

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE 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° :01



DOMAINE : GÉNIE CIVIL

FILIERE : GÉNIE CIVIL

OPTION : STRUCTURES

Mémoire présenté pour l'obtention  
Du diplôme de MASTER Académique

Présenté par :

**Louglaihi Maroua**

**Salem Ilyas**

Intitulé

**Étude de l'incidence de la torsion sur la résistance  
sismique des bâtiments en béton armé - Analyse  
statique non-linéaire -**

Soutenu publiquement le : 25/06/2023

Devant le jury composé de :

Dr. SILINE MOHAMMED	PROF	Université de M'sila	Président
Dr. MENASRI YUCEF	MCB	Université de M'sila	Encadreur
Dr. RAHMANI ABDALLAH YACINE	MCA	Université de M'sila	Examineur

**Année universitaire : 2022 /2023**

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



# Remerciement

Promo 2023

Avant tout, nous souhaitons exprimer notre profonde reconnaissance envers **Allah**, le Tout-Puissant, pour nous avoir accordé la volonté, le courage, la santé et la patience nécessaires afin de mener à bien cet humble travail.

Nous souhaitons également exprimer notre gratitude envers nos parents, dont le soutien inestimable tout au long de notre vie a été d'une importance capitale, et qui continueront à nous accompagner dans tous nos projets futurs.

Nous tenons également à exprimer notre reconnaissance envers nos familles, qui méritent toute notre gratitude pour leur participation, que ce soit de près ou de loin, en nous encourageant et en nous apportant leur précieuse aide tout au long de notre parcours.

Nous n'oublions pas nos précieux amis, que nous avons rencontrés à l'école et en dehors, et plus particulièrement nos camarades de promotion. Leur amitié sincère et leur soutien indéfectible ont été d'une importance inestimable tout au long de notre parcours académique.

Nous exprimons également notre profonde reconnaissance. Notre sincère gratitude à notre promoteur, Monsieur **Menasri Youcef**, pour la richesse de ses enseignements durant notre formation en master, ainsi que pour son encadrement attentif et sa direction avisée tout au long de notre projet de fin d'études.

Nous sommes également reconnaissants envers tous les enseignants en génie civil et les professeurs spécialisés en structures, tels que le Dr Rahmouni, le Dr Rahmani, le Dr Titoum, le Dr Siline, le Dr Hamitouche, le Dr Ouzandja, le Dr Amour, le Dr Meddah et bien d'autres encore, pour leur expertise et leur dévouement sans failles à notre formation.

Nous pensons également à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation depuis nos premiers pas à l'école primaire.

En dernier lieu, nous exprimons notre profonde gratitude envers les membres du jury d'évaluation pour avoir gracieusement accepté d'évaluer avec rigueur notre travail, en y apportant leur expertise pointue et leurs précieux commentaires.

Nous sommes empreints d'une gratitude profonde envers toutes les personnes évoquées précédemment, ainsi qu'envers toutes celles qui, de près ou de loin, ont joué un rôle essentiel dans notre parcours académique et ont contribué à la concrétisation de ce travail de fin d'études. Leur soutien indéfectible, leurs encouragements constants et leur apport inestimable ont été des piliers fondamentaux de notre succès, et nous leur adressons nos remerciements les plus sincères.

Que Dieu bénisse chacune de ces personnes et les récompense pour leur générosité, leur soutien et leur bienveillance à notre égard.

# إهداء

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

﴿ وَأَجِزْ دَعْوَاهُمْ أَنْ الْحَمْدُ لِلَّهِ رَبِّ الْعَالَمِينَ ﴾

كان الطريق طويلاً و كان الوصول على قدم المشقة مهيباً وعظيماً  
وما كنت لأفعل لو لا ان الله مكنتني  
فالحمد لله ... عند البدء وحين الختام والحمد لله ... على التمام

أهدي عملي هذا إلى من كلله الله بالهبة والوفاء ذو السيرة الملهمة والفكر النبيل من رباني وكافح من أجلي.. إلى المصباح الذي أضاء دربي.. ولمن أحمل اسمه بكل إخثار.. إلى من أضأ بعلمه عقل غيره.. إلى من كان معلم الأجيال قبل أن يكون معلمي.. إلى الذي إنتاجي ما هو إلا تربيته الذي وهبني القلم. وكان له الأثر الأول في بلوغي التعليم العالي أرجوا من الله أن يمد في عمرك لتري ثماراً قد حان قطافها بعد طول إنتظار وستبقى كلماتك نجوم أهتدي بها اليوم وفي الغد وإلى الأبد..

## والدي العزيز أطال في عمرك

إلى أمي ثم أمي إلى قلوبتي الأولى ومعنى الحب والتفاني. إلى ركنة عمري وملجأ، إلى بسمته الحياة وسر الوجود إلى من كان دعاؤها سر نجاحي وحنانها بلسر جراحني إلى من أرشدتني ورافقتني في كل مشاوير حياتي ولا تنال تفعل إلى الآن.. أفتخر كونك منذ أنجبتني حتى هذه اللحظة أمماً عظيمة..

أمي الحبيبة فاللهم أرزقها العفو والعافية وبارك لي في عمرها

والدري الغاليين حفظكما الله و جعلني بارة بكما

إلى أخي ... كنتَ حصناً و حزناً و ظهراً و حُب ... حفظك الله و أدام عليك عافيتك  
وإلى إخوتي الغاليين والسند في حياتي ... أنتم مصدر فرحتي وسعادتني ... حفظكم الله و أطال في عمركم  
إلى صديقاتي ورفيقات دربي الأعزاء... أنتن ركن أساسي في حياتي، أنتن مصدر الإلهام والتحفيز ومصدر للسعادة والدعم أشكر كن على الوقوف بجانبني، وتقديم النصع والدعم في كل الظروف... حفظكم الله

و في الأخير... اللهم إجعلني من الذين يستفيدون من العلم وينشرونه، وإجعل العلم نوراً يضيء دربي و درب الآخرين. اللهم إجعلني من الذين يعملون بما يعلمون، وينشرون الخير والإحسان بقدر ما أعطيتنا من علم. اللهم أرزقني العلم النافع والفهم الصحيح، وإجعلني من الذين يسعون في طلب العلم ويتعلمون بإخلاص وإجتهد

Louglaiti Maroua

P R O M O 2 0 2 3

# **Dédicace**

*Je tenais tout d'abord à remercier Allah le tout puissant et  
miséricordieux, qui m'a donné la force et la patience d'accomplir ce*

*Modeste travail.*

*Je dédie ce travail en signe de respect et de reconnaissance :*

*À celle qui a tout donné, tout sacrifié, à la femme qui règne sur mon  
coeur, " ma mère ".*

*À celui qui m'a toujours dirigé, guidé, aidé et encouragé afin  
de me voir affronter la vie avec sérénité et courage, à l'homme  
qui a toujours souhaité me voir à la hauteur, " mon père ".*

*À mes frères :Badreddine , Sofiane*

*À mes sœurs : Nadia , Elham , Sara*

*Un cadeau spécial à une source de fierté et de force Belkiss*

*Toute ma famille sans exception*

*À mes chers amis Mohamed Amine et Youcef et Rabeh et Nadir*

*Et à tous mes amis*

*À mon binôme Maroua et toute la promotion 2023*

*Salem Ilyas*  
— PROMO 2023 —

## ملخص

الزلازل هي واحدة من أكثر القوى الطبيعية تدميراً، فهي قادرة على إحداث أضرار جسيمة في المباني والبنية التحتية. عندما يضرب الزلزال، غالباً ما تتعرض الهياكل الخرسانية المسلحة لقوى إلتواء كبيرة. يمكن أن تتسبب هذه القوى في حدوث تشوه مفرط أو تلف أو حتى انهيار الهيكل. لذلك، تعتبر مقاومة الإلتواء للمباني الخرسانية المسلحة جانباً حاسماً في تصميمها الزلزالي. في هذه الدراسة قمنا بدراسة تأثير الإلتواء على المقاومة الزلزالية لمنشأة إطارية من الخرسانة المسلحة مكونة من (ط+2) ، و ذلك بالأخذ في عين الاعتبار السلوك اللاخطي للمواد و العناصر بإستعمال طريقة التحليل الستاتيكي اللاخطي (Pushover) ، و تمت النمذجة للمنشأة بإستخدام برنامج العناصر المحددة SAP2000v14 . و في هذه الدراسة تمت المقارنة بين منشأتين (ط+2) الأولى منتظمة أفقياً و الثانية غير منتظمة أفقياً و من خلال النتائج المتحصل عليها تمكنا من فهم تأثير الإلتواء على المنشآت الإطارية الخرسانية في حالة حدوث زلزال.

**الكلمات المفتاحية:** الزلازل، قوى الإلتواء، المقاومة الزلزالية، تحليل ستاتيكي لاخطي ، منشآت إطارية خرسانية .

## RÉSUMÉ

Les tremblements de terre sont l'une des forces naturelles les plus destructeurs, capables de causer des dommages importants aux bâtiments et aux infrastructures. Lorsqu'un séisme se produit, les structures en béton armé subissent souvent de grandes forces de torsion. Ces forces peuvent entraîner une déformation excessive, des dommages ou même l'effondrement de la structure. Par conséquent, la résistance à la torsion des bâtiments en béton armé est un aspect crucial de leur conception parasismique. Dans cette étude, nous avons étudié l'effet de la torsion sur la résistance sismique d'une structure portique en béton armé composée de (R+2) étages, en tenant compte du comportement non linéaire des matériaux et des éléments en utilisant la méthode d'analyse statique non linéaire (Pushover). La modélisation de la structure a été réalisée à l'aide du logiciel d'éléments finis SAP2000v14. Et dans cette étude, une comparaison a été faite entre deux structures (R+2), la première est régulière horizontalement et la seconde est irrégulière horizontalement. Grâce aux résultats obtenus, nous avons pu comprendre l'impact de la torsion sur les structures en béton armé en cas de séisme.

**Mots-clés :** Les tremblements de terre, torsion, les structures portique en béton armé, analyse statique non linéaire.

## ABSTRACT

Earthquakes are one of the most destructive natural forces, capable of causing significant damage to buildings and infrastructure. When an earthquake occurs, reinforced concrete structures often experience large torsional forces. These forces can result in excessive deformation, damage, or even collapse of the structure. Therefore, the torsional resistance of reinforced concrete buildings is a crucial aspect of their seismic design. In this study, we investigated the effect of torsion on the seismic resistance of a (R+2)-story reinforced concrete frame structure, taking into account the nonlinear behavior of materials and elements using the nonlinear static analysis method (Pushover). The structure was modeled using the finite element software SAP2000v14. Additionally, a comparison was made between two structures (R+2). The first structure was horizontally regular, while the second structure was horizontally irregular. The obtained results allowed us to understand the impact of torsion on reinforced concrete structures in the event of an earthquake.

**Key Words :** Earthquakes , torsion , seismic resistance, reinforced concrete frame structure , nonlinear static analysis .

# TABLE DES MATIÈRES

Remerciement.....	I
Dédicace.....	II
ملخص.....	III
Résumé.....	IV
Abstract.....	V
Table des matières.....	VI
Liste des notations.....	IX
Liste des tableaux.....	XIII
Liste des illustrations.....	XIV
<b>INTRODUCTION GÉNÉRALE.....</b>	<b>XVI</b>

## CHAPITRE I NOTIONS DE BASE SUR LES SÉISMES

I.1 Introduction.....	2
I.2 Description des séismes.....	2
I.3 Origine de séisme.....	2
I.4 Notion de faille.....	3
I.5 Caractéristiques d'un séisme.....	4
I.6 Classifications des séismes.....	5
I.7 Propagation des ondes sismique.....	6
I.7.1 Ondes De Volume.....	6
I.7.2 Ondes de surface.....	7
I.8 Enregistrement des ondes sismiques.....	8
I.8.1 Sismographes.....	8
I.8.2 Sismogramme.....	9
I.9 Mesure d'un séisme.....	10
I.9.1 Force sismique.....	10
I.9.1.1 L'Echelle de Medvedev-Sponheuer-Karnik.....	10
I.9.1.2 L'Echelle de Richter.....	12
I.10 Historique des séismes en Algérie.....	12
I.11 Classification des zones sismiques selon l'RPA.....	13
I.12 Conclusion.....	14

## CHAPITRE II EFFETS DE TORSION SUR LES STRUCTURES EN BÉTON ARMÉ

II.1 Introduction.....	16
II.2 Effets de la torsion .....	16
II.3 Origines du phénomène de torsion .....	16

II.4 Dommages Irrégularités structurelles .....	17
II.4.1 Dommages dus a l'irrégularité en plan .....	17
II.4.2 Dommages dus à l'irrégularité en élévation .....	19
II.4 Sources de réponse de la torsion .....	20
II.5 Caractéristiques géométriques de la structure .....	21
II.5.1 Centre de masse .....	21
II.5.2 Centre de torsion .....	22
II.6 Excentricité : [RPA 99 V2003 Art 3.5.a.2] .....	23
II.6.1 Excentricité théorique (statique) .....	23
II.6.2 Excentricité accidentelle : [RPA 99 version 2003 Art 4.2.7] .....	24
II.7 Conclusion .....	24

### CHAPITRE III ANALYSE STATIQUE NON LINÉAIRE DES STRUCTURES EN BÉTON ARMÉ « PUSHOVER »

III.1 Introduction .....	26
III.2 Origine de l'analyse Pushover .....	27
III.3 Hypothèses d'élaboration de la méthode (Pushover) .....	27
III.4 But de l'analyse pushover .....	28
III.5 Détermination de la courbe de capacité .....	29
III.6 Formulation de l'analyse Pushover .....	31
III.7 Étapes de l'analyse pushover .....	32
III.8 Avantages de l'analyse Pushover .....	33
III.9 Conclusion .....	34

### CHAPITRE IV APPLICATION NUMÉRIQUE

IV.1 Introduction.....	36
IV.2 Présentation et caractéristiques des structures.....	36
IV.2.1 Description du bâtiment étudié.....	36
IV.2.2 Caractéristiques géométrique.....	38
IV.2.3 Caractéristiques des matériaux.....	38
IV.2.4 Définition des charges.....	40
IV.3 Modélisation de la structure.....	41
IV.3.1 Modélisation de la structure régulière (sans torsion).....	41
IV.3.2 Modélisation de la structure irrégulière (avec torsion).....	41
IV.4 Résultats et interprétation sur les structures.....	44
IV.4.1 Résultats d'analyse modale.....	44
IV.4.2 Résultats d'analyse statique non linéaire.....	45
IV.5 Détermination de la courbe de capacité.....	46
IV.5.1 Courbe de capacité de la structure régulière (sans torsion).....	46
IV.5.2 Courbe de capacité de la structure irrégulière (avec torsion).....	48
IV.6 Demande en ductilité.....	51

---

IV.7 Comparaison entre les deux structures.....	52
IV.7.1 Résultats obtenus.....	53
IV.8 Résultats des déplacements inter étage.....	56
IV.8.1 Déplacement structure régulier (sans torsion).....	56
IV.8.2 Déplacement structure irrégulier (avec torsion).....	57
IV.9 Comparaison entre les deux structures.....	58
IV.10 Conclusion.....	60
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE .....</b>	<b>62</b>
<b>RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE .....</b>	<b>64</b>

# NOTATIONS ET SYMBOLES

## 1 – Notations latines

- A Coefficient d'accélération de zone.
- $C_T$  Coefficient en fonction du système de contreventement.
- $D_u$  Déplacement à l'état limite ultime de la structure.
- $D_y$  Déplacement à l'état limite élastique de la structure.
- E Module de déformation linéaire.
- $E_b$  Module d'élasticité du béton.
- $E_s$  Module d'élasticité de l'acier.
- $F_j$  Force appliquée en chaque niveau.
- $F_y$  Effort tranchant à l'état limite élastique de la structure.
- $f_e$  Résistance limite élastique de l'acier haute adhérence.
- $f_{es}$  Résistance limite élastique de l'acier rond lisse.
- $f_c$  Résistance en compression du béton.
- $f_{bu}$  Contrainte limite du béton en compression.
- $f_{c28}$  Résistance caractéristique du béton à la compression.
- $f_{t28}$  Résistance limite du béton à la traction.
- H Hauteur totale la structure.
- $H_n$  Hauteurs des niveaux « n ».
- K Rigidité.
- L Les ondes de Love.
- M Magnitude d'un séisme.
- N Effort normal.
- P Les ondes primaires.
- Q Facteur de qualité.
- R Coefficient de comportement.
- $R_\mu$  Facteur de réduction.
- R Les ondes de Rayleigh.
- S Les ondes secondaires.
- T Période propre correspondant à spectres d'accélération élastiques.
- $T_s$  Période propre de la structure.

$u$	Déplacement.
$V_b$	Effort tranchant à la base.
$W$	Poids total de la structure.
$W_i$	Charges gravitaires au niveau « i ».
$WG_i$	Charges permanentes au niveau « i ».
$WQ_i$	Charges d'exploitations au niveau « i ».
$W_i$	Le poids total de la masse concentrée de l'élément « i » du niveau considéré
$X_i$	Les coordonnées du centre de gravité de l'élément « i » par rapport au repère
$Y_i$	global
$X_G$	Les coordonnées du centre de masse du niveau par rapport au repère global
$Y_G$	
$I_X$	Les inerties suivant les axes x et y respectivement de chaque élément de
$I_Y$	Contreventement (poteau, poutres)
$X_i$	Coordonnées du centre de torsion des éléments de contreventement par rapport
$Y_i$	au repère global choisi
$X_T$	Coordonnées du centre de torsion du niveau par rapport au repère global choisi
$Y_T$	
$h$	Hauteur de la section du béton
$b$	Largeur de la section du béton
$E_X$	Distance entre le centre de masse et le centre de torsion suivant les deux axes
$E_Y$	
$L_X$	Distance sur les axes d'abscisse
$L_Y$	
$m_i$	Masse concentrée au niveau « i »
$D_i$	Déplacement de la masse $m_i$
$V_b$	Effort tranchant à la base
$F$	Force horizontale agissant sur un système à un seul degré de liberté
$D$	Déplacement à un degré de liberté d'un système
$S_a$	Spectres d'accélération inélastique
$S_d$	Spectres de déplacement inélastique
$M_1$	La masse totale du bâtiment
$D$	L'amplitude du premier mode de vibration au sommet
$\Gamma_1$	Le facteur de participation modale correspondant au premier mode de vibration
$D_y$	Déplacement à l'état limite élastique de la structure

$A_y$	Accélération à l'état limite élastique de la structure
$K$	La rigidité élastique initiale
$X_t$	Déplacement au sommet de la structure
$M$	La matrice de masse
$C$	La matrice d'amortissement
$Q$	Indique le vecteur de force au niveau d'étage
$\ddot{x}g$	L'accélération du séisme
$X^*$	Le déplacement de référence du système à un seul DDL
$M^*$	
$C^*$	Représentent les propriétés du système à un seul DDL équivalent
$Q^*$	

## 2 – Notations grecques

$\nu$	Coefficient de poisson.
$\beta_b$	Coefficient de pondération.
$\alpha$	Coefficient qui tient compte de la diminution de la rigidité due à la fissuration.
$\varepsilon_{be}$	Déformation limite élastique.
$\varepsilon_{bu}$	Déformation ultime du béton.
$\varepsilon_{se}$	Déformation limite élastique de l'acier.
$\varepsilon_{su}$	Déformation ultime de l'acier.
$\mu$	Ductilité.
$\rho$	Masse volumique.
$\gamma_b$	Masse volumique du béton.
$\omega$	Pulsation.
$\phi_i$	Vecteur déplacement du mode fondamental
$\phi_{ij}$	L'amplitude modale au niveau de l'étage « i » pour le mode j
$\{\emptyset\}$	Vecteur de forme

**3 – Abréviations**

ATC	Applied Technology Council.
CP	Collapse Prévention.
FEMA	Federal Emergency Management Agency.
LS	Life Safety.
IO	Immediate Occupancy.
RPA	Règles Parasismiques Algériennes.

# LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Echelles d'intensité de Mercalli .....	11
Tableau IV.1 : Caractéristiques géométriques du bâtiment étudié .....	38
Tableau IV.2 : Caractéristiques de béton .....	39
Tableau IV.3 : Caractéristiques d'acier .....	39
Tableau IV.4 : Valeurs des charges gravitaires et latérales .....	40
Tableau IV.5 : Rigidité de flexion utilisé pour modéliser les éléments structurels	43
Tableau IV.6 : Comparaison du résultat des périodes fondamentales .....	44
Tableau IV.7 : Période de participation modale structure régulière .....	45
Tableau IV.8 : Période de participation modale structure irrégulière .....	45
Tableau IV.9 : Les principaux résultats de l'effort tranchant, déplacement (régulière) .....	47
Tableau IV.10 Les principaux résultats de l'effort tranchant, déplacement (irrégulière) .....	50
Tableau IV.11 : Comparaison entre les deux structures .....	53
Tableau IV.12 : Comparaison des déplacements maximums inter-étages obtenus par la méthode statique non-linéaire (pushover).....	59

# LISTE DES ILLUSTRATIONS

Figure I.1 : Carte du monde montrant les principales plaques tectoniques .....	03
Figure I.2 : différents types de faille .....	04
Figure I.3 : origine des tremblements de terre .....	05
Figure I.4 : Onde P (onde de volume) .....	06
Figure I.5 : Onde S (onde de volume) .....	07
Figure I.6 : Onde L (onde de surface) .....	07
Figure I.7 : Fonctionnement d'un sismographe .....	08
Figure I.8 : Interprétation d'un sismogramme théorique .....	09
Figure I.9 : Carte du zonage sismique du territoire national (RPA99/2003) .....	14
Figure II.1 : Excentrement entraînant un phénomène de torsion .....	17
Figure II.2 : Les dommages causés par l'irrégularité en plan au cours du séisme de 1978 à Miyagi-Ken-Oki, (Japon) .....	18
Figure II.3 : I'irrégularité en plan .....	18
Figure II.4 : Formes favorables : plans simples à 2 axes de symétrie .....	19
Figure II.5 : Dommages dans les angles rentrants dus aux oscillations différentielles, (séisme de Kobé, Japon 1995) .....	19
Figure II.6 : Dommages dus à l'irrégularité en élévation .....	20
Figure II.7 : Régularité en élévation .....	20
Figure II.8 : dimension des poutres et poteaux .....	23
Figure III.1 : Niveaux d'endommagements décrits par une courbe de capacité .....	26
Figure III.2 : Niveaux d'endommagement .....	27
Figure III.3 : hypothèse de la méthode Pushover .....	28
Figure III.4 : Conversion du diagramme de capacité en format (A-D) .....	31
Figure IV.1 : Vue en plan d'un étage courant structure (Régulière) .....	37
Figure IV.2 : Vue en plan d'un étage courant structure (Irrégulière).....	37
Figure IV.3 : Sections et ferrailage : a) poteaux - b) poutres .....	38
Figure IV.4 : Diagramme de déformation-contrainte : a) béton - b) acier .....	39
Figure IV.5 : Vue en 3D de structure régulière (sans torsion) .....	41
Figure IV.6 : Vue en 3D de structure irrégulière (avec torsion) .....	42
Figure IV.7 : Loi de comportement bilinéaire en déformation .....	43

Figure IV.8 : Modélisation des éléments structurels pour l'analyse "Pushover".....	43
Figure IV.9 : Courbe de capacité : effort tranchant à la base - déplacement au sommet, sens longitudinal (x) .....	46
Figure IV.10 : Courbe de capacité : effort tranchant à la base - déplacement au sommet, sens transversal (y) .....	47
Figure IV.11 : Courbe de capacité (V-D) sens X et Y variante 1 .....	48
Figure IV.12 : Courbe de capacité : effort tranchant à la base - déplacement au sommet, sens longitudinal (x) .....	49
Figure IV.13 : Courbe de capacité : effort tranchant à la base - déplacement au sommet, sens transversal (y) .....	49
Figure IV.14 : Courbe de capacité (V-D) sens X et Y variante 2 .....	50
Figure IV.15 : Courbe de capacité des deux variantes - sens longitudinal (x) .....	52
Figure IV.16 : Courbe de capacité des deux variantes - sens transversal (y) .....	53
Figure IV.17 : Comparaison entre les des deux variantes - selon X-X .....	54
Figure IV.18 : Comparaison entre les des deux variantes - selon Y-Y .....	54
Figure IV.19 : Déplacement inter-étage-direction longitudinale X-X.....	56
Figure IV.20 : Déplacement inter-étage-direction transversal Y-Y.....	56
Figure IV.21 : Déplacement inter-étage-direction longitudinale X-X.....	57
Figure IV.22 : Déplacement inter-étage-direction transversal Y-Y.....	57
Figure IV.23 : Comparaison des déplacements inter-étage-direction longitudinale X-X.....	58
Figure IV.24 : Comparaison des déplacements inter-étage-direction transversal Y-Y.....	58

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les séismes constituent un phénomène naturel récurrent en Algérie, située dans une région sismiquement active. Le pays a connu plusieurs événements sismiques dévastateurs dans son histoire, tels que le tremblement de terre de Chlef en 1980 et celui de Boumerdes en 2003, ayant causé de lourdes pertes humaines, matérielles et économiques. Les séismes sont souvent imprévisibles et peuvent survenir à tout moment, mettant en danger la sécurité des personnes et des constructions. C'est pourquoi la compréhension du comportement des structures en cas de séisme est primordiale pour assurer la sécurité des bâtiments et des populations. Dans ce contexte, de nombreuses études ont été menées pour améliorer la résistance sismique des constructions en Algérie, en développant notamment des réglementations parasismiques et en étudiant les effets de la torsion sur les structures en béton armé. La présence de nombreux bâtiments construits avant l'application des règlements parasismiques plus récents (tels que le RPA99 V2003) aggrave le danger en cas de séisme. Cependant, après le séisme de Chlef en 1980, l'Algérie a pris conscience des risques encourus et a mis en place des mesures d'information et de prise en compte de l'aléa sismique dans la construction.

La structure d'un bâtiment est soumise à différentes forces, telles que les forces permanentes, les forces variables et les forces accidentelles. Les forces accidentelles incluent les séismes, qui peuvent causer des dégâts majeurs, voire la destruction complète des structures. L'étude des dommages causés par les tremblements de terre a permis de mieux comprendre les caractéristiques des mouvements sismiques et d'identifier les points faibles des structures et leur comportement en cas de séisme.

Lorsqu'un tremblement de terre frappe, les structures en béton armé sont souvent soumises à des forces de torsions importantes. Ces forces peuvent entraîner des déformations excessives, des endommagements ou même un effondrement de la structure. Par conséquent, la résistance à la torsion des bâtiments en béton armé est un aspect crucial de leur conception parasismique. Cependant, la compréhension de l'effet de la torsion sur la résistance sismique des bâtiments en béton armé est encore limitée et mérite une étude approfondie. Cette mémoire est donc consacrée à l'étude de l'effet de la torsion sur la résistance sismique des bâtiments portiques en béton armé, avec comme objectif de mieux comprendre le phénomène impliqué et d'améliorer la conception parasismique des structures en béton armé.

Ce mémoire est subdivisé en quatre chapitres :

- Le premier chapitre présente une introduction aux notions de base sur les séismes, il comprend quelques généralités sur les séismes pour mieux comprendre le phénomène, le chapitre est traité également de l'histoire des séismes en Algérie, mettant en évidence les événements marquants survenus dans le passé. Enfin, il aborde la classification des zones sismiques selon les normes de l'RPA.
- Le deuxième chapitre se concentre sur l'effet de la torsion sur les structures en béton armé. Ce chapitre présente un rapport détaillé sur les causes principales les plus importantes liées au phénomène de torsion et les dommages qui ont été observés à la suite d'irrégularités structurelles et les sources les plus importantes de réponse au phénomène de torsion et les Caractéristiques géométriques de la structure, en tenant compte excentricité en considération.
- Le troisième chapitre traite de la méthode analyse statique non linéaire (Pushover) utilisée pour évaluer l'incidence de la torsion des bâtiments portiques en béton armé. Cette méthode est examinée en détail, en mettant en évidence son importance, ses hypothèses, ses limites et sa formulation.
- Le quatrième chapitre présente une analyse numérique d'une structure portique en béton armé. On a proposé deux structures (R+2), le premier est régulier horizontalement et le second est irrégulier horizontalement à l'aide du logiciel de SAP2000v14. Cette étude permet d'évaluer l'effet de la torsion sur la résistance sismique.

Enfin, le travail se termine par une conclusion générale qui résume l'ensemble des résultats obtenus. Ce projet est destiné à fournir des connaissances précieuses sur l'effet de la torsion sur la résistance sismique des bâtiments portiques en béton armé, qui pourraient être utiles dans l'amélioration des codes de conception parasismique et la conception de stratégies de renforcement efficaces pour les bâtiments existants.

**CHAPITRE I**

**NOTIONS DE BASE SUR LES  
SÉISMES**

## I.1 Introduction

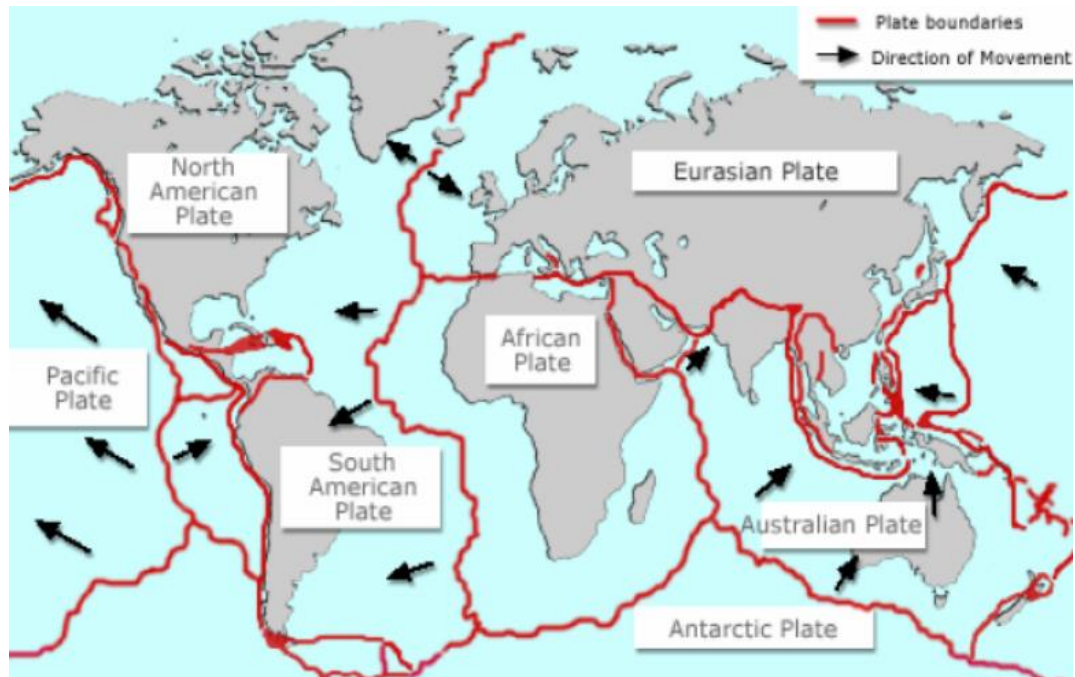
Les tremblements de terre représentent actuellement la catastrophe naturelle la plus meurtrière. Cette catastrophe résulte de la rupture brutale des roches qui engendre de nombreuses secousses. Les conséquences de ce phénomène sont considérables et affectent de manière significative les êtres humains, l'économie et l'environnement. Aujourd'hui, il est primordial que l'homme apprenne à coexister avec le risque sismique en acquérant une compréhension approfondie de la nature des séismes, de leur environnement et des moyens disponibles pour atténuer leurs effets négatifs. De cette manière, il sera possible de réduire les impacts des tremblements de terre sur les populations et les infrastructures tout en assurant une meilleure résilience face à cette catastrophe naturelle [1].

## I.2 Description des séismes

Un séisme, est un phénomène géologique qui se produit lorsqu'il y a une libération soudaine d'énergie dans la croûte terrestre. Cette énergie est générée par la rupture des roches le long d'une zone de faille, qui est une zone de fracture dans la croûte terrestre où les blocs des roches se déplacent les uns par rapport aux autres [2]. Lorsque les blocs de roches se déplacent, ils libèrent de l'énergie sous forme de vibrations qui se propagent à travers la Terre sous forme d'ondes sismiques. Ces ondes sismiques peuvent causer des mouvements de terrain, des effondrements, des glissements de terrain, des tsunamis et d'autres dommages aux bâtiments et aux infrastructures [3]. Les tremblements de terre sont classés selon leur magnitude, qui mesure la quantité d'énergie libérée par le séisme. Cette mesure est effectuée en utilisant l'échelle de Richter ou une autre échelle de magnitude. Les tremblements de terre peuvent être extrêmement destructeurs, en particulier lorsqu'ils se produisent près de zones densément peuplées et mal préparées.

## I.3 Origine de séisme

Le point focal d'un tremblement de terre se situe généralement à l'intérieur de la Terre, dans la croûte ou la lithosphère, où se produisent les mouvements tectoniques. Plus précisément, les tremblements de terre sont déclenchés par la rupture d'une partie de la croûte terrestre le long d'une faille, libérant une grande quantité d'énergie qui se propage sous forme d'ondes sismiques. Cette énergie s'accumule au fil du temps en raison des contraintes tectoniques créées par le mouvement des plaques tectoniques qui composent la lithosphère. Mais, il existe d'autres causes de tremblements de terre, telles que l'activité humaine, les impacts de météores, les éruptions volcaniques, les glissements de terrain, etc. [4].



**Figure I.1 :** Carte du monde montrant les principales plaques tectoniques [5].

Il existe trois types de phénomènes qui sont couramment désignés sous le nom de tremblements de terre :

- Le tremblement d'origine tectonique, sont le plus fréquent et le plus dévastateur qui se caractérise par les mouvements horizontaux des plaques le long des failles [6].
- Le tremblement d'origine volcanique, qui est causé par les mouvements de magma dans les chambres magmatiques des volcans [6].
- La mise en eau des barrages ou l'exploitation de gisements souterrains tels que le gaz ou les minerais sont des exemples d'activités humaines qui peuvent causer des séismes, généralement de magnitude modérée [5].

#### I.4 Notion de faille

Des études menées sur les séismes ont permis aux géophysiciens, de découvrir que de nombreux séismes sont situés à proximité de failles connues pour être actives. À l'inverse, l'ensemble des failles est l'une des premières causes d'apparition d'un séisme. La manière la plus simple de catégoriser les failles est basée sur leurs déplacements :

- **Faille normale :** Elles sont définies par l'espacement d'un compartiment par rapport à un autre, qui résulte des contraintes de traction [7].
- **Faille inverse :** Dans le cas d'une faille inverse, l'un des deux blocs se déplace vers l'autre en raison d'une compression générale. Cela se traduit par un raccourcissement du bloc-diagramme [5].

- **Faille décrochant (coulissante) :** Les failles entraînent un coulisement horizontal de deux blocs dans des directions opposées de chaque côté du plan de la faille, sous l'effet d'une contrainte de cisaillement [7]. La figure ci-dessous illustre les différents types de failles :

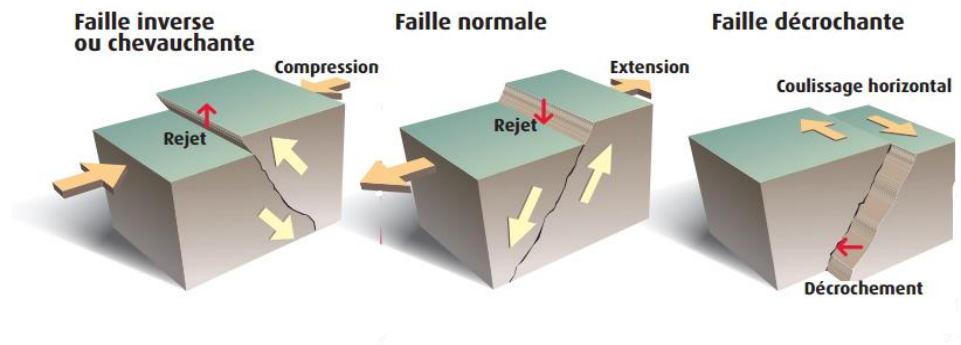


Figure I.2 : différents types de faille [8].

### I.5 Caractéristiques d'un séisme

On peut caractériser un séisme par différents paramètres :

- **Foyer (ou hypocentre) :** Le foyer d'un séisme est la région de la faille où commence la rupture et d'où partent les ondes sismiques. Les séismes qui génèrent des dégâts ont habituellement des foyers situés dans les cent premiers kilomètres de la lithosphère.
- **Magnitude (échelle de RICHTER) :** C'est une évaluation de l'énergie libérée au foyer.
- **Intensité I (échelle de MERCALLI) :** C'est une caractérisation de l'importance des effets matériels observés en surface et de la perception par la population.
- **Durée :** C'est un paramètre significatif dans les processus de fissurations et dégradations progressives des éléments d'une construction.
- **Épicentre géométrique :** Il représente la projection verticale du foyer sur la surface libre.
- **Distance focale :** Elle représente la distance qui sépare le site et le foyer.
- **Distance épacentrale :** C'est une distance qui sépare un site de l'épicentre géométrique.

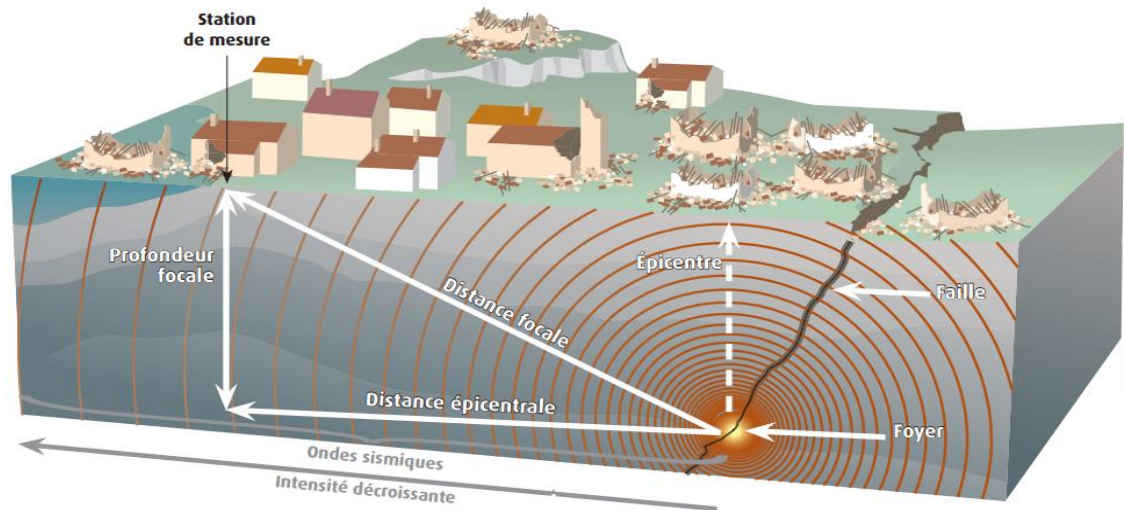


Figure I.3 : origine des tremblements de terre [8].

## I.6 Classifications des séismes

Les séismes sont classés selon la profondeur de leur foyer en trois catégories [7] : Les séismes superficiels, les séismes intermédiaires et les séismes profonds.

- **Séismes superficiels** sont les plus courants, représentent environ 70 % de l'énergie sismique libérée et sont les plus destructeurs.
- **Séismes intermédiaires** ont des foyers situés entre 15 et 70 km de profondeur et sont moins intenses comme les séismes superficiels.
- **Séismes profonds** représentent environ 5% des séismes et ont des foyers situés entre 70 et 150 km de profondeur. Ils sont principalement à l'origine du long d'une plaque et peuvent être aussi intenses que les autres types de séismes.

## I.7 Propagation des ondes sismique

Les séismes génèrent des ondes sismiques qui se propagent dans les directions, différents types d'ondes qui produisent des effets différents sur les sols et les structures. En comprenant les caractéristiques des différentes ondes et leurs conditions de propagation, on peut prédire leur effet sur un bâtiment en fonction de son emplacement géologique et de sa distance au foyer [9].

### I.7.1 Ondes De Volume

Les ondes sismiques qui ont le potentiel de détruire des bâtiments sont appelées "ondes de volume". Lorsqu'ils atteignent le sous-sol d'un bâtiment, ils créent des forces d'inertie qui provoquent une déformation de la structure due à l'accélération [3]. On distingue deux types d'ondes de volume :

- **Ondes P (primaires)** : Sont plus rapides et atteignent leur destination en premier. Ils provoquent des mouvements de compression et de dilatation des particules de sol qu'ils traversent, semblables au mouvement des fils d'un ressort. Ils ont tendance à secouer les bâtiments verticalement et à se propagent dans tous les milieux.
- **Ondes S (secondaires)** : Se propagent en cisillant le sol perpendiculairement à leur direction de propagation. Elles ont tendance à secouer les bâtiments horizontalement dans toutes les directions. Contrairement aux ondes P, elles ne se propagent pas dans les milieux liquides.

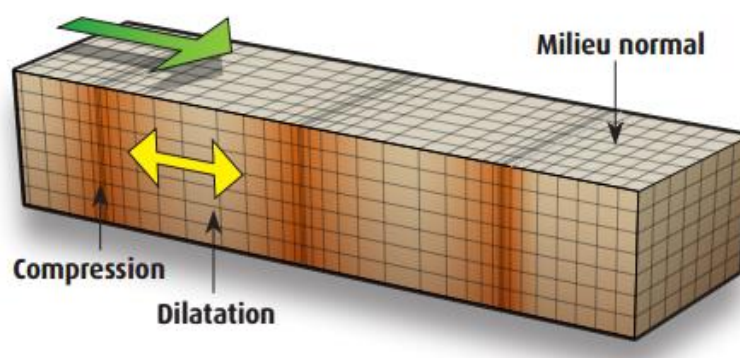


Figure I.4 : Onde P (onde de volume) [8].

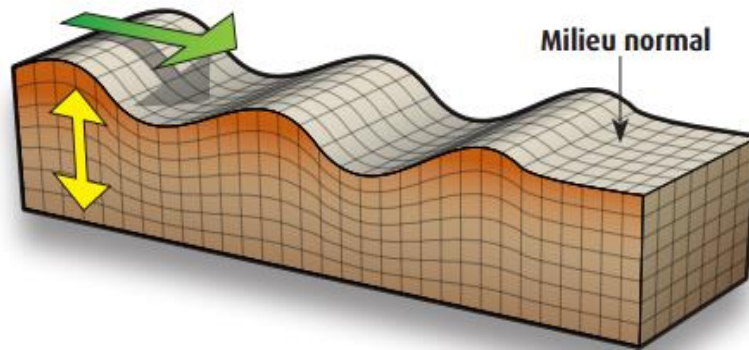


Figure I.5 : Onde S (onde de volume) [8].

### I.7.2 Ondes de surface

Qui se propage parallèlement à la surface et qui sont plus lents que les ondes de volume, mais peuvent avoir une amplitude plus élevée [3]. Elles se décomposent en deux types :

- **Ondes de Love** : Dont le mouvement se produit dans un plan horizontal perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde.
- **Ondes de Rayleigh** : Qui entraînent des mouvements complexes, à la fois verticaux et horizontaux.

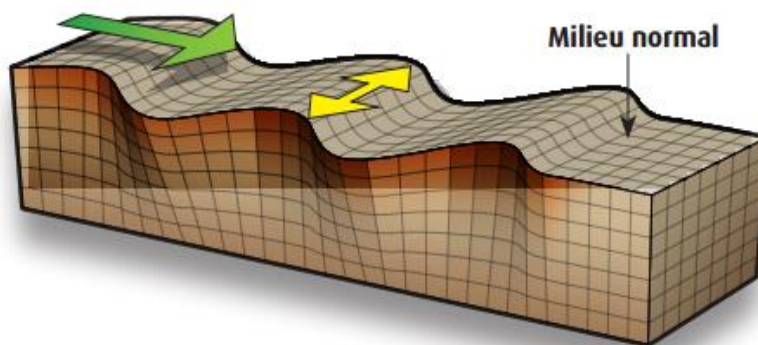


Figure I.6 : Onde L (onde de surface) [8].

## I.8 Enregistrement des ondes sismiques

Les ondes sismiques sont des ondes élastiques. Les vibrations engendrées par un séisme se propagent dans toutes les directions. Elles se succèdent et se superposent sur les enregistrements des sismomètres [10]. La mesure des ondes sismiques se fait à l'aide de :

### I.8.1 Sismographes

Sismographes ce sont des instruments très sensibles. Lors d'un séisme, le mouvement enregistré est une simplification par rapport au mouvement réel du sol. Pour obtenir une mesure précise, il faut enregistrer les deux composantes horizontales et la composante verticale de l'onde sismique. Pour cela, on utilise des sismographes à inertie, également appelés "sismographes horizontaux", pour enregistrer le mouvement du sol dans une direction horizontale, et des sismographes verticaux pour enregistrer le mouvement du sol dans une direction verticale. Aux stations d'observation sismographique, il est nécessaire d'avoir au moins trois sismographes : deux sismographes horizontaux et un sismographe vertical pour obtenir une mesure complète de l'onde sismique [1].

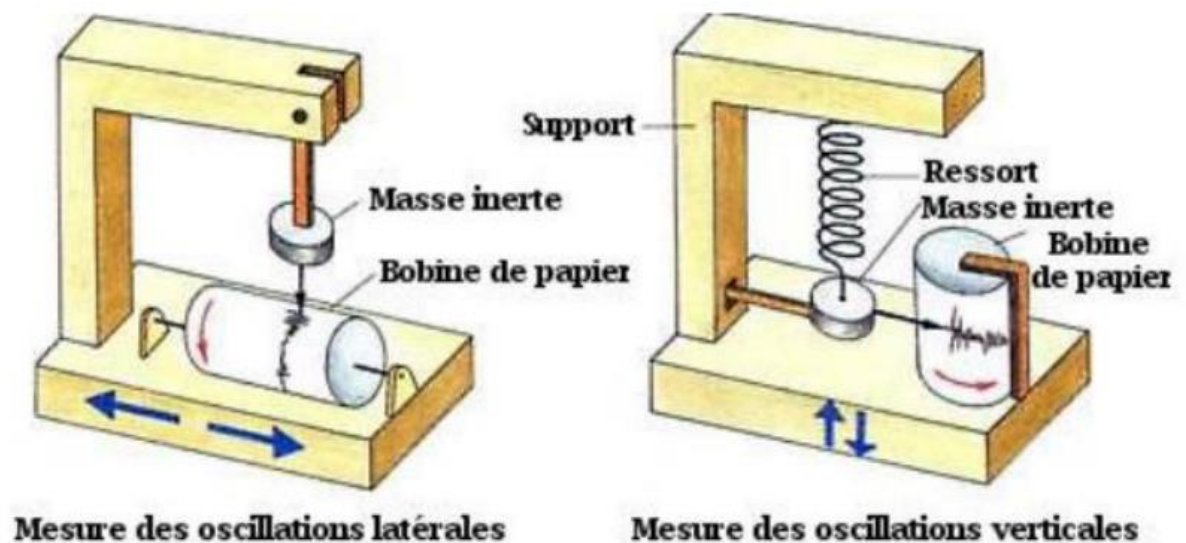


Figure I.7 : Fonctionnement d'un sismographe [6].

## I.8.2 Sismogramme

Un sismogramme est un enregistrement graphique des ondes sismiques captées par un sismographe. Cette courbe peut varier en fonction de plusieurs facteurs, notamment la quantité d'énergie libérée par le séisme, la distance entre le foyer et la station sismographique, la nature et la structure des couches de la Terre traversées par les ondes, ainsi que le type de sismographe utilisé pour la mesure. Les ondes sismiques enregistrées sur un sismogramme ne sont pas seulement celles qui ont parcouru le chemin le plus court entre le foyer et la station sismographique. En effet, elles peuvent subir de multiples interactions complexes avec les différentes couches de la Terre avant d'atteindre la station, ce qui peut affecter la forme de la courbe enregistrée. Le sismogramme est un outil important pour l'étude et la compréhension des tremblements de terre et de leur propagation à travers la Terre [6].

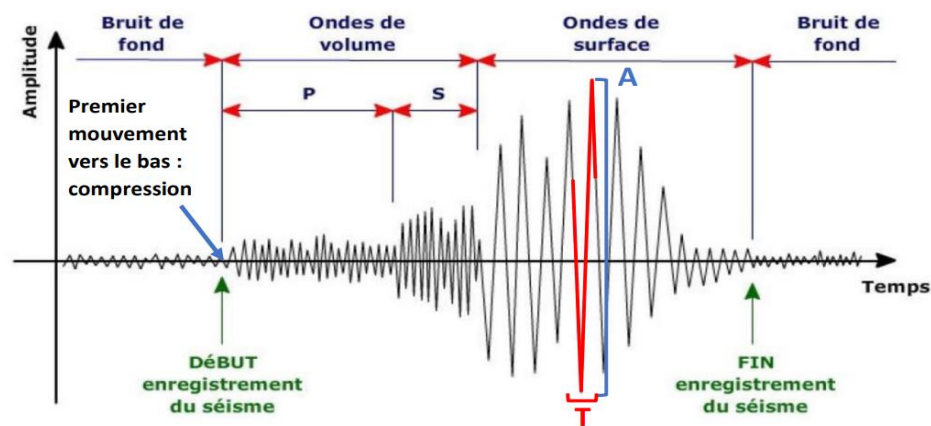


Figure I.8 : Interprétation d'un sismogramme théorique [11].

## I.9 Mesure d'un séisme

### I.9.1 Force sismique

Les tremblements de terre ne sont pas tous égaux en matière de force. La puissance d'un séisme dépend du type de séisme ainsi que de l'énergie libérée lors de sa rupture. Il existe plusieurs échelles sismiques pour mesurer la force d'un tremblement de terre. L'échelle MSK, nommée d'après ses créateurs Medvedev, Sponheuer et Karnik, prend en compte les dégâts causés par le séisme sur les bâtiments et les infrastructures. D'un autre côté, l'échelle de Richter est utilisée pour évaluer la force d'un séisme en fonction de sa magnitude, qui mesure l'énergie libérée par le séisme [12].

#### I.9.1.1 L'Echelle de Medvedev-Sponheuer-Karnik

A été développée en 1902 et modifiée en 1931. Mise au point par le sismologue italien Giuseppe Mercalli. Elle indique l'intensité d'un séisme sur une échelle de I à XII.

Cette intensité est déterminée par deux choses : l'ampleur des dégâts causés par un séisme et la perception qu'a eue la population du séisme. Il s'agit d'une évaluation qui fait appel à une bonne dose de subjectivité. De plus, la perception de la population et l'ampleur des dégâts vont varier en fonction de la distance à l'épicentre. On a donc avec cette échelle, une échelle variable géographiquement [1].

Tableau I.1 : Echelles d'intensité de Mercalli [1].

Echelle	Effets ressentis
I	Aucun mouvement n'est perçu.
II	Quelques personnes peuvent sentir un mouvement si elles sont au repos et/ou dans les étages élevés de grands immeubles.
III	A l'intérieur de bâtisses, beaucoup de gens sentent un léger mouvement. Les objets suspendus bougent. En revanche, à l'extérieur, rien n'est ressenti.
IV	A l'intérieur, la plupart des gens ressentent un mouvement. Les objets suspendus bougent, mais aussi les fenêtres, plats, assiettes, loquets de porte.
V	La plupart des gens ressentent le mouvement. Les personnes sommeillant sont réveillées. Les portes claquent, la vaisselle se casse, les tableaux bougent, les petits objets se déplacent, les arbres oscillent, les liquides peuvent déborder de récipients ouverts.
VI	Tout le monde sent le tremblement de terre. Les gens ont la marche troublée, les objets, tableaux, tombent, le plâtre des murs peut se fendre, les arbres et les buissons sont secoués. Des dommages légers peuvent se produire dans des bâtiments mal construits, mais aucun dommage structural.
VII	Les gens ont du mal à tenir debout. Les conducteurs sentent leurs voitures secouées. Quelques meubles peuvent se briser. Des briques peuvent tomber des immeubles. Les dommages sont modérés dans les bâtiments bien construits, mais peuvent être considérables dans les autres.
VIII	Les chauffeurs ont du mal à conduire. Les maisons avec de faibles fondations bougent. De grandes structures telles que des cheminées ou des immeubles, peuvent se tordre et se briser. Les bâtiments bien construits subissent de légers dommages, contrairement aux autres qui en subissent de sévères. Les branches des arbres se cassent. Les collines peuvent se fissurer si la terre est humide. Le niveau de l'eau dans les puits peut changer.
IX	Tous les immeubles subissent de gros dommages. Les maisons sans fondations se déplacent. Quelques conduits souterrains se brisent. La terre se fissure.
X	La plupart des bâtiments et leurs fondations sont détruits. Il en est de même pour quelques ponts. Des barrages sont sérieusement endommagés. Des éboulements se produisent. L'eau est détournée de son lit. De larges fissures apparaissent sur le sol. Les rails de chemin de fer se courbent.
XI	La plupart des constructions s'effondrent. Des ponts sont détruits. Les conduits souterrains sont détruits.
XII	Presque tout est détruit. Le sol bouge en ondulant.

### I.9.1.2 L'Échelle de Richter

L'échelle de Richter est une échelle logarithmique qui mesure la magnitude d'un tremblement de terre. Elle a été inventée par le sismologue américain Charles Richter en 1935 [13]. L'échelle de Richter est basée sur la mesure de l'amplitude des ondes sismiques générées par un tremblement de terre, mesurée à une distance de 100 km de l'épicentre. L'échelle de Richter va de 0 à 10, Chaque niveau de l'échelle correspond à un multiple de 10 de l'amplitude des ondes sismiques, et chaque niveau supérieur représente une énergie libérée 10 fois plus grande que le niveau précédent. Par exemple, un tremblement de terre de magnitude 5 est 10 fois plus puissant qu'un tremblement de terre de magnitude 4, et libère donc 10 fois plus d'énergie [14]. L'échelle de Richter est utilisée dans le monde entier pour évaluer la force des tremblements de terre et pour informer les populations sur les risques associés à ces événements sismiques. Cependant, l'échelle de Richter ne prend pas en compte tous les facteurs liés à la destruction causée par un tremblement de terre, tels que la profondeur de l'épicentre ou la nature du sol. De nos jours, on utilise d'avantage l'échelle de magnitude du moment, mise au point en 1979 Par le Japonais Hiroo Kanamori. Cela dépend aussi du logarithme, mais plus précisément que l'échelle de Richter [12].

### I.10 Historique des séismes en Algérie

L'Algérie est une région à haut risque sismique en raison de sa situation géographique. Le pays est situé à la frontière de deux plaques tectoniques, la plaque africaine et la plaque eurasienne, et est donc vulnérable aux tremblements de terre. Au fil des siècles, l'Algérie a été touchée par de nombreux séismes majeurs qui ont causé des pertes en vies humaines et des dommages matériels considérables. Le plus grand séisme jamais enregistré en Algérie s'est produit le 9 mai 1365 dans la région de Bejaïa. Ce tremblement de terre a été estimé à une magnitude de 7,5 et a causé de graves dommages à la ville et ses environs. Des témoins ont signalé des effondrements de bâtiments et de maisons, ainsi que des glissements de terrain et des fissures dans le sol. Il y a eu des milliers de morts et de blessés dans cette catastrophe.

Au XXe siècle, l'Algérie a connu plusieurs séismes majeurs. Le 9 septembre 1954, la ville de Chlef a été touchée par un séisme de magnitude 6,7 qui a fait plus de 1 200 morts et de nombreux blessés. En 1980, la ville d'El Asnam (aujourd'hui Chlef) a été touchée par un séisme de magnitude 7,3 qui a fait plus de 2 500 morts et de nombreux blessés. Ce séisme a également causé des dommages matériels considérables dans la région. Le séisme le plus

récent en Algérie s'est produit le 21 mai 2003 dans la région de Boumerdes, à environ 50 kilomètres à l'est d'Alger. Ce séisme de magnitude 6,8 a causé la mort de plus de 2 200 personnes et des milliers de blessés. La région a subi des dommages matériels considérables, y compris la destruction de nombreux bâtiments et maisons. Après chaque séisme majeur, Le gouvernement algérien a pris des mesures pour renforcer la réglementation sur la construction et améliorer les normes de sécurité pour mieux résister aux tremblements de terre. Des mesures ont également été prises pour améliorer la recherche et la surveillance sismiques dans le pays afin de mieux prévoir les risques. Malgré ces mesures, l'Algérie reste une région à haut risque sismique [15].

### **I.11 Classification des zones sismiques selon l'RPA 99 V2003**

L'évaluation du risque sismique par zone est une méthode de découpage du territoire en "zones de sismicité". À l'intérieur de ces zones, l'aléa sismique est considéré comme uniforme, ce qui permet de définir des règles pour les constructions résistantes aux séismes. Cette méthode constitue une base essentielle pour la définition de normes de sécurité sismique, en fonction des risques encourus dans chaque zone. En Algérie, le zonage sismique consiste à classer les régions en fonction de leur niveau de risque sismique [16]. Le zonage sismique adopté en Algérie est donné par la représentation suivante :

**Zone 0** : Sismicité négligeable.

**Zone I** : Sismicité faible.

**Zone II** : « a » et « b » : Sismicité moyenne.

**Zone III** : Sismicité élevée.

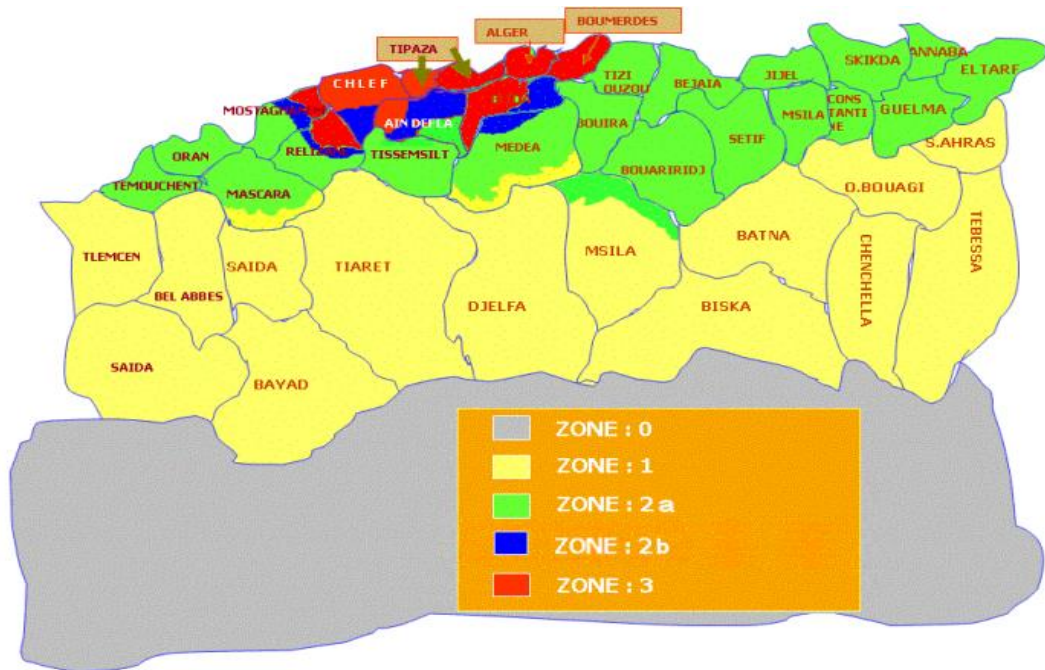


Figure I.9 : Carte du zonage sismique du territoire national (RPA99/2003) [16].

## I.12 Conclusion

La résolution des problèmes de construction d'ouvrages capables de résister aux secousses sismiques nécessite une connaissance approfondie des propriétés du mouvement sismique. Le but de ce chapitre est de clarifier comment se produit un séisme, et la propagation des ondes sismiques est explorée, de même que les méthodes d'enregistrement et de mesure des séismes, essentielles pour leur étude. Enfin, il met en évidence la classification des zones sismiques selon les normes de l'RPA99V2003.

## CHAPITRE II

# EFFETS DE TORSION SUR LES STRUCTURES EN BÉTON ARMÉ

### II.1. Introduction :

Les effets de la torsion sont considérés comme un facteur majeur responsable de sévères endommagements et même de ruines de plusieurs structures lors des séismes [26].

Dans le contexte de la sismique, la torsion des bâtiments repose sur plusieurs faits, en général, la présence d'asymétrie dans les bâtiments conduit à la distinction entre les centres de masse et les centres de rigidité, qui ont une excentricité structurelle à chaque plan  $i$ . Dans notre travail de recherche nous devons passer par les concepts théoriques de la torsion et son influence sur le comportement inélastique de la structure. Ce chapitre vise essentiellement à introduire les notions théoriques de torsion, la prise en compte de la torsion dans les prescriptions sismiques et la méthode d'évaluation des lois de comportement inélastique [18].

Les observations des bâtiments soumis aux tremblements de terre forts ont prouvé que la réponse de torsion excessive est l'un des facteurs les plus importants, qui produit des dommages graves pour les structures, même l'effondrement. La réponse de torsion excessive est souvent due aux asymétries structurales codifiées, dans la plupart des règles internationales, par une classification structurale qui caractérise les structures régulières et irrégulières, compulse le concepteur pour employer différentes méthodes pour l'analyse structurale [19].

### II.2. Effets de la torsion

La torsion autour de l'axe vertical est un phénomène destructeur lors d'un séisme car elle tend à solliciter de façon non uniforme les différents éléments de la structure. Il convient donc que les bâtiments puissent disposer, en plus de leur rigidité vis-à-vis des actions latérales, d'une résistance et d'une rigidité appropriées à la torsion. Afin de prendre en compte ce phénomène, il est nécessaire de comprendre son origine et ensuite d'expliquer comment calculer le centre de masse et le centre de rigidité [29].

### II.3. Origines du phénomène de torsion

Trois causes principales peuvent être à l'origine de la torsion :

- C'est l'existence d'excentricité entre les centres de gravité (CG) et les centres de rigidité (CR). Les composantes horizontales de l'action sismique induisent dans une structure, outre la flexion et le cisaillement, de la torsion. En effet, le centre de gravité, point de passage de la force d'inertie engendrée par le tremblement de terre, n'est généralement pas confondu avec le centre de rigidité de l'étage considéré. Pour un bâtiment multi-étages, les

centres de gravité et les centres de rigidité des différents niveaux ne sont pas nécessairement sur des lignes verticales [20].

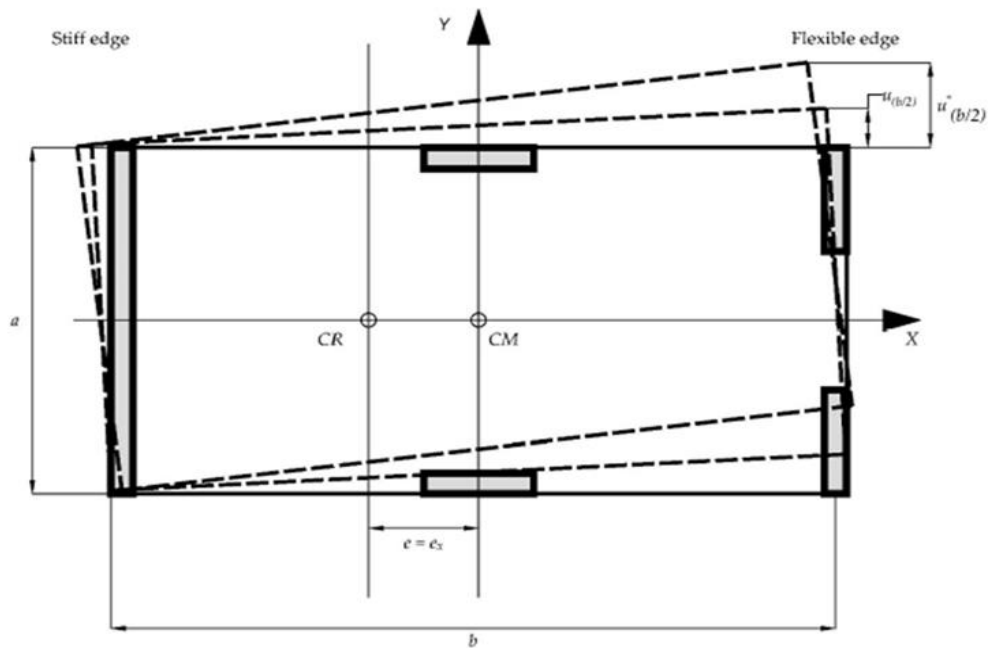


Figure II.1 : Excentrement entraînant un phénomène de torsion [27].

- Ensuite, les incertitudes diverses sur les positions des centres de gravité et des centres de rigidité à chaque étage sont des facteurs importants. La position du centre de masse de chaque niveau n'est pas connue de façon précise car elle dépend de l'utilisation de l'étage. En effet, la position des centres de rigidité de chaque niveau dépend de la flexibilité réelle des diverses unités de contreventement ; cette dernière n'est connue que par une estimation [29].

- Enfin, il y a des phénomènes additionnels qui sont aussi à l'origine de la torsion [29] éventuellement causé par la composante rotationnelle des mouvements horizontaux différentiels du sol correspondant à la propagation des ondes de cisaillement en surface et la possibilité de couplage des réponses longitudinale et torsionnelle [20].

## II.4. Dommages Irrégularités structurelles

### II.4.1. Dommages dus à l'irrégularité en plan :

L'irrégularité en plan est due principalement à l'excentricité entre le centre de masse (CM) et le centre de rigidité (CR) dans une structure provoquant des vibrations de torsion par rapport au centre de rigidité, entraînant de graves dommages aux composants structurels dans les régions les plus flexibles latéralement de la structure [21].

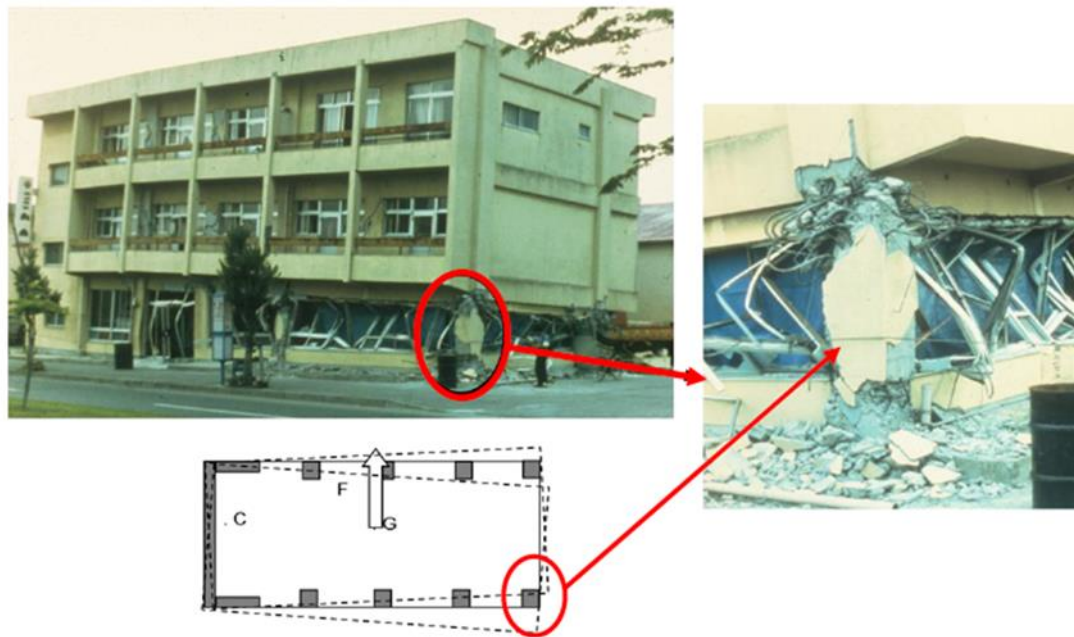


Figure II.2 : Les dommages causés par l'irrégularité en plan au cours du séisme de 1978 à Miyagi-Ken-Oki, (Japon) [25]

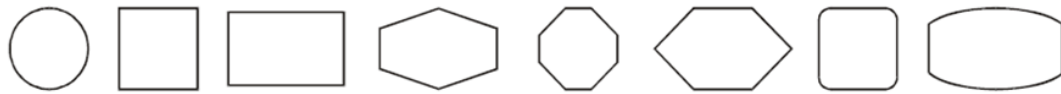
Le mouvement sismique horizontal est un phénomène bidirectionnel. La structure du bâtiment doit être capable de résister à des actions horizontales suivant toutes les directions et les éléments structuraux doivent des caractéristiques de résistance et de rigidité similaires dans les deux directions principales, ce qui se traduit par le choix de formes symétriques. La forme idéale n'est pas seulement symétrique suivant deux axes, mais se rapproche de l'axisymétrie [30].



Effets d'une irrégularité en plan au rez-de-chaussée favorisant des modes de vibration en torsion.

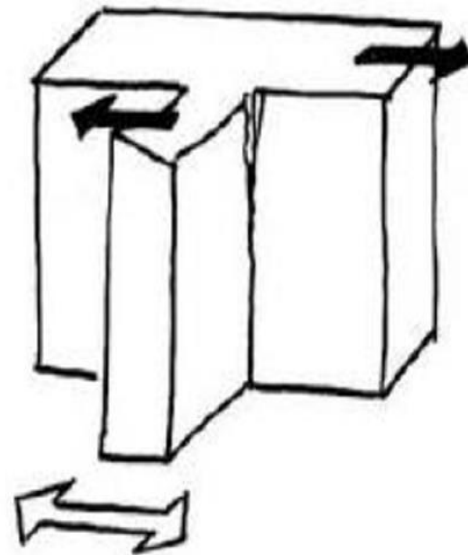
Figure II.3 : I 'irrégularité en plan [29].

Figures 5.4 car des dégâts importants ont souvent été observés à la jonction des pans dans des structures composées de plusieurs pans perpendiculaires [31].



**Figure II.4 : Formes favorables : plans simples à 2 axes de symétrie [30].**

La Figure II.4 montre les dommages dans les angles rentrants dus aux oscillations différentielles (séisme de Kobé, Japon 1995). Le bâtiment est conforme aux règles parasismiques mais le choix architectural d'une forme en L sans présence de joints ou de renforts a conduit à des dommages au niveau de l'angle rentrant dans le plan horizontal [25].



**Figure II.5 : Dommages dans les angles rentrants dus aux oscillations différentielles, (séisme de Kobé, Japon 1995) [21].**

#### II.4.2. Dommages dus à l'irrégularité en élévation :

Les irrégularités en élévation peuvent être la cause de dommages importants dans les structures en bâtiment car engendrant le phénomène de torsion qui lorsqu'il n'est pas prévu donne lieu à des contraintes supplémentaires particulièrement lors de sollicitations sismiques [21].



Figure II.6 : Dommages dus à l'irrégularité en élévation [25].

Dans la vue en élévation, les principes de simplicité et de continuité se traduisent par un aspect régulier de la structure primaire, sans variation brutale de raideur. De telles variations entraînent des sollicitations locales élevées [19].

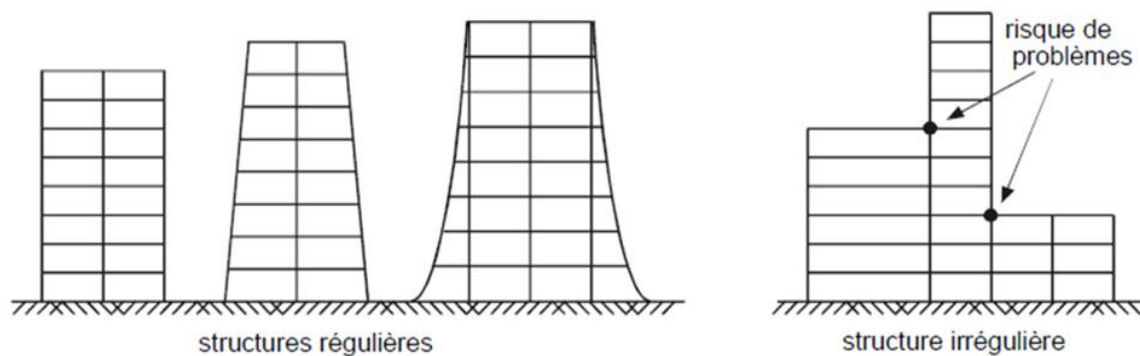


Figure II.7 : Régularité en élévation [31].

#### II.4. Sources de réponse de la torsion

Les sources de réponse de torsion peuvent être divisées en deux catégories, (a) torsion naturel et (b) torsion accidentel :

**a- La torsion naturel :** est considérée comme la réponse de torsion résultant du fait de couplage entre les mouvements latéraux et de torsion des bâtiments avec l'asymétrie plan inhérente [21] . Les forces dynamiques agissant sur une structure pendant un tremblement de terre sont en fonction de l'inertie massique et sont considérées pour agir par le centre

de la masse, CM, à chaque niveau de plancher [19]. Si le centre de masse et le centre de rigidité, (CR), de chaque étage ne coïncident pas avec les mouvements de torsion lorsque la structure est soumise à des tremblements de terre [32].

**b- La torsion Accidentelle :** est le résultat de toute variabilité imprévue dans les propriétés structurelles du bâtiment (i.e. incertitude dans la masse et la rigidité) et les mouvements du sol d'entrée qui conduisent à des changements dans la réponse en torsion. La répartition réelle de la masse dans un bâtiment est probablement différente de l'hypothèse généralement adoptée selon laquelle la masse du bâtiment est concentrée aux étages et uniformément répartie [21] . La torsion Accidentelle doit expliquer l'incertitude en déterminant les endroits du CM et du CR aussi bien que l'incertitude pour déterminer la rigidité et les forces de résistance d'élément de charge latérale dues à la variabilité dans les propriétés matérielles, les dimensions d'élément, la fabrication, le contrôle de qualité, les méthodes de construction, et l'histoire précédente de charge. Ceci implique que même nominalement les structures symétriques sont en soi asymétriques à un certain degré [19]. D'autres sources potentielles de torsion accidentelle comprennent les fluctuations de la rigidité au fil du temps, l'action inélastique supplémentaire et les vibrations de torsion causées par le mouvement des objets. Rotation du sol (la Terre) et différences géographiques dans les mouvements de la Terre, ainsi que d'autres causes inattendues de torsion [32].

## II.5. Caractéristiques géométriques de la structure :

Quel que soit le problème que l'on se propose de résoudre dans l'étude dynamique d'une structure, il est indispensable de connaître en premier lieu les caractéristiques géométriques qui interviennent dans l'évaluation des efforts horizontaux d'origine sismique. Les caractéristiques à déterminer sont : [32]

- Le centre de Masse
- Le centre de Torsion

### II.5.1. Centre de masse :

Le principe de calcul est de déterminer le centre de masse de chaque niveau des éléments constructifs qui ont une influence sur la stabilité du bâtiment (planchers, poutres, poteaux) [41].

Le centre de masse est repéré dans un système d'axes choisi, il est défini par la formule suivante : [37]

$$X_G = \frac{\sum W_i \times X_i}{\sum W_i} \quad (\text{II.1})$$

$$Y_G = \frac{\sum W_i \times Y_i}{\sum W_i} \quad (\text{II.2})$$

- **W<sub>i</sub>** : Le poids total de la masse concentrée de l'élément (i) du niveau considéré
- **X<sub>i</sub>** et **Y<sub>i</sub>** : Les coordonnées du centre de gravité de l'élément (i) par rapport au repère global.
- **X<sub>G</sub>** et **Y<sub>G</sub>** : Les coordonnées du centre de masse du niveau par rapport au repère global

### II.5.2. Centre de torsion :

Le centre de torsion T est un point caractérisé par :

- Une force passant par ce point provoquant une translation du plancher et donc de l'ensemble des éléments de contreventement parallèlement à cette force et sans rotation [29].
- Un moment autour de ce point provoque une rotation du plancher dans le même sens que le moment et sans translation.

Le centre de torsion est repéré dans le même système d'axe choisi, il est défini par les formules suivantes: [41]

$$X_T = \frac{\sum I_{yi} \times X_i}{\sum I_{yi}} \quad (\text{II.3})$$

$$Y_T = \frac{\sum I_{xi} \times Y_i}{\sum I_{xi}} \quad (\text{II.4})$$

Avec :

- $I_X$  et  $I_Y$  : Les inerties suivant les axes x et y respectivement de chaque élément de Contreventement (poteau, poutres) [29].
- $X_i$  ,  $Y_i$  : coordonnées du centre de torsion des éléments de contreventement par rapport au repère global choisi [42].
- $X_T$  ,  $Y_T$  : coordonnées du centre de torsion du niveau par rapport au repère global choisi. Il est rappelé que : [29]
- ✓ Le centre de torsion d'un poutres ou d'un poteau simple (rectangulaire) est confondu avec son centre de gravité;
- ✓ Les inerties sont calculées par les formules suivantes: [41]

-Pour les poteaux et les poutres :

$$I_X = \frac{bh^3}{12} \quad (\text{II.5})$$

$$I_Y = \frac{hb^3}{12} \quad (\text{II.6})$$

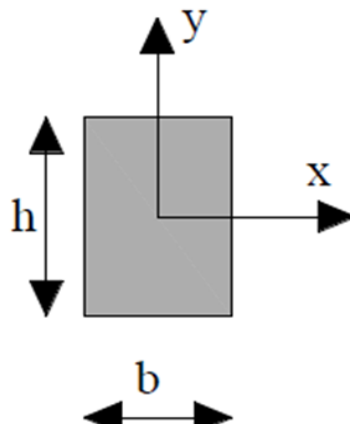


Figure II.8 : dimension des poutres et poteaux [29]

### II.6. Excentricité : [RPA 99 version 2003]

À chaque niveau et pour chaque direction de calcul, la distance entre le centre de gravité des masses et le centre des rigidités ne dépassent pas 15% de la dimension du bâtiment mesurée perpendiculairement à la direction de l'action sismique considérée [41].

### II.6.1. Excentricité théorique (statique) :

C'est la distance entre le centre de masse et le centre de torsion suivant les deux axes, elle est calculée comme suit : [37]

$$E_x = |X_T - X_G| \quad (\text{II.7})$$

$$E_y = |Y_T - Y_G| \quad (\text{II.8})$$

### II.6.2. Excentricité accidentelle : [RPA 99 version 2003]

Pour toutes les structures comportant des planchers ou diaphragmes horizontaux rigides dans leur plan, on supposera qu'à chaque niveau et dans chaque direction, la résultante des forces horizontales a une excentricité par rapport au centre de torsion égale à la plus grande des deux valeurs : [42]

- 5% de la plus grande dimension du bâtiment à ce niveau (cette excentricité doit être prise en considération de part et d'autre du centre de torsion).
- Excentricité théorique résultant des plans [29].

$$E_x = 0,05. L_x \quad (\text{II.9})$$

$$E_y = 0,05. L_y \quad (\text{II.10})$$

## II.7. Conclusion

Nous avons vu dans ce chapitre les effets de la torsion et les notions théoriques y afférentes. Il semble que la torsion est un phénomène très compliqué pour l'ingénierie. Il est clair que sa considération dans les règlements parasismiques est basée sur des formules empiriques. Les différents types des lois de comportement ont été exposés dans la dernière partie de ce chapitre [18].

**CHAPITRE III**

**ANALYSE STATIQUE NON  
LINÉAIRE DES STRUCTURES  
EN BÉTON ARMÉ  
«PUSHOVER»**

### III.1. Introduction

Le principe de base du calcul parasismique consiste essentiellement à assurer un degré de sécurité acceptable permettant de réduire les risques relatifs aux défaillances, aux catastrophes et aux pertes de vie. Une structure soumise à un violent séisme est sollicitée au de la du domaine élastique [40].

Pour cela, Les méthodes élastiques classiques s'avèrent insuffisantes, du fait qu'ils n'approchent pas au comportement réel de la structure. Un outil performant souvent utilisé dans ce domaine est fourni par les courbes de capacité (fragilité, Pushover) qui décrivent la probabilité d'atteindre ou dépasser un état de dommage provoqué par un séisme, c'est la procédure d'analyse statique non linéaire [34].

L'analyse statique non linéaire, ou la méthode d'analyse Push over, peut être exécutée directement par un programme informatique qui permet de modéliser le comportement non linéaire des éléments de résistance d'une structure aux charges latérales. Dans cette étude, les analyses de Push over ont été effectuées sur les structures en béton armé en utilisant le logiciel SAP2000V14 [33].

La méthode d'analyse statique non linéaire push over est une méthode approximative dont laquelle la structure est assujettie à une charge latérale croissante jusqu'à sa rupture, cela permet d'appréhender le comportement non linéaire de la structure [35].

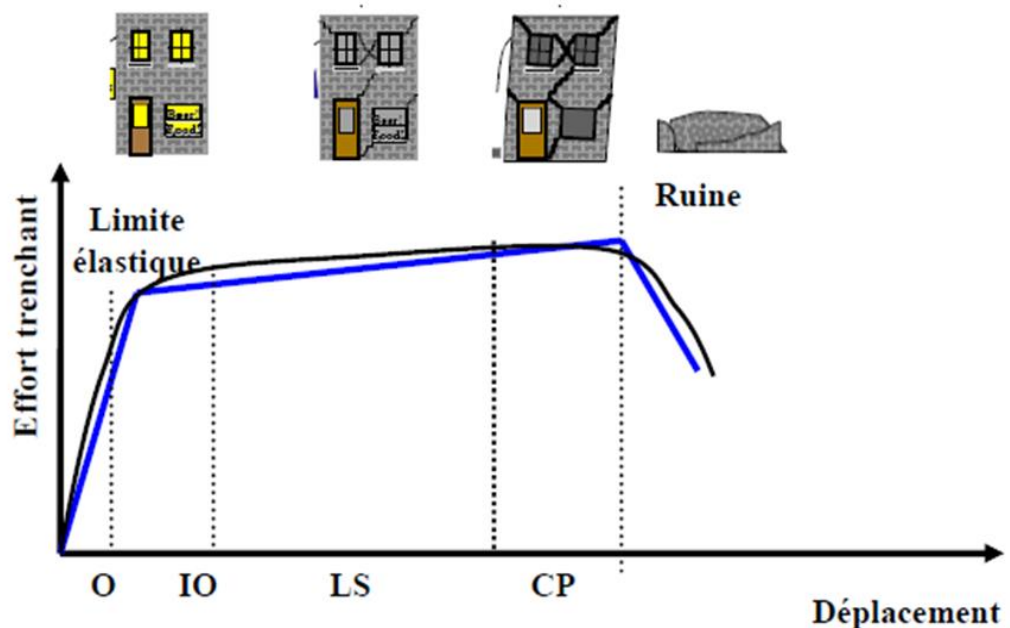


Figure III.1 : Niveaux d'endommagements décrits par une courbe de capacité [5].

D'après la (figure III.1) on remarque que la courbe est composée de quatre segment, chaque segment correspond à une étape d'endommagement.

- Le premier niveau : comportement élastique (un état de non endommagement).
- Le deuxième niveau: un endommagement mineur est susceptible de se développer.
- Le troisième niveau : un état d'endommagement avancé (sa stabilité étant en danger).
- Le quatrième niveau : effondrement de la structure (aucune capacité de résistance)



Figure III.2 : Niveaux d'endommagement [40].

### III.2. Origine de l'analyse Pushover :

L'analyse statique push over 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 [36]. Les chercheurs ont montré que ces hypothèses donnent de bons résultats concernant la réponse sismique (déplacement maximale) donnée par le premier mode de vibration de la structure simulé à un système linéaire équivalent [40].

### III.3. Hypothèses d'élaboration de la méthode (Pushover) :

L'analyse statique non-linéaire Pushover est basée sur l'hypothèse que la réponse d'une structure à multi degrés de libertés ( MDOF ) (multi degré of free dom) peut être assimilée à la réponse d'un système à un seul degré de liberté équivalent ( SDOF ) (single degré of free dom) (Figure.III.2.), ce qui implique que la réponse est fondamentalement contrôlée par un seul mode de vibration et la forme de ce mode. [35]

Les chercheurs ont montré que ces hypothèses donnent de bons résultats concernant la réponse sismique (déplacement maximale) donnée par le premier mode de vibration de la structure simulée à un système linéaire équivalent [5].

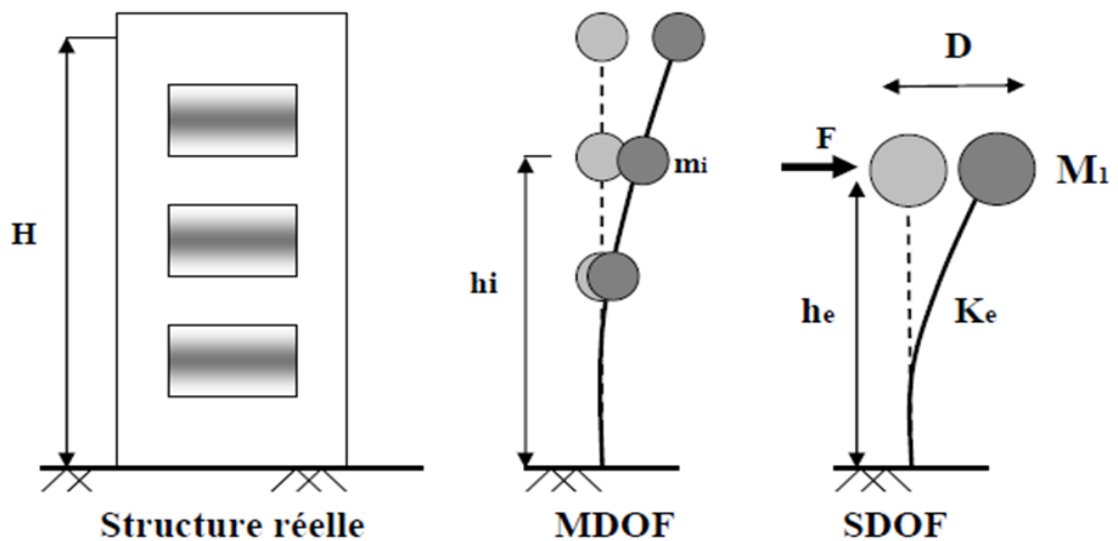


Figure III.3 : hypothèse de la méthode Pushover [35].

#### III.4. But de l'analyse Pushover :

Le but de l'analyse push over est de décrire le comportement réel de la structure et d'évaluer ses demandes et les différents paramètres en termes de sollicitations et déplacements dans les éléments de la structure lors d'un séisme et en comparant ces demandes aux capacités existantes aux niveaux de performance présentant un certain intérêt. L'évaluation est basée sur une évaluation des paramètres de performance les plus importants, y compris les déplacements entre les niveaux, déformations inélastiques dans les éléments (en valeur absolue ou normalisés par rapport à valeur de plastification), les déformations entre les éléments, et les forces dans les éléments et les assemblages [34].

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 être obtenues par une simple analyse élastique, on cite : [5]

- 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 [38].

- 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 [33].
- 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 [35].
- L'identification des zones critiques dans lesquelles les déformations sont supposées être grandes [5].
- L'identification des discontinuités de résistance en plan et en élévation qui entraînent des variations dans les caractéristiques dynamiques dans le domaine inélastique [36].
- 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 des structures [40].

### III.5. Détermination de la courbe de capacité :

La méthode de calcul la plus rigoureuse et plus complète d'analyse des structures sous l'action sismique est le calcul dynamique temporel non linéaire, qui permet de reproduire fidèlement le comportement de la structure et de connaître ses états de performance à différents instants du séisme, néanmoins ce type d'étude est difficilement envisageable pour des structures courantes car elle peut se révéler très coûteuse en temps de calcul en raison de la complexité des modèles et du nombre de calcul à réaliser [38].

Par conséquent, le calcul non linéaire en poussée progressive (Pushover) représente une alternative intéressante car les données matérielles sont similaires à celles de l'analyse temporelle non linéaire et les difficultés du calcul temporel pas à pas sont évitées [39].

Dans ce qui suit on présentera les différentes étapes d'une analyse Pushover telles que :

- Établissement de la courbe de capacité (effort tranchant à la base - déplacement au sommet), après l'application des forces latérales en utilisant les formules suivantes [5]

$$F = \left( \frac{m_i \cdot \phi_i}{\sum_{i=1}^N m_i \cdot \phi_i} \right) \cdot v_b \quad (\text{III.1})$$

$$D = \left( \frac{m_i \cdot \phi_i}{\sum_{i=1}^N m_i \cdot \phi_i} \right) \cdot D_i \quad (\text{III.2})$$

Avec :

- $m_i$  : Masse concentrée au niveau  $i$
- $D_i$  : Déplacement de la masse  $m_i$
- $\phi_i$  : Vecteur déplacement dumode fondamental
- $V_b$  : Effort tranchant à la base
- $F$  : force horizontale agissant sur un système à un seul degré de liberté
- $D$  : Déplacement à un degré de liberté d'un système.

- Transformation de la courbe obtenue (effort tranchant-déplacement au sommet), en Spectre de capacité, forme ( $S_a$ -  $S_d$ ) :

La force latérale appliquée ( $F$ ) est convertie en accélération spectrale  $S_a$ , et Le déplacement réel de la couche de toit ( $D$ ) est converti en déplacement spectral  $S_d$  par la formule suivante utiliser l'équation (III.3) :

$$S_a = \frac{F}{M_1} \quad S_d = \frac{D}{\Gamma_1 \phi_{ij}} \quad (\text{III.3})$$

Où,  $M_1$  est la masse totale du bâtiment,  $\phi_{ij}$  est l'amplitude modale au niveau de l'étage «  $i$  » pour le mode  $j$ ,  $D$  est l'amplitude du premier mode de vibration au sommet,  $\Gamma_1$  est le facteur de participation modale correspondant au premier mode de vibration

$$M_1 = \frac{(\sum_{i=1}^N m_i \phi_{i,1})^2}{\sum_{i=1}^N m_i \phi_{i,1}^2} \quad (\text{III.4})$$

$$\Gamma_1 = \frac{\sum_{i=1}^N m_i \phi_{i,1}}{\sum_{i=1}^N m_i \phi_{i,1}^2} \quad (\text{III.5})$$

- Courbe de capacité d'une structure est une représentation graphique qui relie l'effort tranchant à la base de celle-ci au déplacement au sommet, elle est obtenue par un calcul statique non linéaire appelé analyse "Pushover" [33].

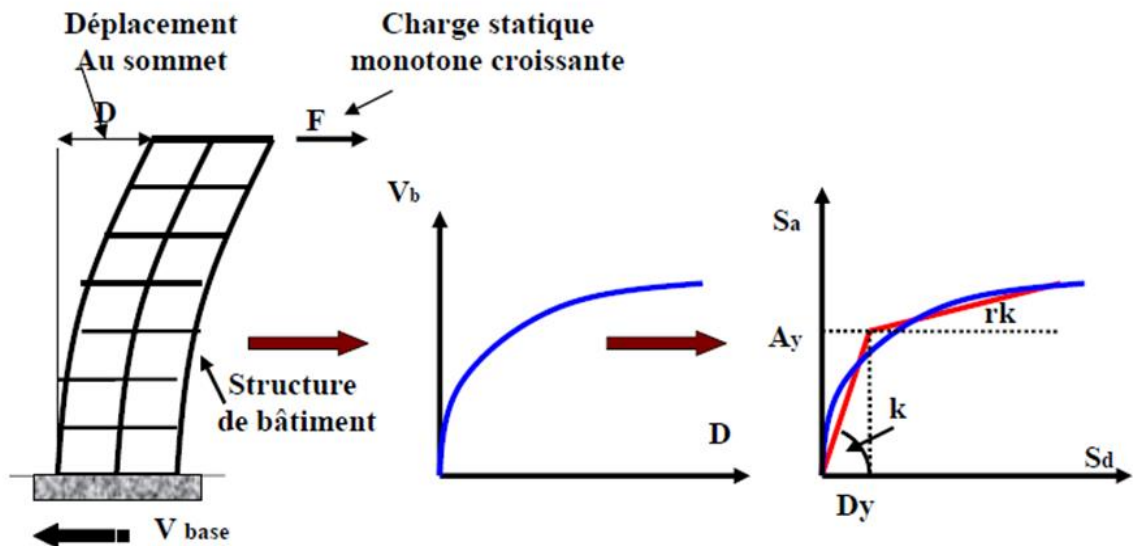


Figure III.4 : Conversion du diagramme de capacité en format (A-D) [5].

Nous obtenons, par ces transformations, une courbe de capacité dont les composantes sont le spectre du déplacement ( $S_d$ ) en abscisse et le spectre d'accélération ( $S_a$ ) en ordonnée [5].

$D_y$ ,  $A_y$ , déplacement et accélération à l'état limite élastique de la structure,  $r$  taux d'écrouissage,  $K$  la rigidité élastique initiale ( $K = \frac{A_y}{D_y}$ ),  $r_k$  est la rigidité plastique avec écrouissage.

### III.6. Formulation de l'analyse Pushover :

Prenons cette hypothèse et définissons le vecteur de déplacement  $X$  en termes de système plusieurs DDL comme suit :

$$X = \{\Phi\} X_t \quad (\text{III.6})$$

$X_t$  : est le déplacement au sommet de la structure [34].

L'équation différentielle d'un système à plusieurs degrés de liberté s'écrit : [30]

$$M\{\emptyset\}\ddot{\mathbf{x}}_t + C\{\emptyset\}\dot{\mathbf{x}}_t + Q = -M\{1\}\ddot{\mathbf{x}}_g \quad (\text{III.7})$$

$M$  : est la matrice de masse.

$C$  : est la matrice d'amortissement.

$Q$  : indique le vecteur de force au niveau d'étage.

$\ddot{\mathbf{x}}_g$  : est l'accélération du séisme.

On définit  $X^*$  : le déplacement de référence du système à un seul DDL comme suit : [34]

$$X^* = \frac{\{\emptyset\}^T M\{\emptyset\}}{\{\emptyset\}^T M\{1\}} \mathbf{x}_t \quad (\text{III.8})$$

On multiplie l'équation (équation III.7) par  $\{\emptyset\}$  et on remplace  $\mathbf{x}_t$  par sa valeur déduite de l'équation (équation III.8), on obtiendra l'équation différentielle suivante qui décrit la réponse du système à un seul DDL équivalent comme suit :

$$M^* \ddot{\mathbf{x}}_t^* + C^* \dot{\mathbf{x}}_t^* + Q^* = -M^* \ddot{\mathbf{x}}_g^* \quad (\text{III.9})$$

$M^*$ ,  $C^*$ ,  $Q^*$  représentent les propriétés du système à un seul DDL équivalent et sont données par :

$$M^* = \{\emptyset\}\{1\} \quad (\text{III.10})$$

$$C^* = \{\emptyset\}\{\emptyset\} \frac{\{\emptyset\}^T M\{1\}}{\{\emptyset\}^T M\{\emptyset\}} \quad (\text{III.11})$$

$$Q^* = \{\emptyset\} \quad (\text{III.12})$$

### III.7. Étapes de l'analyse Pushover :

- **Etape 1** : la structure est supposée soumise aux charges gravitaires constantes, selon la réglementation Algérien ces charges incluent les charges permanentes et une portion des charges d'exploitations ils sont données par :  $G+0,2Q$  [38].
- **Etape 2** : elle subit un autre chargement latéral triangulaire déterminé en calculant les charges latérales équivalentes qui représentent les forces d'inerties dues à la composante horizontale des sollicitations sismiques [35].

- **Etape3** : On détermine un déplacement cible, déplacement est choisi arbitrairement, à condition qu'il soit représentatif de la déformation de la structure [38].
- **Etape4** : En augmentant les forces latérales appliquées durant l'analyse, il y a apparition graduelle des rotules plastiques, l'évolution des mécanismes plastiques et l'endommagement progressif de la structure est fonction de l'intensité du chargement Latéral et des déplacements résultants [35].

### III.8. Avantages de l'analyse Pushover :

L'avantage de l'analyse pushover est qu'il s'applique également à l'évaluation des structures existantes et à la conception des neufs. L'analyse Pushover fournisse des informations sur beaucoup de caractéristiques de réponse qui ne peuvent pas être obtenues à partir d'une analyse statique ou dynamique élastique linéaire. Ce qui suit sont des exemples de telles caractéristiques de réponse : [35]

- Les demandes en force dans les éléments potentiellement fragiles, comme les demandes axiales en force dans les poteaux, les demandes en moments dans les zones de connexion poteau-poutre etc [52].
- L'identification des discontinuités de force en plan ou en élévation qui mèneront aux changements des caractéristiques dynamiques dans le domaine non élastique [34].
- L'évaluations des déplacements inter-étages, qui expliquent les discontinuités de force ou de rigidité et peuvent être employées pour contrôler les dommages et pour évaluer les effets P-delta [40].
- Vérification de la complétude du chemin de chargement considérant tous les éléments de la structure, les éléments non structuraux rigides ainsi que les fondations [43].

**III.9. Conclusion :**

L'analyse 'Pushover' est un outil puissant et très utile qui nous permet de rechercher la performance sismique des structures à travers leurs points de performance et de positionner et demande et de capacité donnent un aperçu sur le comportement de la structure lors d'un séisme [30].

Elle utilise la méthode statique non linéaire "Pushover" pour déterminer la courbe de capacité de la structure qui permet de mieux appréhender le comportement non linéaire des structures existantes en simulant la succession des phénomènes caractérisant l'état de chaque élément. De plus, elle permet une meilleure détermination des éléments critiques et de cerner le comportement sismique des structures d'une manière plus réaliste [5].

**CHAPITRE IV**

**APPLICATION NUMÉRIQUE**

## IV.1 Introduction

Le présent chapitre se concentre sur la modélisation numérique dont l'objectif principal est d'évaluer l'impact de la torsion sur la résistance sismique des bâtiments en béton armé (structures portiques auto stable). La torsion est un phénomène qui se produit lorsque les forces sismiques présentent de manière dissymétrique sur la structure, créé ainsi des torsions qui peuvent avoir des effets dévastateurs sur la structure. C'est pourquoi il est important d'analyser les effets de la torsion sur la résistance sismique des bâtiments portique en béton armé afin de prendre des mesures pour améliorer leur résistance. La modélisation implique la réalisation d'une analyse statique non-linéaire "Pushover" pour obtenir les corps de capacité de la structure. Cette analyse est une méthode numérique qui permet de simuler la réponse d'un bâtiment soumis à des charges sismiques. Elle permet de terminer la capacité de la structure à résister aux charges sismiques de plus en plus importantes jusqu'à ce qu'elle atteigne un état de défaillance.

Pour effectuer cette analyse, il est nécessaire de réaliser une analyse non linéaire en 3D d'une structure (R+2) à l'aide du logiciel SAP2000v14. Cette analyse en 3D permettra principalement de déterminer les déplacements et les efforts tranchants dans les deux cas, avec et sans torsion. Les déplacements et les efforts tranchants sont des paramètres importants pour évaluer la résistance sismique d'un bâtiment. La torsion est également un paramètre important à analyser dans une analyse compte dans, car elle a un impact significatif sur le séisme de résistance. Une fois les résultats de l'analyse obtenus, il est possible de comparer les résultats pour évaluer l'effet de la torsion sur la résistance sismique des bâtiments portique en béton armé.

## IV.2 Présentation et caractéristiques des structures

**IV.2.1 Description du bâtiment étudié :** Il s'agit d'un bâtiment portique en béton armé à usage d'habitation, composé de Rez-de-chaussée plus 2 étages (R+2) dont la hauteur de chaque étage est de 3.06m est classée dans le groupe d'usage 2, le bâtiment est implanté dans la commune de m'sila (wilaya m'sila), Qui est classée comme une zone de moyenne sismicité (IIa), d'après les règles parasismiques algériennes (RPA99V2003). Le système de contreventement est composé des portiques, 06 dans le sens longitudinal et 03 dans le sens transversal (voir figure IV.1). Les planchers de 20 cm d'épaisseur (16cm hauteur du corps creux + 4cm épaisseur de la dalle de compression). Les dimensions des poutres principales et secondaires sont (30x40) cm<sup>2</sup> et les poteaux ont des sections (40 x 40) cm<sup>2</sup> (la figure IV.3). Illustre les sections et les armatures des éléments structures (poutres et poteaux).

Pour étudier l'effet de la torsion, nous avons pris dans le premier cas une structure régulière horizontalement (La figure IV.1), Dans le second cas, nous avons pris une structure irrégulière horizontalement (la figure IV.2) :

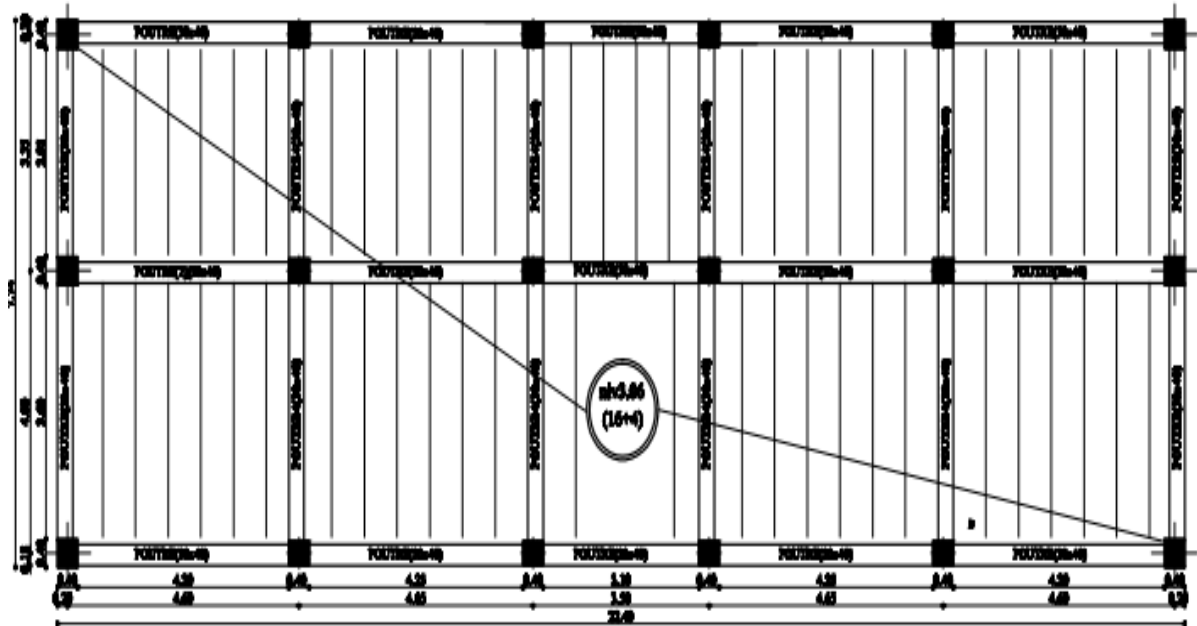


Figure IV.1 : Vue en plan d'un étage courant structure (Régulière).

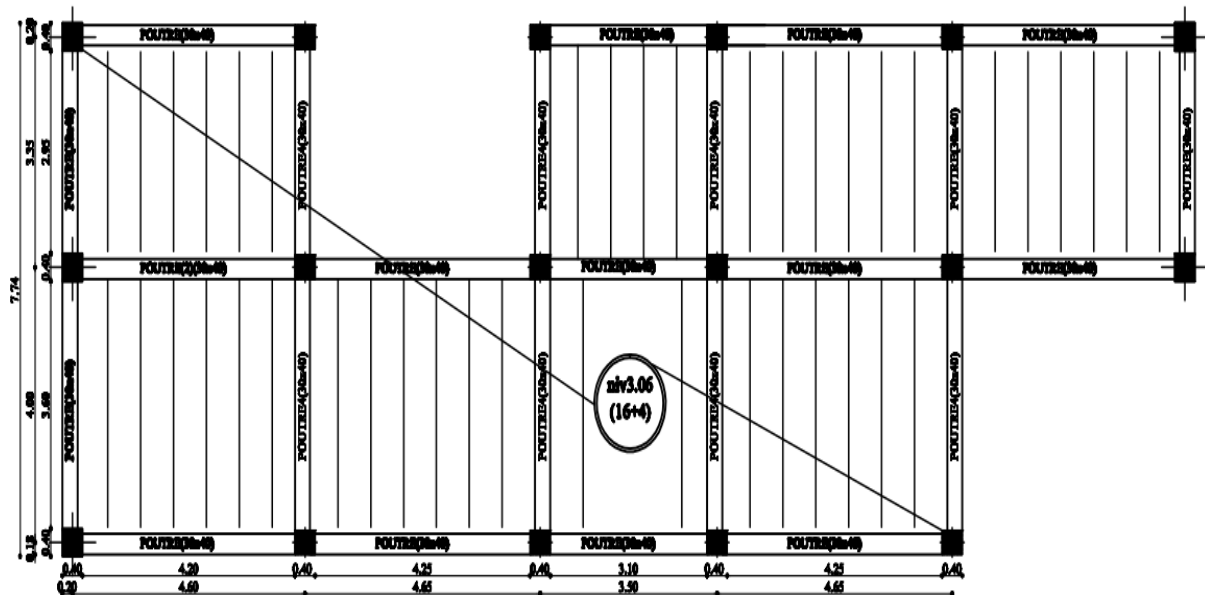


Figure IV.2 : Vue en plan d'un étage courant structure (Irrégulière).

Ferraillage des poteaux et poutres

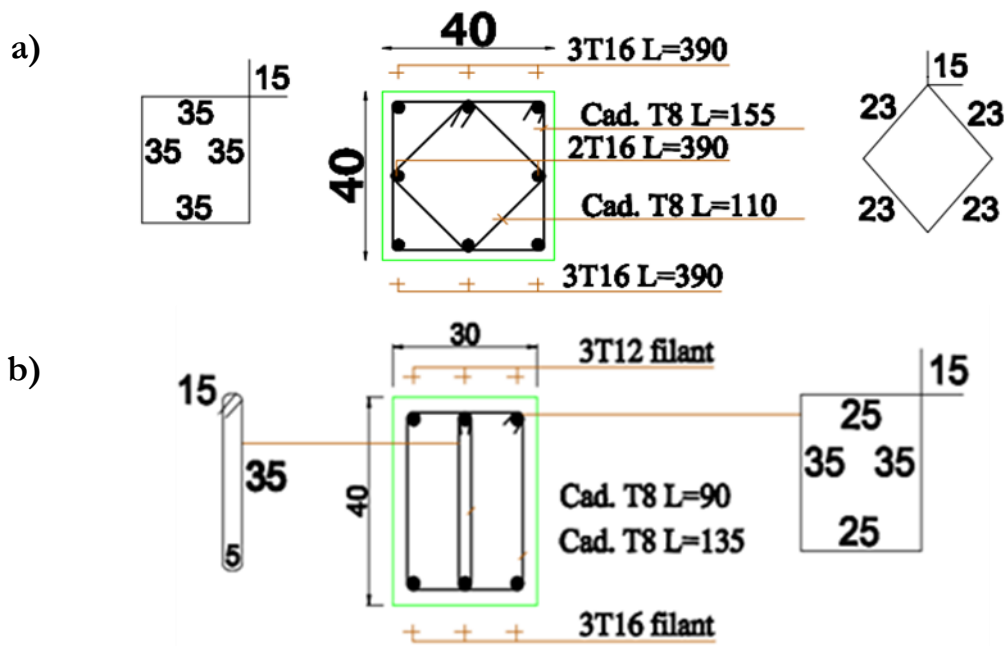


Figure IV.3 : Sections et ferraillage : a) poteaux - b) poutres

**IV.2.2 Caractéristiques géométrique :** Les caractéristiques géométriques du bâtiment étudié sont récapitulées dans le tableau IV.1 :

Tableau IV.1 : Caractéristiques géométriques du bâtiment étudié.

Caractéristiques géométriques	Valeur [m]
Longueur totale	22.40
Largeur totale	7.75
Hauteur de RDC	3.06
Hauteur d'étage courant	3.06
Hauteur totale	9.18

**IV.2.3 Caractéristiques des matériaux :** Les tableaux (IV.2) et (IV.3) résument respectivement les caractéristiques des matériaux utilisés pour le béton et l'acier :

Tableau IV.2 : Caractéristiques de béton.

Caractéristiques des matériaux	Valeur
Résistance caractéristique à la compression $f_{c28}$	25 MPa
Résistance limite en traction du béton $f_{t28}$	2.1 MPa
Contrainte limite du béton en compression $f_{bu}$	14.1 MPa
Coefficient de poisson $\nu$	0.2
Masse volumique du béton $\gamma$	2.4 t/m
Le module de déformation longitudinal instantané $E_{ij}$	32164,195 MPa
Le module de déformation longitudinal différé $E_{vj}$	10818,865 MPa
Module d'élasticité (Young instantané) $E_b$	32164 MPa
Déformation limite élastique $\epsilon_{be}$	2‰
Déformation ultime $\epsilon_{su}$	3.5‰

Tableau IV.3 : Caractéristiques d'acier.

Caractéristiques des matériaux	Valeur
Résistance limite élastique de l'acier Haute adhérence $f_e$	400 MPa
Résistance limite élastique de l'acier Rond lisse $f_{es}$	235 MPa
Module d'élasticité de l'acier $E_s$	2,1.10 <sup>5</sup> MPa
Déformation limite élastique $\epsilon_{se}$	2‰
Déformation ultime $\epsilon_{su}$	10‰

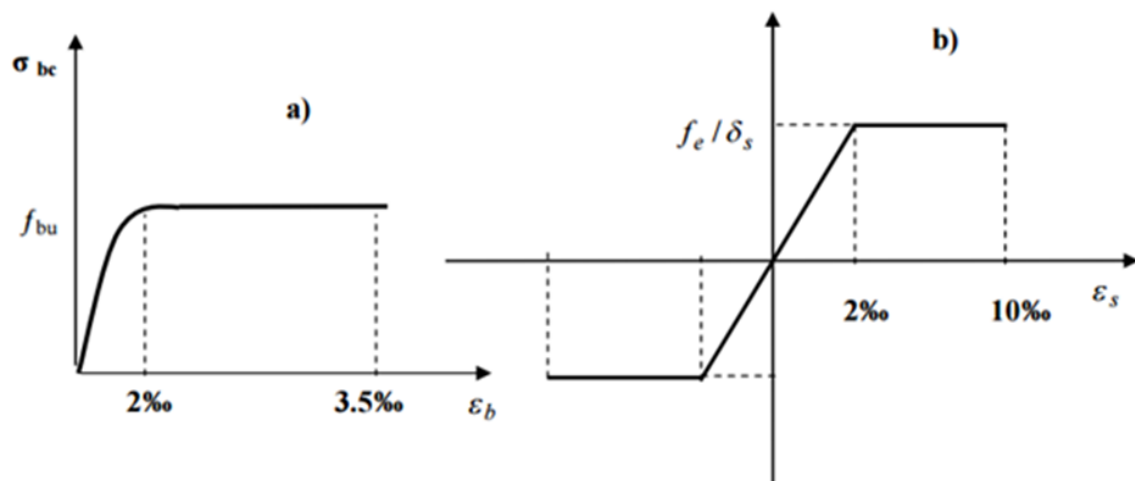


Figure IV.4 : Diagramme de déformation-contraainte [38] : a) béton - b) acier.

**IV.2.4 Définition des charges :** 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, ainsi que les charges d'exploitation multipliées par leur coefficient de pondération ' $\beta$ ', bâtiment d'habitation  $\beta=0.2$  [39].

$$\text{- Charges gravitaires} \quad W_i = W_{Gi} + \beta W_{Qi} \quad (\text{IV.1})$$

$$\text{- Charges permanentes :} \quad W_{Gi} = 5.4 \text{ KN/m}^2$$

$$\text{- Charges d'exploitation :} \quad W_{Qi} = 1.5 \text{ KN/m}^2$$

$$\text{- Poids total de la structure :} \quad W = \sum_{i=1}^n W_i$$

- Les charges latérales dans une direction horizontale définies dans cette étude sont présentées dans le tableau IV.4. Noter que nous avons utilisé une charge horizontale (représentant une action dynamique) Valant 1000 kN, la distribution de la charge appliquée en chaque étage on utilise l'équation (IV-2).

$$F_j = \frac{W_j h_j}{\sum_{i=1}^n W_i h_i} \cdot V_b \quad (\text{IV.2})$$

Avec :

$V_b$  : Pseudo force sismique.

$F_j$  : Force appliquée en chaque niveau.

$W$  : Poids total de la structure sésisme.

Le tableau IV.4 montre les résultats obtenus dans les valeurs de gravité et de force latérale :

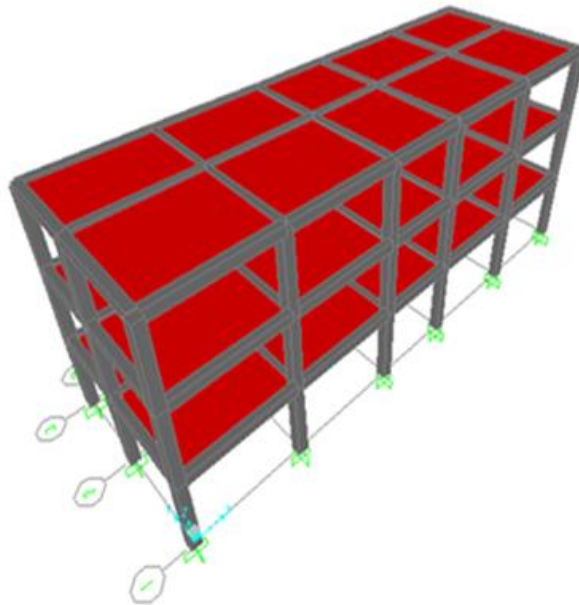
**Tableau IV.4 :** Valeurs des charges gravitaires et latérales.

Niveau	$W_i$ (KN)	$h_j$ (m)	$W_j \cdot h_j$ (KN.m)	$\frac{W_j \cdot h_j}{\sum W_i \cdot h_i}$	$F_{ix}$ (KN)	$F_{iy}$ (KN)
<b>01</b>	728.02	3.06	2227.74	0.16	166.7	166.7
<b>02</b>	728.02	6.12	4455.48	0.33	330.4	330.4
<b>03</b>	728.02	9.18	6683.22	0.49	490.1	490.1

### IV.3 Modélisation de la structure

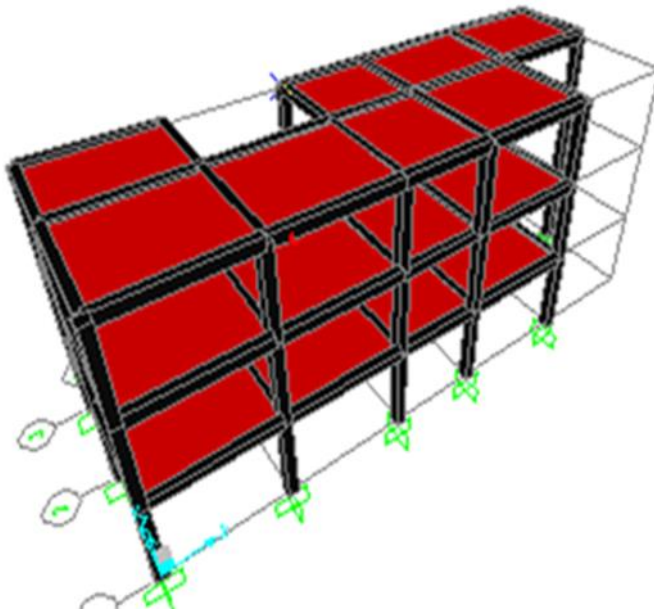
La structure est située en zone moyenne sismicité (IIa) et appartient au groupe d'usage 2, le coefficient de comportement de la structure  $R = 3,5$ , Facteur de qualité  $Q=1$ , et l'amortissement 5%.

**IV.3.1 Modélisation de la structure régulière (sans torsion) :** Les poutres et les poteaux, qui constituent les éléments structurels, sont représentés dans le modèle par des éléments poutres. Les planchers, quant à eux, sont considérés comme des diaphragmes rigides. La figure IV.5 représente la géométrie générale du modèle en 3D.



**Figure IV.5 :** Vue en 3D de structure régulière (sans torsion).

**IV.3.2 Modélisation de la structure irrégulière (avec torsion) :** La figure IV.6 représente la géométrie générale du modèle en 3D.



**Figure IV.6 :** Vue en 3D de structure irrégulière (avec torsion).

Pour déterminer les courbes de capacité de la structure portique en béton armé, deux modèles d'analyse ont été réalisés :

- a) L'analyse modale est une méthode utilisée pour déterminer le comportement dynamique d'un système structural. Elle permet d'obtenir les fréquences naturelles de vibration et les modes propres associés à la structure. Dans le contexte de l'élaboration des courbes de capacité, l'analyse modale est réalisée pour les charges gravitaires dans un régime élastique linéaire. Elle permet de calculer plusieurs éléments nécessaires à la conversion des courbes de capacité en spectres de capacité.
- b) Analyse statique non linéaire sur le même modèle 3D de la structure. Tout d'abord, le modèle a été soumis à des forces verticales, puis à un système de forces horizontales similaire aux forces sismiques, qui ont été augmentées jusqu'à ce que la structure soit détruite ou que le déplacement maximum soit atteint. Pour cette analyse, nous avons utilisé la loi globale de comportement bilinéaire en déformation, définie dans les normes FEMA 356 et ATC40 [40] (voir figure IV.7). Les poteaux et les poutres sont modélisés à l'aide d'éléments de type poutre, divisés en trois éléments finis (voir figure IV.8). Le premier élément, situé au milieu, suit une loi élastique avec une rigidité de flexion constante  $EI$ . Les deux autres, situés aux extrémités, se comportent comme des rotules plastiques, suivant une loi rigide-plastique caractérisée par une rigidité de flexion  $\alpha EI$ . Le coefficient  $\alpha$  est le résultat de la multiplication de la rigidité  $EI$  en état non fissuré par un coefficient qui tient compte de la diminution de rigidité due à la fissuration. Les

valeurs de rigidité recommandées par l'ATC 40 et le FEMA 356 sont fournies dans le Tableau IV.5.

Tableau IV.5 : Rigidité de flexion utilisé pour modéliser les éléments structuraux [46].

Rigidité de flexion	Élément fini élastique (KN.m <sup>2</sup> )	Fini plastique (kN.m <sup>2</sup> )
Poutre	$EI_b$	$0.5EI_b$
Poteau	$EI_c$	$0.7EI_c$

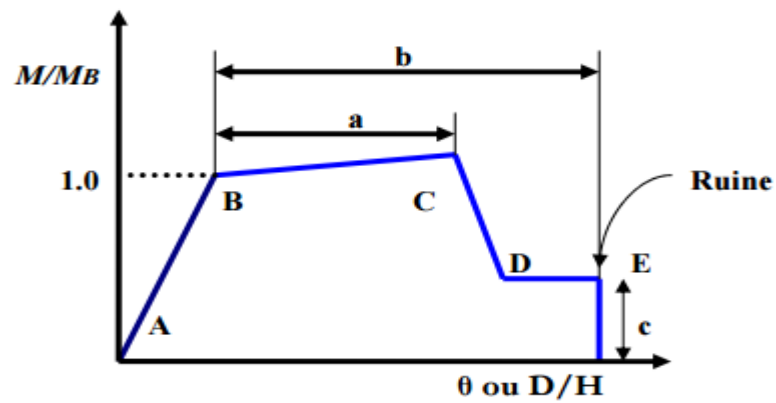


Figure IV.7 : Loi de comportement bilinéaire en déformation d'après [41] et [40].

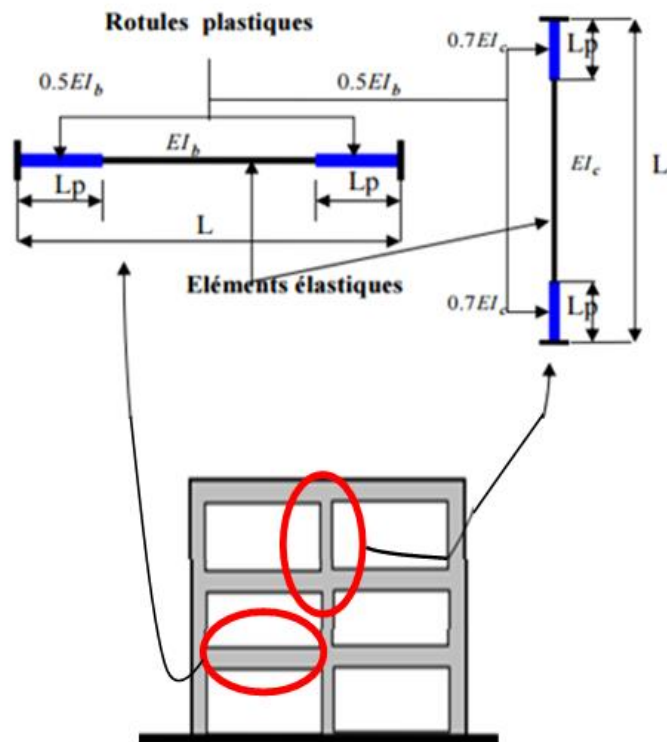


Figure IV.8 : Modélisation des éléments structuraux pour l'analyse "Pushover"[5].

#### IV.4 Résultats et interprétation sur les structures

Les résultats obtenus sont calculés par SAP2000v14

##### IV.4.1 Résultats d'analyse modale

L'analyse modale qui a été effectuée par le logiciel SAP2000v14, nous a donné des périodes pour le premier mode, de 0.304 s selon le sens (x) et de 0.315 s selon (y). Nous pouvons clairement constater que les périodes fondamentales obtenues par le logiciel SAP2000v14 sont relativement proches que celles fournies par la formule empirique (IV.3) et inférieures à celles fournies par (IV.4).

$$T = 0.09h_N / \sqrt{D} \quad (\text{IV.3})$$

$$T = C_T h_N^{3/4} \quad (\text{IV.4})$$

Où :

$h_N$  : hauteur mesurée en mètres à partir de la base de la structure jusqu'au dernier niveau.

$C_T$  : coefficient, fonction du système de contreventement, du type de remplissage pour notre cas  $C_T = 0.075$ .

$D$  : est la dimension du bâtiment mesurée à sa base dans la direction du calcul considéré.

Le tableau IV.6 présente les résultats des périodes fondamentales obtenues par le logiciel SAP2000 v 14 et la formule empirique donnée dans l'RPA 99 version 2003.

**Tableau IV.6 :** Comparaison du résultat des périodes fondamentales.

Période (s)	Sens Transversal	Sens Longitudinal
$T$ (SAP2000v14)	<b>0.31</b>	<b>0.30</b>
$T = C_T \cdot h_N^{3/4}$ (RPA)	<b>0.39</b>	<b>0.39</b>

Du logiciel SAP2000v14 on a tiré les résultats qui sont illustrés dans le tableau IV.7 pour la structure régulière (sans torsion) et le tableau IV.8 pour la structure irrégulière (avec torsion) :

Tableau IV.7 : Période de participation modale structure régulière.

Mode	Période(s)	UX	UY	Sum UX	Sum UY	Sum RZ
<b>1</b>	<b>0.315072</b>	0%	<b>83%</b>	0%	83%	54%
<b>2</b>	<b>0.304278</b>	<b>85%</b>	0%	85%	83%	60%
<b>3</b>	0.275905	0%	0%	85%	83%	83%
<b>4</b>	0.205326	0%	2%	85%	85%	84%
<b>5</b>	0.179117	0%	0%	85%	85%	85%
<b>6</b>	0.145996	0%	0%	85%	85%	85%
<b>7</b>	0.140242	0%	0%	85%	85%	85%
<b>8</b>	0.109868	0%	0%	85%	85%	85%
<b>9</b>	0.105467	0%	0%	85%	85%	85%
<b>10</b>	0.099638	0%	10%	85%	95%	92%
<b>11</b>	0.099264	10%	0%	95%	95%	93%
<b>12</b>	0.096314	0%	0%	95%	95%	94%

Tableau IV.8 : Période de participation modale structure irrégulière.

Mode	Période(s)	UX	UY	Sum UX	Sum UY	Sum RZ
<b>1</b>	<b>0.290095</b>	0%	<b>81%</b>	0%	81%	60%
<b>2</b>	<b>0.284287</b>	<b>84%</b>	0%	85%	82%	63%
<b>3</b>	0.256293	0%	1%	85%	83%	81%
<b>4</b>	0.202333	0%	2%	85%	85%	84%
<b>5</b>	0.173625	0%	0%	85%	85%	84%
<b>6</b>	0.147304	0%	0%	85%	85%	84%
<b>7</b>	0.137591	0%	0%	85%	85%	85%
<b>8</b>	0.114619	0%	0%	85%	85%	85%
<b>9</b>	0.10607	0%	0%	85%	85%	85%
<b>10</b>	0.095076	0%	0%	85%	85%	85%
<b>11</b>	0.091712	0%	8%	85%	93%	93%
<b>12</b>	0.090342	10%	0%	96%	94%	93%

#### IV.4.2 Résultats d'analyse statique non linéaire

Les courbes force déplacement (effort tranchant à la base – déplacement au sommet de la structure) déduit du calcul numérique sont présentés dans les figures IV.9 et IV.10 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.5 Déterminations de la courbe de capacité

L'analyse Pushover est réalisée en appliquant à la structure une série de forces latérales croissantes jusqu'à ce que le déplacement au sommet de la structure atteigne un déplacement cible prédéfinie [42]. La courbe qui représente le comportement de la structure est tracée en utilisant le déplacement du sommet (D) en abscisse et l'effort tranchant à la base (V) en ordonnée.

### IV.5.1 Courbe de capacité de la structure régulière (sans torsion)

L'analyse statique non linéaire permet d'obtenir la courbe de capacité de la structure (Effort tranchant à la base - Déplacement au sommet) pour une distribution des forces incrémentées de façon progressive jusqu'à l'atteinte du déplacement cible :

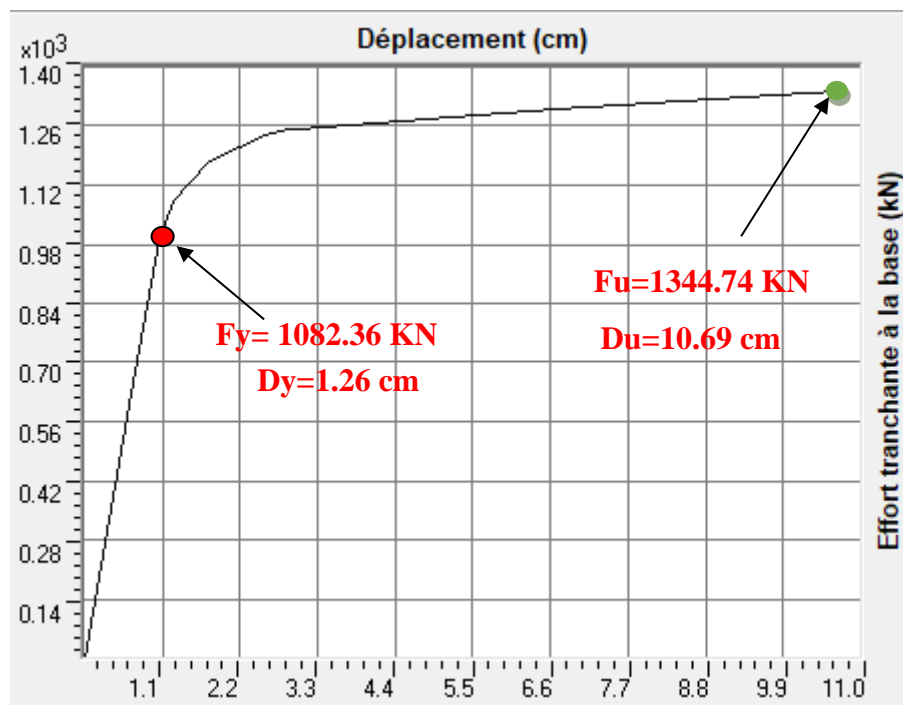


Figure IV.9 : Courbe de capacité : effort tranchant à la base - déplacement au sommet, sens longitudinal (x)

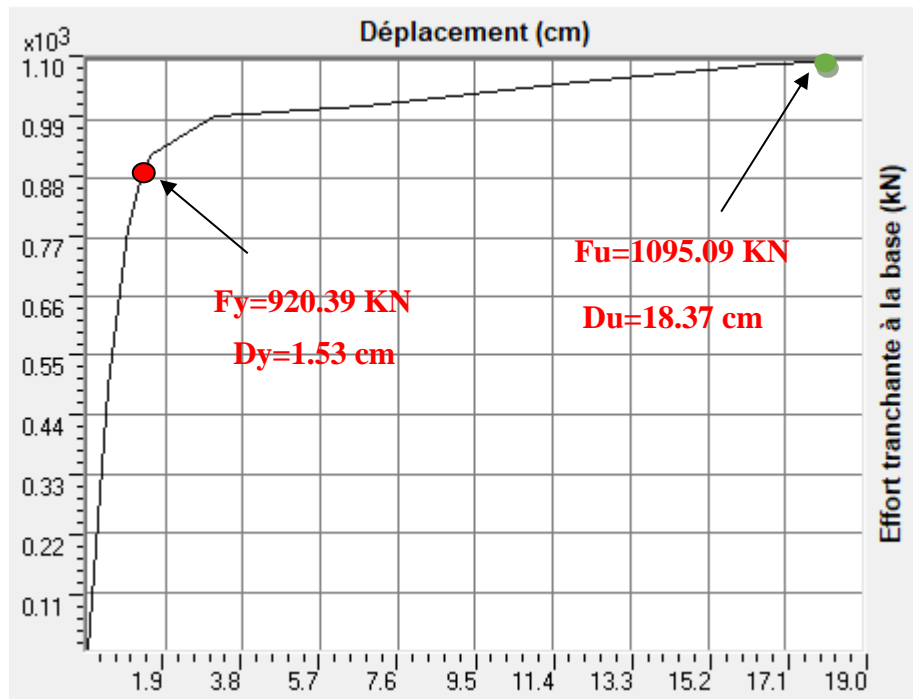


Figure IV.10 : Courbe de capacité : effort tranchant à la base - déplacement au sommet, sens transversal (y)

Les principaux résultats des efforts tranchants, des déplacements de la structure selon les deux sens sont présentés dans le tableau :

Tableau IV.9 : Les principaux résultats de l'effort tranchant, déplacement (régulière).

Caractéristiques	Effort	Déplacement	Effort	Déplacement
	Élastique	élastique	Rupture	ultime
	$F_y$ (KN)	$D_y$ (cm)	$F_u$ (KN)	$D_u$ (cm)
Sens (x)	1082.364	1.263	1344.742	10.699
Sens (y)	920.397	1.539	1095.092	18.379

**Comparaison :** on peut évaluer la résistance et la ductilité de la structure dans chacune des directions. La figure IV.11 permet de comparer les courbes de capacité sismique dans les deux directions principales (x et y) d'une structure régulière.

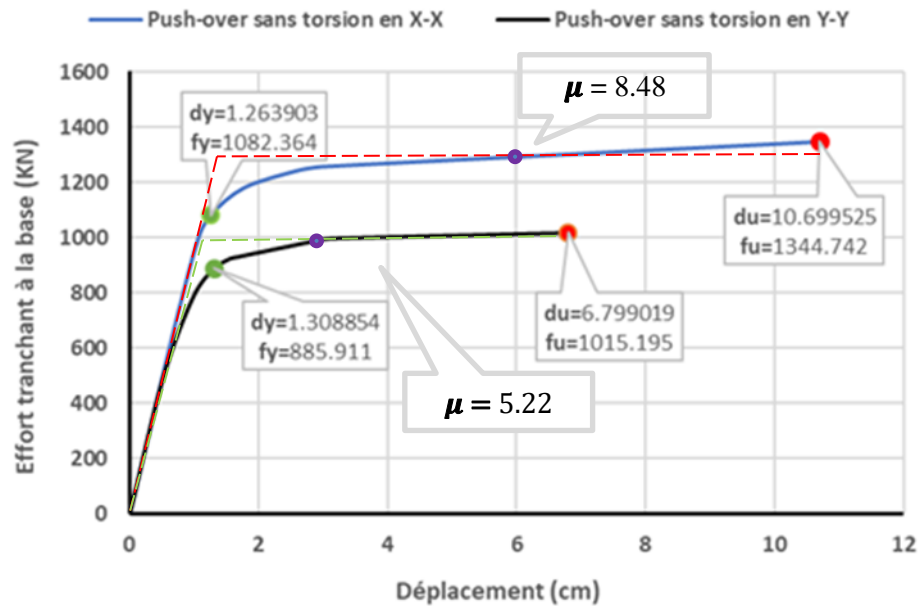


Figure IV.11 : Courbe de capacité (V-D) sens X et Y variante 1.

#### IV.5.2 Courbe de capacité de la structure irrégulière (avec torsion)

Dans la conception des bâtiments, les formes irrégulières sont de plus en plus courantes pour répondre à des exigences esthétiques ou fonctionnelles particulières. Cependant, ces formes peuvent rendre la structure du bâtiment plus vulnérable aux forces de torsion, qui peut causer des déformations excessives et des dommages importants aux structures. En effet, les formes irrégulières peuvent générer des moments de torsion supplémentaires, qui sont des forces de rotation qui subissent les éléments de la structure. Ces moments de torsion peuvent entraîner des contraintes et des déformations non uniformes qui peuvent affaiblir la résistance du bâtiment et le rendre plus vulnérable aux effets des tremblements de terre ou des vents forts. Dans cette situation, nous supposons que le bâtiment demeure le même, mais que des modifications seront apportées à sa conception.

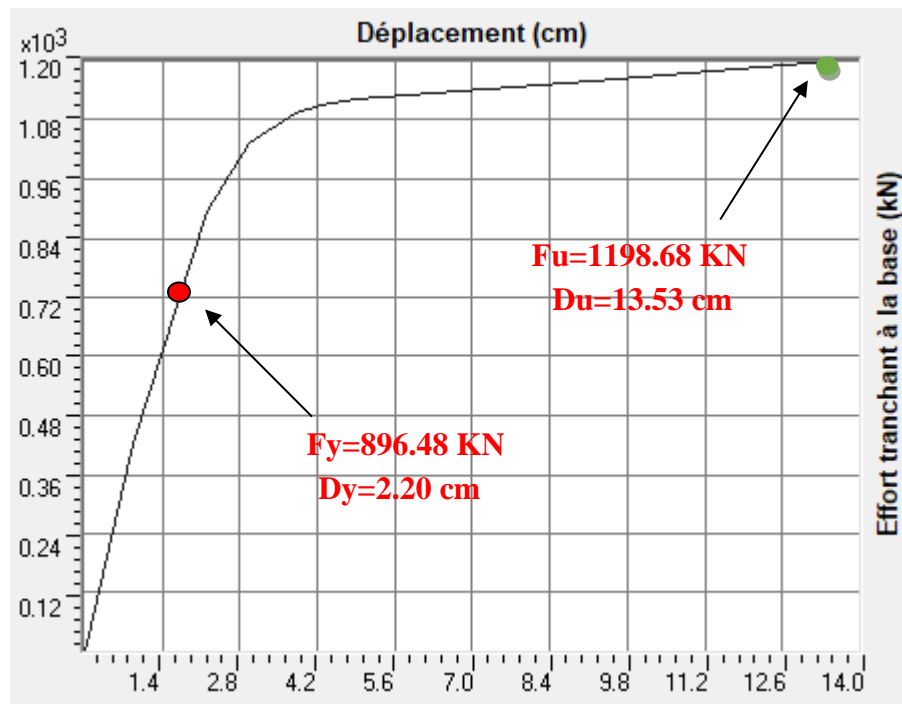


Figure IV.12 : Courbe de capacité : effort tranchant à la base - déplacement au sommet, sens longitudinal (x)

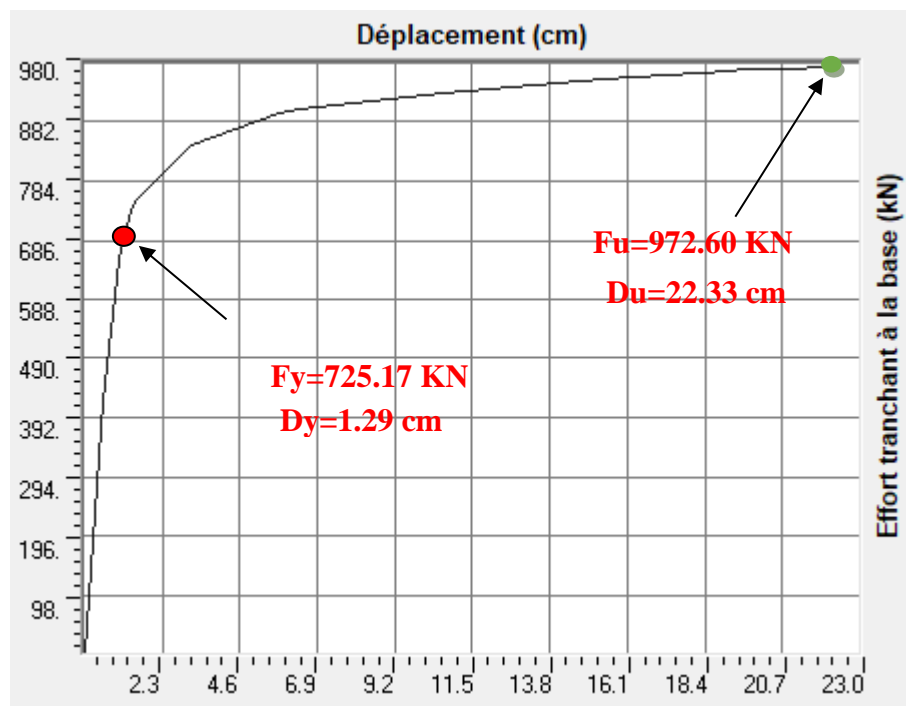


Figure IV.13 : Courbe de capacité : effort tranchant à la base - déplacement au sommet, sens transversal (y)

Les principaux résultats des efforts tranchants, des déplacements de la structure selon les deux sens sont présentés dans le tableau :

Tableau IV.10 Les principaux résultats de l'effort tranchant, déplacement (irrégulière).

Caractéristiques	Effort	Déplacement	Effort	Déplacement
	Élastique $F_y$ (KN)	élastique $D_y$ (cm)	Rupture $F_u$ (KN)	ultime $D_u$ (cm)
Sens (x)	896.482	2.200	1198.689	13.530
Sens (y)	725.174	1.297	972.601	22.331

**Comparaison :** La figure IV.14 montre la comparaison des courbes de capacité selon les deux sens (x et y) pour la structure irrégulière.

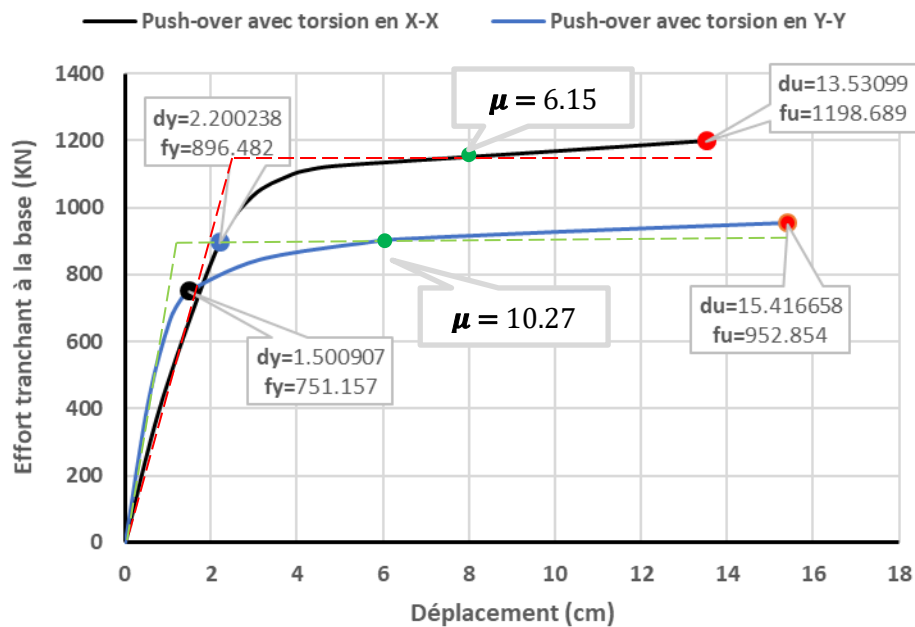


Figure IV.14 : Courbe de capacité (V-D) sens X et Y variante 2.

#### Commentaires :

D'après les courbes de capacité précédentes (figure IV.9) et (figure IV.14) nous pouvons remarquer que :

- Les caractéristiques des limites élastiques (effort tranchant - déplacement) indiquent que la structure présente une plus grande marge élastique dans la direction (x) par rapport à la direction (y).
- La structure présente une résistance globale plus élevée dans la direction (x) par rapport à la direction (y), principalement en raison du grand nombre de poteaux présents dans le sens (x). Par conséquent, la structure atteint plus rapidement le domaine plastique dans la direction (x) par rapport à la direction (y).

- La ductilité de la structure est plus faible dans la direction (x) par rapport à la direction (y).
- Au début de la courbe, nous observons un comportement élastique du chargement (représenté par une ligne droite), ce qui indique que la structure présente une rigidité maximale à ce domaine.
- Durant la phase élastique, la présence de rotules plastiques permet à la structure de supporter des déplacements plus importants tout en subissant une perte progressive de rigidité jusqu'à ce qu'elle atteigne sa capacité ultime.
- Les contraintes résiduelles présentes dans la structure jouent un rôle essentiel en lui permettant de résister aux charges gravitaires jusqu'à ce qu'elle atteigne la déformation ultime conduisant à sa ruine.

#### IV.6 Demande en ductilité ( $\mu$ )

Lorsqu'un séisme de forte intensité survient, les différents éléments constitutifs d'une structure peuvent subir des déformations significatives. Si ces éléments ne sont pas capables de se déformer suffisamment, ils risquent d'être endommagés, ce qui peut entraîner l'effondrement de la structure. La ductilité, qui représente la capacité d'un matériau à se déformer sans se rompre, est un paramètre crucial en ingénierie sismique [43].

Dans le cadre de cette étude, le rapport de ductilité a été sélectionné comme un indicateur permettant d'évaluer la capacité de ductilité des structures étudiées.

$$\mu_d = \frac{D_u}{D_y} \quad (\text{IV.5})$$

**$D_u$**  : Déplacement ultime de la structure .

**$D_y$**  : Déplacement élastique de la structure.

### IV.7 Comparaison entre les deux structures

La comparaison des courbes de capacité sismique entre la structure régulière et la structure irrégulière permettent d'observer les différences fondamentales de comportement entre les deux. Et nous pouvons noter les changements brusques de rigidité et de résistance, la ductilité et la capacité de dissipation d'énergie des structures sous l'effet des séismes. Ces comparaisons permettent d'identifier les zones de vulnérabilité et de prendre des mesures appropriées pour améliorer la performance sismique de la structure.

Les figures IV.15 et IV.16 représente la comparaison des courbes de capacité des structures régulières et irrégulières selon le sens longitudinal (x) et le sens transversal (y) respectivement.

Selon X-X :

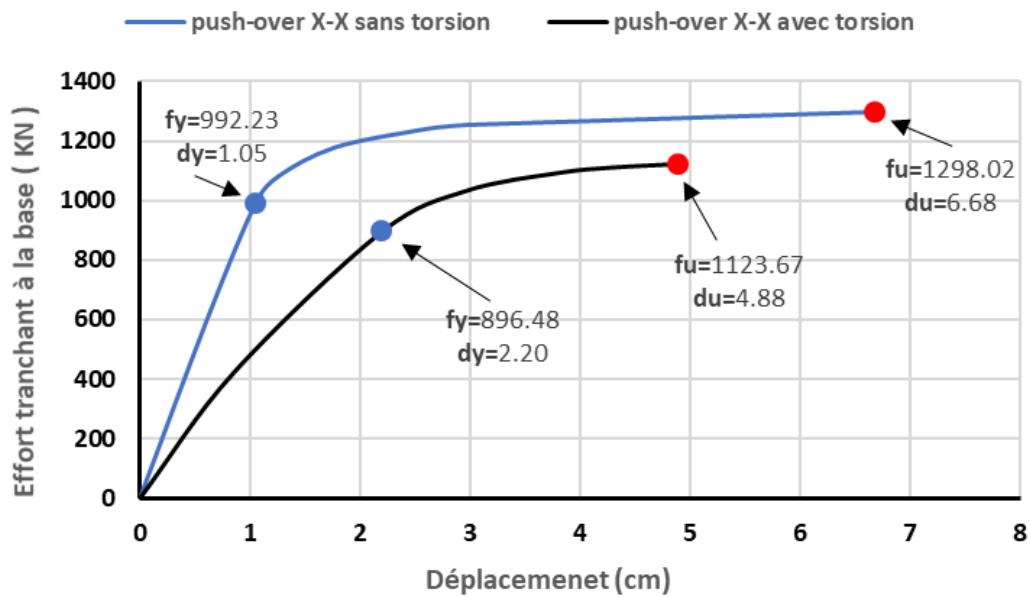


Figure IV.15 : Courbe de capacité des deux variantes - sens longitudinal (x).

Selon Y-Y :

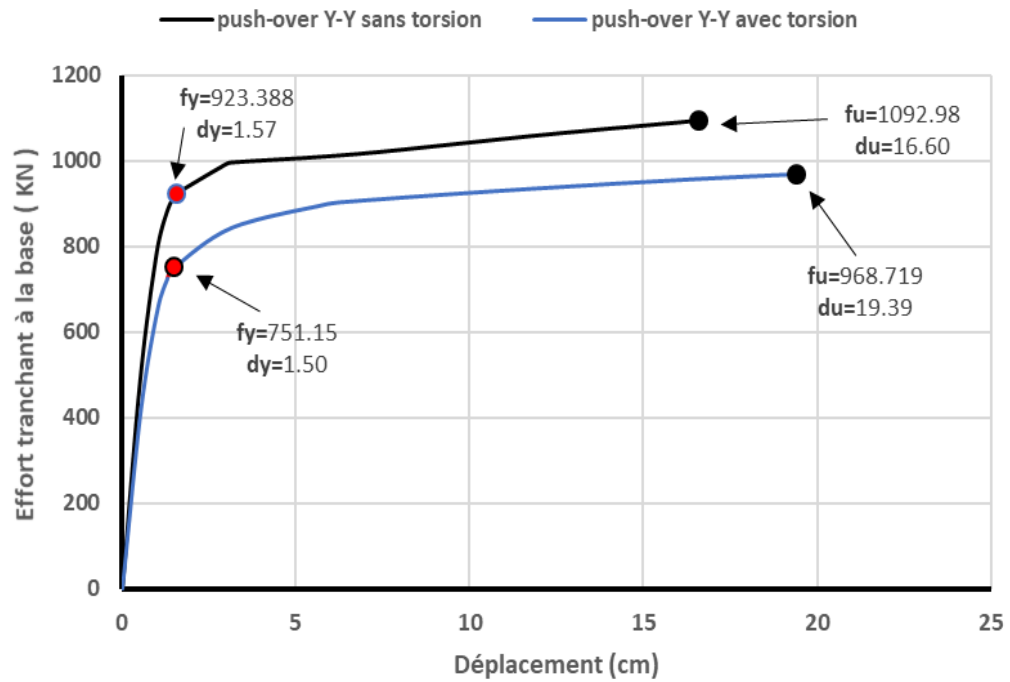


Figure IV.16 : Courbe de capacité des deux variantes - sens transversal (y).

#### IV.7.1 Résultats obtenus

Tableau IV.11 offre un aperçu récapitulatif des résultats obtenus.

Tableau IV.11 : Comparaison entre les deux structures.

Structure	Structure régulière		Structure irrégulière	
	X-X	Y-Y	X-X	Y-Y
Caractéristiques				
Période (s)	0.304	0.315	0.284	0.290
Déplacement ultime (cm)	0.106	0.183	0.139	0.223
Effort Rupture (KN)	1344.742	1095.092	1198.689	972.601
Déplacement élastique (cm)	0.012	0.015	0.022	0.012
Effort élastique (KN)	1082.364	920.397	896.482	725.174
Rigidité $K_i$ (KN/m)	97782.69	95377.38	49398.89	78429.6
Ductilité $\mu$ (-)	8.465	11.937	6.331	17.208
Facteur de réduction $R_u$ (-)	1.242	1.189	1.337	1.341

Les figures IV.17 et IV.18 mettent en évidence la comparaison des propriétés entre les deux structures étudiées.

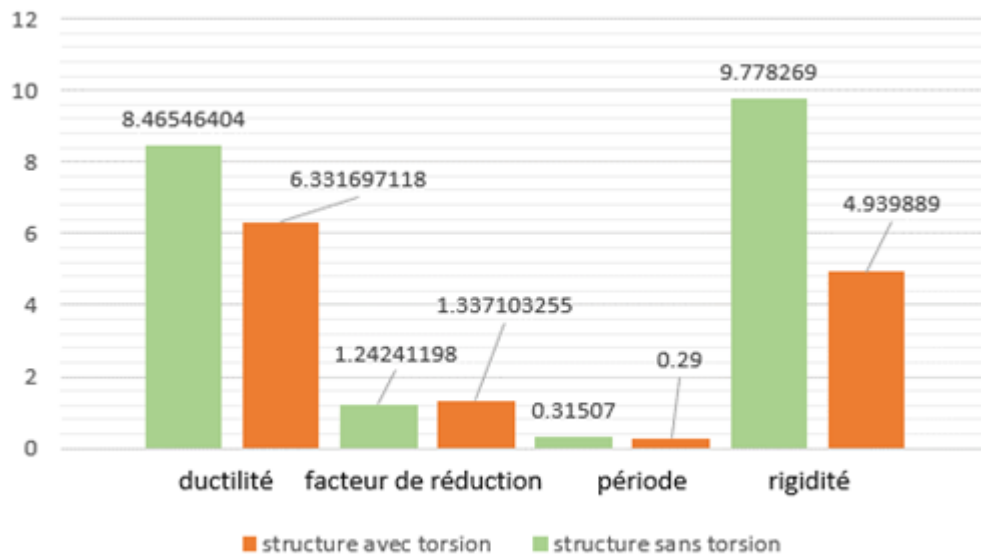


Figure IV.17 : Comparaison entre les des deux variantes - selon X-X.

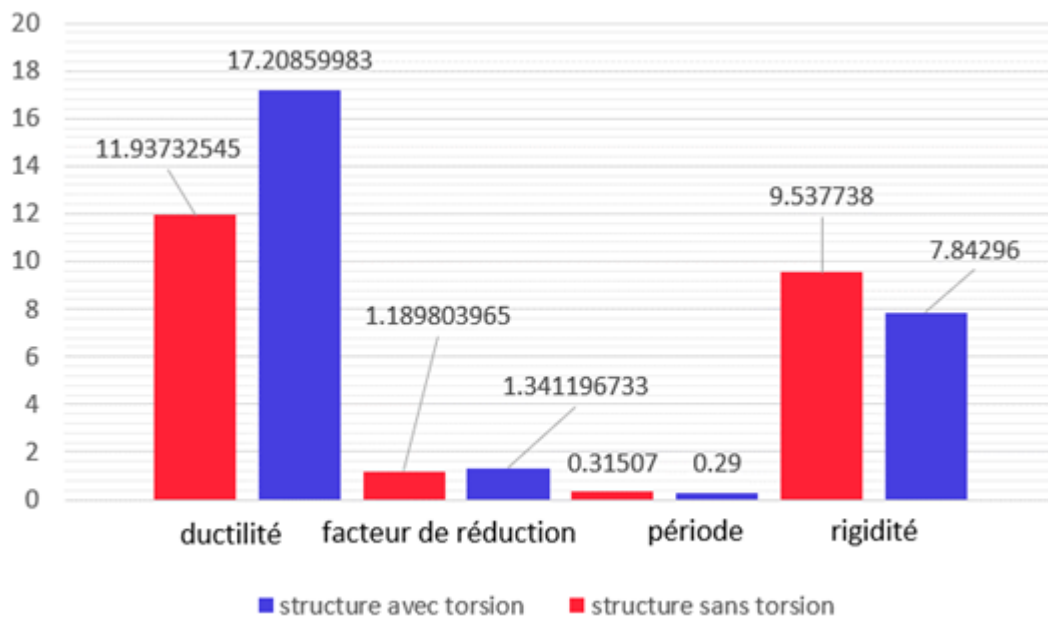


Figure IV.18 : Comparaison entre les des deux variantes - selon Y-Y.

**Commentaires :**

- D’après le tableau IV.11 nous pouvons observer que dans le cas de structure régulière la résistance dans les deux sens (X, Y) et augmentent plus par rapport le cas de structure irrégulière. La comparaison entre les deux cas montre que la résistance augmente de :
  - 12.1% dans le sens (X-X) et 6.5 % dans le sens (Y-Y).
- D’après les figures précédentes nous pouvons observer que dans le premier cas (sans torsion) la rigidité dans les deux sens (X, Y) et augmentent plus par rapport le deuxième

cas (avec torsion). La comparaison entre les deux cas montre que la rigidité augmente de:

- 97.9% dans le sens (X-X) et 21.6 % dans le sens (Y-Y).
- Lors de l'étude de l'effet de la torsion sur la résistance sismique des structures portiques, un régulier et un irrégulier, plusieurs observations ont été notées. Tout d'abord, le bâtiment régulier a montré une plus grande résistance à la torsion que le bâtiment irrégulier.
- En matière de déformation, le bâtiment irrégulier a montré une plus grande déformation que le bâtiment régulier.
- De plus, l'effort tranchant à la base pour le bâtiment irrégulier est plus important que pour le bâtiment régulier. Le bâtiment irrégulier a montré un plus grand déplacement que le bâtiment régulier.
- Le chemin de torsion d'un bâtiment régulier est plus raide que celui des cellules d'un bâtiment irrégulier, ce qui indique que la résistance par les forces de torsion est plus élevée. Cela fait partie de la symétrie du bâtiment régulier, qui perpétue la division uniforme et les charges de torsion dans sa structure.
- La première courbe révèle une différence significative en termes de coefficient de ductilité entre le bâtiment régulier et le bâtiment irrégulier, où le bâtiment régulier présente un coefficient de ductilité plus élevé que le bâtiment irrégulier sur le sens x-x. Toutefois, la deuxième courbe montre une inversion de tendance, où le coefficient de ductilité du bâtiment régulier diminue par rapport à celui du bâtiment irrégulier.
- En ce qui concerne le coefficient de rigidité, les deux courbes révèlent une valeur plus élevée pour le bâtiment régulier que pour le bâtiment irrégulier.
- Enfin, en matière de rigidité et de ductilité, le bâtiment régulier a montré une plus grande rigidité en réponse à la torsion, mais une moindre ductilité que le bâtiment irrégulier. Par conséquent, indique que le bâtiment régulier est plus résistant à la torsion, mais que le bâtiment irrégulier est plus susceptible de subir des déformations importantes avant la rupture.
- En conclusion, ces observations démontrent que la torsion a un effet significatif sur la résistance sismique des bâtiments en béton armé, en particulier sur les bâtiments

irréguliers. Les bâtiments ont généralement une meilleure résistance à la torsion, mais il n'y a pas de plus grande ductilité. Les bâtiments irréguliers, quant à eux, ont montré une plus grande déformation et un extra grand effort tranchant à la base, mais une grande ductilité. Ces résultats soulignent l'importance de prendre en compte l'effet de la torsion dans la conception des bâtiments en béton armé, en particulier pour les bâtiments irréguliers.

#### IV.8 Résultats des déplacements inter étage

Les figures (IV.19, IV.20 et IV.21, IV.22) ci-dessous présentent les résultats des déplacements maximaux obtenus pour la structure régulière et la structure irrégulière :

##### IV.8.1 Déplacement structure régulier (sans torsion) :

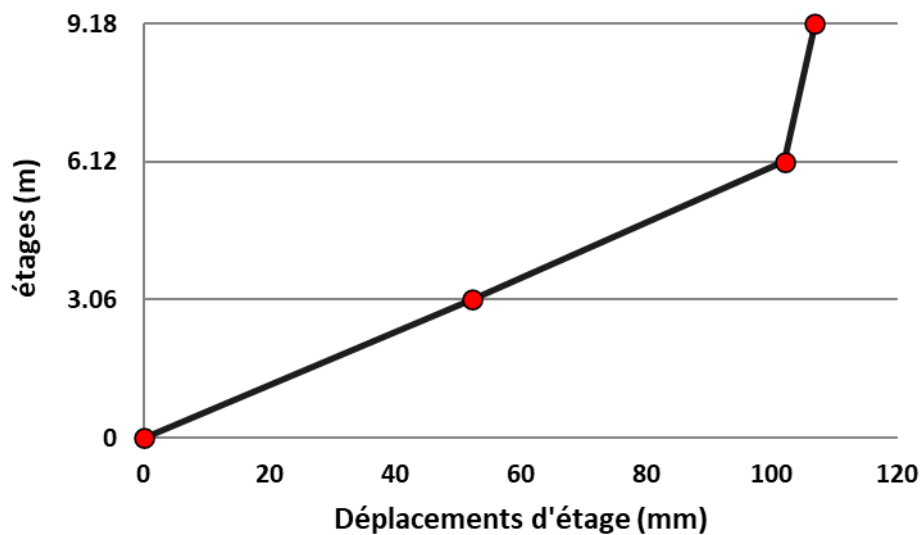


Figure IV.19 : Déplacement inter-étage-direction longitudinale X-X

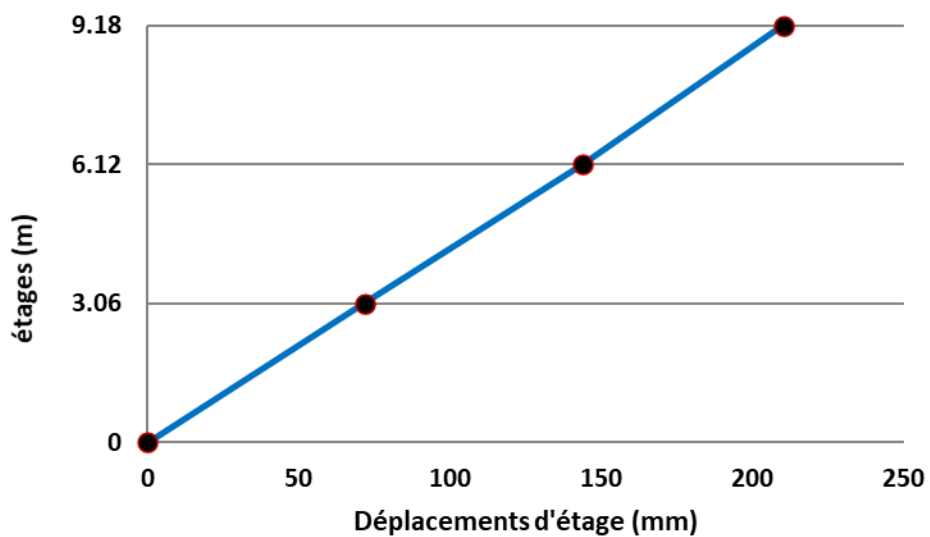


Figure IV.20 : Déplacement inter-étage-direction transversal Y-Y

IV.8.2 Déplacement structure irrégulier (avec torsion) :

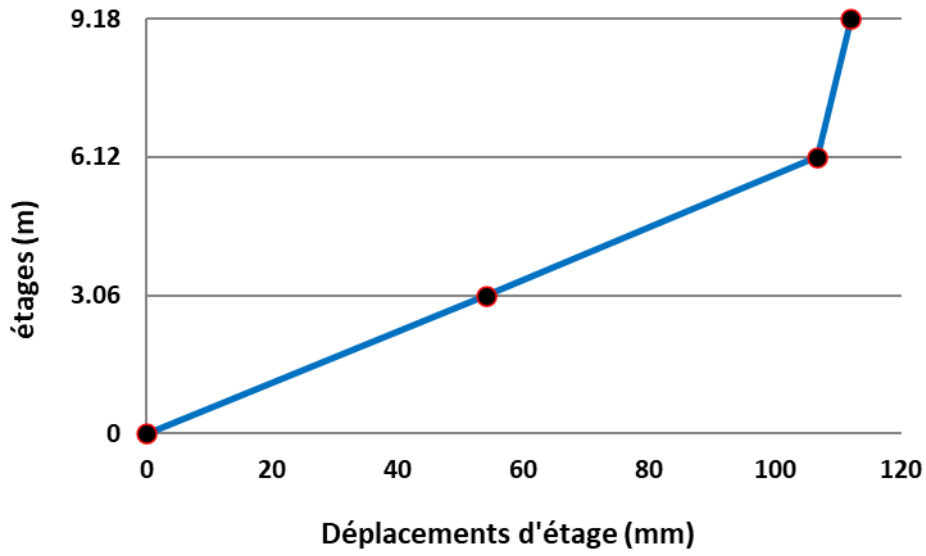


Figure IV.21 : Déplacement inter-étage-direction longitudinale X-X

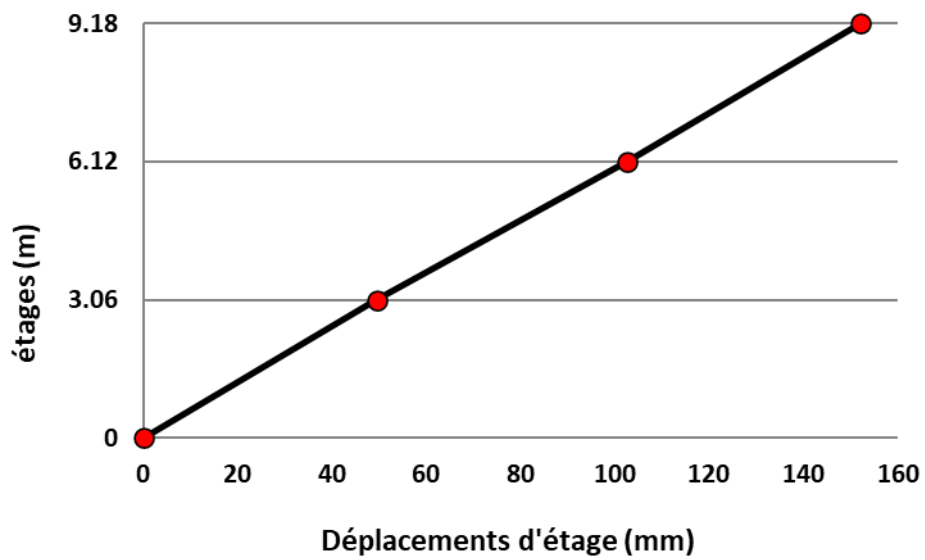


Figure IV.22 : Déplacement inter-étage-direction transversal Y-Y

IV.9 Comparaison entre les deux structures

Les figures IV.23 et IV.24 et le tableau IV.12 représente les résultats de la comparaison des courbes de capacité des structures régulières et irrégulières selon les deux directions :

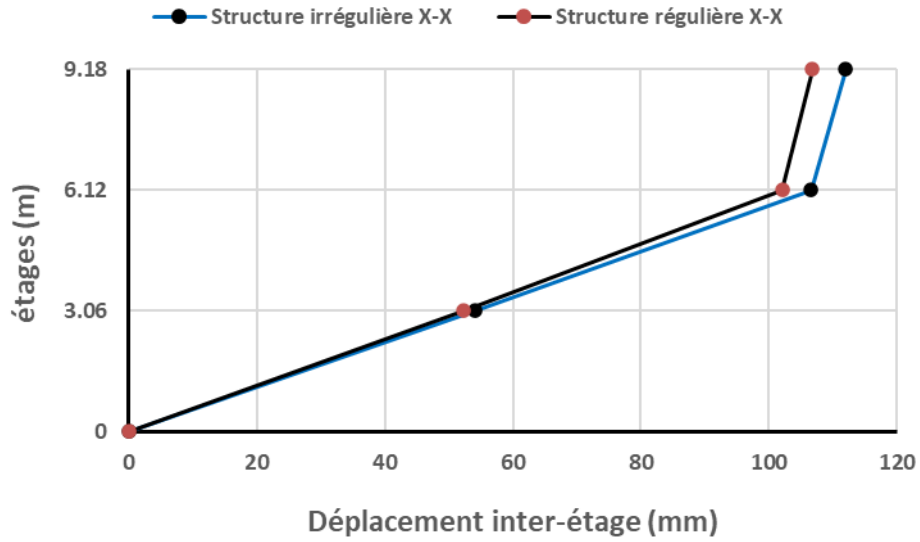


Figure IV.23 : Comparaison des déplacements inter-étage-direction longitudinale X-X

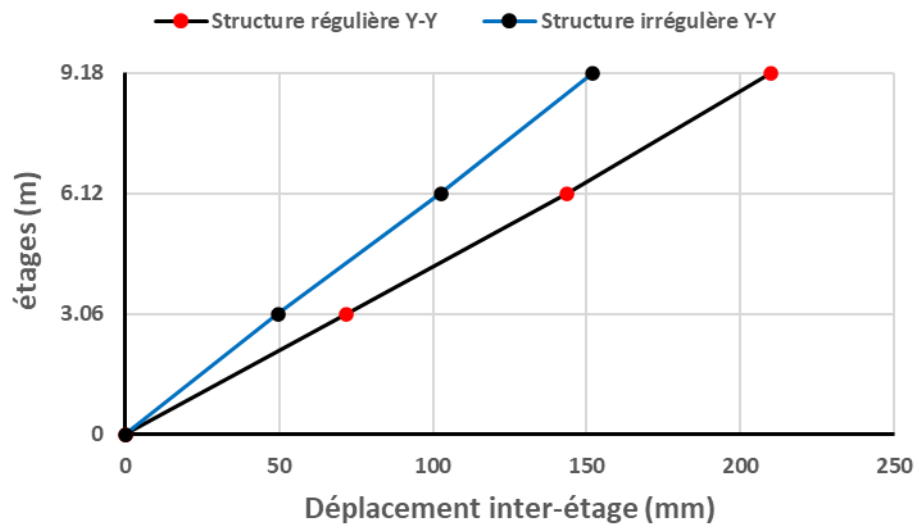


Figure IV.24 : Comparaison des déplacements inter-étage-direction transversal Y-Y

**Tableau IV.12 :** Comparaison des déplacements maximums inter-étages obtenus par la méthode analyse statique non-linéaire (Pushover).

Caractéristiques Structure	Sens X-X		Sens Y-Y	
	Déplacements maximums (mm)	D Max (%)	Déplacements maximums (mm)	D Max (%)
Structure régulière	106.84	1.70	210.12	2.35
Structure irrégulière	111.98	1.77	152.05	1.73

**Commentaires :**

- On remarque que dans le cas de la structure irrégulière, le déplacement de la structure est plus grand que dans le cas de la structure régulière selon les deux directions.
- Notez pour les courbes de déplacement pour la structure régulière :
  - Les courbes de déplacement des structures régulières montrent généralement un comportement plus prévisible et symétrique.
  - Les courbes peuvent présenter une augmentation progressive des déplacements avec une augmentation simultanée de l'effort tranchant, démontrant ainsi une bonne capacité de résistance aux séismes.
- Remarquez pour les courbes de déplacement pour la structure irrégulière :
  - Les courbes de déplacement des structures irrégulières peuvent être plus complexes et présenter des comportements moins prévisibles.
  - En raison de l'irrégularité dans la répartition de la rigidité et de la résistance, les déformations peuvent être plus importantes et les courbes peuvent présenter des paliers et des fluctuations.

#### IV.10 Conclusion

D'après les résultats de notre étude nous pouvons conclure que :

Les courbes de déplacement fournissent des informations essentielles sur le comportement structural en cas de séisme. Les structures régulières démontrent généralement une réponse plus stable, une capacité de dissipation d'énergie plus efficace et une meilleure ductilité. En revanche, les structures irrégulières peuvent présenter des déformations plus importantes et des réponses moins uniformes. Il est important de prendre en compte les différences entre les structures régulières et irrégulières lors de la conception et de l'évaluation de la performance sismique afin de garantir la sécurité des occupants et la résistance structurale. Des mesures appropriées doivent être prises pour renforcer les structures irrégulières et minimiser les effets négatifs des irrégularités sur leur comportement en cas de séisme.

# CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce travail avait pour objet d'étudier l'effet de torsion sur la résistance sismique d'un bâtiment portique en béton armé (R+2). Pour étudier cet effet, nous avons pris dans le premier cas une structure régulière horizontalement, Dans le second cas, nous avons pris une structure irrégulière horizontalement. Nous avons utilisé la méthode statique non-linéaire (Pushover), basée sur le principe de performance et les déplacement, ce qui permet de reproduire le comportement sismique pour les deux structures étudiées.

Les variantes ont été au préalable, dimensionnés suivant le code de calcul de béton armé aux états limites (BAEL 91), et le règlement parasismique algérien, RPA99/V2003, et la modélisation de la structure a été réalisée à l'aide du logiciel d'éléments finis SAP2000v14.

D'après les résultats obtenus par l'étude comparative concernant deux modèles, dans le premier cas le structure régulier a montré une plus grande résistance à la torsion que le structure irrégulier dans le second cas, et en termes de déformation, le structure irrégulier a montré une plus grande déformation que le structure régulier, Dans le cas de la structure irrégulière, les déplacement de la structures est plus grand que dans le cas de la structure régulière selon les deux directions. Dans le cas de absence dans la torsion la ductilité inférieur que le cas d'existence de la torsion dans le sens X-X , et la ductilité à été supérieur dans le cas avec torsion par rapport de cas d'absence la torsion dans le sens Y-Y

Pour réduire la phénomène de torsion dans la structure :

- Doit être pris en compte l'effet de torsion dans la conception qui peuvent conduire à des conséquences graves.
- Évité les formes complexe et asymétrique dans la conception.
- Ajout des contreventements (voiles) pour le renforcement et assurant la stabilité des structure asymétrique.
- Dans le cas d'une structure irrégulière et asymétrique on peut utiliser des joints parasismiques pour diviser les formes complexes.

Enfin, ce projet est notre première expérience et il nous a été très utile puisque l'utilisation d'un outil informatique nous a fait gagner beaucoup de temps. Cependant, la maîtrise du logiciel reste une étape très importante qui nécessite la connaissance de quelques notions de base des sciences de l'ingénieur.

# RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIE

- [1] NEDJAI, A., **L'influence de l'interaction sol structure sur la réponse sismique des bâtiments (cas des bâtiments portiques en béton armée)**, Mémoire de MASTER, Université Mohamed Boudiaf-M'sila, 2018.
- [2] ZEGHICHI, L., A. Merzougui, and B. Mezghiche, **Lecture dans le règlement parasismique algérien**, 2005.
- [3] VU, T.K., **Incidence de la torsion sur la résistance sismique de bâtiments courants avec diaphragmes horizontaux rigides. Application aux structures en bois**, Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II, 2011.
- [4] OMAR, M., **Influence de la disposition des voiles sur la performance sismique des bâtiments**, 2013.
- [5] Youcef, M. (2009). **Évaluation de Vulnérabilité Sismique des Bâtis Existants « Structure portique en béton armé »** (Mémoire de Magister, GUELMA).
- [6] MESSAOUD, T., **SIMULATION SISMIQUE DANS LES PROFILES DE SOL EN CHAMP LIBRE**, Mémoire de MASTER, Université Mohamed Boudiaf-M'sila, 2016.
- [7] LANSEUR, H., A. Aggaoua, and N. Belhamdi, **Étude De La Réponse Sismique De Structures Par Analyse Modale Spectrale Et Analyse Dynamique Par Accélérogrammes Générés À Partir Du Spectre De Réponse Élastique Du Rpa99/2003**, Université abderrahmane mira Bejaïa, 2012.
- [8] Ministère de l'Écologie du Développement durable et de l'Énergie., **LES SÉISMES**. Collection Prévention des risques naturels, juillet 2012.
- [9] Mémoire du projet de fin d'études. < Scribd.vpdfs.com\_pfe-vulnerabilite-sismique-des-batiments-en-beton-arme.pdf >.
- [10] EDDINE, D.H.A. and S. Hadjer, **L'effet Du Séisme Vertical Sur La Réponse Des Structures**. 2016.
- [11] Fiche scientifique ,**Comment lire un sismogramme**.
- [12] AMINA,B., **MÉTHODE D'ÉVALUATION DE LA VULNÉRABILITÉ SISMIQUE DES BATIMENTS**, Mémoire de MASTER, Université Mohamed Boudiaf-M'sila, 2016.
- [13] BOUAZIZ, A., **INTERACTION SOL-STRUCTURE D'UN PASSAGE SUPERIEUR D'UNE VOIE FERREE (CAS D'UN PONT DALLE)** 2018, Université Mohamed Boudiaf-M'sila, 2018.
- [14] RICHTER, C.F., An instrumental earthquake magnitude scale. Bulletin of the seismological society of America, 1935. **25**(1): p. 1-32.

- [15] HABBI, D., **Evaluation des mécanismes de ruine des structures auto-stables sous les séismes proches et lointains**, Université Mouloud Mammeri , 2014.
- [16] BENLAALA, N., **Influence de l'interaction sol structure sur la réponse sismique des bâtiments**, Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider–Biskra , 2012.
- [17] Ziane, S. (2018). **Modélisation tridimensionnelle du comportement dynamique des bâtiments asymétriques par OpenSees** (diplôme de MASTER ACADEMIQUE).
- [18] Benkhelil, M. (2014). **Effets de la torsion dans l'analyse Pushover modale des bâtiments** (Mémoire de magister, Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics, Alger).
- [19] Fourn, H. (2014). **Effet de la torsion en plan sur le comportement sismique des structures des batiments** (Mémoire de Magister, Taieb BRANCI).
- [20] Hentri, M. (2020, 2021). **Etude comportement dynamique structures multi étages avec irrégularité en plan** (diplôme de doctorat, Université usto d oran doctorat).
- [21] BENSALAH, M. (2018). **Estimation de l'effet de la torsion dans les batiments**. Blida , thèse de doctorat.
- [22] Pelletier, K. (2015). **Considération de la torsion pour l'analyse sismique non linéaire de noyaux en béton armé** [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal].
- [23] Fronteddu, P. G. (2018). **Considération de la torsion accidentelle pour la conception parasismique des bâtiments selon le CNB** (Masters thèses, École Polytechnique de Montréal).
- [24] AZZOUZ, B. AISSANI, M. (2018). **Influence de la torsion sur le comportement sismique des structures portiques en béton armé** (diplôme de MASTER, Université Mohamed Boudiaf-M'sila ).
- [25] Amar, K. (2014/2015) . **Chpitre II : Pathologie des batiments endommagés par les séismes** . Université hassiba benbouali de chlef.
- [26] MESSAADI, S., TOAIBA, A. (2017). **Identification expérimentale de l'excentricité accidentelle dans les bâtiments en utilisant les réseaux de neurones artificiels** (diplôme de Masters academique).
- [27] Mohamed, O. A., & Mehana, M. S. (2020). **Assessment of accidental torsion in building structures using static and dynamic analysis procedures**. Applied Sciences, 10(16), 5509.
- [28] J. (s.d.). **efectos de la torsion sismica en las edificaciones**. ing.tepeatoche,víctor, 1-41.
- [29] NEZLIOUI , N., & TEBBAL , M. (2009). **conception et étude d'un bâtiment ( RDC + 8 + SOUS SOL ) contreventé par des voiles.**( Université Dr. yahia fares de medea : diplôme d'ingénieur).

- [30] Ait Taleb, E. H. (2016). **Influence des irrégularités en plan sur la performance sismique des structures** (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou).
- [31] André , P. Hervé , D. (2011). **Conception parasismique. le contexte de l’Eurocode 8**, 2-642
- [32] Sewell, C.D., **“Inelastic response of torsionally unbalanced multistorey shearwall buildings designed using elastic static and dynamic analyses”**, BAsC., University of British Columbia, Vancouver Canada, August (2000).
- [33] Belazouz, L. (2016). **Influence de la disposition des voiles sur le comportement dynamique des structures** (Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri).
- [34] Zehar, S. (2017). **Analyse numérique des ouvrages en béton armé par la méthode pushover** (Mémoire de Magister, Faculté de Génie Civil).
- [35] BEN KHOIA, A . Ikhlef, B. (2018). **Etude Statique non linéaire d'une structure R+ 2 en Béton Armé** (Master en génie civil , Université Ahmed Draia-ADRAR).
- [36] SALIM, M. (2016). **analyse non lineaire d'une structure en voile** (diplôme de master, Université de mohamed boudiaf M'sila faculte de technologie).
- [37] BOUGASMI, K., BELLOULOU, Z., & YOUSFI, M. (2022). **Conception et étude d'un bâtiment ss+ RDC+ 7etage a usage multiple à usage d'abitation.**
- [38] Barkou, M. A. (2019). **Application de La Méthode d'analyse statique non-linéaire «Pushover» sur un bâtiment R+ 4** (diplôme de MASTER 2, Université L'Arbi Ben M'hidi Oum El Bouaghi ).
- [39] Belkheir, M. A. (2012). **Influence de la disposition des voiles sur la performance sismique des structures mixtes** (Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri).
- [40] MEDJERAB, M. (2012). **Modélisation parasismique des structures en béton armé** (Mémoire de Magister, Université Mohamed Khider-Biskra).
- [41] NAAS, A., OUNESLI, S., BACHENE, S. (2021). **Etude d'un bâtiment (R+ 5+ entre-sol)** à Chlef
- [42] BOUKHELKHAL, R., SAHMADI, F. (2011). **Etude d'un bâtiment a usage habitation et commerciale ( R+6 entre-sol )**. Université YAHIA FARES DE MEDEA: diplôme master.
- [43] Abdesslam, I. (2018). **Analyse pushover des structures en béton armé tridimensionnelle à étage souple** (diplôme de Doctorat, Université Mohamed Khider-Biskra).
- [44] BAEL 91., **Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états limites**, section I du CCTG,306 p, 1992.
- [45] RPA99., **Règles Parasismiques Algériennes 99 Version 2003**, Algérie, OPU 2003.
- [46] FEMA 356, **FEMA 356- Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings**, Federal Emergency Management Agency, Washington, 2000.

- [47] ATC-40., **Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings**, Vol. 1, Applied Technology Council, Redwood City, California, 1996.
- [48] Victor DAVIDOVICI : **construction en zone sismique**, Edition Le Moniteur, 1999.
- [49] T. BRANCI et Tiliouine Boualem, **Réponse sismique des structures des bâtiments en béton armé Configurations régulière et irrégulière**, Département de génie civil, faculté des sciences et sciences de l'ingénieur, Université Hassiba Benbouali, Chlef, Algérie, 2008.

الحمد لله الذي ما تم جهد ولا خُتِم سعى

إلا بفضلِه وما تخطر العبد من عقبات وصعوبات

إلا بتوفيقه ومعونته