 \text{ KN/m}^2$$

$$\text{Charges gravitaires } W_i = W_{Gi} + \beta W_{Qi}$$

$$\text{Poids total de la structure : } W = \sum W_i n_i$$

Tableau IV.3 : Les valeurs des charges gravitaires.

Structure	WG (KN)	WQ (KN)	β	W (KN)
Auto stable	9459,59	1429,51	0,2	9745,49
Mixte	10539,89	1429,51	0,2	10825,79

Les charges latérales dans une direction horizontale définies dans ces études sont présentées dans les tableaux. La distribution de la charge appliquée en chaque étage on utilise l'équation (IV.6).

$$F_i = \frac{w_{ih}}{\sum_{i=1}^n w_{ih}} V_b \quad \text{Avec :}$$

F_i : Force appliquée en chaque niveau

V_b : Pseudo force sismique

$$V_b = A.D.Q.W / R$$

Tableau IV.4 : Les données sismiques.

Structure	Portique	Mixte
Coefficient d'accélération de zone	A= 0,10	A= 0,10
Facture d'amplification dynamique moyenne	D= 2.20	D=1.9
Facture de qualités	Q= 1	Q= 1
Coefficient de comportement global de la structure	R= 3.5	R= 5
Poids totaux de la structure	W=9745,49KN	W=10825,79 KN
Force sismique totale appliquée à la base	V _b =612,57 KN	V _b =411,38 KN

Tableau IV. 5 : Distribution des charges latérales.

Structure	Niveau	h_i (m)	W_i (KN)	$W_i \cdot h_i$ (KN.m)	$\frac{W_i h_i}{\sum_{i=1}^n W_i h_i}$	V_b (KN)	F_i (KN)
Portique Auto stable	RDC	3.06	9745,49	29821,19	0.066	612,57	40,42
	1 ^{er}	6.12	9745,49	59642,39	0.133	612,57	81,47
	2 ^{ème}	9.18	9745,49	89463,59	0.200	612,57	122,51
	3 ^{ème}	12.24	9745,49	119284,79	0.266	612,57	162,94
	4 ^{ème}	15.3	9745,49	149105,99	0.333	612,57	203,98
Mixte	RDC	3.06	10825,79	33126,91	0.066	411,38	27,15
	1 ^{er}	6.12	10825,79	66253,83	0.133	411,38	54,71
	2 ^{ème}	9.18	10825,79	99380,75	0.200	411,38	82,27
	3 ^{ème}	12.24	10825,79	132507,66	0.266	411,38	109,42
	4 ^{ème}	15.3	10825,79	165634,58	0.333	411,38	136,98

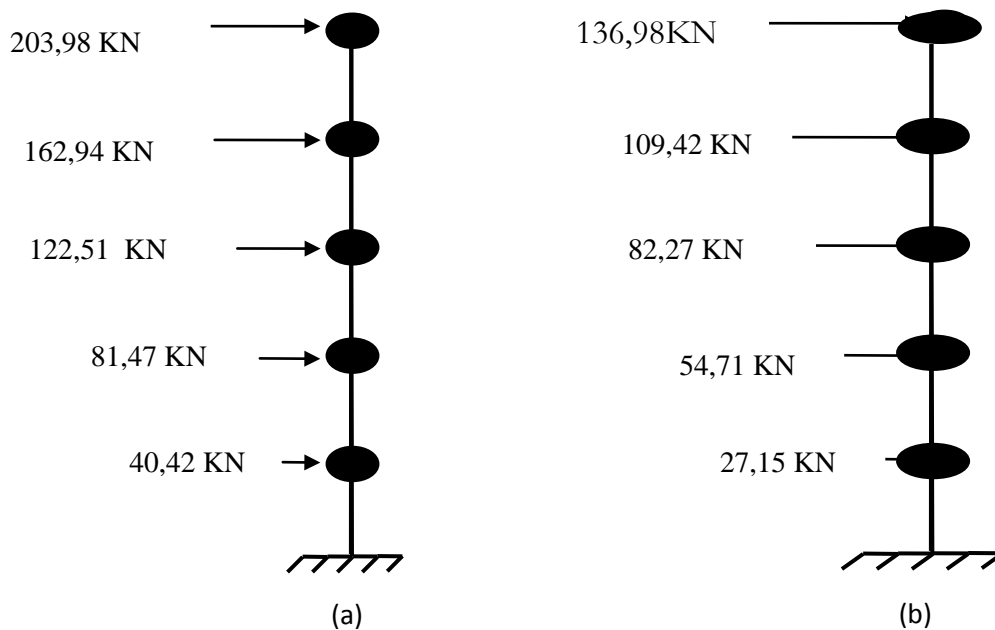


Figure IV.10 : Distribution des charges latérales des structures
a) pour la structure auto stable et b) pour la structure Mixte.

IV.3 Loi de comportement non linéaire de la structure :

IV.3.1 Loi de comportement non linéaire des poutres et poteaux :

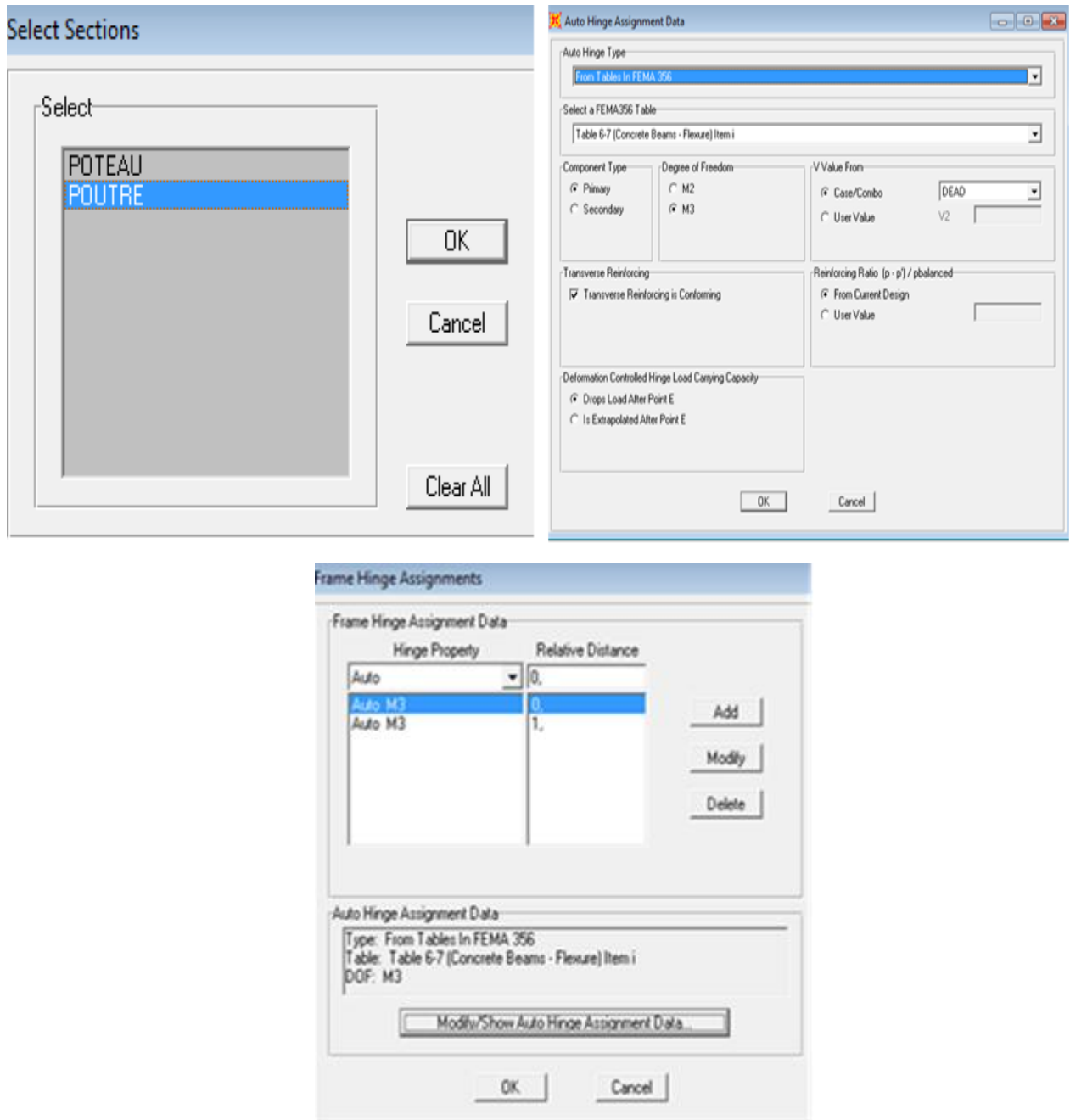
Le comportement non linéaire des poutres et des poteaux est représenté par l'attribution concentrée des rotules plastiques aux extrémités des éléments est traduit par l'introduction de rotules plastiques "**Plastic Hinge**" aux niveaux des sections susceptibles de se plastifier. Des rotules de type **moment (M2 et M3)**, **cisaillement (V2 et V3)**, **effort normal (P)**, **Torsion (T)**, peuvent être définies le long des éléments linéaires, par ailleurs le logiciel offre aussi la possibilité de définir des rotules qui prennent en compte le couplage **effort normal-moment (PMM)**

Pour notre modèle de calcul, nous allons introduire dans les poutres et les poteaux des rotules plastiques avec des lois de comportements définies par défaut par le logiciel comme suit :

- **Poutres** : Rotules de flexion (M3), cisaillement (V2).
- **Poteaux** : Rotules de flexion (PM2M3), cisaillement suivant axe 2-2 (V2), Cisaillement suivant axe 3-3 (V3).

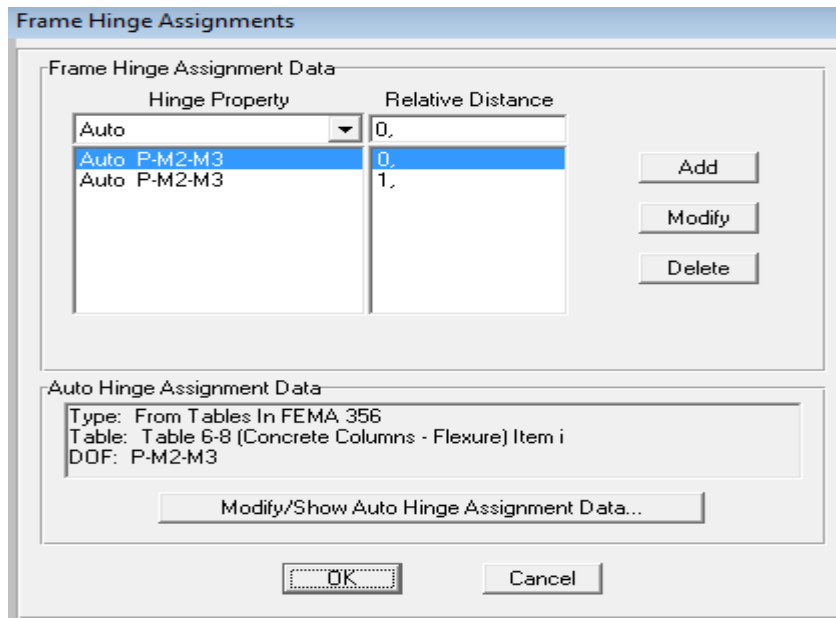
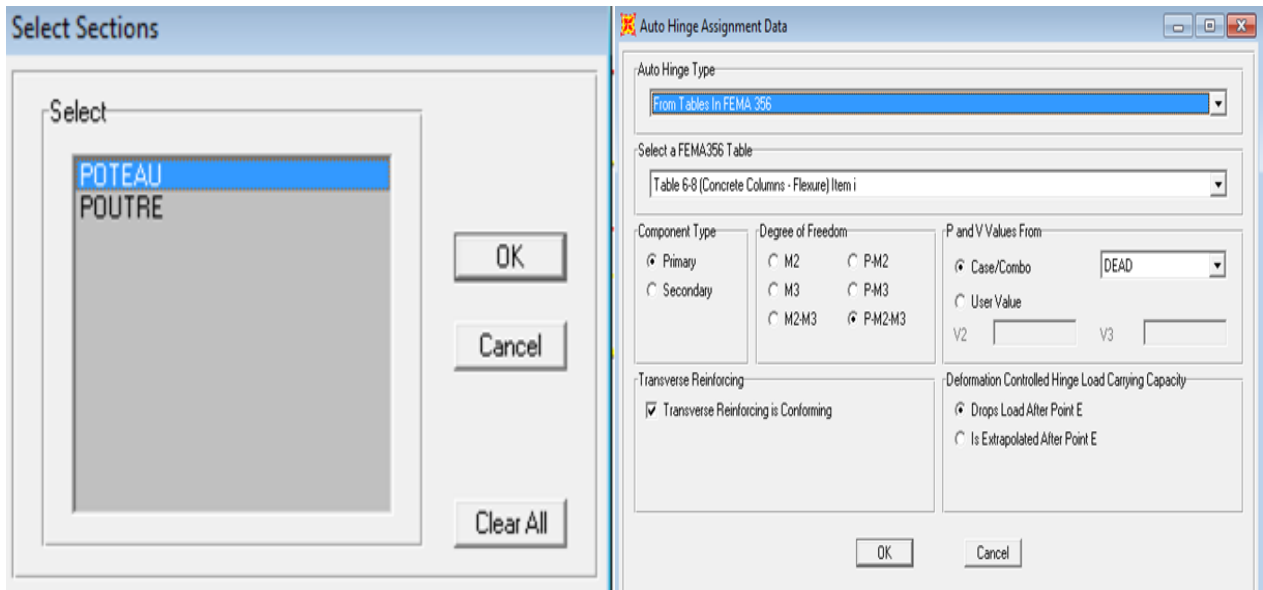
Les propriétés des différents types de rotules plastiques définies par défaut par le logiciel sont extraites des règlements américains **ATC40** et **FEMA 356**. Pour chaque type de rotule, le comportement non linéaire est défini par un modèle idéalisé, représenté par une courbe force- déformation.

Dans la fenêtre qui apparaît (**Figure IV.11**), pour chaque de type de rotule choisie "**Hinge Property**" , on introduit dans la case "**Relative Distance**" les valeurs des rapports (0) et (1) qui correspondent aux extrémités des poutres (Nœud).



Figures IV.11: Introduction des rotules plastiques des poutres

Dans la fenêtre qui apparaît (**figures IV.12**), Pour chaque type de rotule choisie "Frame Hinge Assignments", on introduit dans la case "Relative Distance" les valeurs des rapports (0) et (1) qui correspondent aux extrémités des poteaux (Nœud).



Figures IV.12 : Affectation des rotules plastiques aux poteaux

Les niveaux de dommage qui contrôlent la loi de comportement des rotules plastiques, définis précédemment sont illustrés par la **figure IV.13**.

Frame Hinge Property Data for M3 - Moment M3

Edit

Displacement Control Parameters

Point	Moment/SF	Rotation/SF
E-	-0,2	-0,025
D-	-0,2	-0,015
C-	-1,1	-0,015
B-	-1	0
A	0	0
B	1,1	0,015
C	1,1	0,015
D	0,2	0,015
E	0,2	0,025

Symmetric

Type

Moment - Rotation

Moment - Curvature

Hinge Length

Relative Length

Load Carrying Capacity Beyond Point E

Drops To Zero

Is Extrapolated

Scaling for Moment and Rotation

Use Yield Moment

Moment SF Positive Negative

Use Yield Rotation (Steel Objects Only)

Rotation SF Positive Negative

Acceptance Criteria (Plastic Rotation/SF)

Immediate Occupancy

Positive Negative

Life Safety

Positive Negative

Collapse Prevention

Positive Negative

Show Acceptance Criteria on Plot

OK Cancel

Figure IV.13 : Loi de comportement de rotule de cisaillement de type M3

IV.3.2 Loi de comportement non linéaire des voiles :

La modélisation non linéaire des voiles peut être efficacement effectuée en utilisant des modèles analytiques et numériques basées sur une approche **macroscopique**. Dans les approches habituelles de modélisation non linéaire, le voile est modélisé par un élément **“Poteau-Poutre”** équivalent situé sur l’axe central du voile. Ce modèle se compose d’un seul élément flexionnel élastique avec des rotules plastiques placées aux extrémités pour définir le comportement non linéaire des zones critiques, les poutres supérieures et inférieures sont considérées infiniment rigides.

Dans les approches habituelles de modélisation non linéaire, le voile est modélisé par un élément **“Poteau-Poutre”** équivalent situé sur l’axe central du voile. Ce modèle se compose d’un seul élément flexionnel élastique avec des rotules plastiques placées aux extrémités pour

définir le comportement non linéaire des zones critiques, les poutres supérieures et inférieures sont considérées infiniment rigides. [42]

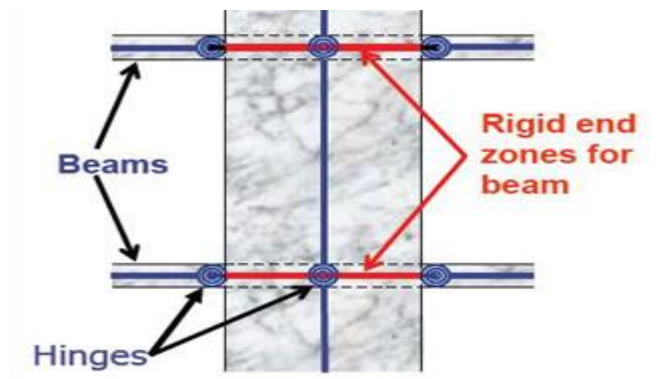


Figure IV.14 : Modèle "Poteau-Poutre équivalent".

La loi de comportement non linéaire en flexion du voile peut à présent être introduite dans le logiciel (figure IV .15), comme suit :

Frame Hinge Property Data for M3 - Moment M3

Edit

Displacement Control Parameters

Point	Moment/SF	Rotation/SF
E-	-0,2	-0,025
D-	-0,2	-0,015
C-	-1,1	-0,015
B-	-1	0
A	0	0
B	1,	0,
C	1,1	0,015
D	0,2	0,015
E	0,2	0,025

Symmetric

Load Carrying Capacity Beyond Point E

Drops To Zero

Is Extrapolated

Scaling for Moment and Rotation

Use Yield Moment Moment SF Positive Negative

Use Yield Rotation (Steel Objects Only) Rotation SF 1. Positive Negative

Acceptance Criteria (Plastic Rotation/SF)

Immediate Occupancy Positive Negative

Life Safety Positive Negative

Collapse Prevention Positive Negative

Show Acceptance Criteria on Plot

Figure IV.15 : Exemple loi de comportement (M - θ) voile (0.2mx1.2m) ferrillé en double nappe (T12/10cm) soumis à un effort normal de compression.

IV.4 Résultats et comparaisons :

IV.4.1 Résultats d'analyse statique non linéaire (Pushover) :

Les courbes force -déplacement (effort tranchant à la base –déplacement au sommet de la structure) déduites du calcul numérique pour la structure auto stable sont présentées dans les figures IV.13, IV.14 et pour la structure mixte sont présentées dans les figures IV15, IV16 pour le sens longitudinal (x) et le sens transversal (y) respectivement. En général, ces courbes de capacité comportent une phase élastique linéaire suivie d'une phase non linéaire correspondant à la formation des rotules plastiques, jusqu'au moment de la rupture.

IV.4.1.1 Résultats de Structure portique:

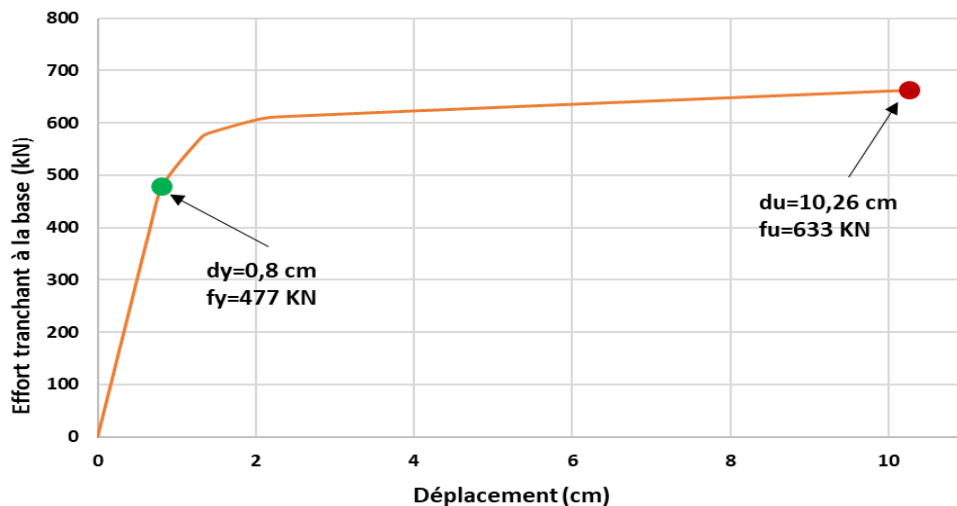


Figure IV. 16: Courbe de capacité de la structure portique : effort tranchant à la base - déplacement au sommet selon le sens longitudinal (x).

Remarque 1 :

D'après la courbe de capacité de Pushover

- $dy=0.8$ cm et $f_y= 477$ kN ; $du=10.26$ cm et $f_u=633$ kN
donc la ductilité de la structure portique selon de sens x-x **12.36**

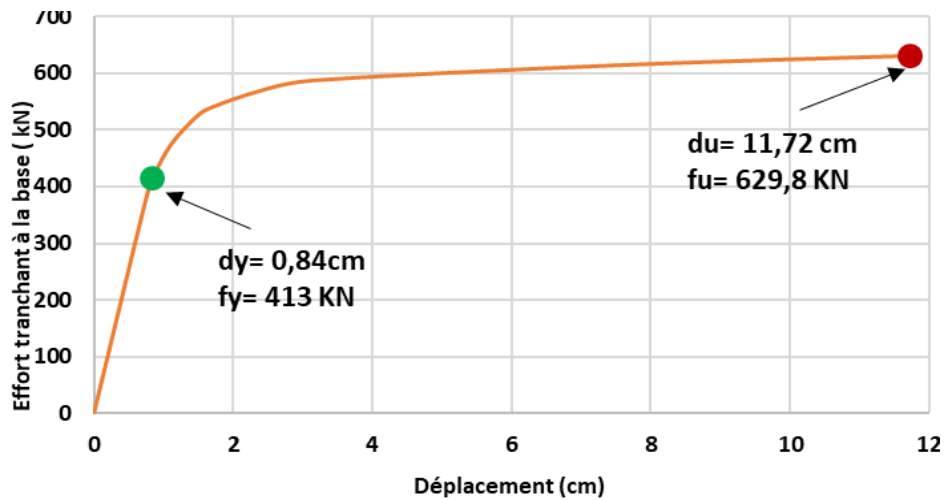


Figure IV.17 : Courbe de capacité de la structure portique : effort tranchant à la base - déplacement au sommet selon le sens transversal (y).

IIV.4.1.2 Structure Mixte

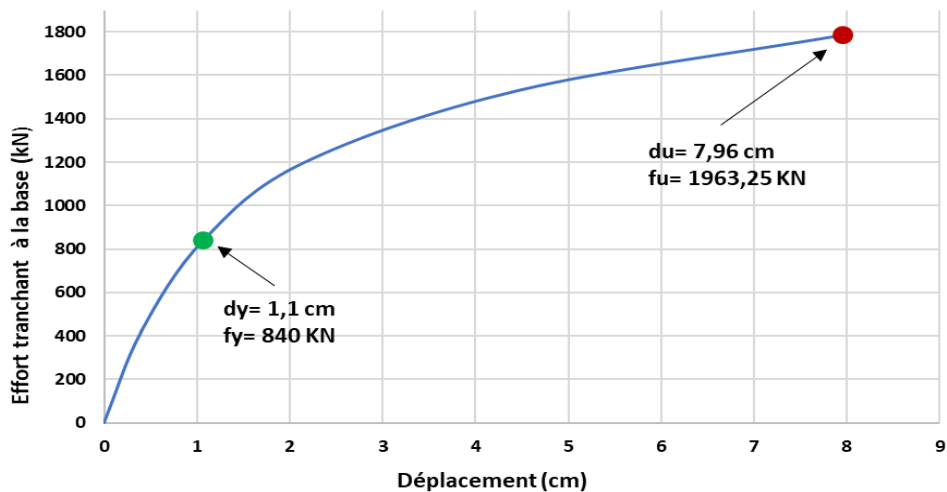


Figure IV.18 : Courbe de capacité de la structure mixte : effort tranchant à la base - déplacement au sommet selon le sens longitudinal (x).

Remarque 3 :

D'après la courbe de capacité de Pushover

- $dy=1.1\text{cm}$ et $fy= 840\text{ kN}$; $du=7.96\text{ cm}$ et $fu=1963.25\text{ kN}$
Donc la ductilité de la structure mixte selon de sens x-x est **7.1**

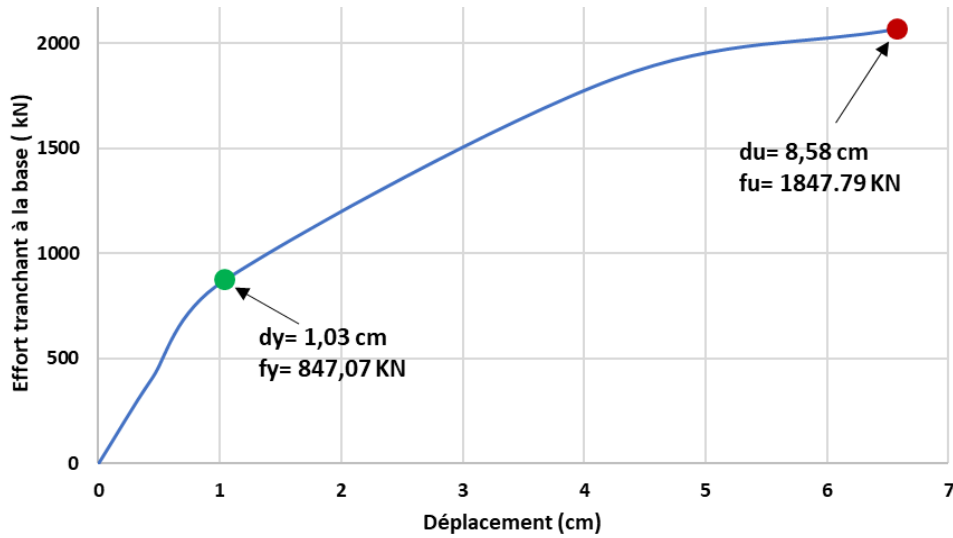


Figure IV.19: Courbe de capacité de la structure mixte : effort tranchant à la base - déplacement au sommet selon le sens transversal (y).

Remarque 4 :

D'après la courbe de capacité de Pushover

- $dy=1.03$ cm et $f_y= 847.07$ KN ; $du=8.58$ cm et $f_u=1847.79$ KN

Donc la ductilité de la structure mixte selon de sens y-y est **8.38**

IV.4.1.3 Comparaison entre la structure portique et la structure mixte :

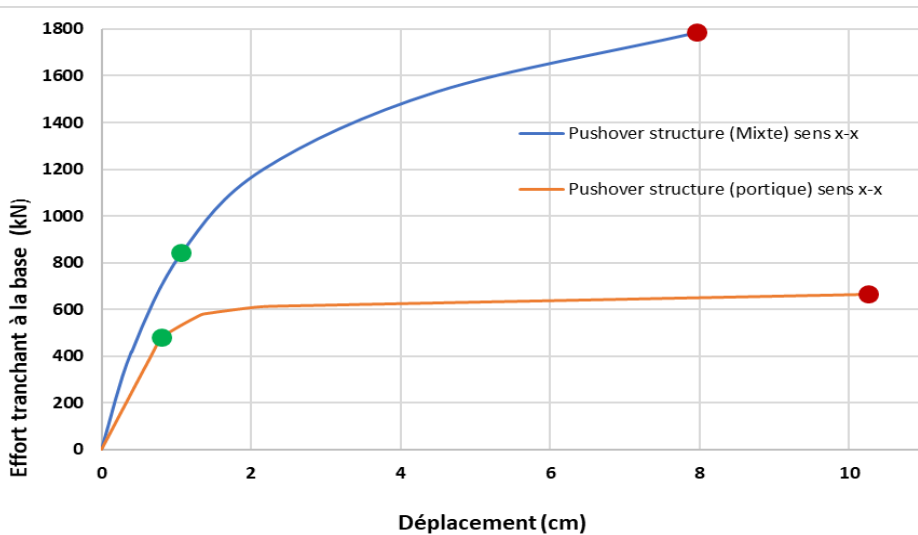


Figure IV. 20 : Comparaison des Courbes de capacités de structure portique avec structure mixte (effort tranchant à la base - déplacement au sommet selon le sens longitudinal x).

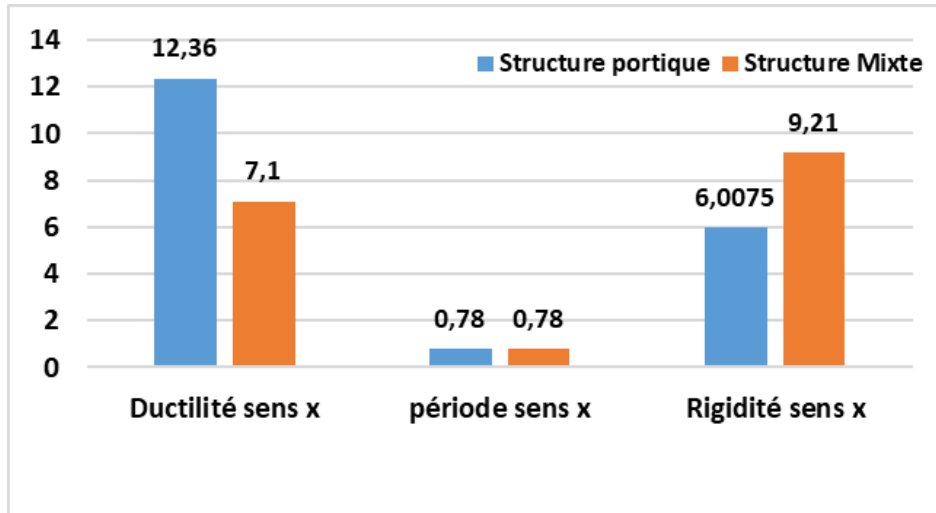


Figure IV. 21 : Comparaison des résultats de la structures portique et mixte selon le sens longitudinal x.

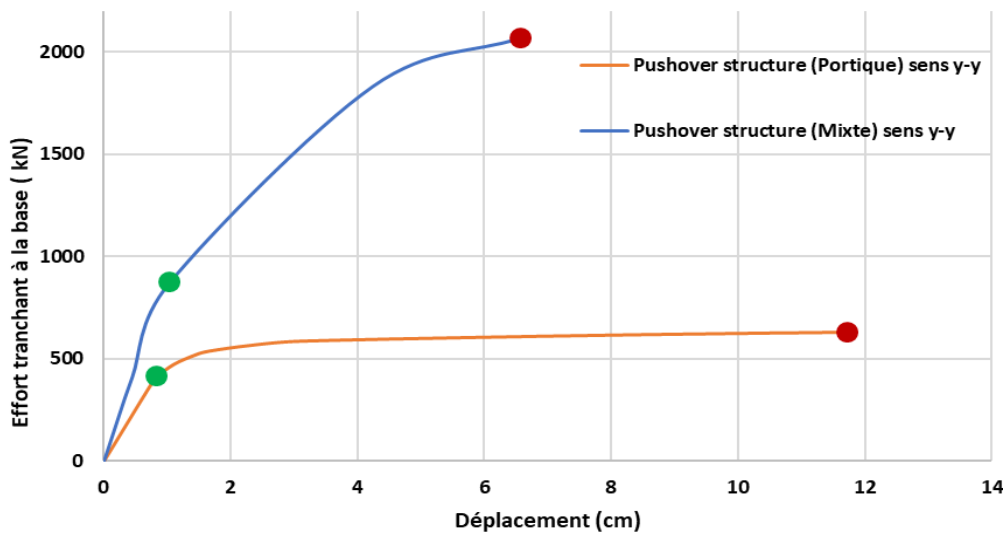


Figure IV. 22 : Comparaison des Courbes de capacités de structure portique avec structure mixte (effort tranchant à la base - déplacement au sommet selon le sens transversale y).

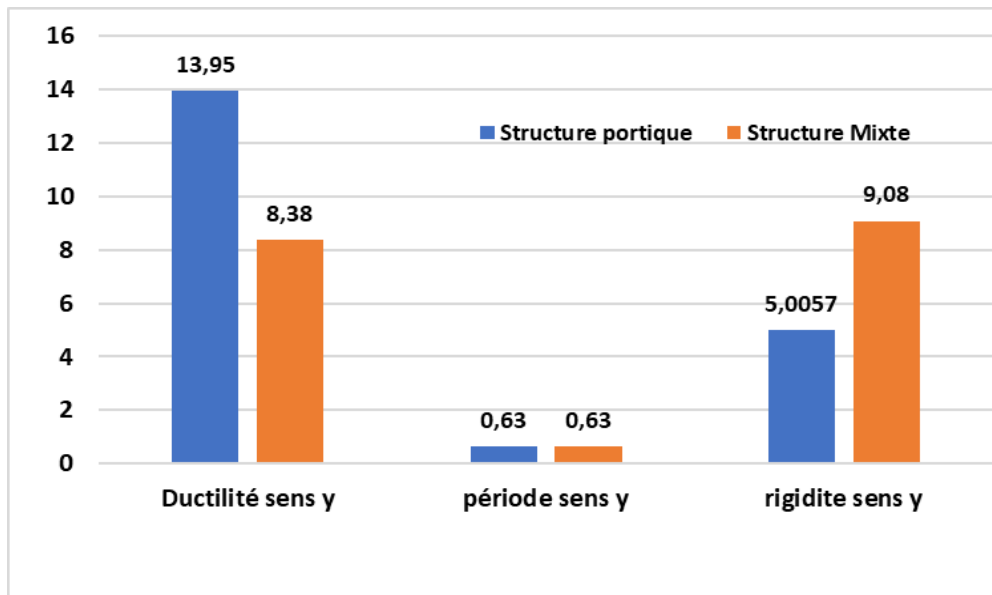


Figure IV. 23 : Comparaison des résultats de la structures portique et mixte selon le sens longitudinal y.

Tableau IV.6: Résultats d’efforts tranchants, déplacements et ductilités

Structure	Portique		Mixte	
	Sens (x)	Sens (y)	Sens (x)	Sens (y)
Effort élastique F_y (KN)	477	413.36	840.85	847.07
Déplacement élastique D_y (cm)	0.83	0.84	1.12	1.03
Effort Rupture F_u (KN)	633.36	629.81	1963.25	1847.79
Déplacement ultime D_u (cm)	10.26	11.72	7.96	8.58
Ductilité (μ)	12.36	13.95	7.1	8.38
Période (s)	0.78	0.78	0.63	0.63
Rigidité K_i (KN/m)	60075.01	50057.39	92105.66	90831.71

IV.4.2 Comparaison des résultats

D'après le tableau précédent nous pouvons remarquer que :

IV.4.2.1 Pour la structure portique auto stable :

➤ **Ductilité**

La ductilité selon le sens (x) de valeur 12.36 est inférieure à celle du sens (y) de 13.95.

➤ **Résistance**

La résistance selon le sens(x) de valeur 633.36 KN est supérieure à celle du sens (y) de 629.81 KN. Cette différence justifie par le nombre des travées selon le sens (x) **supérieure** à celle du sens (y).

On constate qu'il y a une relation **inverse** entre la résistance et la ductilité.

IV.4.2.2 Pour la structure mixte :

➤ **Ductilité**

La ductilité selon le sens (x) de valeur 7.1 est inférieure à celle du sens (y) de 8.38.

➤ **Résistance**

La résistance selon le sens(x) de valeur 1963.25 KN est supérieure à celle du sens (y) de 1847.79 KN. Cette différence justifie par le nombre des travées selon le sens (x) **supérieure** à celle du sens (y).

On constate qu'il y a une relation **inverse** entre la résistance et la ductilité.

IV.4.2.3 Structure portique avec structure mixte :

➤ **Ductilité et résistance**

Selon le sens (x) : La ductilité dans la structure auto stable de valeur 12.36 est supérieure à celle de la structure mixte de 7.1, et la résistance dans la structure auto stable de valeur 633.36 KN est inférieure à celle de la structure mixte de 1963.25 KN, Car la dernière structure contient des voiles.

On constate que les voiles augmentent la résistance et minimisent la ductilité.

Selon le sens (y) : La ductilité dans la structure auto stable de valeur 13.95 est supérieure à celle de la structure mixte de 8.38, et la résistance dans la structure auto stable de valeur

629.81 **KN** est inférieure à celle de la structure mixte de 1847.79 KN, Car la dernière structure contient des voiles.

On constate que les voiles augmentent la résistance et minimise la ductilité.

(Les voiles augmentent la rigidité et diminuent la ductilité).

➤ Période

La période **T** lié à la masse de la structure :

$$T = \frac{2\pi}{\omega}$$

La masse de la structure mixte est **supérieur** à la masse de structure portique donc la période de la structure mixte de la valeur de 0.63 est inférieur de la période de la structure portique de la valeur de 0.78.

➤ Rigidité

Rigidité dans la structure mixte de la valeur 908.31 sur le sens x et 921.05 sur le sens y est supérieure à la rigidité dans la structure portique de la valeur 600.57 sur le sens x et 500.37 sur le sens y.

On constate que les structures mixtes plus rigide aux structures portiques dans les cas des séismes faibles. Et la structure portique plus ductile par rapport la structure mixte dans les cas des séismes fort.

IV.5 Formation des Rotules plastiques

Le logiciel SAP 2000 nous permet de visualiser le développement des rotules plastiques à n'importe quel point de la structure. Les figures suivantes illustrent l'évolution des rotules plastiques dans les deux structures

IV.5.1 Structure portique

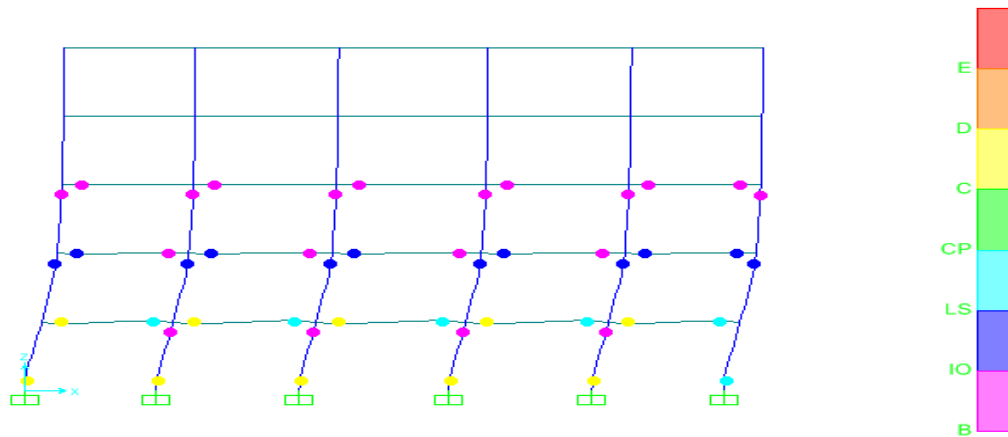


Figure IV.24 : Formation des rotules plastiques structure portique sens (x).

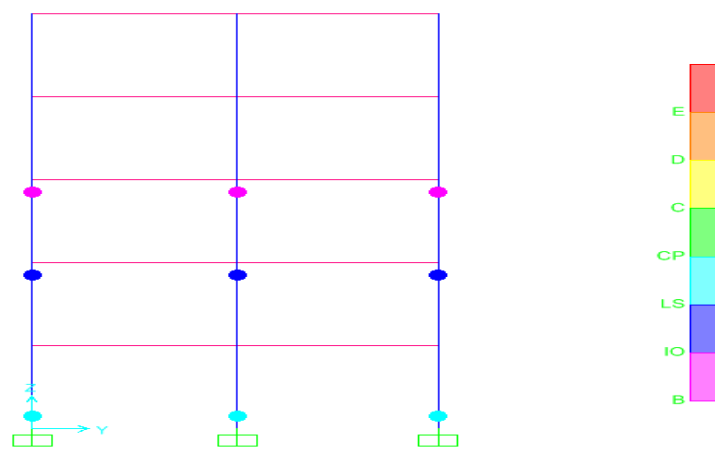


Figure IV.25 : Formation des rotules plastiques structure portique sens (y).

IV.5.2 Structure mixte :

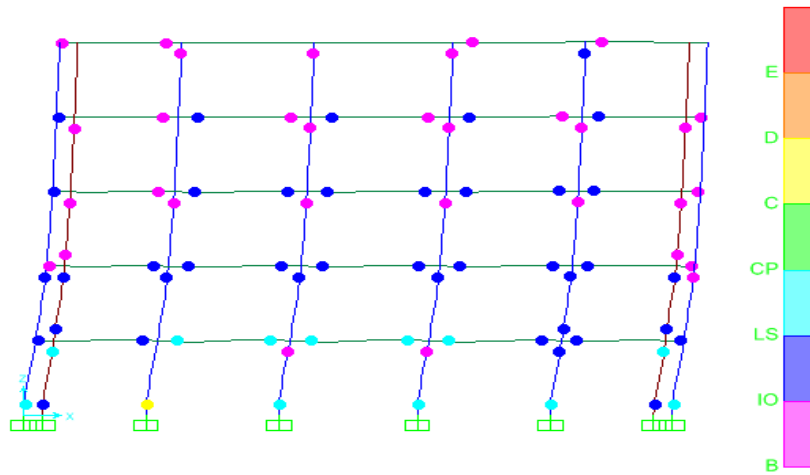


Figure IV.26 : Formation des rotules plastiques structure mixte sens (x).

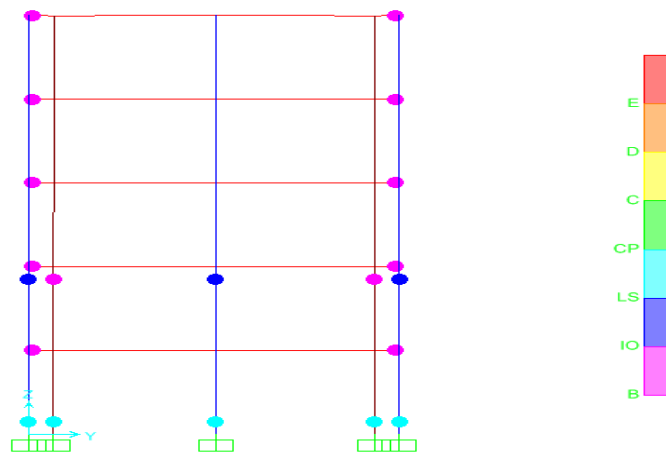


Figure IV.27 : Formation des rotules plastiques structure mixte sens (y).

IV.5 Conclusion

L'exécution de calcul statique non linéaire par la méthode Pushover a été réalisée d'un logiciel (SAP2000).

Les résultats de la ductilité entre des structures portiques et mixtes est essentielle pour assurer la performance et la sécurité des bâtiments face à des charges et des conditions de chargement variées.

Dans ce chapitre, nous avons représenté les courbes de capacités et montré que :

- On constate qu'il y a une relation inverse entre la résistance et la ductilité.
- Ductilité des structures portiques est supérieure à celle de la structure mixte.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

En conclusion, cette étude a examiné la ductilité des structures portiques et mixtes en béton armé lors d'événements sismiques. La ductilité est une caractéristique essentielle pour garantir la capacité d'une structure à absorber l'énergie sismique et à se déformer sans subir de défaillance catastrophique. Les structures portiques et mixtes, grâce à leur configuration et à l'utilisation de différents matériaux, offrent une certaine capacité de ductilité. L'exécution de calcul statique non linéaire par la méthode Pushover a été réalisée d'un logiciel (SAP2000).

Dans ce mémoire, A travers les résultats obtenus, nous sommes parvenus aux points suivants :

- On constate qu'il y a une relation inverse entre la résistance et la ductilité.
- Ductilité des structures portiques est supérieure à celle de la structure mixte.
- Dans ce cas, la structure auto stable est plus stable et souple que la structure mixte, par ce que la ductilité de la structure portique auto stable est supérieur de ductilité de la structure mixte.
- Les structures mixtes plus rigides aux structures portiques
- La structure portique plus ductile par rapport la structure mixte

Ensuite, la ductilité est un aspect essentiel de la résilience des structures portiques et mixtes en cas de séismes. Une bonne conception, une construction de qualité et un entretien régulier sont nécessaires pour garantir la performance sismique optimale de ces structures. Des recherches continues sont également nécessaires pour améliorer notre compréhension de la ductilité des structures. Enfin, Nous proposons pour de futures études dans le domaine de la ductilité des structures en béton armé de l'étudier d'une autre méthode comme la méthode dynamique non linéaire et comparer entre les deux méthodes statique non linéaire et dynamique non linéaire.

Références bibliographie

- [1] **Mr GHERBI Khaled**, Evaluation de la ductilité sectionnelle et structurale des éléments fléchis en béton, UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMERY -TIZI OUZOU-
- [2] **Melle HACHEM RAFIKA**, Etude de la Ductilité de Déplacement des Poteaux en Béton Armé, UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE, 2003-2004.
- [3] **Mr M. Youcef**, Approche de la Vulnérabilité Sismique des Structures Portiques en Béton Armé - Cas Bâtis Algériens, Thèse de doctorat, L'UNIVERSITÉ 8 MAI 1945 GUELMA,2018
- [4] **A. KASSOUL, K. EZZIANE, A. KADRI** , ASPECTS QUALITATIFS DE LA DUCTILITE DANS LES CONSTRUCTIONS EN BETON ARME , Algérie équipement , juillet 2001 , IGC centre universitaire de Chlef.
- [5] **R. Park**, EVALUATION OF DUCTILITY OF STRUCTURES AND STRUCTURAL ASSEMBLAGES FROM LABORATORY TESTING. BULLETIN OF THE NEW ZEALAND NATIONAL SOCIETY FOR EARTHQUAKE ENGINEERING, Vol. 22, No.3, Septembre 1989.
- [6] **KHELIFI KHAWLA**, RENFORCEMENT DES STRUCTURES DE PORTIQUES EN BETON ARMEE SOUS L'EFFET DU SEISME, Mémoire de master, UNIVERSITE LARBI BEN MHIDI OUM EL BOUAGHI, 2017/2018.
- [7] RPA-99/V2003. "Règles parasismiques Algériennes 1999". Document technique réglementaire DTRBC 248 – Centre National de Recherche Appliquée en Génie sismique (CGS), Alger.
- [8] **S. GIEU**, DUCTILITÉ DES STRUCTURES EN BÉTON ARMÉ, CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET MÉTIERS PARIS, DIPLÔME D'INGÉNIEUR CNAM, 27 novembre 2012.
- [9] **BERTERO. V.V**, Ductility Based Structural Design – State of the Art Report. Proceeding of ninth word conference on earthquake engineering, Tokyo, vol (VIII), pp. 673-686, Aug-1988.

- [10] **DONEUX**. Catherine, Étude du Mécanisme de Transfert des Flexions à la Jonction Poteau Poutre dans les Structures en Portiques Mixtes Soumises à Une Action Sismique, Thèse de Doctorat, Université de Liège, 2001-2002.
- [11] **A. KASSOUL, K. EZZIANE & A. KADRI**, "Ductilité de courbure dans les poutres en béton armé dimensionnée par le RPA 99", deuxième colloque de génie parasismique AGS, P 371-378, oct. 2000.
- [12] **R. HACHEM**, Etude de la Ductilité de Déplacement des Poteaux en Béton Armé , Thème de Magister - 2003-2004 - UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE .
- [13] **A. BOULAOUAD**, DYNAMIQUE NON LINÉAIRE DES SYSTÈMES À PLUSIEURS DEGRÉS DE LIBERTÉ, Thèse d'Etat en Génie Civil ; UNIVERSITÉ Hadj Lakhdar DE BATNA Institut de Génie civil, d'Hydraulique et d'Architecture 05 Avril 2012.
- [14] **TINE.M & SIMERABET.Y** Evaluation de comportement des structures –mémoire de master -2020 -Université ibn Khaldoun de Tiaret.
- [15] Ghernoug **N**, Comportement et influence de l'élancement des voiles parasismiques sur les structures en voile-portique, université Larbi ben MHIDI, 2020.
- [16] **Djellouli Selma**, ETUDE COMPARATIVE DE L'ÉVALUATION DES DOMMAGES SISMIQUE POUR UNE STRUCTURE PORTIQUE EN B.A ET UNE STRUCTURE MIXTE, Université Mohamed Boudiaf Msila.
- [17] Conception et réalisation : Alp'Géorisques [38420 Domène], Graphies [38240 Meylan], Juin 2004.
- [18] **Giorgio giovannini ivano sedili**, la construction parasismique appliquée à la terre crue.
- [19] **LAHOUAL Abderrahmane GUERROUD Lakhdar**, Effets de caractéristiques sismiques sur les spectres de réponse, Université Ziane Achour de Djelfa, 2016-2017.
- [20] **KAABECHE Tahar, MEBRAK Abderraouf**, Contribution à l'étude des risques naturels (sismiques et mouvements de terrain) dans la Wilaya de Sétif, Mémoire de fin d'études
Présenté en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Géologie, UNIVERSITE

FERHAT ABBAS-SETIF, 2010.

[21] **YASSINE, AHMED**. TABLISSEMENT D'UN SPECTRE DE CALCUL RÉGION DE BOUMERDES. 2017. Thèse de master. UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA.

[22] **HIDA, Hassan**, ÉVALUATION DE LA VULNÉRABILITÉ SISMIQUE DES PONTS ET VIADUCS, ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE UNIVERSITÉ DU QUÉBEC, 22 MAI 2009.

[23] **Dr. Taleb Hosni Abderrahmane**, Système de Contreventements ; université de milla.

[24] **SEBAI Khalifa**, quantification de la ductilité des constructions autos-tables en béton arme dimensionnés selon le règlement parasismique algérien RPA 99/v-2003, magister en génie civil, université hassiba ben Bouali de Chlef, 2012.

[25] **D. LAKHDAR, M.NASREDDIN**, PATHOLOGIE SISMIQUE ET MODES DE RUINES DES DIFFERENTS DE SYSTEMES ETUDE DE CONSTRUCTION, Université KASDI Merbah de Ouargla.

[26] **Melle. KACIMI Nacéra**, Analyse numérique d'une structure auto stable et d'une structure mixte (portiques + voiles), Mémoire de Magister, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI TIZI-OUZOU, 2013.

[27] **Kassoul A., Ezziane K., Kadri A.**, Nouveau pourcentage d'armature pour la condition de ductilité dans les poutres, Revue française de génie civil, Vol. 8, N° 7, 769-791, 2004

[28] **BENZAOUI Kamal**, Etude de l'évolution du R.P.A. sur le comportement structural des bâtiments d'habitation et ses impacts sur le dimensionnement d'un point de vue sécuritaire et économique, UNIVERSITE LARBI BEN M'HIDI OUM EL BOUAGHI

[29] **M. Mekki**, La détermination des spectres de réponse d'une structure à partir de diverses méthodes d'intégrations temporelle. Mémoire de magister 2004.

[30] Bâtiments – Principes de Base à l'Attention des Ingénieurs, Architectes, Maîtres d'Ouvrage et Autorités. Directives de l'OFEG. Berne, 2002

- [31] **Dr. Marc Badoux, Dr. Pierino Lestuzzi, Dr. Rudolf Vogt** ; Dimensionnement parasismique - Extrait de la documentation D 0182, Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zürich, 2003
- [32] **A.Issam**, Analyse Pushover des structures en béton armé tridimensionnelle à étage souple, thèse de doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, 2018
- [33] **A. Ahmed, F.Soufyane**, ETUDE DE COMPORTEMENT SISMIQUE DES STRUCTURES EN BETON ARME LA METHODE N2 ETENDUE, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA 2021 ,UTILISANS IRREGULIERES EN
- [34] **Mr TEDJDITI Ahmed Kamel**. “Evaluation des coefficients de comportement des structures par une approche semi-globale”. Mémoire de Master Département de génie civil Université Abou-Bekr. Belkaid-Tlemcen. 2017.
- [35] **B.Aissa, K.Lamine**, Etude comparative de la distribution de la charge sismique avec la méthode statique linéaire et la méthode statique non linéaire, UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJE-BOUIRA ,2018/2019
- [36] **A.Boubaya**, IMPACT DES MURS DE REMPLISSAGE EN MAÇONNERIE SUR LE COMPORTEMENT SISMIQUE DES PORTIQUES EN BETON ARME, UNIVERSITE MOHmed khider 2019-
- [37] FEMA 273, NEHRP recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
- [38] **LAFI Djamel Eddine**, EVALUATION DE LA CAPACITÉ PORTANTE DES STRUCTURES PAR LA MÉTHODE PUSHOVER, Université Hadj Lakhdar –Batna, 2012
- [39] **YASSINE, AHMED**. TABLISSEMENT D'UN SPECTRE DE CALCUL RÉGION DE BOUMERDES. 2017. Thèse de master. UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA.
- [40] BAEL 91
- [41] DTR B.C 2.2
- [42] **Mr BELKHEIR Mohammed Aghiles**, Influence de la disposition des voiles sur la

performance sismique des bâtiments, Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de
Tizi-Ouzou, 2012.

انتهى بفضل الله.... اللهم لك الحمد والشكر.

