الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algerienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي - تبسة

Université Echahid Cheikh Larbi Tébessi – Tébessa –

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Civil

MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de Master Académique**

En : Génie Civil

Spécialité : Structures

Par : TEDJANI HASSNA

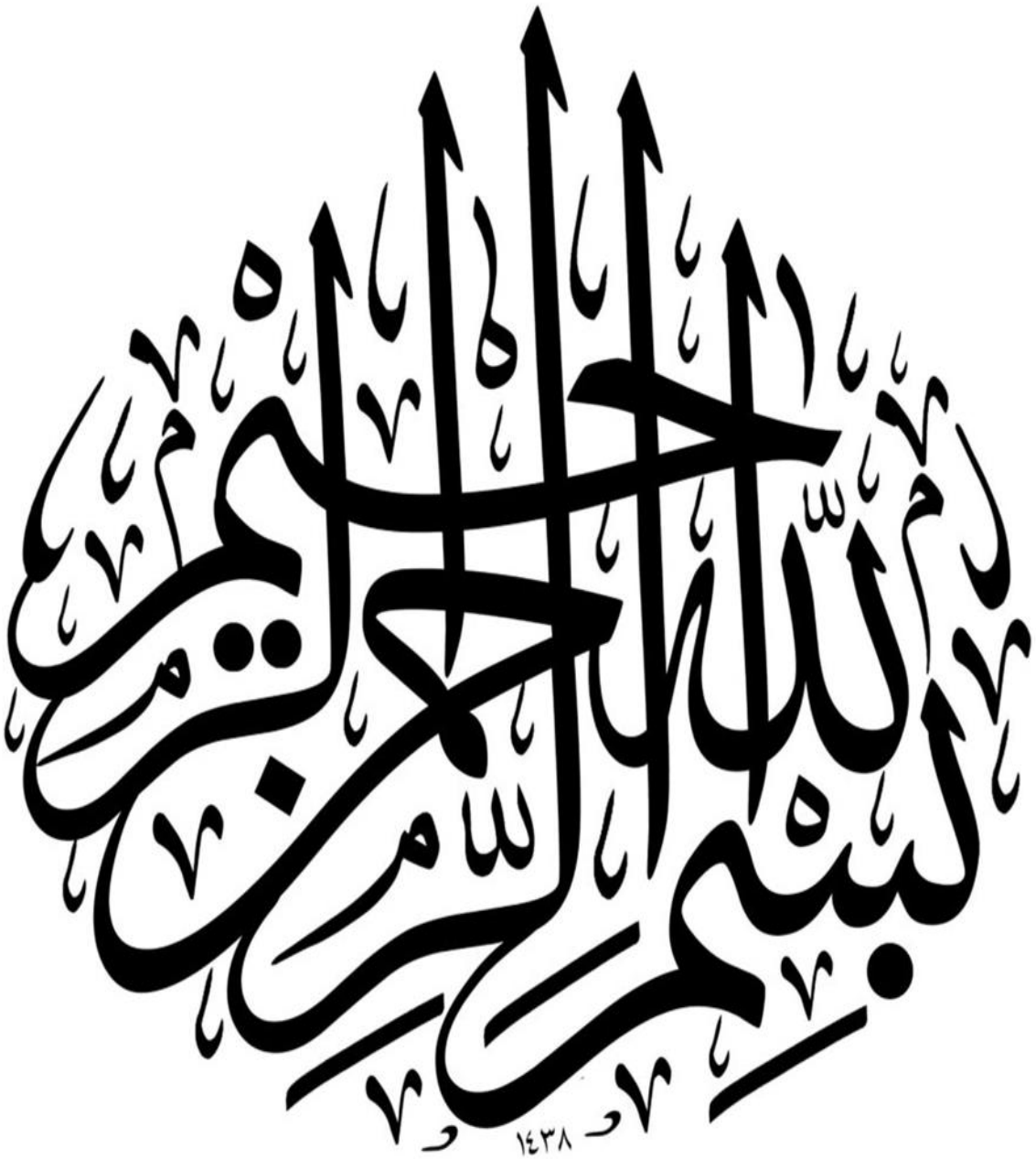
Sujet

Étude d'un bâtiment à structure porteuse à ossature rigide conforme au règlement parasismique RPA 2024

Présenté et soutenu publiquement, Le dimanche 29 Juin 2025, devant le jury composé de :

Dr. BOULARESS Said	Maitre de conference B	Président
Dr. ATHMANIA Brahim	Maitre de conference A	Rapporteur
Dr. LABED Abderrahim	Maitre de conference B	Examinateur 1

Promotion : 2024/2025


بسم الله الرحمن الرحيم
١٤٣٨

Remerciement

Avant toute chose, je rends grâce à Allah pour m'avoir accordé la force, la patience et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail académique, malgré les nombreuses difficultés rencontrées au cours de ce parcours.

J'exprime ma profonde reconnaissance à mon encadrant, Monsieur Athmania Brahim, pour avoir accepté de superviser ce mémoire et pour ses orientations précieuses tout au long de sa réalisation. Ses remarques, ses conseils et sa disponibilité ont contribué à structurer ce travail et à guider mes réflexions dans la bonne direction. Je le remercie sincèrement pour le temps qu'il m'a accordé et pour ses réponses à mes sollicitations.

Je remercie également les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail et pour leurs observations constructives, qui ont enrichi son contenu.

Ma gratitude s'étend au Département de Génie Civil, à son administration, à ses enseignants et à tout le personnel, pour leur accompagnement académique et pour l'environnement d'apprentissage favorable qu'ils ont su instaurer durant mes années d'études.

Une pensée émue à mes parents disparus – qu'Allah leur fasse miséricorde et les accueille dans Son vaste paradis. Leur amour, leurs prières et les valeurs qu'ils m'ont transmises continuent d'être ma source d'inspiration. Que ce travail soit, par la volonté de Dieu, une œuvre bénéfique à leur mémoire.

Je remercie chaleureusement mes frères et sœurs pour leur soutien moral et leur présence constante à mes côtés, surtout dans les moments les plus éprouvants.

À mes amis et camarades, je suis reconnaissant pour leur esprit de solidarité, leur soutien continu et les souvenirs inoubliables partagés durant ce parcours.

Enfin, un mot sincère à moi-même : malgré les épreuves, la fatigue et les nuits blanches, j'ai persévéré, avec l'aide de Dieu, jusqu'à atteindre cet objectif

Dédicaces

À la mémoire de mon cher père Mohamed "Hama", l'homme qui m'a appris la patience et la dignité, dont la présence était pour moi une source de sécurité, et dont l'absence est une douleur qui ne s'apaise jamais. Malgré ton départ, tes conseils restent gravés dans mon cœur, et ta voix continue de me guider quand je suis perdue. Qu'Allah t'accorde Sa miséricorde et fasse de ton séjour l'un des jardins du Paradis.

À ma chère mère Rabia "Saïda", source intarissable de tendresse, lumière de ma vie qui ne s'est jamais éteinte malgré ton absence. Tes prières me manquent, la chaleur de ton étreinte, tes mots apaisants... Que Dieu t'accorde Sa clémence, toi qui étais mon paradis sur terre, et qu'Il me réunisse avec toi au Paradis éternel.

À l'épouse de mon frère, qui a tenté de combler l'absence de ma mère avec sa douceur, assumant le rôle maternel dans les moments les plus difficiles. Merci pour ta bienveillance, ta délicatesse et tout ce que tu as offert avec amour et patience.

À mes chères sœurs : Fatma, Safa et Soundes, merci pour votre présence constante, vos prières sincères et votre soutien infaillible. Vous êtes mon refuge et ma source d'amour pur.

À mon frère Alla, que nous n'avons trouvé que lui dans les moments les plus durs. Tu as été l'homme de la maison, le pilier de nos cœurs, notre mur de sécurité. Merci pour tout ce que tu as enduré en silence, pour tes sacrifices, et pour ta présence irremplaçable.

À mes amies chères Kerkoub Aya et Chourfi Wissam, merci pour les éclats de rire qui m'ont sauvée durant les jours sombres, et pour les instants simples que nous avons partagés et qui resteront gravés dans mon cœur.

À toutes celles qui ont vu mes faiblesses, mes effondrements, puis m'ont tendu la main pour me relever : merci du fond du cœur à Chaïma, qui m'a connue dans tous mes états, sans jamais s'éloigner, restant toujours à mes côtés avec douceur, sincérité et tendresse.

Merci à Malak, l'amie au cœur tendre, baume de mon âme dans les moments les plus douloureux, par sa présence apaisante et sa bonté qui a touché le fond de mon cœur.

Et une immense reconnaissance à Aya Aouadi, qui ne m'a jamais abandonnée malgré ma fragilité, qui a vécu ma tristesse à mes côtés, instant après instant, et m'a soutenue avec un amour sincère et une fidélité rare. Tu as été mon pilier quand tout s'effondrait, la main qui m'a relevée sans hésiter.

Le réconfort est venu sous la forme d'une amie, mais aussi d'une sœur que ma mère n'a pas mise au monde, un trésor que je remercie Dieu d'avoir mis sur mon chemin.

Je tiens à me remercier sincèrement pour ma persévérance et ma résilience. Malgré la fatigue, les chutes et les moments difficiles, j'ai su me relever, avancer et garder le sourire. Merci à moi-même de ne pas avoir abandonné et d'être allée jusqu'au bout.

Liste de Symbole

Liste de Symbole	Définition
T	Période fondamentale de vibration de la structure (s)
ξ	Coefficient d'amortissement (souvent 5%)
ag	Accélération maximale du sol (m/s^2)
S	Coefficient d'amplification du sol
R	Facteur de comportement (réduction des forces sismiques grâce à la ductilité)
Qf	Facteur de qualité (structurelle et constructive)
M	Moment de renversement (kNm)
V	Effort tranchant à la base (kN)
Δ	Déplacement inter-étage (mm)
Sd	Sollicitation de calcul
Rd	Résistance de calcul
ψ	Coefficient de combinaison des actions variables
E	Action sismique (horizontal ou vertical)
G	Charges permanentes (poids propre)
Q	Charges d'exploitation (variables)
m	Masse au niveau considéré (kg)
h	Hauteur totale ou par étage (m)

Liste de Symbole	Définition
F	Force sismique horizontale équivalente (kN)

Liste des tableaux

Titre	Page
Tableau 1.1 : critères de Régularité	10
Tableau 1.2 : Exigences pour les Joints	10
Tableau 1.3 : Types de Systèmes Structurels	11
Tableau 1.4 : Représente les Conditions de choix du Site	13
Tableau 1.5 : Classification des bâtiments selon leur importance sismique selon les normes RPA 2003, Eurocode 8 et RPA 2024	14
Tableau 1.6 : Classification des systèmes de contreventement	15
Tableau 1.7 : Régularité en plan et en élévation	16
Tableau 1.8 : Facteurs de qualité et coefficients de comportement	17
Tableau 1.9 : Combinaisons d'action sismique	18
Tableau 2.1 Comparaison des formules fondamentales de calcul de la force sismique selon les normes RPA99, RPA2024, EC8	26

Liste des figures

Titres des figures	Page
Figure 1.1 : Classification des zones sismique des normes RPA99 et RPA2024 et EC8	**12**
Figure 1.2 : Régularité En élévation de RPA99/2003 et RPA2024	**16**
Figure 1.3 : Régularité En élévation de norme Eurocode 8	**17**
Figure 2.1 : Les plans d'étage et d'élévation	**25**
Figure 2.2 : Modèle 3D du bâtiment étudié sous ETABS v22	**26**
Figure 2.3 : Distribution des déplacements inter-étages en direction X pour différents sites sismiques selon RPA2024	**30**
Figure 2.4 : Distribution des déplacements inter-étages en direction X pour différents sites sismiques selon RPA99/2003	**32**
Figure 2.5 : Distribution des déplacements inter-étages en direction X pour différents sites sismiques selon EUROCODE 8	**34**
Figure 2.6 Distribution des déplacements inter-étages en direction Y pour différents sites sismiques selon RPA2024	**36**
Figure 2.7 : Distribution des déplacements inter-étages en direction Y pour différents sites sismiques selon RPA99	**38**
Figure 2.8 : Distribution des déplacements inter-étages en direction Y pour différents sites sismiques selon EC 8	**40**
Figure 2.9 : Distribution des efforts tranchant inter-étages en direction X pour différents sites sismiques selon RPA2024	**42**
Figure 2.10 : Distribution des efforts tranchant inter-étages en direction X pour différents sites sismiques selon RPA99	**44**

Figure 2.11 : Distribution des efforts tranchant inter-étages en direction X pour différents sites sismiques selon EC8	**46**
Figure 2.12 : Distribution des efforts tranchant inter-étages en direction Y pour différents sites sismiques selon RPA2024	**49**
Figure 2.13 : Distribution des efforts tranchant inter-étages en direction Y pour différents sites sismiques selon RPA99	**51**
Figure 2.14 : Distribution des efforts tranchant inter-étages en direction Y pour différents sites sismiques selon EC8	**53**
Figure 2.15 : Distribution moment de renversement en direction X pour différents sites sismiques selon RPA2024	**55**
Figure 2.16 : Distribution moment de renversement en direction X pour différents sites sismiques selon RPA99	**57**
Figure 2.17 : Distribution moment de renversement en direction X pour différents sites sismiques selon EC8	**59**
Figure 2.18 : Distribution moment de renversement en direction Y pour différents sites sismiques selon RPA2024	**61**
Figure 2.19 : Distribution moment de renversement en direction Y pour différents sites sismiques selon RPA99	**63**
Figure 2.20 : Distribution moment de renversement en direction Y pour différents sites sismiques selon EC8	**65**
Figure 3.1 : Distribution des déplacements inter-étages maximaux en fonction de la hauteur (Analyse spectrale RPA 2024, direction X)	**72**
Figure 3.2 : Distribution des déplacements inter-étages maximaux en fonction de la hauteur (Analyse spectrale RPA 99'03, direction X)	**74**
Figure 3.3 : Distribution des déplacements inter-étages maximaux en fonction de la hauteur (Analyse spectrale EC 8, direction X)	**75**

Figure 3.4 : Distribution des déplacements inter-étages maximaux en fonction de la hauteur (Analyse spectrale RPA 2024, direction Y)	**77**
Figure 3.5 : Distribution des déplacements inter-étages maximaux de type 1 en fonction de la hauteur (Analyse spectrale RPA99, direction Y)	**78**
Figure 3.6 : Distribution des déplacements inter-étages maximaux en fonction de la hauteur (Analyse spectrale EC8, direction Y)	**80**
Figure 3.7 : Distribution des efforts tranchants – Analyse modale spectrale RPA 2024, direction X	**81**
Figure 3.8 : Distribution des efforts tranchants – Analyse modale spectrale RPA 99'03, direction X	**83**
Figure 3.9 : Distribution des efforts tranchants – Analyse modale spectrale EC8, direction X	**85**
Figure 3.10 : Distribution des efforts tranchants – Analyse modale spectrale RPA 2024, direction Y	**87**
Figure 3.11 : Distribution des efforts tranchants – Analyse modale spectrale RPA 99, direction Y	**89**
Figure 3.12 : Distribution des efforts tranchants – Analyse modale spectrale EC8, direction Y	**91**
Figure 3.13 : Distribution des moments de renversement selon la hauteur, analyse modale spectrale	**93**
Figure 3.14 : Distribution des moments de renversement selon la hauteur , analyse modale spectrale RPA 99, direction X	**94**
Figure 3.15 : Distribution des moments de renversement selon la hauteur, analyse modale spectrale EC8, direction X	**96**

Figure 3.16 : Distribution des moments de renversement selon la hauteur, analyse modale spectrale RPA 2024, direction Y	**97**
Figure 3.17 : Distribution des moments de renversement selon la hauteur, analyse modale spectrale RPA 99'03, direction Y	**99**
Figure 3.18 : Distribution des moments de renversement selon la hauteur, analyse modale spectrale EC8, direction Y	**101**

Résumé :

Cette étude analyse le comportement sismique d'un bâtiment à ossature rigide, selon les exigences du nouveau règlement parasismique algérien RPA 2024. Deux approches de calcul ont été appliquées : la méthode statique équivalente et la méthode du modèle spectrale. Les résultats obtenus – notamment les déplacements inter-étages, les efforts tranchants à la base et les moments de renversement – sont comparés avec ceux issus de l'application des anciens règlements RPA 99/03 et Eurocode 8 (EC8). Il en ressort que le RPA 2024 introduit des exigences plus rigoureuses, entraînant une augmentation notable des sollicitations sismiques pour les structures rigides. Cette étude met en lumière l'évolution normative et ses implications pratiques sur la conception parasismique en Algérie.

Mots-clés:

RPA 2024, méthode statique équivalente, spectre de réponse, efforts sismiques, Eurocode 8.

Abstract:

This work investigates the seismic response of a rigid frame structural system in accordance with the updated Algerian seismic code RPA 2024. Two seismic analysis methods were employed: the Equivalent Static Method and the Spectral Modal Method. Key seismic demand parameters inter-story drifts, base shear forces, and overturning moments were evaluated and compared with results obtained as per the previous RPA 99/03 and Eurocode 8 (EC8) standards. The study highlights that RPA 2024 imposes more stringent seismic demands, notably for rigid frame structures, resulting in increased seismic forces. The findings emphasize the updated seismic design code evolution and its impact on earthquake-resistant design practices in Algeria.

Keywords:

RPA 2024, rigid frame, equivalent static method, response spectrum, seismic forces, Eurocode 8.

الملخص

تهدف هذه الدراسة إلى تحليل سلوك مبنى مكوّن من إطار صلب وفقًا لمتطلبات لائحة البناء الزلزالية الجزائرية الجديدة .RPA 2024 تم استخدام طريقتين للتحليل الزلزالي: الطريقة الستاتيكية المكافئة وطريقة النمذجة الطيفية. وشملت النتائج المحصل عليها كلًا من الإزاحات بين الطوابق، قوى القص القاعدية، وعزوم الانقلاب. تمت مقارنة هذه النتائج مع تلك المستخرجة باستعمال اللائحتين السابقتين RPA 99/03 و .Eurocode 8 أظهرت الدراسة أن RPA 2024 أكثر صرامة من سابقاته، ما أدى إلى ارتفاع ملحوظ في القيم التصميمية للقوى الزلزالية. تبرز هذه النتائج أهمية التحديثات في اللوائح الزلزالية وأثرها المباشر على تصميم المباني المقاومة للزلازل.

الكلمات المفتاحية:

RPA 2024، إطار صلب، الطريقة الستاتيكية المكافئة، الطيف الزلزالي، القوى الزلزالية، .Eurocode 8

Table de matière

Remerciement 3

Dédicaces 4

Liste de Symbole 5

Liste des tableaux 7

Liste des figures 8

Résumé : 12

Table de matière 1

Introduction Générale 4

Chapitre I :Évolution de la réglementation parasismique en Algérie : analyse comparative avec les normes internationales 6

1.1. Introduction : 7

1.2. Généralités : 8

1.2.1 Les règlements parasismiques algériens 8

1.2.2 Les règlements parasismiques algériens 99/2003 8

1.2.3 Les règles parasismiques européennes (Eurocode8) 8

1.2.4 Les règlements parasismiques algériens 2024 9

1.3 Comparaison entre l'ancien règlement (RPA 99/2003), le nouveau RPA 2024 et les codes internationaux 9

1.3.1 Principes et recommandations de conception 9

1.3.1.2 Reconnaissances et études de sol : 9

1.3.2 Critères de classification 11

1.3.3 Action sismique 13

1.3.4 Justification de la sécurité 18

1.4. Conclusion : 20

Chapitre II : Évaluation Comparative De La Réponse Sismique Par La Méthode Statique Equivalente Selon (RPA & EC8) 21

1.Introduction : 22

2.Méthode statique équivalente : 22

2.1 Définition : 22

2.2 L'objectif : 22
2.3 Principe : 22
2.4 Conditions d'application de la méthode statique équivalente : 23
3.Description du modèle d'étude : 23
2.4 Calcul de la force sismique totale : 26
4.Analyse des résultats : 28
4.1 Déplacement inter étages : 28
4.2 Efforts tranchants : 40
4.3 Moment de renversement 53
5.Conclusion : 66
Chapitre III : Méthode du spectre de réponse : Une étude comparative selon les codes Sismique algériens Selon (RPA24, RPA99'03) et Eurocode 8 67
1. Introduction : 68
2. Principe : 68
3. Hypothèses principales : 68
4. Étapes de l'analyse modale spectrale : 68
5. Définition des spectres de conception 69
6. Analyse des résulta : 71
6.1. Déplacement inter-étages 71
6.2. Efforts tranchants 80
6.3. Moment de renversement 92
Conclusion Générale 104
Références bibliographiques 105

Introduction Général

Introduction Générale

La région algérienne, de par sa situation géographique dans une zone de sismicité notable, est régulièrement exposée au risque de tremblements de terre. La sécurité des personnes et des biens face à ces phénomènes naturels dévastateurs représente un défi majeur pour l'ingénierie civile. Dans ce contexte, la conception et la construction de bâtiments capables de résister aux sollicitations sismiques est d'une importance capitale et s'appuie sur l'application rigoureuse de réglementations spécifiques visant à garantir la stabilité et la capacité de dissipation d'énergie des structures en cas d'événement sismique.

Le domaine de l'ingénierie parasismique est en constante évolution, intégrant les retours d'expérience des séismes passés, les avancées de la recherche et le développement de nouvelles techniques d'analyse et de construction. Cette dynamique se traduit par la mise à jour régulière des codes et normes de conception. En Algérie, le Règlement Parasismique Algérien (RPA) constitue la base réglementaire pour la conception des structures résistant aux séismes. L'introduction d'une nouvelle version, le RPA 2024, marque une étape significative, structurellement significative de nouvelles exigences, de méthodes d'analyse affinées ou d'une harmonisation accrue avec les standards internationaux.

Comprendre l'impact de ce nouveau règlement sur la conception des structures courantes, telles que les bâtiments à portique contreventé, est essentiel pour les ingénieurs praticiens. Il devient primordial d'évaluer comment l'application du RPA 2024 modifie les calculs de réponse sismique par rapport aux versions antérieures du règlement (notamment le RPA 99/2003) et comment il se positionne par rapport aux codes parasismiques de référence à l'échelle internationale, comme l'Eurocode 8. De plus, les méthodes d'analyse sismique prescrites par ces règlements, qu'il s'agisse de la méthode statique équivalente, plus simple, ou de la méthode dynamique par spectre de réponse, plus élaborée, peuvent conduire à des résultats différents qui méritent une analyse comparative détaillée.

Dans cette perspective, ce mémoire se propose de réaliser une analyse technique détaillée d'un bâtiment à structure porteuse à ossature rigide type, en appliquant les dispositions du nouveau Règlement Parasismique Algérien RPA 2024. L'objectif principal est non seulement de concevoir et vérifier les sections et vérifier la structure selon ce règlement, mais aussi de mener une analyse comparative précise et conforme aux normes des résultats d'analyse sismique obtenus en utilisant différentes réglementations (RPA 2024, RPA 99'03, Eurocode 8)

et les deux méthodes d'analyse couramment employées (statique équivalente et dynamique par spectre de réponse).

Pour atteindre ces objectifs, le présent mémoire est structuré en trois chapitres principaux :

Le Chapitre 1 : Évolution des Règlements techniques Parasismiques en Algérie : Une Analyse Comparative avec les Règlements Internationaux dressera un un aperçu chronologique du développement des normes parasismiques algériennes, en situant l'émergence du RPA 2024 dans ce contexte et en effectuant une comparaison des principes fondamentaux avec ceux des règlements parasismiques internationaux de référence, notamment l'Eurocode 8, afin de comprendre les influences et les spécificités de chaque code.

Le Chapitre 2 : évaluation comparative de la réponse sismique par la méthode statique équivalente selon (RPA & EC8) mettra en œuvre la méthode d'analyse statique équivalente au bâtiment étudié, en confrontant les approches et les résultats obtenus selon les prescriptions du RPA (avec un focus sur le RPA 2024) et de l'Eurocode 8. Cette analyse permettra de mettre en évidence les différences dans l'estimation des forces sismiques et de leur répartition latérale.

Le Chapitre 3 : méthode du spectre de réponse : une analyse comparative selon les codes sismiques algériens (RPA24, RPA99’03) et Eurocode 8 approfondira l'analyse sismique en utilisant la méthode dynamique par spectre de réponse. Ce chapitre réalisera une étude comparative détaillée des résultats (déplacement-inter étages, efforts tranchant, moment de renversement) obtenus en appliquant les spectres de réponse et les règles de combinaison modale définis par le RPA 2024, le RPA 99'03 et l'Eurocode 8, offrant ainsi une vision complète de l'impact de chaque règlement sur la réponse dynamique de la structure.

Les résultats de cette étude comparative devraient permettre de mieux appréhender les spécificités et les implications pratiques de l'application du nouveau RPA 2024, d'identifier les différences significatives dans le comportement sismique prédit selon les différentes réglementations et méthodes d'analyse, et ainsi de fournir des éléments de réflexion utiles pour l'amélioration de la conception parasismique en Algérie et pour une meilleure compréhension des enjeux liés à l'harmonisation normative.

Chapitre I :

Évolution de la réglementation parasismique en Algérie : analyse comparative avec les normes internationales

1.1. Introduction :

L'impact des séismes sur les bâtiments en Algérie dépend de plusieurs facteurs, notamment la magnitude et la localisation du séisme, ainsi que la résilience des structures. L'Algérie, en particulier ses régions du nord comme Alger et Oran, est située dans une zone d'activité sismique. Face aux risques sismiques récurrents, l'élaboration de normes de construction parasismiques a marqué un tournant dans l'histoire de la régulation sismique algérienne. Ces normes visent à garantir la sécurité des bâtiments et à protéger les vies humaines grâce à des règles précises pour la conception sismique des structures.

L'évolution des réglementations parasismiques en Algérie a débuté en 1954, après le tremblement de terre d'Orléanville (Chlef), avec l'établissement des premières recommandations antisismiques (AS 55) [1]. En 1973, une circulaire du MTPC a introduit des règles de conception et de calcul parasismiques inspirées du règlement français PS 69, principalement pour les ouvrages publics en zones sismiques.

Le séisme d'El Asnam, survenu le 10 octobre 1980, a conduit à la promulgation de la première version du Règlement Parasismique Algérien (RPA 81) en 1981, qui utilisait également la méthode statique équivalente. Une mise à jour en 1983 (RPA 81, version 83) a affiné le calcul des forces sismiques, toujours selon cette méthode [2]. En 1988, le RPA 88 a intégré la méthode d'analyse modale spectrale, révisant ainsi le RPA 81 [3]. Le RPA 99 a poursuivi cette évolution en adoptant la méthode modale spectrale [2]. Après le séisme de Boumerdès du 21 mai 2003, le RPA 99, version 2003 (RPA99/V2003), a introduit de nouvelles zones sismiques et des coefficients d'accélération actualisés [4]. Enfin, en septembre 2024, le RPA 2024 a été approuvé, renforçant les règles de construction en intégrant des techniques modernes de protection sismique et de nouveaux systèmes constructifs, en lien avec la stratégie nationale de protection contre les catastrophes naturelles [5, 6].

1.2. Généralités :

1.2.1 Les règlements parasismiques algériens

Le Règlement Parasismique Algérien (RPA), document technique référencé sous "DTR BC 2-48" ou "Règles Parasismiques Algériennes RPA", constitue un ensemble de prescriptions pour la conception et le calcul parasismique. Il établit les principes à suivre selon la zone de sismicité, avec pour objectifs principaux la protection des vies humaines par la prévention de l'effondrement lors de séismes majeurs et la limitation des dommages aux éléments secondaires lors de séismes modérés [7]. Le RPA inclut :

- La révision des classifications (zonage sismique, sites et sols, catégories d'ouvrages).
- La définition des critères pour choisir les méthodes de calcul des forces sismiques (statique équivalente, analyse modale spectrale, etc.).

Ces règles tiennent compte de la forme des bâtiments, de la rigidité des structures, des matériaux employés, ainsi que des techniques spécifiques pour les fondations et les systèmes de renforcement. En Algérie, les normes parasismiques reposent sur un cadre juridique et technique évolutif, illustré par les versions successives du RPA (RPA 80, RPA 83, ..., RPA 2024) [8].

1.2.2 Les règlements parasismiques algériens 99/2003

Approuvé en 1999 et mis à jour après le séisme de Boumerdès en 2003, le RPA 99, version 2003 (RPA99/V2003), est une référence clé pour la conception et la construction en zones sismiques en Algérie. Son objectif principal est de prévenir l'effondrement des structures lors de séismes majeurs, tout en réduisant les dommages aux éléments secondaires lors de séismes modérés. Ce règlement est essentiel pour garantir la sécurité et la résilience des bâtiments face aux risques sismiques, constituant une base incontournable pour les professionnels du secteur [9].

1.2.3 Les règles parasismiques européennes (Eurocode8)

L'Eurocode pour la conception et le dimensionnement des bâtiments et ouvrages de génie civil, incluant des dispositions pour les fondations et la résistance aux séismes. L'Eurocode 8, dédié à la construction parasismique, fait partie de ce projet visant à unifier les pratiques techniques au sein de l'Union européenne, remplaçant des normes nationales comme la française PS 92. Il facilite la libre circulation des produits et services de construction tout en améliorant la sécurité et la durabilité des structures [10]. L'Eurocode 8 comprend six parties, dont les plus pertinentes pour les bâtiments sont :

1. EN 1998-1 : Règles générales, actions sismiques et conception des bâtiments.
2. EN 1998-5 : Fondations et aspects géotechniques [11].

1.2.4 Les règlements parasismiques algériens 2024

Approuvé le 15 mai 2024, le RPA 2024 actualise les règles sismiques algériennes en intégrant l'expertise nationale pour améliorer la sécurité et l'intégrité des bâtiments. Il met à jour les classifications des zones sismiques, des sites, des sols et des catégories de bâtiments, tout en définissant les actions sismiques et en introduisant une nouvelle classification des systèmes de contreventement. Le règlement précise les méthodes de calcul, incluant la méthode statique équivalente, l'analyse spectrale modale et l'analyse dynamique par accélérogramme [12].

1.3 Comparaison entre l'ancien règlement (RPA 99/2003), le nouveau RPA 2024 et les codes internationaux

1.3.1 Principes et recommandations de conception

1.3.1.1 Choix de Site :

RPA99/2003 et RPA 2024 : Ces règlements privilégient l'évitement des sites à risques, tels que ceux proches de failles actives, sujets à la liquéfaction, ou présentant des instabilités (pentes, remblais non compactés, cavités). La topographie accidentée et la composition hétérogène du sol sont également considérées [12, 13].

Eurocode 8 : Le choix du site repose sur le dimensionnement tenant compte de l'accélération verticale, l'évaluation de la liquéfaction et la stabilité des sols, ainsi que les mouvements liés aux failles [14,15].

1.3.1.2 Reconnaissances et études de sol :

RPA99/2003 : Les études de sol sont obligatoires en zones de sismicité moyenne à élevée pour classer les sites et identifier les risques (liquéfaction, instabilité). Des investigations complémentaires peuvent intégrer les propriétés dynamiques des sols [13].

Eurocode 8 : Les sols sont classés selon leur comportement sismique (via Vs30 ou SPT), avec une analyse de l'interaction sol-structure pour assurer la stabilité [16,17].

RPA 2024 : Similaires aux exigences non sismiques, les études doivent évaluer le sol, la nappe phréatique et les risques spécifiques, avec des recommandations détaillées en annexe B [12].

1. 3.1.4 Superstructure :

Les aspects liés à la superstructure sont abordés sous plusieurs angles, notamment la régularité, les joints, les systèmes structurels et la ductilité

a. Régularité

Tableau 1.1 critères de Régularité

Règlement	**Critères de Régularité**
RPA99/2003	Symétrie des rigidités et masses, continuité des éléments pour minimiser la torsion [13].
Eurocode 8	Distribution symétrique des masses et rigidités pour éviter la torsion [18,19].
RPA 2024	Critères en plan et en élévation pour guider le choix des méthodes de calcul [12].

b. Les Joints

Un joint parasismique est un espace aménagé entre deux parties d'une structure pour permettre des mouvements différentiels lors d'un séisme, limitant ainsi les dommages. Les exigences pour les joints parasismiques sont illustrées dans le tableau 1.3 comme suit.

Tableau 1.2 Exigences pour les Joints

Règlement	**Exigences pour les Joints**
RPA99/2003	Plans, sans décrochement, limitant les déformations et assurant l'indépendance des blocs [13].
Eurocode 8	Conçus pour transmettre les forces sismiques sans dommages majeurs [20].
RPA 2024	Limitent la longueur à 200 m, séparent les blocs de rigidités différentes et simplifient les formes complexes [12].

c. Systèmes structurels :

Les systèmes structurels sont des ensembles d'éléments porteurs (poutres, poteaux, murs, etc.) conçus pour résister aux charges (gravité, vent, séisme) et assurer la stabilité globale d'un bâtiment tableau 4.

Tableau 1.3 Types de Systèmes Structurels

Règlement	**Types de Systèmes Structurels**
RPA99/2003	Murs porteurs, cadres en béton armé, systèmes mixtes.[13]
Eurocode 8	Murs porteurs, cadres en béton armé, systèmes mixtes, structures en acier
RPA 2024	Structures en béton armé, acier, maçonnerie, systèmes de contreventement [12].

d. Ductilité :

La ductilité est la capacité d'un matériau ou d'une structure à subir des déformations plastiques importantes sans rupture, essentielle pour absorber l'énergie sismique et garantir un comportement non fragile lors de séismes. La comparaissions entres les règlements parasismiques est comme suit ;

RPA99/2003 : Utilise un coefficient de comportement R (3,5 à 5) pour les systèmes structurels, sans classification explicite de ductilité. [21,22]

Eurocode 8 : Définit trois classes (DCL : $q \leq 1,5$; DCM : $q \leq 4$; DCH : $q > 4$) pour une conception dissipative

RPA 2024 : Exige une ductilité suffisante pour dissiper l'énergie sismique, privilégiant les rotules plastiques dans les éléments horizontaux [12].

1.3.2 Critères de classification

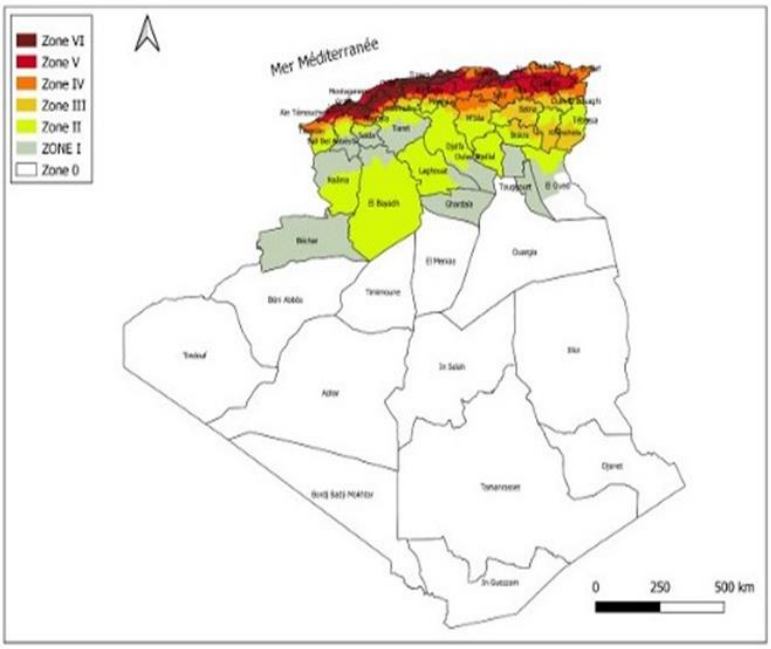
1.3.2.1 Classification des zones sismique :

Les cartes sismiques (Figure **1.1**) , basées sur des données géologiques, géotechniques et historiques, définissent les zones à risque [37]. Voici une comparaison :

- RPA99/V2003 : Zones 0 (négligeable) à III (élevée) [13].
- Eurocode 8 : Échelle continue basée sur l'accélération maximale du sol (PGA), sans zones numérotées [23,24].
- RPA 2024 : Zones 0 à VI, reflétant une mise à jour du zonage [12].

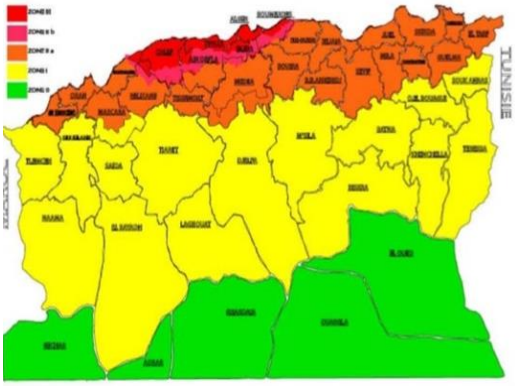
Figure 1.1 Classification des zones sismiques selon les normes RPA 99, RPA 2024 et l'Eurocode 8 (EC8)

Zonage sismique de l'Algérie (RPA2024)

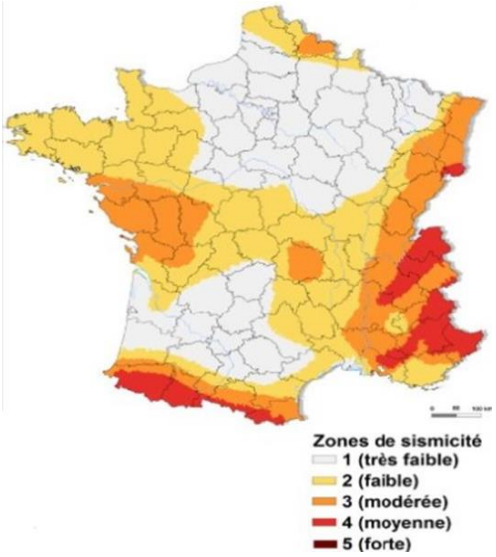


(a) Zonage sismique de l'Algérie: toutes zones 0 à VI

Zonage sismique de l'Algérie (RPA99/2003)



Zonage sismique de France (EC8)



1.3.2.2 Classification des Sites

La classification repose sur les propriétés mécaniques des sols, notamment la vitesse des ondes de cisaillement (Vs30) [25] :

- **RPA99/2003 :** S1 (rocheux, > 800 m/s) à S4 (très meuble, < 200 m/s)[13].
- **Eurocode 8 :** A (> 800 m/s) à E (< 200 m/s), plus S1/S2 pour cas spéciaux[26].
- **RPA 2024 :** S1 (> 800 m/s) à S5 (études spécifiques) [12].

1.3.2.3 Conditions de Site

Tableau 1.4 Représente les Conditions de choix du Site

Règlement	**Catégories**	**Investigations**	**Études Spécifiques**
RPA99/2003	S1 à S4[13]	Conditions de sol, actions	Classification, importance
Eurocode 8	A à E[27]	Classification, ductilité	Coefficients d'importance
RPA 2024	S1 à S5 [12]	Sol, actions sismiques	Sites, actions, systèmes

1.3.3 Action sismique

1.3.3.1 Classification de bâtiment selon leur importent :

La classification des bâtiments selon leur importance sismique catégorise les structures en fonction de leur fonction, de leur occupation et de leur rôle sociétal, déterminant ainsi les exigences de conception parasismique, comme illustré dans le tableau 6

Tableau 1.5 Classification des bâtiments selon leur importance sismique selon les normes RPA 2003, Eurocode 8 et RPA 2024

Règlement	***Classification principale***	***Catégories d'importance***
RPA 2003	• Groupe 1A : Ouvrages d'importance vitale • Groupe 1B : Ouvrages de grande importance • Groupe 2 : Ouvrages courants ou d'importance moyenne • Groupe 3 : Ouvrages de faible importance[13]	• Ouvrages vitaux (hôpitaux, centres de secours) • Grands rassemblements (stades, aéroports) • Bâtiments courants (logements, bureaux) • Bâtiments à faible risque (entrepôts, constructions agricoles)
Eurocode 8 (EC8)	• Catégorie I : Bâtiments de faible importance • Catégorie II : Bâtiments d'importance moyenne • Catégorie III : Bâtiments de grande importance (hôpitaux, écoles) ou nécessitant une fonctionnalité post-sismique • Catégorie IV : Bâtiments vitaux (centres de contrôle, installations d'urgence)[28]	• Faible (granges, petits entrepôts) • Moyenne (habitations, immeubles de bureaux) • Grande (infrastructures essentielles) • Vitale (défense civile, centrales stratégiques)
RPA 2024	• Groupe 1A : Bâtiments vitaux (centres de crise, télécoms) • Groupe 1B : Bâtiments de grande importance (universités, musées) • Groupe 2 : Bâtiments d'importance moyenne (logements collectifs) • Groupe 3 : Bâtiments de faible importance (entrepôts, ateliers)[12]	• Coefficient 1.40 (Groupe 1A) • Coefficient 1.20 (Groupe 1B) • Coefficient 1.00 (Groupe 2) • Coefficient 0.80 (Groupe 3)

1.3.3.2 Classification des systèmes de contreventement :

La classification des systèmes de contreventement définit les typologies de structures résistantes aux charges latérales (vent, séisme), selon des critères de rigidité, de ductilité et de redondance. Les réglementations comme le RPA 2003, l'Eurocode 8, l'ASCE 7-16 et le RPA 2024 proposent des catégories distinctes, résumées dans le tableau 1.7.

Tableau 1.6 Classification des systèmes de contreventement

Règlement	***Classification***	***Coefficient de comportement/ réponse***
RPA99/2003	• Système 2 : Voiles porteurs en béton armé, où les voiles supportent plus de 20 % des charges verticales. • Systèmes 4a et 4b : Combinaison de voiles et de portiques. Le système 4a s'applique aux bâtiments de plus de 10 niveaux ou 33 m, avec des portiques capables de reprendre au moins 25 % de l'effort tranchant d'étage [29].	R = 3.5 à 5
EC8	L'EC8 ne définit pas de classification spécifique des systèmes de contreventement comme le RPA, mais évalue les systèmes structuraux selon leur capacité à résister aux actions sismiques	R = 1 à 8
RPA2024	La classification repose sur la capacité à dissiper l'énergie sismique. Le coefficient de comportement (R) dépend des matériaux, du type de construction, de la redistribution des efforts et des capacités de déformation post-élastique des éléments [12].	R = 1.5 à 5.5

1.3.3.3 Classification des bâtiments selon leur configuration :

La classification des bâtiments selon leur configuration (Figure 1.2) correspond à leur catégorisation en fonction de leurs caractéristiques structurales (géométrie, symétrie, continuité des éléments), influençant leur réponse sismique, et il est établi que les règlements parasismiques Eurocode 8, RPA2003 et RPA2024 fournissent un tableau 1.8 comparatif des

critères de régularité en plan (distribution homogène des masses/rigidités) et en élévation (uniformité des étages)

Tableau 1.7 Régularité en plan et en élévation

RPA2024 & RPA99/2003	EC8
Régularité en plan	
- Le rapport $\frac{L_{max}}{L_{min}} \leq 4$ -L'excentricité structurale ≤15% de la longueur. [12,13]	- Mêmes critères de rapport $\frac{L_{max}}{L_{min}} \leq 4$
$\frac{\sum I_{partie\ rentré}}{L_{totale}} \leq 25\%$	- Surface rentrante ≤5% de la surface totale
- Xcr−Xcm≤0,15L	- Excentricité ≤30% du rayon de torsion $e_{ox.y} \leq 0{,}3r_{x.y}$ [30]
Régularité en élévation	
- Continuité des éléments de contreventement (des fondations au sommet). - Variation maximale de 20 % des dimensions en plan entre niveaux successifs. - Variation de masse entre niveaux : constante ou décroissante [30] Régularité En élévation	

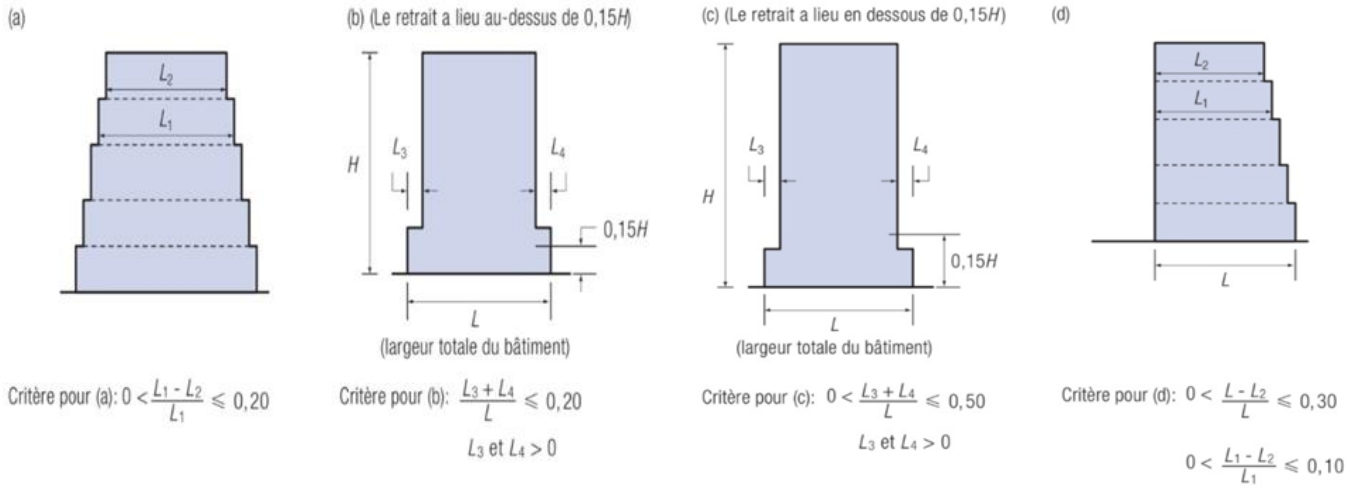


Figure 1.2 : Régularité En élévation de RPA99/2003 et RPA2024

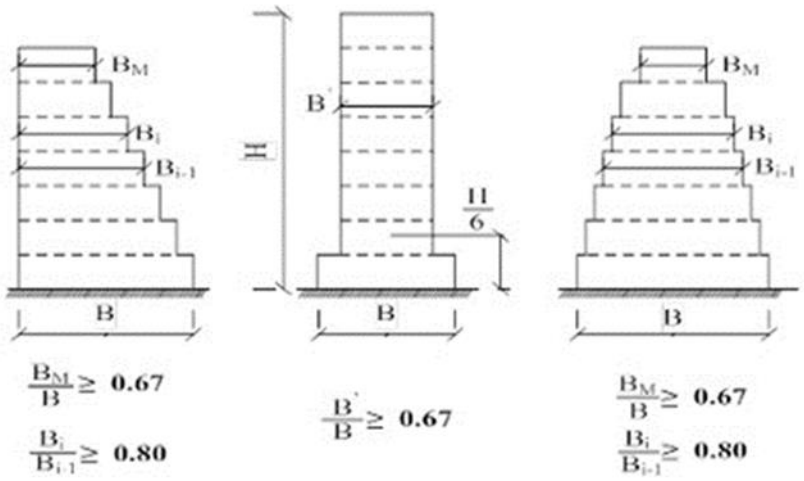


Figure 1.3 : Régularité En élévation de norme Eurocode 8

1.3.3.4 Facteur de qualité et coefficients de comportement

Les règlements utilisent le terme facteur de qualité, mais avec des nuances distinctes pour refléter la capacité d'une structure à résister aux séismes. Le facteur de qualité dans les RPA se concentre davantage sur les aspects constructifs et géométriques, tandis que l'EC8 et. Les variantes entre règlements sont résumées en tableau 1.9 [31] :

Tableau 1.8 Facteurs de qualité et coefficients de comportement

Règlement	**Facteur/Coef**	**Description**	**Utilisation**
RPA99/2003	Q[13]	Redondance, géométrie, régularité, qualité de construction	Ajustement des forces sismiques selon les critères de qualité
EC8	Q	Ductilité et redondance de la structure	Réduction des forces sismiques en fonction de la ductilité
RPA2024	Q_f [12]	Redondance, régularité, contrôle	Ajustement des forces sismiques

1.3.4 Justification de la sécurité

1.3.4.1 Combinaisons d'action sismique :

Les combinaisons d'actions sismiques représentent l'association des charges permanentes, variables et sismiques à considérer pour le dimensionnement des structures, selon des coefficients spécifiques définis par les réglementations parasismiques. Les combinaisons d'actions sismiques, illustrées dans le tableau 1.10

Tableau 1.9 Combinaisons d'action sismique

Règlement	Combinaisons de base	Coefficients clés	Caractéristiques distinctives
RPA99/2003	$G+Q\pm1,2E$ $G+Q\pm E$ $0,8G\pm$[32,33,34]	/	- Trois combinaisons simplifiées - Prise en compte partielle des charges variables (Q) via 0,8G.
EC8	Ed=$\sum G_k j$+P+$\sum \psi_{2i}$.$Q_{ki} + A_{Ed}$[35,36,37]	$\psi_{E,i} = \varphi.\psi_{2,i}$ *(Φ=1.0 toit 0.8 étages)*	- Coefficients de combinaison variables selon l'occupation - Intègre des combinaisons directionnelles ($E_{Edx} + 0.8E_{Edy}$)
RPA2024	1. Composantes sismique horizontales G+ψ.Q+E1 G+ψ.Q+E2 2. Composantes sismique verticale G+ψ.Q+E3 G+ψ.Q+E4 G+ψ.Q+E5 [12]	E1 =±Ex±0.3Ey E2=±0.3Ex±Ey E3 = ±Ex ±0.3Ey ±0.3Ez E4 = ±0.3Ex ±Ey ±0.3Ez E5 = ±0.3Ex ±0.3Ey ±Ez	- Deux combinaisons simplifiées (horizontales et verticales).

1.3.4.2 Justification vis-à-vis de la résistance

RPA 99/2003 exige que tous les éléments structuraux (piliers, poutres, planchers, fondations) disposent d'une résistance suffisante pour supporter les forces sismiques [38]. **EC8** insiste sur la nécessité d'une résistance adaptée à ces sollicitations pour chaque composant structurel [39]. **RPA 2024** introduit une méthodologie calculatoire : la sollicitation agissante (S_d), déterminée à partir des combinaisons de charges et des effets du second ordre, ne doit pas excéder la sollicitation résistante (R_d), calculée selon les propriétés des matériaux. Cette règle s'applique également aux assemblages et aux éléments non structuraux critiques [12].

1.3.4.3 Justification vis-à-vis de la ductilité

RPA 99/2003 souligne l'importance de la ductilité pour permettre aux structures de subir des déformations plastiques sans rupture lors de séismes majeurs, notamment via des systèmes de contreventement capables d'absorber l'énergie sismique [40,41]. **EC8** combine résistance et ductilité [42]. **RPA 2024** considère les exigences de ductilité comme satisfaites si les dispositions constructives (choix des matériaux, détails des éléments) décrites dans le document technique sont respectées [12].

1.3.4.4 Justification vis-à-vis de l'équilibre d'ensemble

RPA 99/2003 impose une stabilité globale des structures sous séisme, en intégrant l'effet *P-Δ* (interaction charges verticales/déformations latérales)[43]. **EC8** étend cette exigence aux fondations, exigeant une vérification de leur capacité portante lors des sollicitations sismiques[44,45]. **RPA 2024** définit des coefficients de sécurité minimaux : 1,3 contre le renversement et 1,25 contre le glissement. Le moment stabilisant est calculé en incluant les charges verticales, le poids des fondations et du sol [12].

1.3.4.5 Justification vis-à-vis de la résistance des planchers

RPA 99/2003 exige que les planchers résistent aux forces sismiques sans rupture, tandis que les fondations doivent transmettre ces forces au sol sans instabilité[46]. **EC8** précise que les planchers doivent agir comme des *diaphragmes rigides*, garantissant une répartition homogène des charges et une ductilité adéquate[47]. **RPA 2024** ajoute une exigence de *sur-résistance* (coefficient 1,3) pour les diaphragmes horizontaux, particulièrement dans les structures irrégulières, celles avec ouvertures importantes, ou des murs partiels en sous-sol [12].

1.4. Conclusion :

Le **Règlement Parasismique Algérien 2024 (RPA 2024)** marque une avancée majeure dans l'évolution des normes de construction en Algérie. En intégrant des méthodologies modernes et des enseignements tirés des séismes passés, il renforce la résilience des structures face aux risques sismiques, tout en s'alignant partiellement sur les standards internationaux comme l'**Eurocode 8** . Parmi ses innovations phares :

1. **Un zonage sismique redéfini**, divisant le territoire en sept zones (0 à VI), permettant une adaptation fine aux risques régionaux.
2. **Des exigences renforcées** pour les planchers (sur-résistance de 1,3), les fondations et la stabilité globale, avec des coefficients de sécurité stricts (1,3 contre le renversement, 1,25 contre le glissement).

Comparé aux codes internationaux, le RPA 2024 se distingue par sa rigueur dans le choix des sites (évitement des failles actives) et son approche conservatrice des coefficients de comportement. En synthèse, ce règlement incarne une réponse adaptée aux défis sismiques algériens, combinant héritage local et innovations techniques. Son succès dépendra désormais de sa mise en œuvre rigoureuse, de la formation des professionnels et de son évolution continue pour intégrer les avancées mondiales en ingénierie parasismique [48].

Chapitre II : Évaluation Comparative De La Réponse Sismique Par La Méthode Statique Equivalente Selon (RPA & EC8)

1.Introduction :

Le présent chapitre présente une étude comparative de la réponse sismique d'une structure représentative en béton armé à cinq étages, évaluée à l'aide de la méthode statique équivalente. L'étude porte sur les déplacements inter-étages, les efforts tranchants et les moments de renversement selon les directions X et Y, conformément aux règlements parasismiques RPA 2024, RPA 99/2003 et à l'Eurocode 8. L'objectif est de mettre en évidence l'influence du zonage sismique, des conditions de site, ainsi que les particularités de chaque norme en matière de conception parasismique.

2.Méthode statique équivalente :

2.1 Définition :

La méthode statique équivalente est une technique d'analyse sismique simplifiée utilisée pour étudier le comportement des structures sujettes aux séismes. Il consiste à remplacer les forces dynamiques réelles résultant du mouvement sismique par un système de forces statiques imaginaires équivalentes dont les effets sur la structure sont considérés comme similaires aux effets de l'action sismique réelle. Structure sous l'influence d'un système de forces statiques équivalentes aux forces dynamiques résultant du séisme. La méthode ne considère que le premier mode de vibration de la structure, négligeant les modes supérieurs. Il est principalement utilisé pour les structures régulières, les élévations limitées et dans les zones sismiques modérées [1].

2.2 L'objectif :

L'objectif de la méthode statique équivalente dans le cadre de la règle parasismique algérienne est de simplifier l'analyse sismique d'une structure en remplaçant les forces dynamiques réelles dues au séisme par un système de forces statiques fictives équivalentes, dont les effets sont considérés comme équivalents à ceux de l'action sismique réelle [2].

2.3 Principe :

RPA99/2003 : Les forces dynamiques réelles dans la construction sont remplacées par des forces statiques équivalentes pour simplifier l'analyse sismique. Les forces sismiques sont appliquées selon deux axes principaux orthogonaux, mais les méthodes statiques sous-estiment généralement les effets réels d'un séisme majeur [3].

EC8 : La méthode statique équivalent remplace les forces sismiques dynamiques par un système de forces statiques horizontales équivalentes. Les forces sont appliquées successivement dans les deux directions principales du plan horizontal de la structure [4].

RPA2024 : La méthode des forces statiques équivalentes remplace les effets dynamiques d'un séisme par des forces statiques fictives appliquées dans deux directions orthogonales. Bien qu'elle sous-estime les forces réelles d'un séisme majeur, cette limite est compensée par la ductilité de la structure [5].

2.4 Conditions d'application de la méthode statique équivalente :

RPA99/2003 représenter les conditions d'application de la méthode statique équivalente, basées sur la régularité du bâtiment et des limites de hauteur (65 m en zones I et II, 30 m en zone III), avec des critères supplémentaires pour les structures irrégulières [3].

La méthode statique équivalente prescrite par l'Eurocode 8 est une procédure simplifiée d'estimation des forces sismiques, applicable aux structures régulières en plan et en élévation, de hauteur modérée, et situées dans des zones de sismicité faible à modérée. Cette méthode ne permet pas de modéliser les effets dynamiques complexes ni les comportements non linéaires de la structure. [4].

La méthode statique équivalente de **RPA2024** est applicable aux bâtiments respectant certaines conditions. Elle peut être utilisée si le bâtiment est régulier en plan et en élévation, avec une hauteur maximale de 65 m en zones I, II et III, et de 32 m en zones IV, V et VI. Pour les bâtiments irréguliers, en plus de ces limites de hauteur [5].

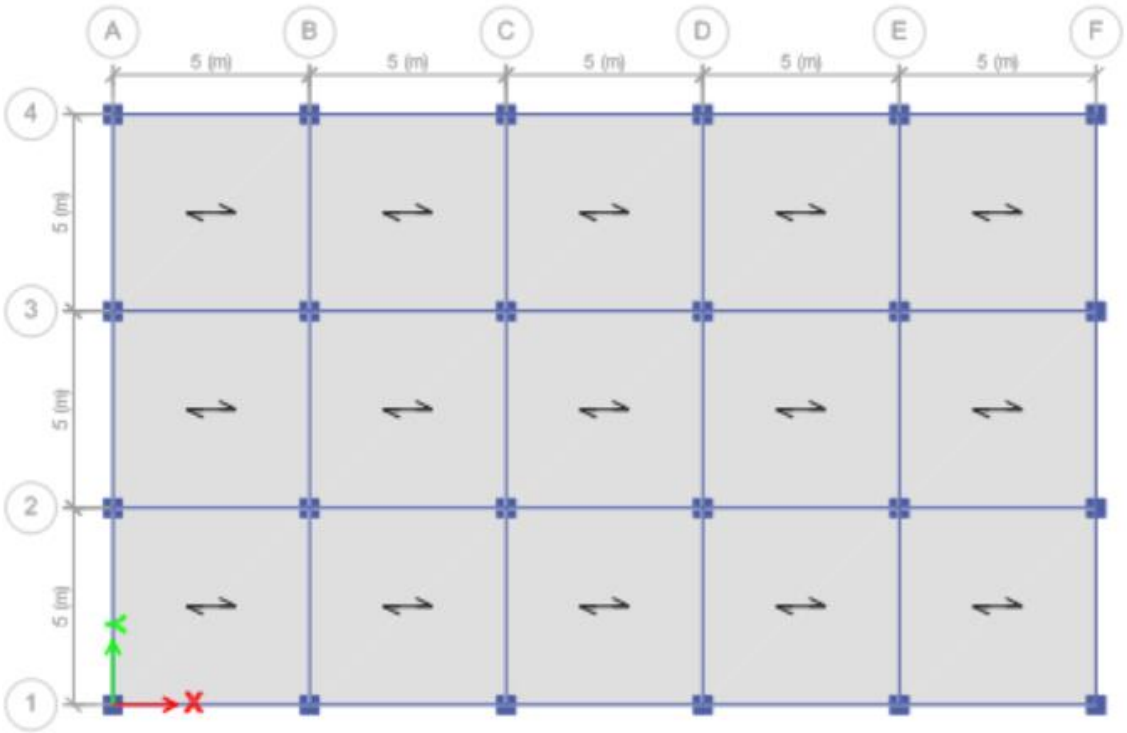
3.Description du modèle d'étude :

Cette étude a pour objectif d'évaluer la méthode statique équivalente en comparant les exigences des règlements parasismiques RPA 2024, RPA 99/2003 et Eurocode 8. Le cas d'étude porte sur un bâtiment résidentiel en béton armé comportant cinq étages. Le rez-de-chaussée a une hauteur de 4,08 mètres, tandis que chaque étage courant mesure 3,08 mètres. Les portées dans les directions X et Y sont de 5 mètres.

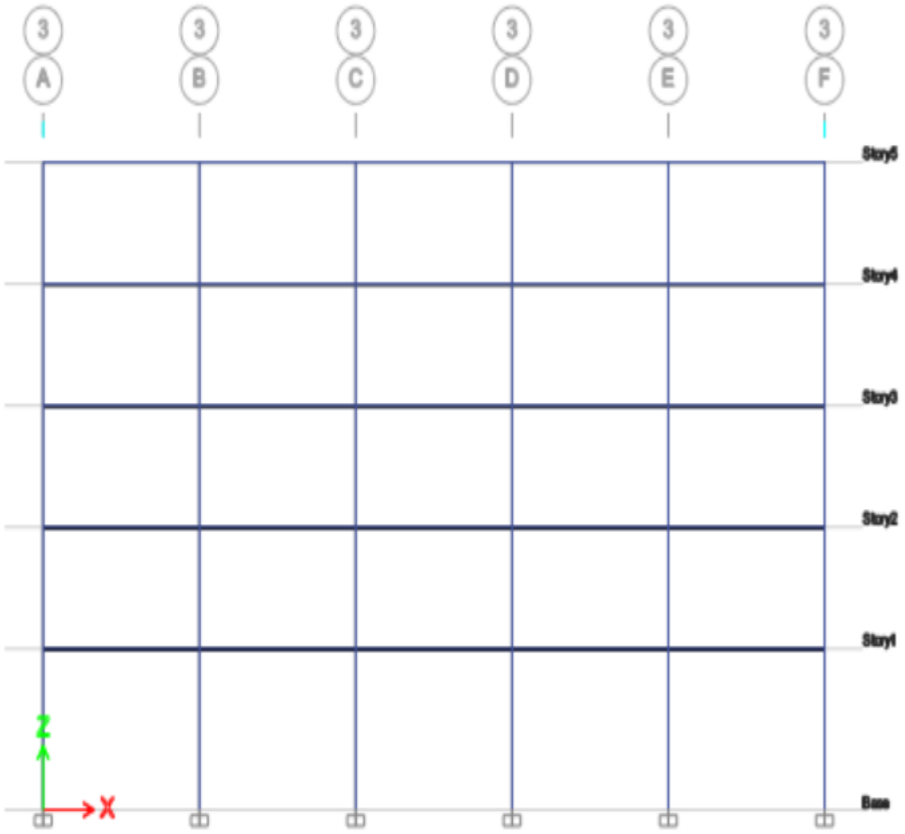
Les caractéristiques des matériaux sont les suivantes : la résistance à la compression du béton à 28 jours est de 25 MPa, et le module d'élasticité longitudinal est de E = 32164 MPa. Les sections des poteaux sont de (50 x 50) cm^2, et celles des poutres longitudinales et transversales sont de (30 x 35) cm^2. Le plancher est constitué de corps creux d'une hauteur de 20 centimètres.

Les charges permanentes pour les étages courants et le dernier étage sont respectivement de 6,10 kN/m² et 6,50 kN/m². Les charges d'exploitation pour les étages courants et le dernier étage sont de 1,5 kN/m² et 1 kN/m² respectivement. La modélisation a été réalisée à l'aide du logiciel ETABS v 22. Les plans d'étage et d'élévation sont présentés à la Figure 2.1.

Pour l'étude comparative, nous nous intéresserons au déplacement inter étages maximal, à la variation des efforts tranchants entre les étages, ainsi qu'au moment de renversement. La comparaison a été effectuée en comparant les sites en fonction des zones sismiques de chaque règlement. De plus, pour le règlement Eurocode 8, nous avons intégré les coefficients d'accélération spécifiés dans le RPA2024 afin d'obtenir une comparaison plus claire et cohérente des résultats.



a) Plan d'étages



b) Plan d'élévation

Figure 2.1 Les plans d'étage et d'élévation

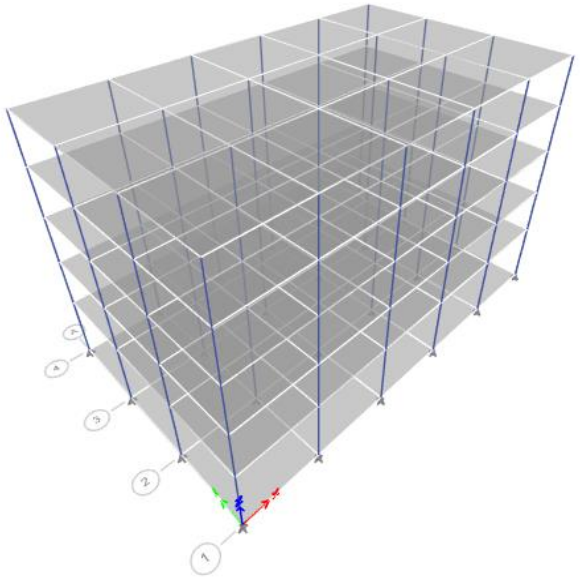


Figure 2.2 : Modèle 3D du bâtiment étudié sous ETABS v22

2.4 Calcul de la force sismique totale :

La force sismique totale dépend de plusieurs paramètres essentiels tels que le poids global de la structure, les coefficients liés à l'aléa sismique ainsi que les facteurs de comportement. En général, elle est déterminée à l'aide d'une formule qui regroupe ces différentes composantes.

Figure 2.1 Comparaison des formules fondamentales de calcul de la force sismique selon les normes RPA99, RPA2024, EC8

Les Normes	Formule de Base
RPA99/2003	$V = W \times A \times D \times \frac{Q}{R}$
EC8	$F_b = S_d(T) \times m \times \boldsymbol{\lambda}$
RPA2024	$\mathrm{V} = \boldsymbol{\lambda}.\frac{\mathbf{S_{ad}}}{\mathbf{g}}(\mathbf{T_0}).\mathbf{W}$

$$\mathbf{T_{empirique} = C_T(h_N)^{3/4}}$$

$$\mathbf{Temp=0.075*16.32^{3/4} = 0.609}$$

- T empirique : [unité en s]: période fondamentale égal 0.609
- h_N : [unité en m]: Hauteur mesurée à partir de la base de la structure jusqu'au dernier niveau (N).
- CT : Coefficient, fonction du système de contreventement (Ossatures spatiales en béton armé sans remplissage en maçonnerie égal 0.075
- T calcul [unité: s]: période fondamentale égal 0.710

$$\mathbf{T_{calcul} < 1.3T_{emp}} \quad \mathbf{donc\ T_0 = T_{calcul}}$$

$$\mathbf{T_{calcul} \geq 1.3_{emp}} \quad \mathbf{donc\ T_0 = 1.3T_{emp}}$$

- $\boldsymbol{\lambda}$ $\begin{cases} 0.85 : \text{ si (T0} \leq \text{2Tc) et si le bâtiment a plus de 2 niveaux} \\ 1, autrement \end{cases}$
- T0 : Période fondamentale de vibration du bâtiment, pour le mouvement de translation dans la direction considérée
- $\frac{Sad}{g}(T0)$: Ordonnée du spectre de calcul pour la période T0

$$\frac{S_{ae}}{g}(T) = \begin{cases} A.I.S.(1+\frac{T}{T_1}.(2.5\eta-1)) & si: 0 < T <\leq T_1 \\ A.I.S.(2.5\eta) & si: T_1 \leq T < T_2 \\ A.I.S.(2.5\eta).(\frac{T_2}{T}) & si: T_2 \leq T < T_3 \\ A.I.S.(2.5\eta).(\frac{T_2.T_3}{T^2}) & si: T_3 \leq T < 4s \end{cases}$$

- A : coefficient d'accélération de calcul pour un sol de classe S1 pour la période de retour de non effondrement Tr =475 ans
- T1 : limite inférieure des périodes correspondant au palier d'accélération spectrale constante
- T2 : limite supérieure des périodes correspondant au palier d'accélération spectrale constante

- T3 : valeur définissant le début de la branche à déplacement spectral
- I : coefficient d'importance Groupe 3 Bâtiments de faible importance (Bâtiments à risque limité pour les personnes égal 1)
- S : coefficient de site
- η : coefficient de correction de l'amortissement (béton arme léger 6%)

$$\eta = \sqrt{\frac{7}{2+\xi}}$$

Tx = 0.925 , Ty = 0.755

PERIODE ETABS : Tx = 0.925 K= 1.2125

Ty= 0.755 K= 1.1275

4.Analyse des résultats :

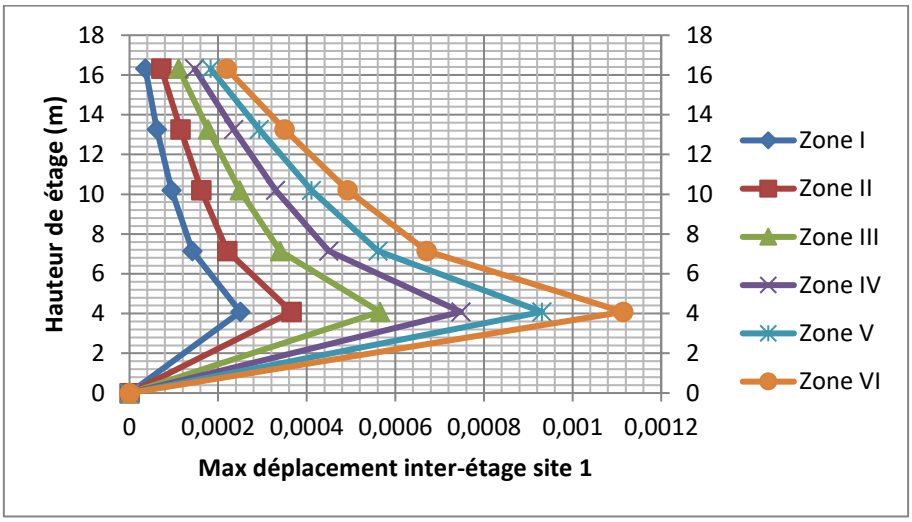
4.1 Déplacement inter étages :

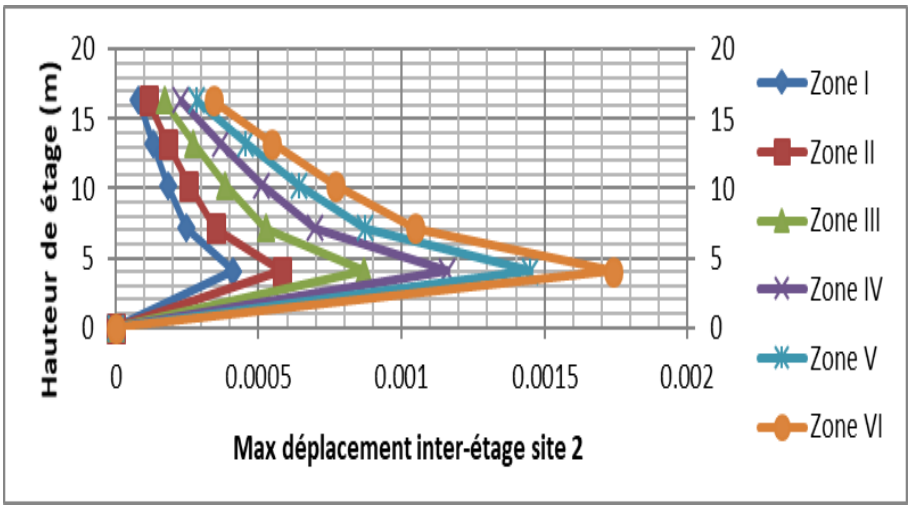
L'interprétation des quatre courbes de déplacement inter-étage maximal, obtenues via la méthode statique équivalente selon le RPA 2024, pour une structure en béton armé de cinq niveaux, révèle une réponse structurelle relativement uniforme entre les différents sites étudiés (figure 1). Dans l'ensemble des cas, la distribution verticale des déplacements présente un gradient décroissant, avec des amplitudes maximales localisées aux étages inférieurs (du 1er au 3e niveau), traduisant une plus grande flexibilité locale. L'évaluation sismique exposée ici concerne la direction X.

L'analyse par zonage sismique révèle des différences significatives. Les zones I et II (faible à modérée sismicité) affichent des déplacements inter-étages relativement faibles, traduisant un comportement plus rigide de la structure qui respecte probablement les limites réglementaires. À l'inverse, les zones III et IV (modérée à élever sismicité) montrent une augmentation notable des déplacements, indiquant des sollicitations plus importantes. Les zones V et VI (forte sismicité) présentent les déplacements les plus importants, avec la zone VI ayant systématiquement les valeurs maximales, ce qui impose une attention particulière lors du dimensionnement.

Des variations sont également constatées entre les sites, probablement dues aux différentes conditions géotechniques locales et aux coefficients d'amplification du sol selon la classification des sites du RPA2024. Le Site 1 présente les déplacements les plus faibles, le Site 2 des valeurs intermédiaires, tandis que les Sites 3 et 4 montrent les déplacements les plus élevés.

Ces observations impliquent que la conception doit impérativement inclure la vérification du respect des limites de déplacements inter-étages prescrites par le RPA2024. Un dimensionnement différencié est nécessaire, avec un renforcement structural accru dans les zones de forte sismicité (V et VI). Cette analyse confirme ainsi l'importance fondamentale de considérer conjointement le zonage sismique et l'influence significative des conditions de site dans la conception parasismique selon le RPA2024.





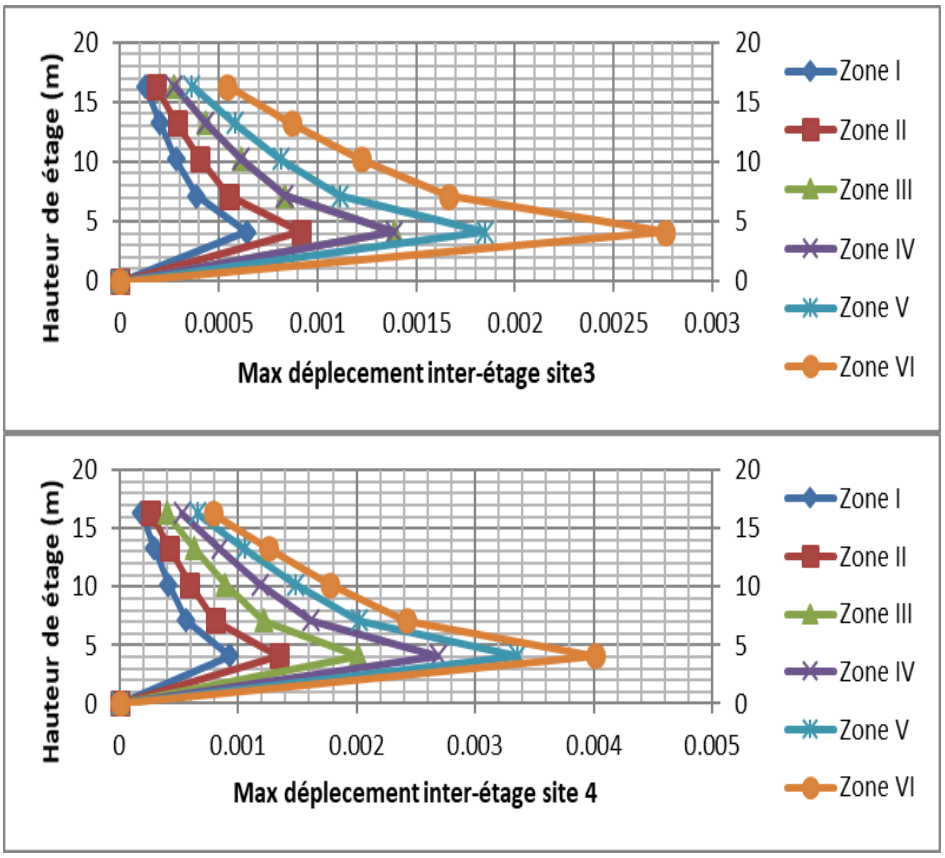


Figure 2.3 Distribution des déplacements inter-étages en direction X pour différents sites sismiques selon RPA2024

L'analyse des quatre graphiques présentant les déplacements inter-étages maximaux obtenus par la méthode statique équivalente selon le RPA99/2003 en direction X(figure 3) pour une structure en béton armé de 5 étages révèle une cohérence dans l'application de cette version réglementaire. Contrairement aux observations faites avec le RPA2024, on note ici une distribution verticale des déplacements plus uniforme sur la hauteur, avec des pics significatifs concentrés aux étages intermédiaires (étages 3-4).

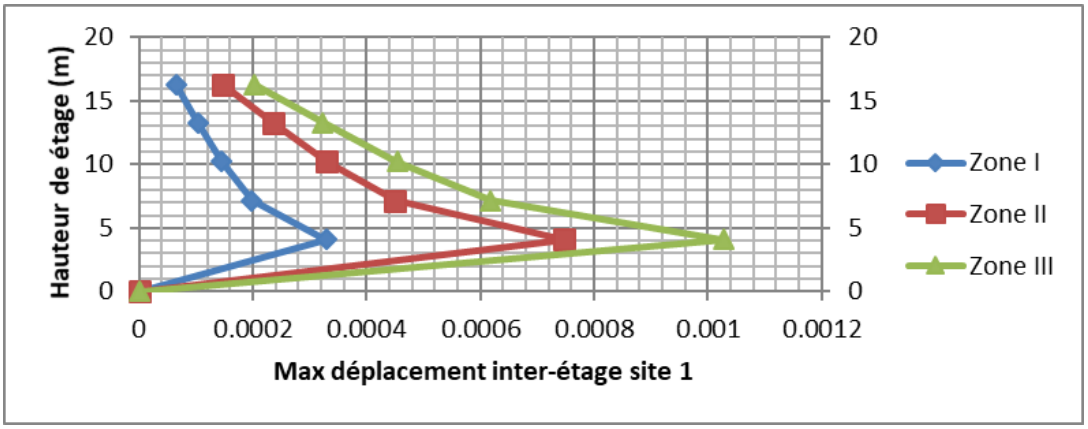
L'analyse par zonage sismique selon le RPA99/2003 met en évidence l'impact de l'aléa. La Zone I (sismicité faible) présente les déplacements les plus réduits et un comportement structurel plus rigide, avec une concentration des déplacements aux niveaux moyens. En Zone II (sismicité moyenne), on observe une augmentation notable des déplacements, avec un profil intermédiaire et des maximas autour des étages 3-4. La Zone III (sismicité élevée) montre les déplacements les plus importants, avec une distribution plus étalée sur la hauteur, indiquant des sollicitations critiques.

Des variations notables sont également constatées entre les sites, avec le Site 1 affichant les déplacements les plus faibles (max ≈ 0.001), le Site 2 des valeurs

intermédiaires (max ≈ 0.0014), et les Sites 3 et 4 les déplacements les plus élevés (max ≈ 0.002). Cette progression reflète l'influence significative des conditions géotechniques locales selon la classification des sites du RPA99/2003 sur la réponse structurale.

Le comportement particulier observé en direction X, caractérisé par des déplacements concentrés aux étages moyens, suggère une sollicitation principalement en flexion, typique de la direction la moins rigide. Les pics aux étages intermédiaires pourraient indiquer une amplification dynamique ou une résonance à ces niveaux. Une comparaison implicite avec les résultats RPA2024 montre une distribution différente (plus vers les étages moyens en RPA99/2003 contre les étages inférieurs en RPA2024) et des amplitudes qui semblent généralement plus faibles selon la version 99/2003.

Ces résultats ont des implications directes pour la conception sous RPA99/2003 : il est essentiel de vérifier le respect des limites de déplacement inter-étages propres à ce règlement. Un renforcement doit être ciblé sur les étages 3-4 où les déplacements sont maximaux. L'effet de site est une variable majeure qu'il faut intégrer, et la direction X apparaît comme la direction critique pour cette structure spécifique. Cette analyse souligne ainsi l'importance d'une analyse directionnelle approfondie et de la prise en compte des spécificités de la réglementation RPA99/2003 dans l'évaluation du comportement sismique.



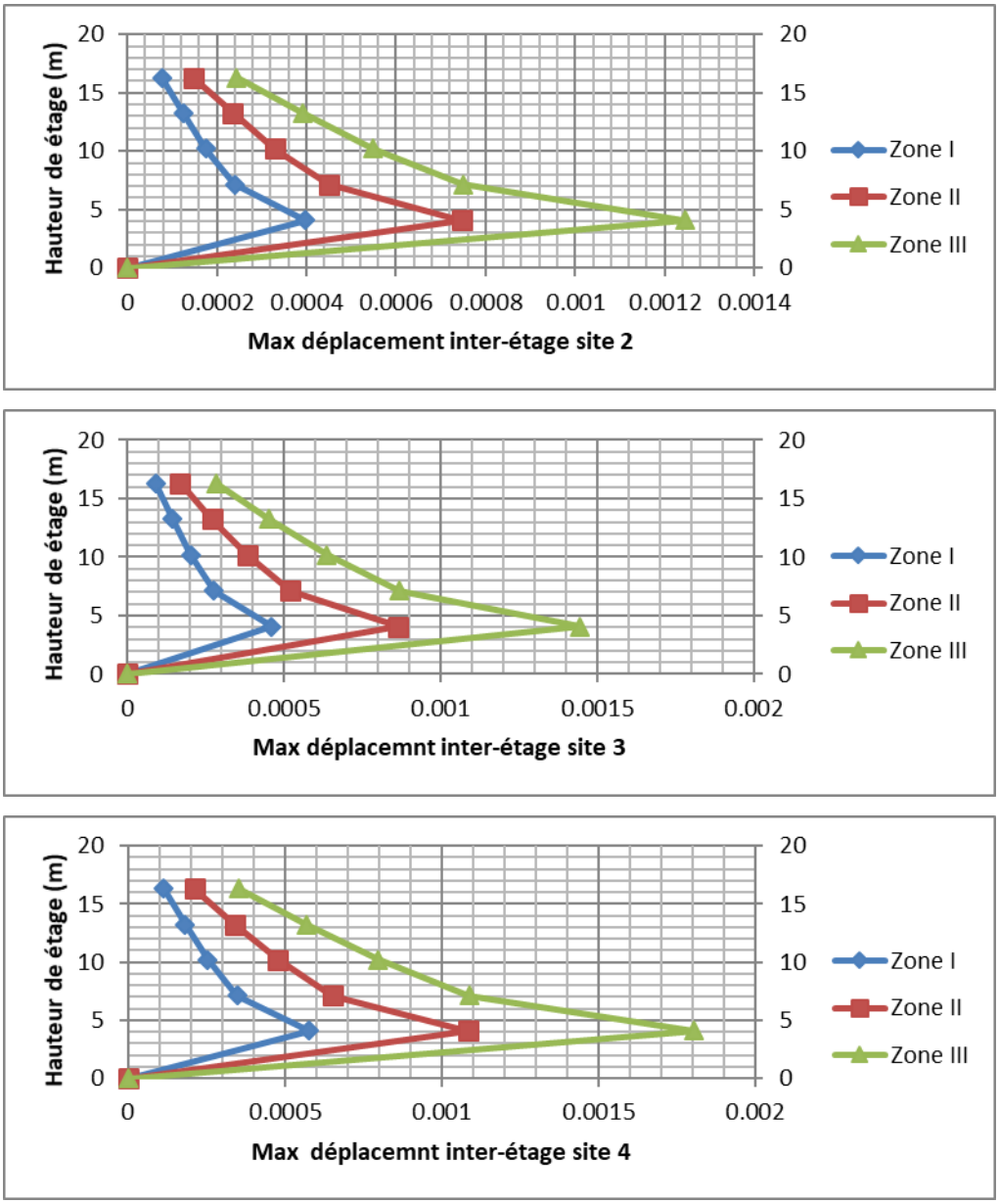


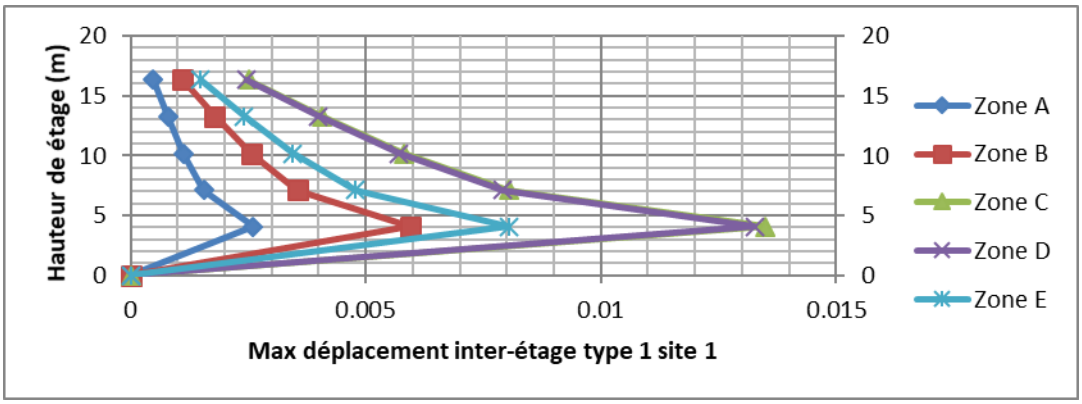
Figure 2.4 Distribution des déplacements inter-étages en direction X pour différents sites sismiques selon RPA2024

L'analyse des quatre graphiques présentant les déplacements inter-étages maximaux obtenus par la méthode statique équivalente selon l'Eurocode 8 (EC8) en direction X (figure4), classés par zones sismiques d'A (très faible) à E (élevée), révèle un comportement structural distinctif comparé aux règlements RPA. On observe une augmentation marquée des déplacements de la Zone A, où ils sont les plus réduits et concentrés aux niveaux inférieurs, vers les Zones D et E, qui présentent les valeurs les

plus importantes et un comportement critique nécessitant une attention particulière. Les Zones B et C montrent une augmentation progressive et un comportement intermédiaire.

Les variations selon les sites sont également significatives, les amplitudes des déplacements augmentant progressivement du Site 1 (le plus rigide, échelle 0–0,015) au Site 4 (le plus souple, échelle 0–0,06). Cette évolution met en évidence l'influence des classes de sol définies par l'Eurocode 8 (de A à E) et leurs coefficients d'amplification spectrale, particulièrement élevés pour les sols meubles (Sites 3 et 4). Une particularité majeure de l'EC8 réside dans la distribution verticale de la réponse, notamment dans les zones de sol de catégories D et E, où l'on observe des déplacements accrus aux niveaux supérieurs. Ce comportement traduit la contribution notable des modes supérieurs et l'effet d'amplification dynamique dû aux conditions de site, en particulier en direction X, qui semble critique pour cette configuration structurelle.

Comparativement aux règlements RPA, l'Eurocode 8 tend à générer des déplacements d'amplitudes généralement supérieures et une distribution verticale différente, moins concentrée vers le bas et pouvant amplifier les déplacements aux étages supérieurs. Ces résultats ont des implications majeures pour la conception : la vérification des limites de déplacement inter-étages de l'EC8, souvent plus strictes, est cruciale. Un renforcement structurel plus global est nécessaire dans les zones de forte sismicité (D et E), avec une attention particulière portée aux étages supérieurs, un point distinctif par rapport aux RPA. L'influence des conditions de site est également confirmée comme un facteur critique. Cette analyse souligne l'approche plus conservative et détaillée de l'Eurocode 8, exigeant une prise en compte rigoureuse de l'ensemble de ces facteurs pour garantir la sécurité structurelle.



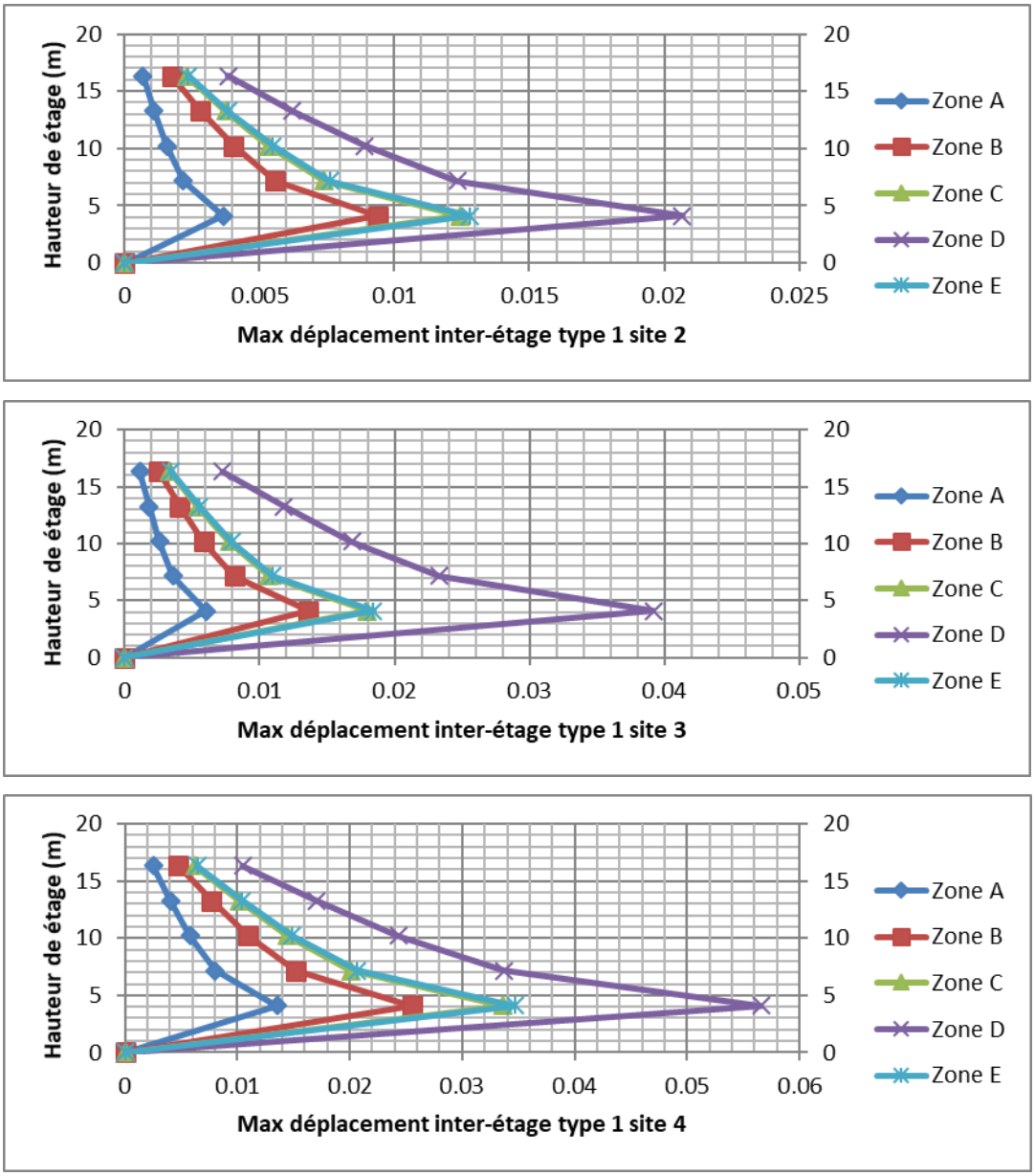


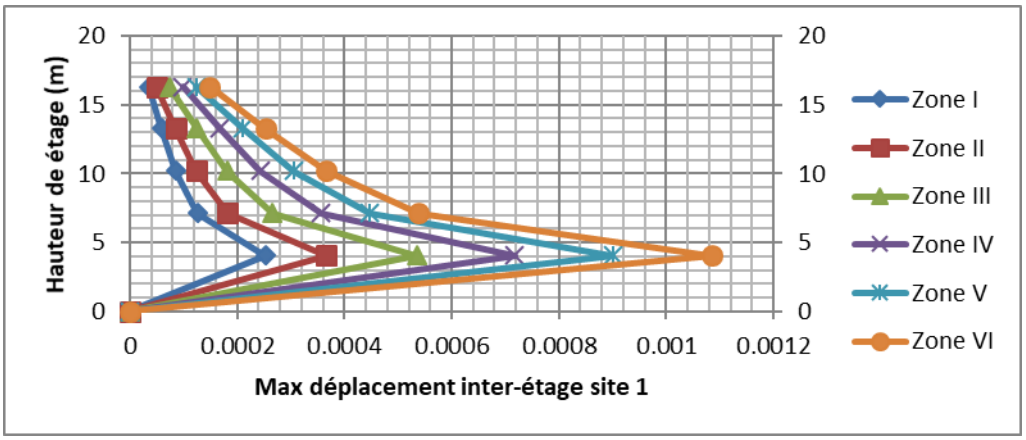
Figure 2.5 Distribution des déplacements inter-étages en direction X pour différents sites sismiques selon EUROCODE 8

L'analyse des quatre graphiques présentant les déplacements inter-étages maximaux obtenus par la méthode statique équivalente selon le RPA2024 en direction Y(figure5) confirme l'application cohérente de ce nouveau règlement parasismique, avec ses six zones sismiques (I à VI) et sa classification des sites. Les résultats par zonage montrent une progression claire des déplacements : minimes en Zone I (sismicité très faible, comportement rigide) et II (faible, acceptable), plus significatifs et nécessitant attention dans les Zones III et IV (modérée à moyenne), importants et

critiques en Zone V (élevée), et maximaux en Zone VI (très élevée, comportement critique, renforcement indispensable).

Outre l'effet de zone, des variations notables sont observées selon les sites. Les déplacements augmentent significativement du Site 1 (max ≈ 0.0012, conditions favorables) au Site 4 (max ≈ 0.005, conditions très défavorables). Cette progression, avec un facteur d'amplification d'environ 4 à 5 du Site 1 au Site 4, souligne l'impact majeur des conditions géotechniques locales selon la classification du RPA2024 et l'interaction marquée entre zone sismique et site, particulièrement pour les zones V et VI sur les sites 3 et 4. Concernant le comportement spécifique en direction Y, on note une concentration des déplacements aux niveaux inférieurs (étages 1-3) avec une décroissance vers le haut, typique d'une flexion d'ensemble. Cette direction semble présenter une rigidité différente de la direction X analysée précédemment, suggérant une anisotropie structurale.

Ces analyses ont des implications cruciales pour la conception parasismique sous RPA2024. Elles imposent la vérification du respect des limites de déplacement inter-étages réglementaires, une attention particulière étant requise pour les combinaisons Zone VI + Site 4. Le dimensionnement doit être adaptatif, progressif selon la zone et ajusté aux conditions de site. L'analyse directionnelle, comparant Y à X, est essentielle pour identifier la direction critique et optimiser la rigidité structurelle. L'évolution réglementaire du RPA2024, avec plus de zones et une meilleure prise en compte des sites, représente une approche plus raffinée. L'analyse confirme ainsi l'importance d'une approche multidirectionnelle et de la considération simultanée du zonage sismique et des conditions géotechniques locales.



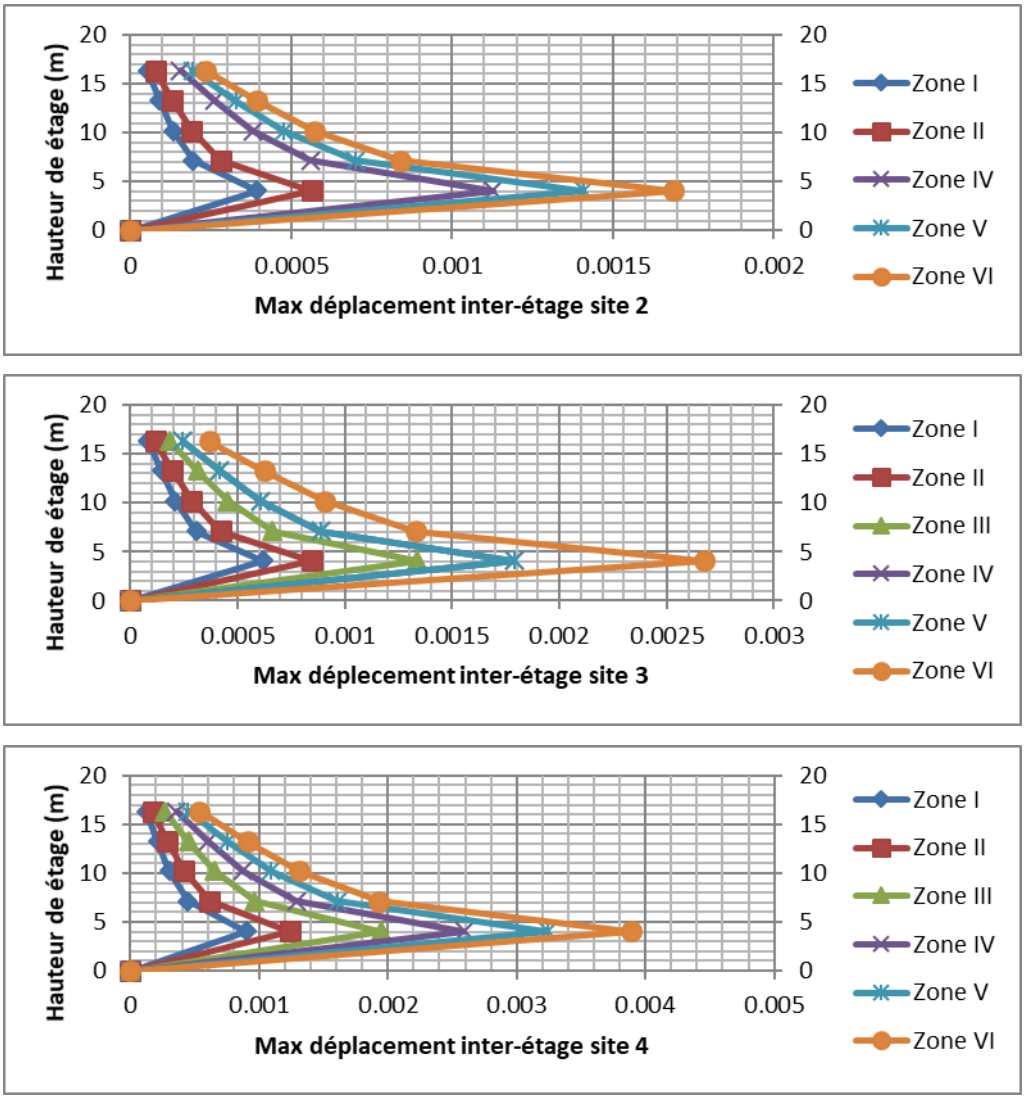


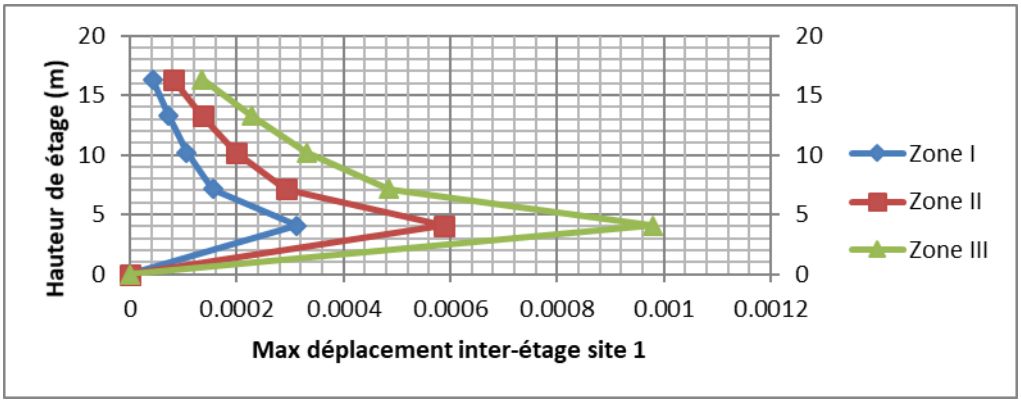
Figure 2.6 Distribution des déplacements inter-étages en direction Y pour différents sites sismiques selon RPA2024

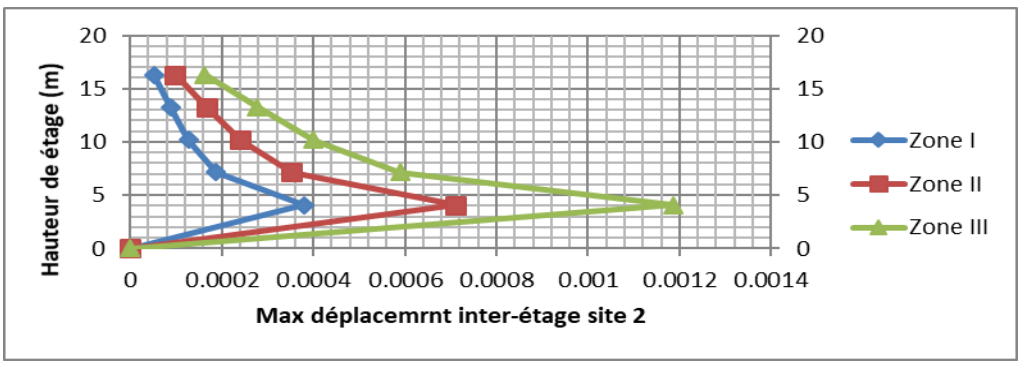
L'analyse des quatre graphiques des déplacements inter-étages maximaux obtenus par la méthode statique équivalente selon le RPA99/2003 en direction Y (figure 6) confirme l'application de ce règlement avec sa classification en trois zones sismiques (I, II, III). On observe une augmentation progressive des déplacements de la Zone I (la plus faible, rigide et stable) à la Zone III (la plus élevée, présentant des sollicitations critiques pour chaque site). La Zone II montre un comportement intermédiaire cohérent.

L'influence des conditions de site est également visible, avec une augmentation des déplacements du Site 1 (le plus favorable, max ≈ 0.0012) au Site 4 (le plus défavorable, max ≈ 0.002). L'amplification du Site 1 au Site 4 est d'environ 1.5 à 2, un effet moins marqué que sous RPA2024, reflétant une classification des sites moins détaillée dans la version 99/2003. La direction Y présente une particularité notable dans

sa distribution verticale : contrairement à d'autres analyses, les déplacements maximaux se concentrent aux étages intermédiaires (étages 3-4), un profil différent de la direction X et suggérant un comportement modal spécifique en Y, potentiellement lié à une flexibilité particulière à ces niveaux et révélant l'anisotropie structurale du bâtiment, possiblement avec un effet de couplage torsion-translation.

Une comparaison avec les résultats obtenus selon le RPA2024 indique des amplitudes de déplacements généralement plus faibles sous RPA99/2003, reflétant une approche moins conservative de l'ancienne version, avec une classification sismique (3 zones) et une prise en compte des sites moins détaillées. Ces observations ont plusieurs implications pour la conception selon le RPA99/2003 : il est impératif de vérifier le respect des limites de déplacement inter-étages de ce règlement, particulièrement en Zone III et pour les étages 3-4, qui apparaissent comme les niveaux critiques en direction Y. L'analyse comparative avec la direction X est essentielle pour comprendre l'anisotropie et adapter le dimensionnement, ciblant le renforcement aux niveaux moyens. L'évolution vers le RPA2024, plus exigeant pour les fortes sismicités et les sites défavorables, devrait être considérée pour une évaluation plus robuste. Cette analyse confirme l'importance de l'analyse multidirectionnelle et de la prise en compte des spécificités du RPA99/2003, notamment le comportement modal et les étages critiques en direction Y.





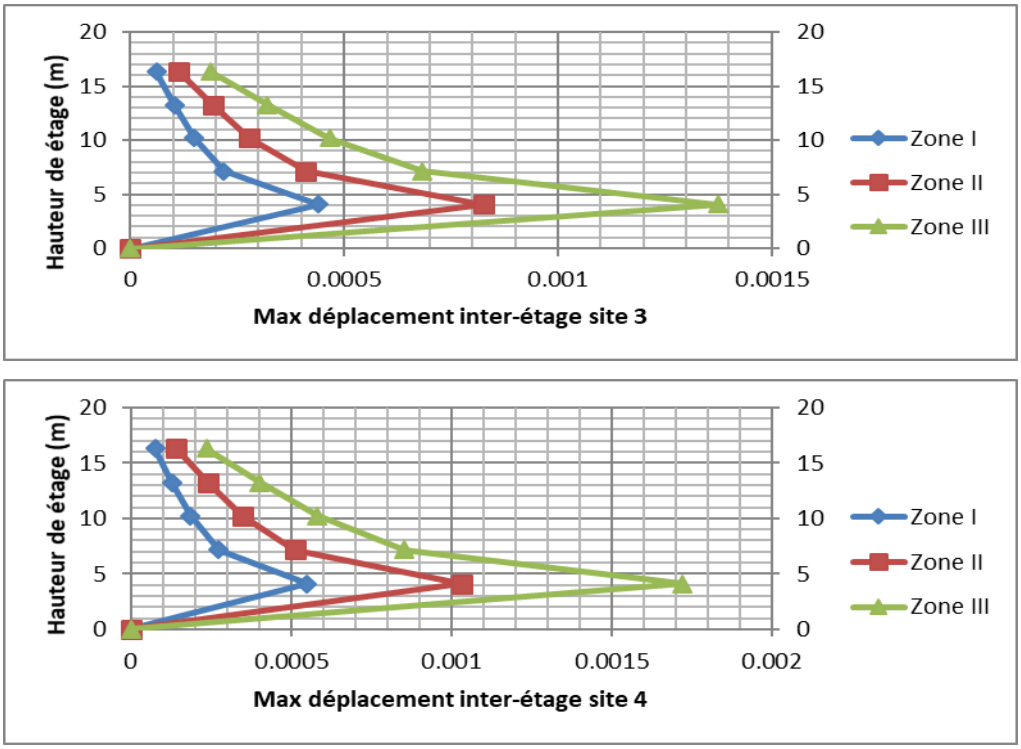


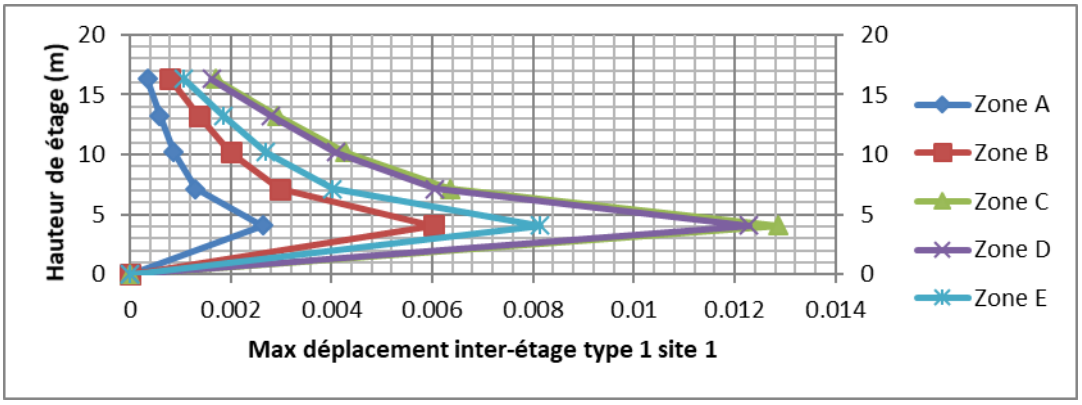
Figure 2.7 Distribution des déplacements inter-étages en direction Y pour différents sites sismiques selon RPA99

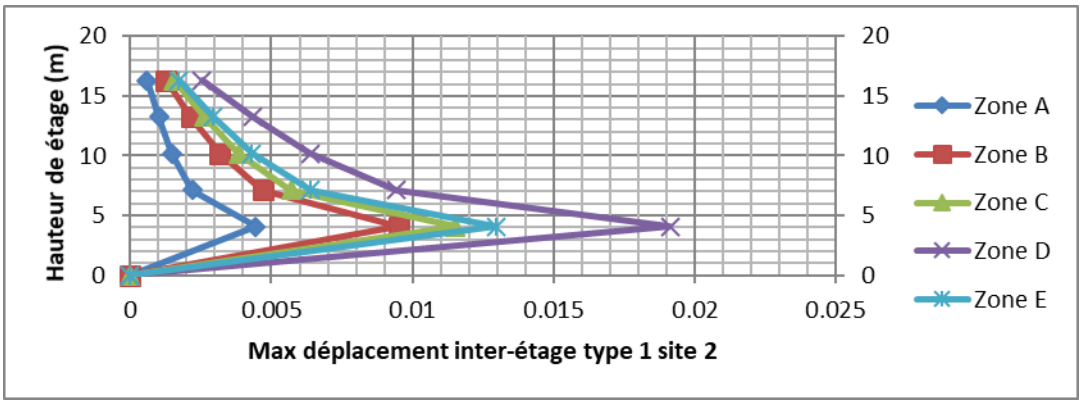
L'analyse des quatre graphiques présentant les déplacements inter-étages maximaux obtenus par la méthode statique équivalente selon l'Eurocode 8 (EC8) en direction Y (Figure II 7), utilisant la classification sismique européenne (Zones A à E), révèle une augmentation significative des déplacements de la Zone A (sismicité très faible, minime, comportement très rigide et concentré aux niveaux inférieurs) jusqu'à la Zone E (sismicité élevée, maximale). Les Zones B et C montrent une augmentation modérée et un comportement intermédiaire, tandis que les Zones D (modérée à élevée) et E présentent un profil caractéristique de l'EC8, avec une amplification notable aux étages supérieurs, indiquant un comportement critique sur toute la hauteur et nécessitant une attention particulière.

Les variations entre les sites, classés selon les classes de sol de l'EC8 (A/B à E), sont également très marquées, les amplitudes des déplacements augmentant progressivement du Site 1 (sol A/B, max ≈ 0.014) au Site 4 (sol E, max ≈ 0.06). Cette progression reflète l'influence prépondérante des conditions géotechniques et l'intégration par l'EC8 de coefficients d'amplification sophistiqués, menant à une amplification significative des déplacements sur les sols meubles (Sites 3 et 4), amplifiant la particularité de la distribution verticale avec des pics aux étages supérieurs

pour les zones D et E. Ce comportement spécifique, différent des règlements RPA qui concentrent davantage les déplacements vers le bas, résulte de la prise en compte par l'EC8 de la participation des modes supérieurs et des effets de résonance sol-structure, témoignant d'un comportement dynamique plus complexe.

Comparativement aux règlements RPA, l'Eurocode 8 génère des amplitudes de déplacements nettement supérieures et une distribution verticale distincte, confirmant son approche plus conservative et raffinée, avec une classification des sols plus détaillée et une prise en compte plus précise des effets de site. Ces résultats ont des implications directes pour la conception : il est crucial de vérifier scrupuleusement les limites de déplacement inter-étages de l'EC8 (généralement plus strictes, souvent ≤ h/500), avec un renforcement global requis pour les zones D et E, ainsi que des dispositions spéciales pour les sites 3 et 4. L'EC8 exige une attention particulière aux étages supérieurs, contrairement aux RPA, et une approche multimodale. L'analyse en direction Y, comparée à la direction X, permet d'identifier la direction critique et souligne l'importance d'une analyse bidirectionnelle complète. En somme, l'Eurocode 8 adopte une approche plus exigeante pour garantir la sécurité structurale, intégrant plus finement les effets sismiques sur l'ensemble de la structure et les interactions sol-structure.





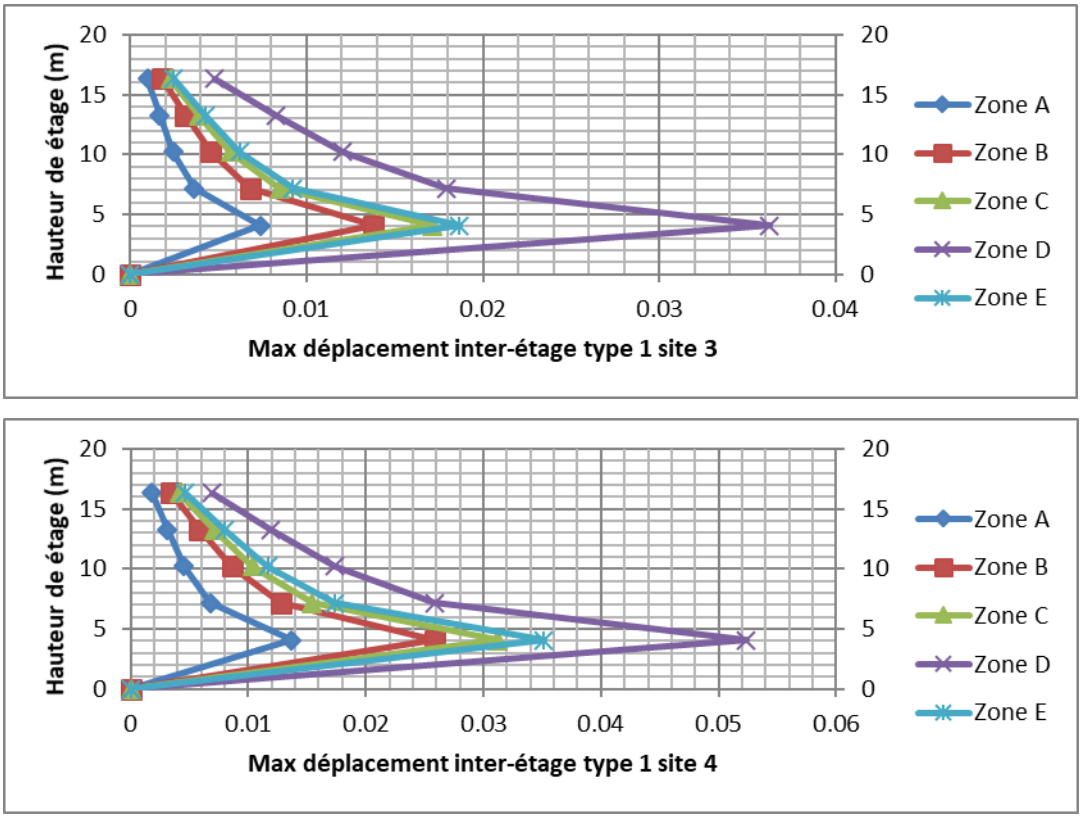


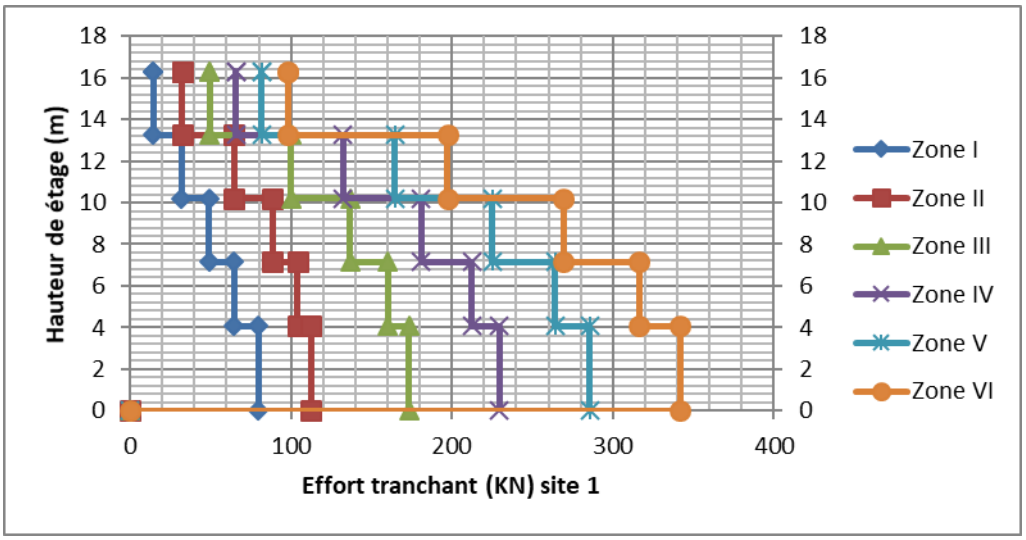
Figure 2.8 Distribution des déplacements inter-étages en direction Y pour différents sites sismiques selon EC 8

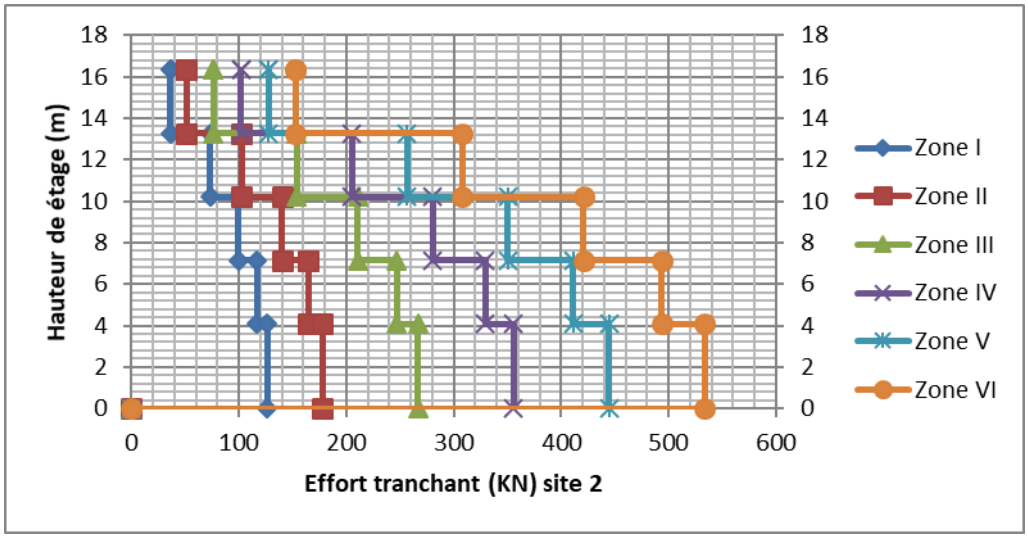
4.2 Efforts tranchants :

L'analyse des quatre graphiques présentant les efforts tranchants maximaux obtenus par la méthode statique équivalente selon le RPA 2024 pour une structure en béton armé de 5 étages en direction X(figure 8) révèle une distribution verticale caractéristique : les efforts sont maximaux à la base (niveau 0) et diminuent progressivement vers le sommet, respectant le principe physique de transmission des efforts sismiques vers les fondations.

L'évolution de ces efforts est fortement dépendante de la zone sismique et du site. En Zone I (très faible sismicité), les efforts sont minimaux, autour de 100 kN à la base pour tous les sites. Ils augmentent progressivement en Zone II (environ 200 kN), atteignent 250-300 kN en Zone III, dépassent 300 kN en Zone IV et V, et deviennent maximaux en Zone VI (très élevée sismicité), pouvant atteindre 400-500 kN à la base selon le site. Parallèlement, l'influence du site est claire : le Site 1 montre systématiquement les efforts les plus faibles (sol rocheux présumé), tandis que les Sites 2, 3 et 4 présentent une augmentation progressive, reflétant l'amplification sismique due à des conditions géotechniques moins favorables, le Site 4 affichant les efforts maximaux.

Ces résultats démontrent une forte cohérence avec les prescriptions du RPA 2024. L'augmentation logique des efforts en fonction de la sismicité zonale et des conditions de site, telle que prévue par le règlement, garantit que la conception parasismique est appropriée et adaptée à chaque contexte spécifique, permettant de dimensionner correctement les éléments structuraux pour résister aux sollicitations sismiques induites.





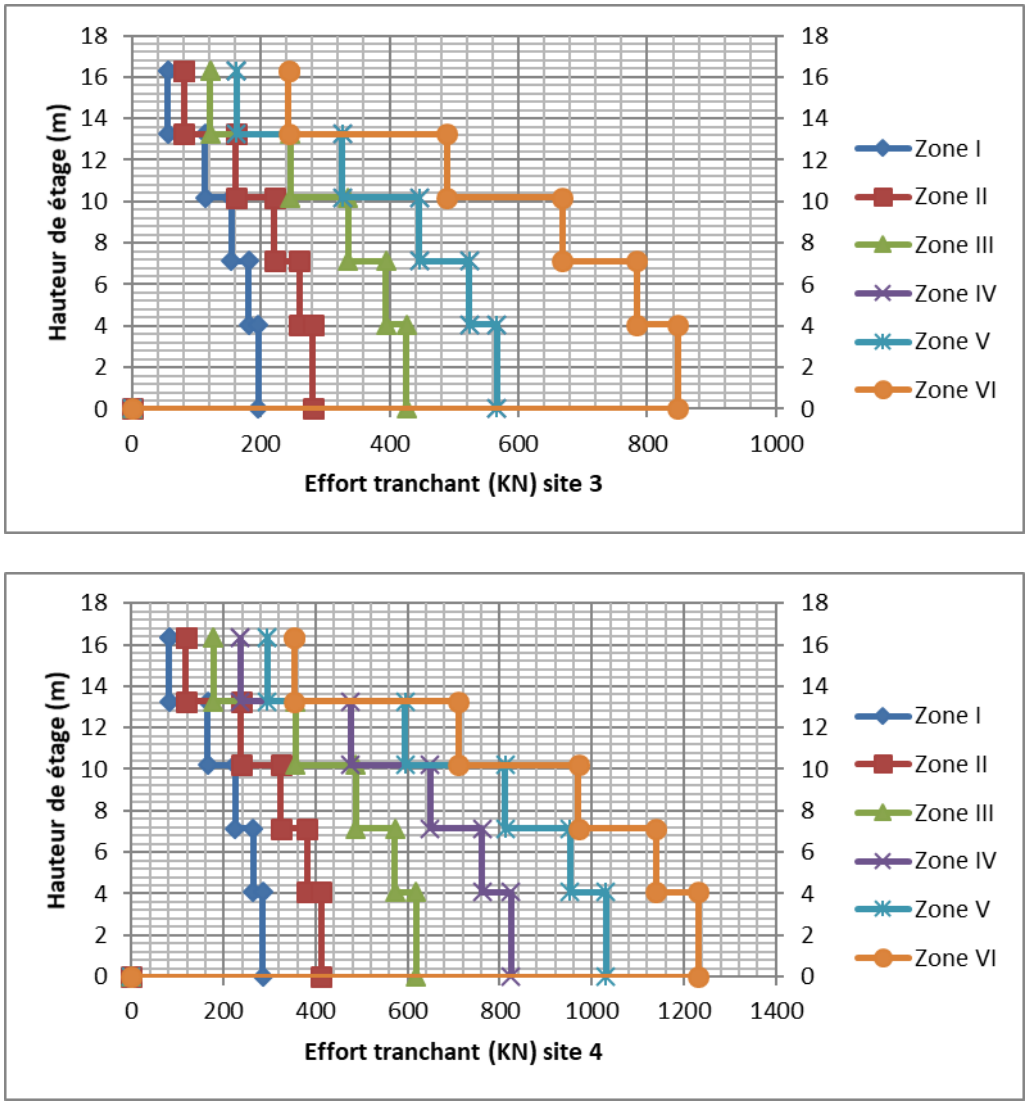


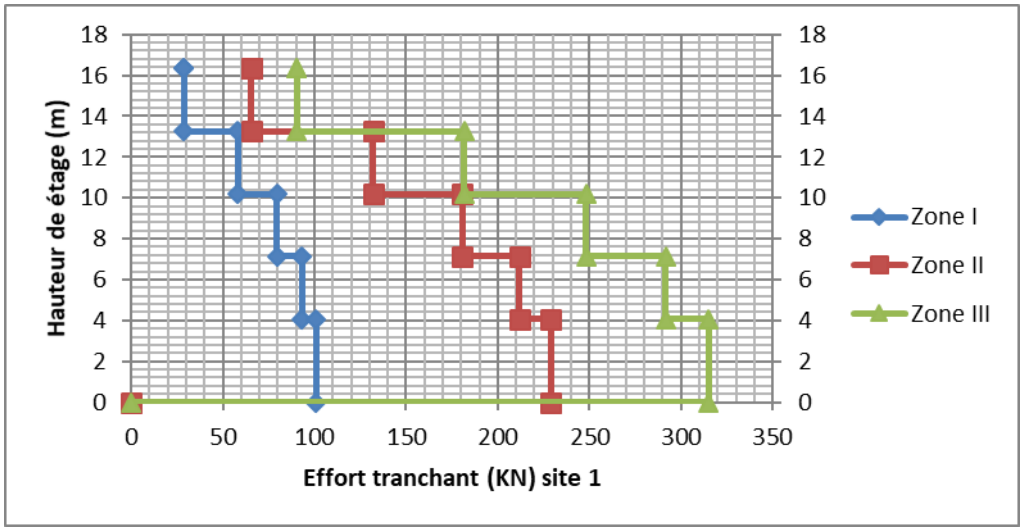
Figure 2.9 Distribution des efforts tranchant inter-étages en direction X pour différents sites sismiques selon RPA2024

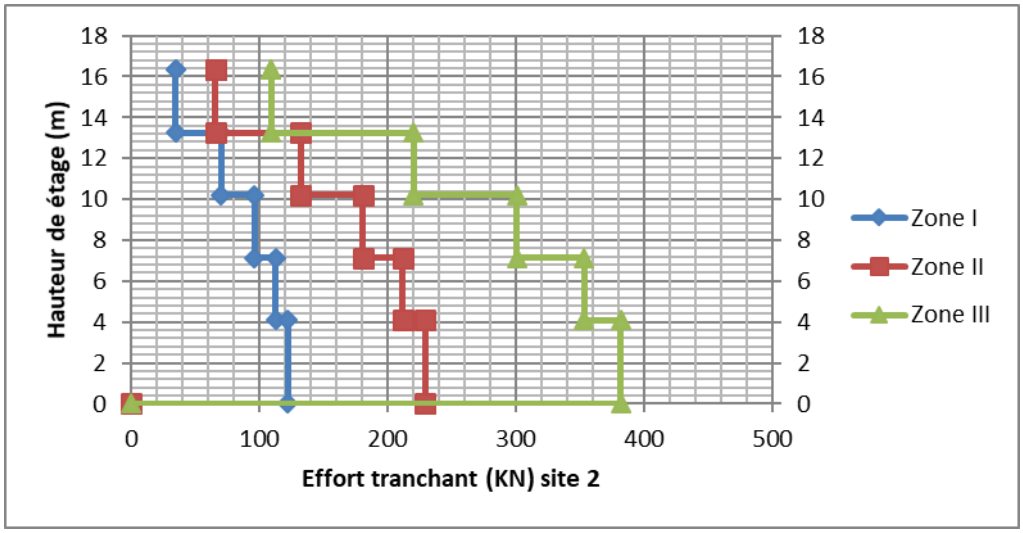
L'analyse des efforts tranchants maximaux obtenus par la méthode statique équivalente selon le RPA 99/2003 en direction X, figure (9) pour une structure en béton armé de 5 étages révèle une distribution verticale caractéristique, avec des valeurs maximales à la base (niveau 0) diminuant progressivement vers le sommet. Cette distribution est conforme aux principes de la dynamique des structures sous sollicitations sismiques et respecte les prescriptions de cette version du règlement, qui classe la sismicité en trois zones (I, II, III).

L'évolution de ces efforts est directement liée à la zone sismique et aux conditions de site. En Zone I (sismicité faible), les efforts sont minimaux, allant de ~100 kN à la base pour le Site 1 jusqu'à 150 kN selon les autres sites. Ils augmentent notablement en Zone II (sismicité

modérée), atteignant 150-250 kN à la base selon le site, et deviennent les plus importants en Zone III (sismicité élevée), variant de 250 à 400 kN à la base, marquant une différence significative avec les zones précédentes. L'influence du site est également claire : le Site 1 (sol ferme/rocheux) présente les efforts les plus faibles, tandis que les Sites 2, 3 et 4 montrent une amplification progressive, atteignant un maximum sur le Site 4 (sol meuble), où l'amplification peut doubler par rapport au Site 1.

Comparés aux résultats du RPA 2024, les efforts tranchants obtenus selon le RPA 99/2003 sont généralement inférieurs, reflétant une approche moins conservative et une classification sismique (3 zones) et des sites moins détaillées dans l'ancienne version du règlement. Cette analyse confirme que, même dans le RPA 99/2003, la progression des efforts entre zones est marquée et l'influence du site déterminante pour l'amplification. Les résultats sont conformes aux principes de conception parasismique de l'époque pour cette distribution en X.





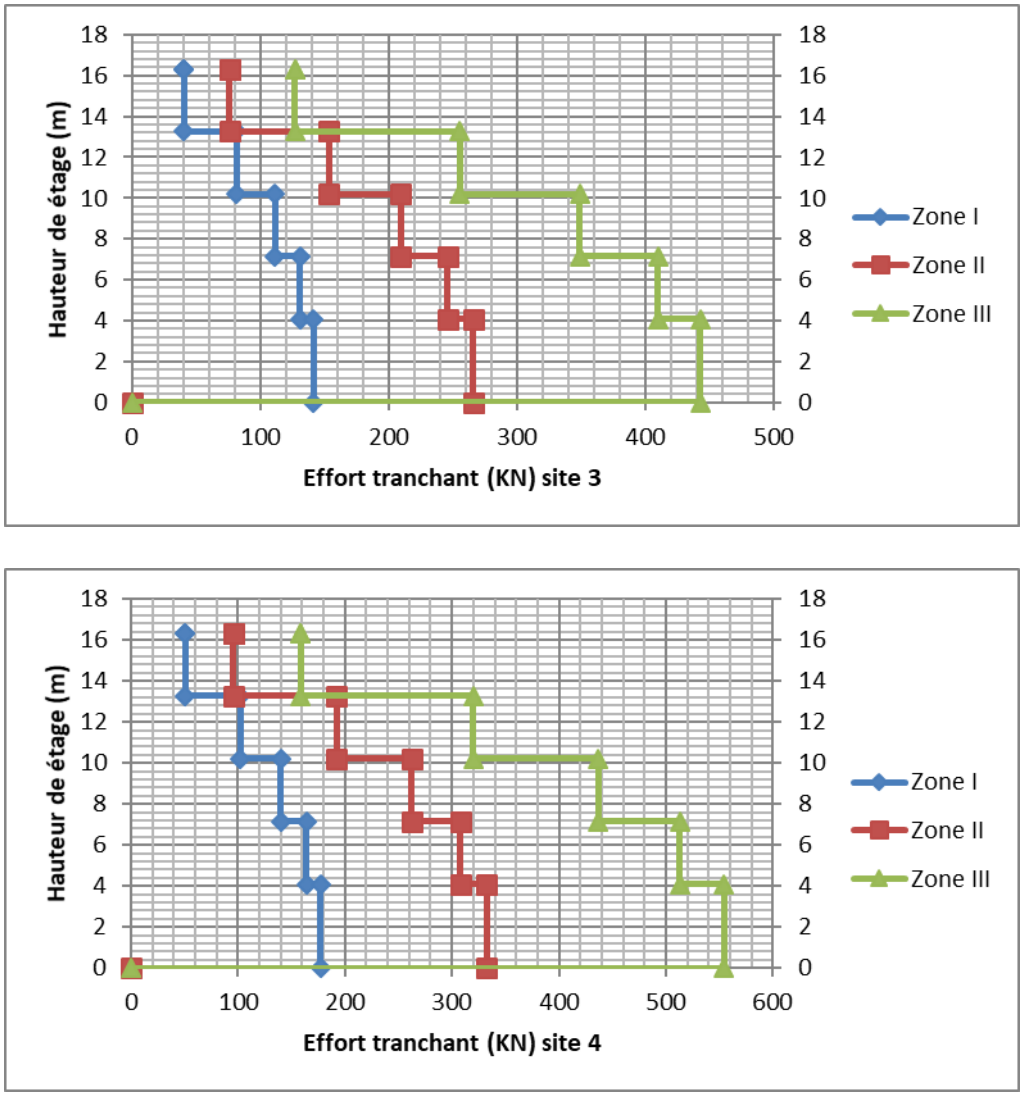


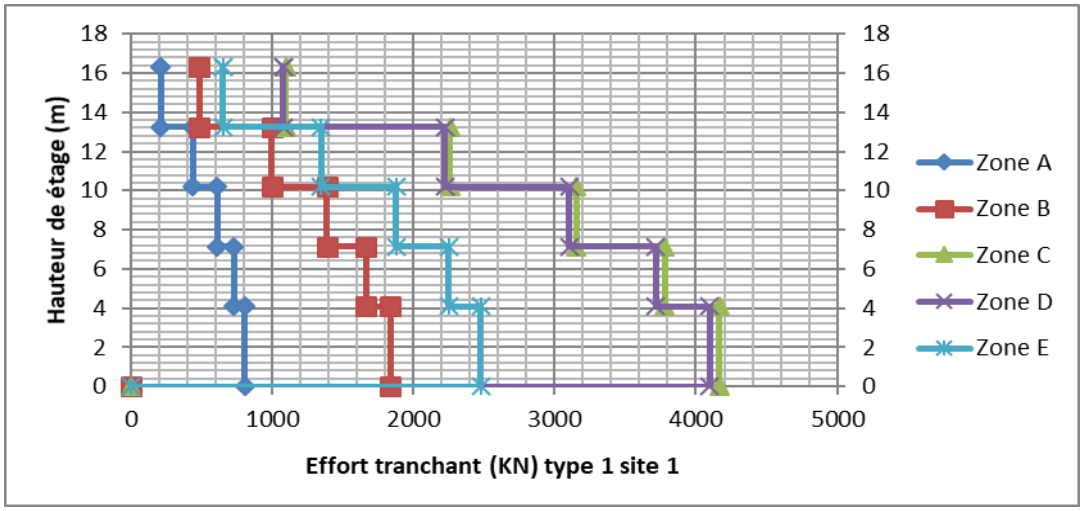
Figure 2.10 Distribution des efforts tranchant inter-étages en direction X pour différents sites sismiques selon RPA99

L'analyse des quatre graphiques présentant les efforts tranchants maximaux obtenus par la méthode statique équivalente selon l'Eurocode 8 (EC8) en direction X, (figure 10) pour une structure en béton armé de 5 étages révèle une distribution verticale caractéristique, avec des efforts maximaux à la base (niveau 0) diminuant progressivement vers le sommet. Cette distribution est conforme aux principes de l'EC8 et reflète le pattern théorique de répartition des forces sismiques.

L'évolution des efforts est fortement corrélée au zonage sismique EC8 (Zones A à E) et aux conditions de site (Sites 1 à 4). Les efforts sont minimaux en Zone A (très faible sismicité), allant de 500 à 1000 kN à la base selon le site. Ils augmentent significativement en Zone B

(faible, 1000-2500 kN) et doublent environ en Zone C (modérée, 2500-5000 kN). Les Zones D (élevée, 4000-10000 kN) et E (très élevée, 2000-8000 kN) présentent les efforts les plus importants, avec des valeurs variables selon les conditions de site. L'influence du site, correspondant aux classes de sol EC8 (A/B à E), est particulièrement marquée : le Site 1 (sol rocheux A/B) montre les efforts les plus faibles, tandis que les Sites 2 (sol C), 3 (sol D) et 4 (sol E, sol meuble) présentent une amplification progressive et substantielle, le Site 4 atteignant les efforts maximaux.

Par rapport aux règlements RPA, les efforts tranchants obtenus avec l'Eurocode 8 sont généralement d'un ordre de grandeur supérieur (plusieurs milliers de kN), témoignant d'une approche plus conservative et sécuritaire. La progression entre les zones suit la logique de l'accélération de référence a_g et l'influence du facteur de sol est plus prononcée, particulièrement sur les Sites 3 et 4. On note également que la Zone D présente souvent les efforts les plus critiques dans la plupart des configurations étudiées. Cette analyse confirme que l'Eurocode 8 impose des exigences sismiques généralement plus strictes, avec une différenciation très marquée selon les conditions de site.



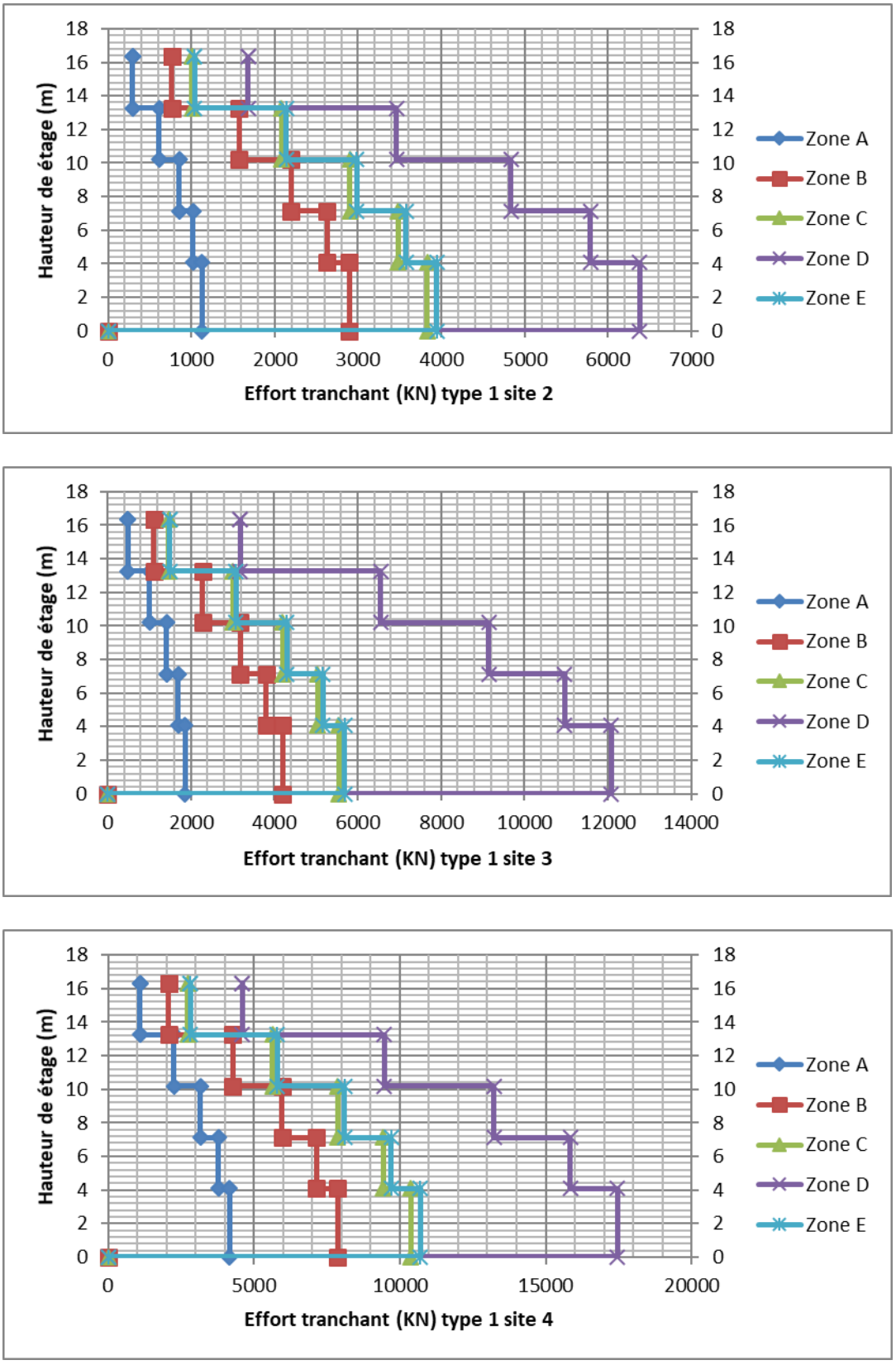
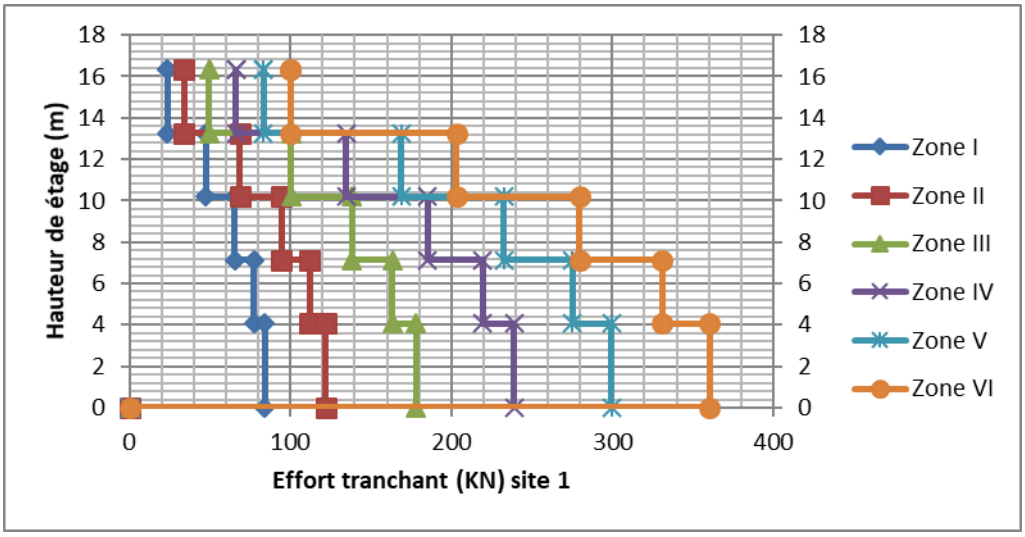


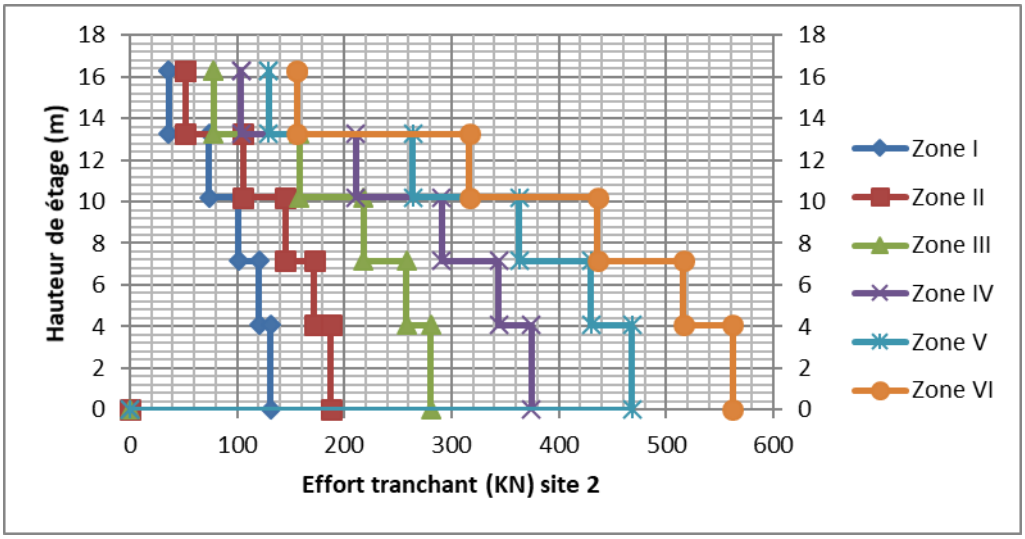
Figure 2.11 Distribution des efforts tranchant inter-étages en direction X pour différents sites sismiques selon EC8

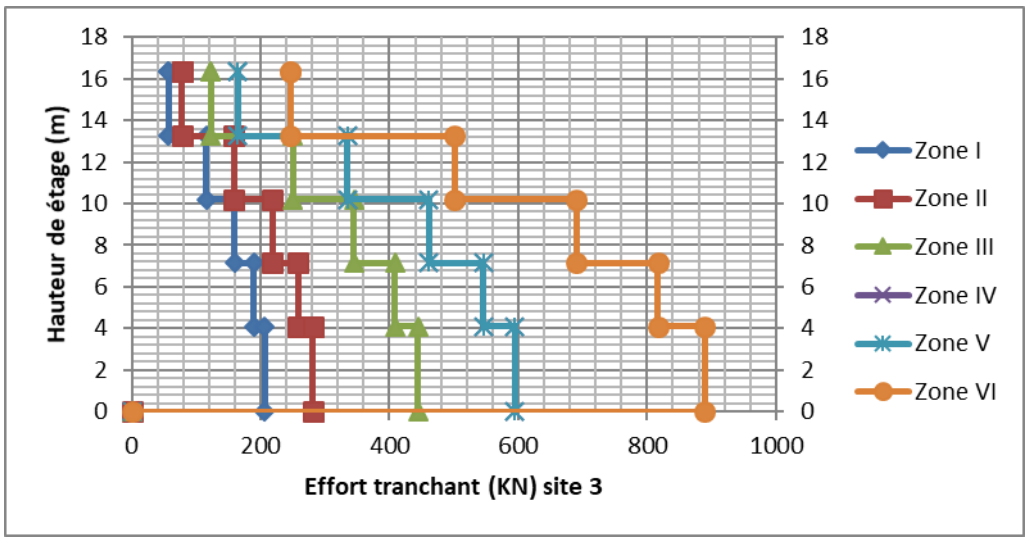
L'analyse des efforts tranchants maximaux obtenus par la méthode statique équivalente selon le RPA 2024 en direction Y pour une structure en béton armé de 5 étages révèle une distribution verticale caractéristique et cohérente avec la direction X (figure 11) : les efforts sont maximaux à la base (niveau 0) et diminuent progressivement vers le sommet, respectant les principes de transmission des forces sismiques. L'évolution de ces efforts est fortement liée aux six zones sismiques du RPA 2024. En Zone I (sismicité négligeable), les efforts sont minimaux (environ 100-200 kN à la base selon le site). Ils augmentent progressivement en Zone II (150-300 kN), atteignent des niveaux intermédiaires en Zones III (200-400 kN) et IV (250-500 kN), deviennent importants en Zone V (300-600 kN), et sont maximaux en Zone VI (très élevée sismicité), variant de 350 à 700 kN à la base selon le site, représentant les sollicitations les plus critiques.

L'influence des conditions de site est un facteur déterminant, entraînant une augmentation significative des efforts du Site 1 (sol ferme/rocheux, efforts les plus faibles) au Site 4 (sol très meuble, efforts maximaux). On observe une amplification modérée sur le Site 2 (~40-50% par rapport au Site 1), importante sur le Site 3 (~100%), et pouvant atteindre 150% sur le Site 4. Comparés aux résultats en direction X, les efforts en direction Y présentent des ordres de grandeur similaires, confirmant l'approche bidirectionnelle du RPA 2024 pour les structures régulières.

Ces résultats démontrent une forte conformité avec les prescriptions du RPA 2024, respectant la hiérarchisation par zones sismiques et intégrant de manière appropriée l'amplification due aux conditions géotechniques. La distribution des efforts est également conforme aux exigences de conception parasismique algérienne. L'analyse confirme ainsi l'importance cruciale du choix du site et de la zone sismique dans le dimensionnement parasismique selon le RPA 2024, ainsi que la nécessité d'une analyse directionnelle complète.


Hauteur de étage (m)
Effort tranchant (KN) site 1
Zone I
Zone II
Zone III
Zone IV
Zone V
Zone VI


Hauteur de étage (m)
Effort tranchant (KN) site 2
Zone I
Zone II
Zone III
Zone IV
Zone V
Zone VI


Hauteur de étage (m)
Effort tranchant (KN) site 3
Zone I
Zone II
Zone III
Zone IV
Zone V
Zone VI

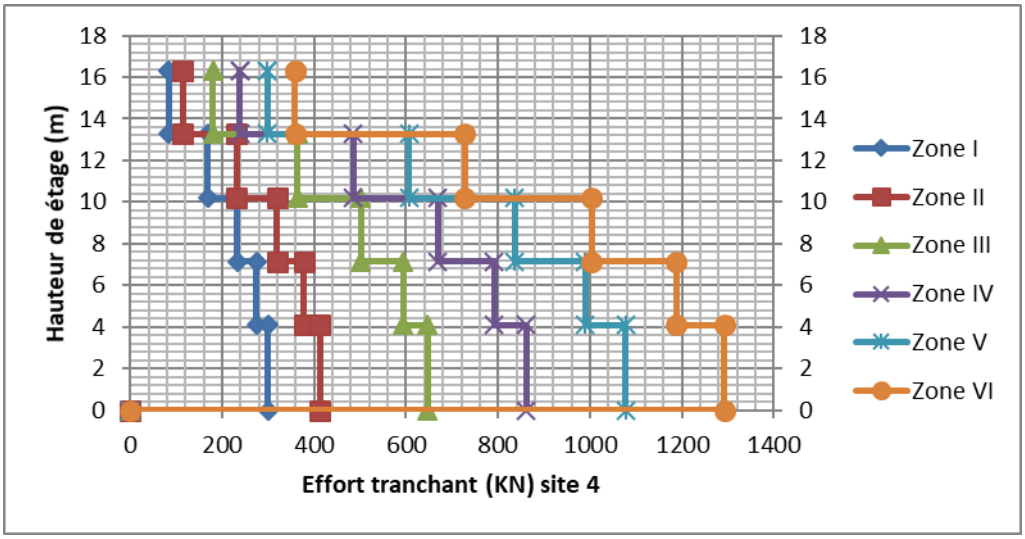


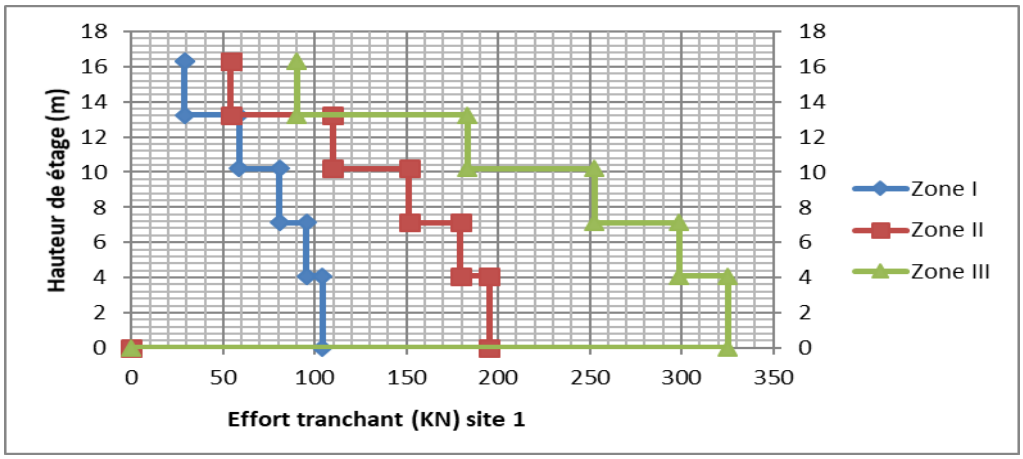
Figure 2.12 Distribution des efforts tranchant inter-étages en direction Y pour différents sites sismiques selon RPA2024

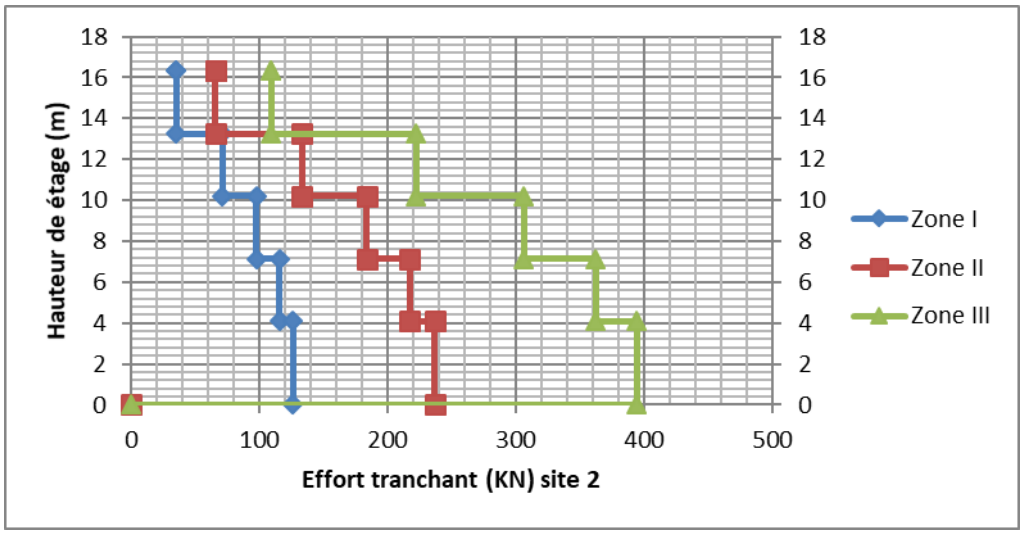
L'analyse des efforts tranchants maximaux obtenus par la méthode statique équivalente selon le RPA 99/2003 en direction Y, (figure 12) pour une structure en béton armé de 5 étages révèle une distribution verticale décroissante caractéristique, conforme aux principes de ce règlement, avec des efforts maximaux à la base (niveau 0) diminuant progressivement vers le sommet. L'évolution selon les trois zones sismiques du RPA 99/2003 montre une augmentation claire : minimaux en Zone I (100-150 kN à la base selon le site), intermédiaires et notablement supérieurs en Zone II (150-250 kN), et les plus importants et critiques en Zone III (250-400 kN à la base), représentant les sollicitations pour les régions à fort aléa sismique.

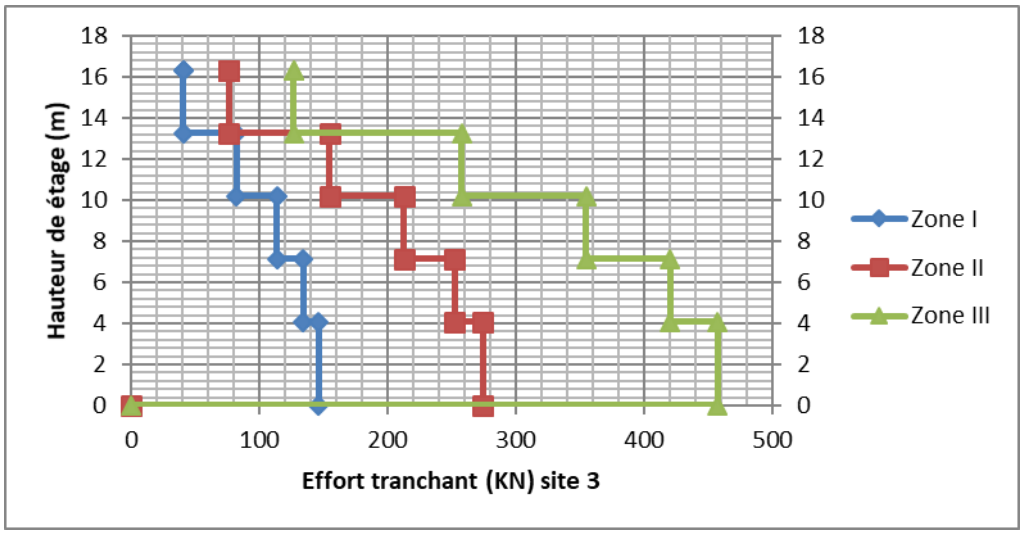
Parallèlement, l'influence des conditions de site (classées S1 à S4) est significative, entraînant une augmentation progressive des efforts du Site 1 (sol rocheux S1, efforts les plus faibles) au Site 4 (sol très meuble S4, efforts maximaux). On observe une amplification d'environ 30-40% pour le Site 2 (sol ferme S2), 60-80% pour le Site 3 (sol meuble S3), et pouvant atteindre 100% pour le Site 4 par rapport au Site 1 en Zone I, cette amplification étant bien marquée et conforme au facteur de site S du règlement. En direction Y, les efforts sont légèrement inférieurs à ceux de la direction X pour certaines configurations, mais la progression entre zones suit une logique linéaire.

Une comparaison avec la direction X confirme que les efforts en direction Y présentent des valeurs similaires, validant l'approche bidirectionnelle du RPA 99/2003 pour les structures régulières en béton armé. Les valeurs obtenues restent dans des ordres de grandeur raisonnables pour l'époque, la différenciation entre les trois zones sismiques est claire et progressive, et l'effet

du site, particulièrement pour les sites 3 et 4, est déterminant. Cette analyse confirme que le RPA 99/2003 proposait une approche pragmatique et adaptée au contexte sismique algérien de l'époque, avec une prise en compte notable de l'aléa zonal et de l'influence des sols.







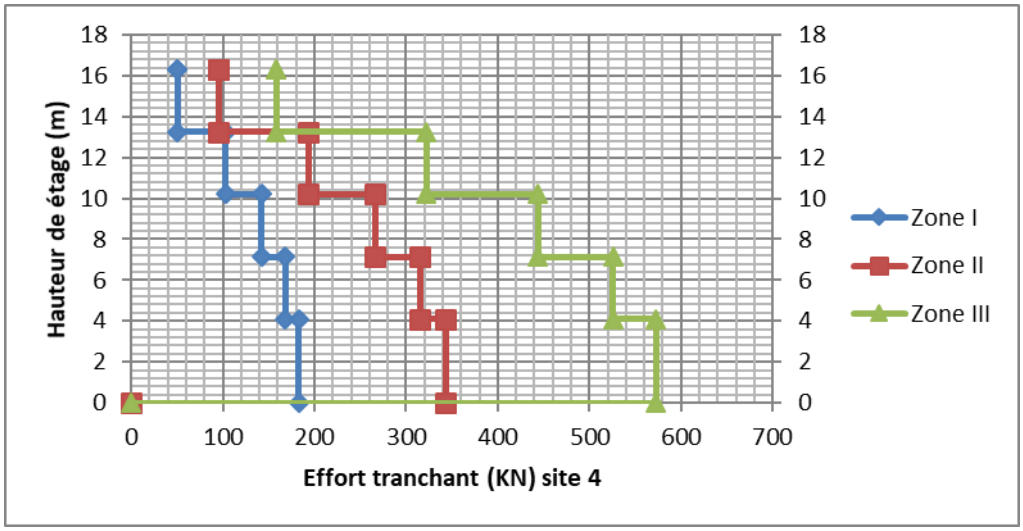


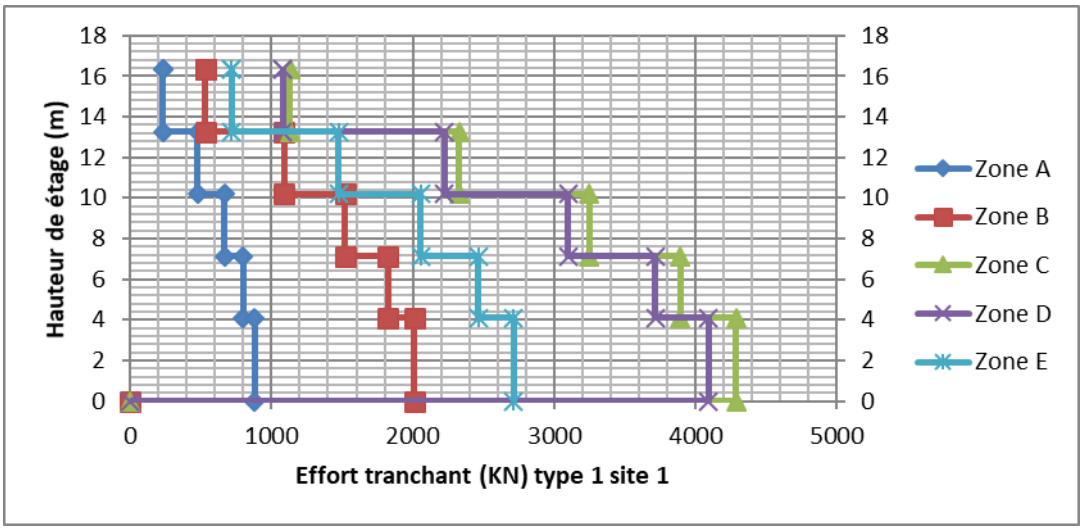
Figure 2.13 Distribution des efforts tranchant inter-étages en direction Y pour différents sites sismiques selon RPA99

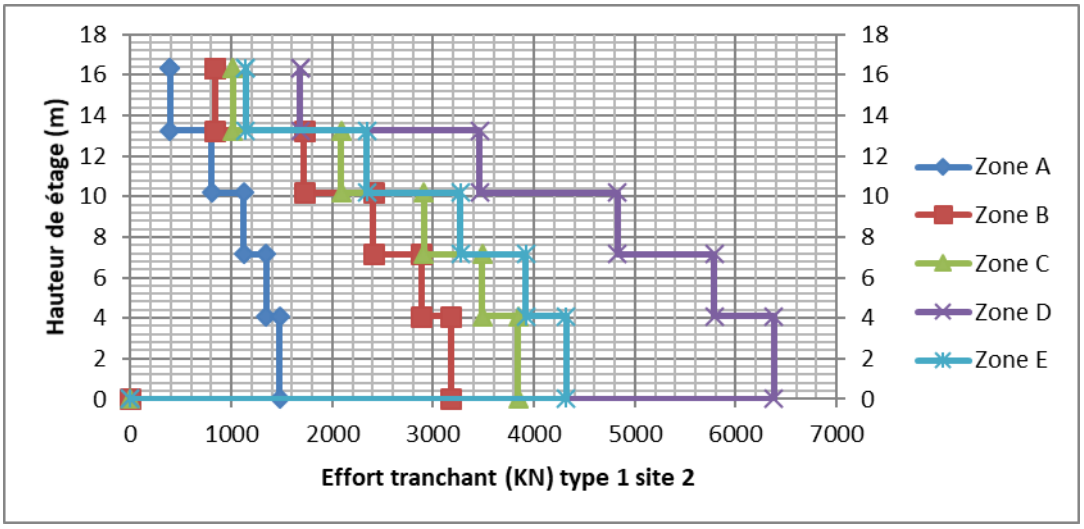
L'analyse des efforts tranchants maximaux obtenus par la méthode statique équivalente selon le RPA 99/2003 en direction Y pour une structure en béton armé de 5 étages révèle une distribution verticale décroissante caractéristique, conforme aux principes de ce règlement, avec des efforts maximaux à la base (niveau 0) diminuant progressivement vers le sommet. L'évolution selon les trois zones sismiques du RPA 99/2003 montre une augmentation claire : minimaux en Zone I (100-150 kN à la base selon le site), intermédiaires et notablement supérieurs en Zone II (150-250 kN), et les plus importants et critiques en Zone III (250-400 kN à la base), représentant les sollicitations pour les régions à fort aléa sismique.

Parallèlement, l'influence des conditions de site (classées S1 à S4) est significative, entraînant une augmentation progressive des efforts du Site 1 (sol rocheux S1, efforts les plus faibles) au Site 4 (sol très meuble S4, efforts maximaux). On observe une amplification d'environ 30-40% pour le Site 2 (sol ferme S2), 60-80% pour le Site 3 (sol meuble S3), et pouvant atteindre 100% pour le Site 4 par rapport au Site 1 en Zone I, cette amplification étant bien marquée et conforme au facteur de site S du règlement. En direction Y, les efforts sont légèrement inférieurs à ceux de la direction X pour certaines configurations, mais la progression entre zones suit une logique linéaire.

Une comparaison avec la direction X confirme que les efforts en direction Y présentent des valeurs similaires, validant l'approche bidirectionnelle du RPA 99/2003 pour les structures régulières en béton armé. Les valeurs obtenues restent dans des ordres de grandeur raisonnables pour l'époque, la différenciation entre les trois zones sismiques est claire et progressive, et l'effet

du site, particulièrement pour les sites 3 et 4, est déterminant. Cette analyse confirme que le RPA 99/2003 proposait une approche pragmatique et adaptée au contexte sismique algérien de l'époque, avec une prise en compte notable de l'aléa zonal et de l'influence des sols..





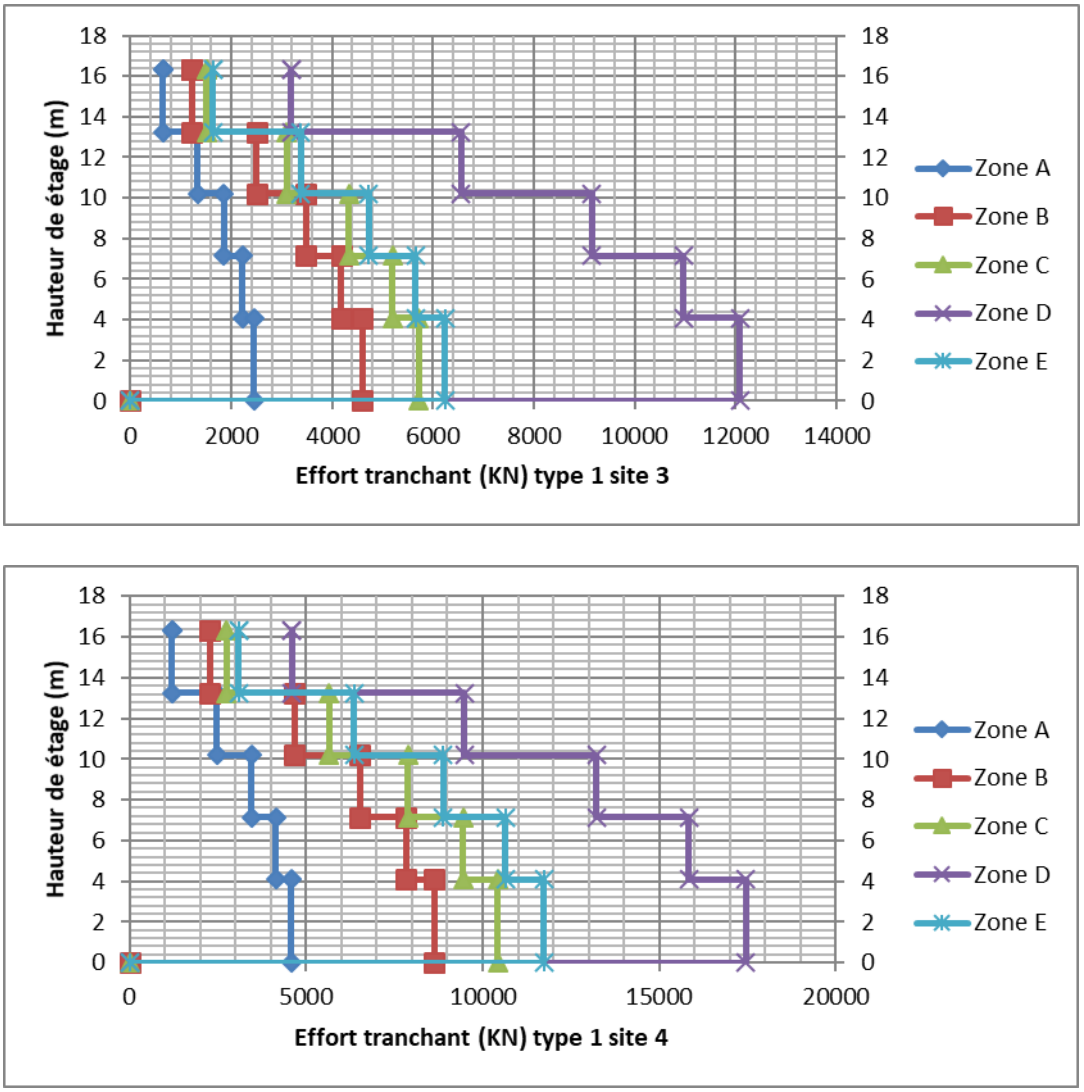


Figure 2.14 Distribution des efforts tranchant inter-étages en direction Y pour différents sites sismiques selon EC8

4.3 Moment de renversement

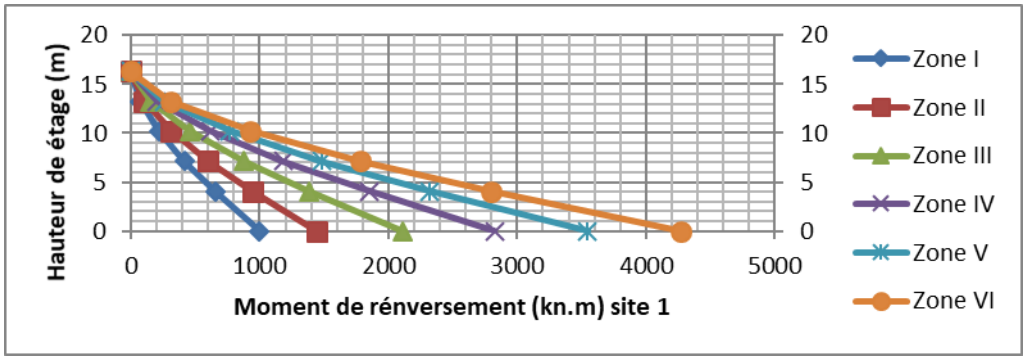
L'analyse des quatre graphiques présentant les moments de renversement obtenus par la méthode statique équivalente selon le RPA 2024 en direction X, (figure14) pour une structure en béton armé de 5 étages révèle un comportement structural cohérent. Dans tous les cas, les moments de renversement diminuent progressivement avec la hauteur, présentant une forme parabolique caractéristique qui traduit la distribution triangulaire des forces sismiques et la concentration des efforts à la base de la structure (niveau 0), conformément aux principes de la méthode statique équivalente.

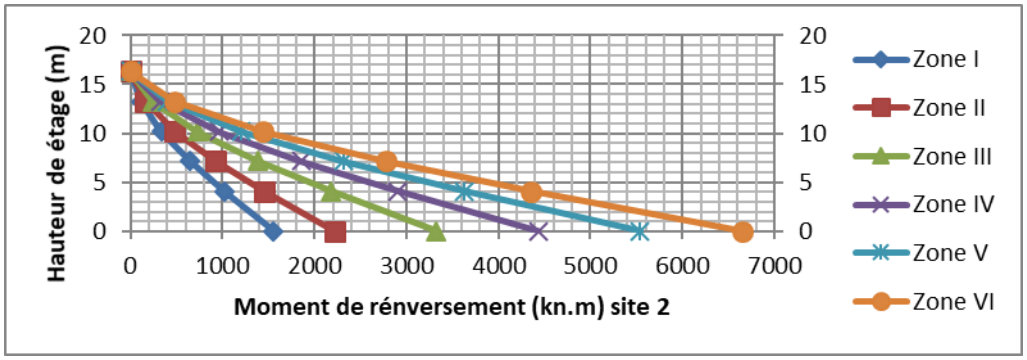
L'influence de la zone sismique est primordiale et respecte la hiérarchisation du RPA 2024. Les moments de renversement augmentent significativement de la Zone I (sismicité la plus faible), où ils sont les plus réduits, jusqu'à la Zone VI (sismicité la plus élevée), qui génère

les moments maximums pour chaque site. Les zones intermédiaires (II à V) montrent une progression logique des sollicitations, reflétant l'augmentation de l'aléa sismique régional.

L'effet du site géotechnique est également très marqué et joue un rôle crucial dans l'amplification des moments. Le Site 1 (sol ferme) présente systématiquement les moments de renversement les plus faibles (autour de 5000 kN.m maximum en Zone VI [correction implicite de l'erreur de zone dans le texte source]). Les sollicitations augmentent notablement sur le Site 2 (sol moyen), s'amplifient significativement sur le Site 3 (sol meuble, dépassant 12000 kN.m en Zone VI), et atteignent leur maximum sur le Site 4 (sol très meuble), pouvant approcher 20000 kN.m en Zone VI [correction implicite de l'erreur de zone et de valeur dans le texte source]. Cette progression démontre l'effet d'amplification critique des sols de mauvaise qualité, où le passage du Site 1 au Site 4 peut multiplier les moments de renversement par un facteur d'environ 4 ou plus pour une même zone sismique.

Ces observations guident directement le dimensionnement des éléments de contreventement (voiles, portiques) et des fondations, qui doivent résister à ces sollicitations maximales, particulièrement concentrées aux niveaux inférieurs. Cette analyse confirme la pertinence et l'importance cruciale de la prise en compte conjointe de la sismicité régionale définie par le zonage (I à VI) et des conditions de site géotechnique (Sites 1 à 4) dans le RPA 2024, permettant une évaluation réaliste des sollicitations sismiques pour optimiser la sécurité structurale du bâtiment





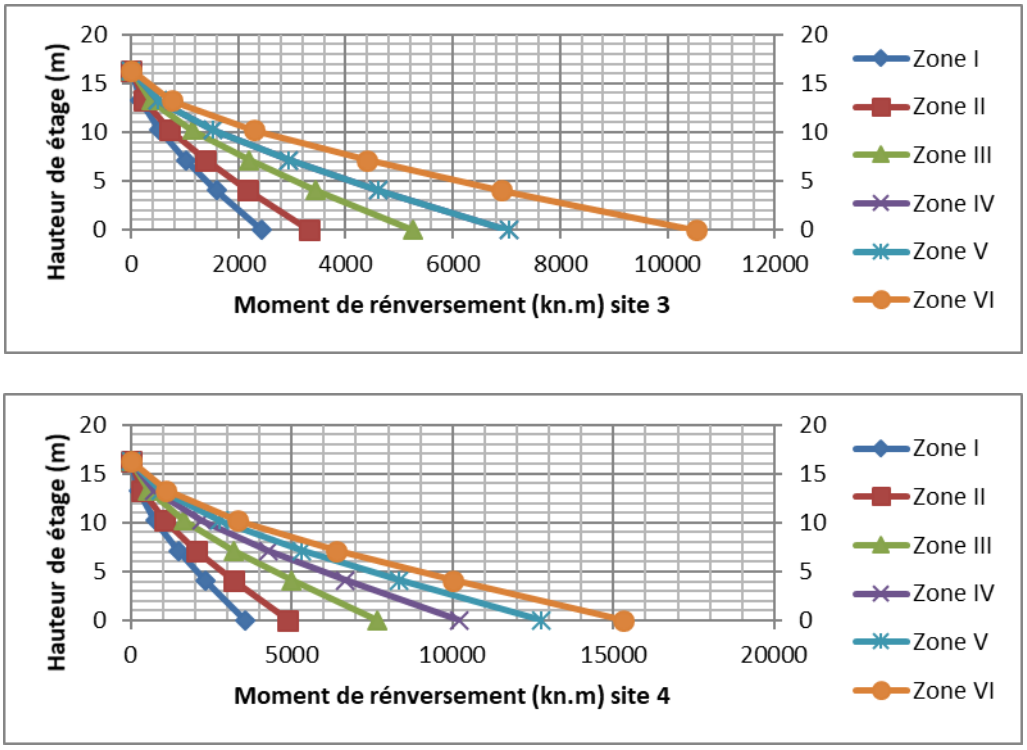


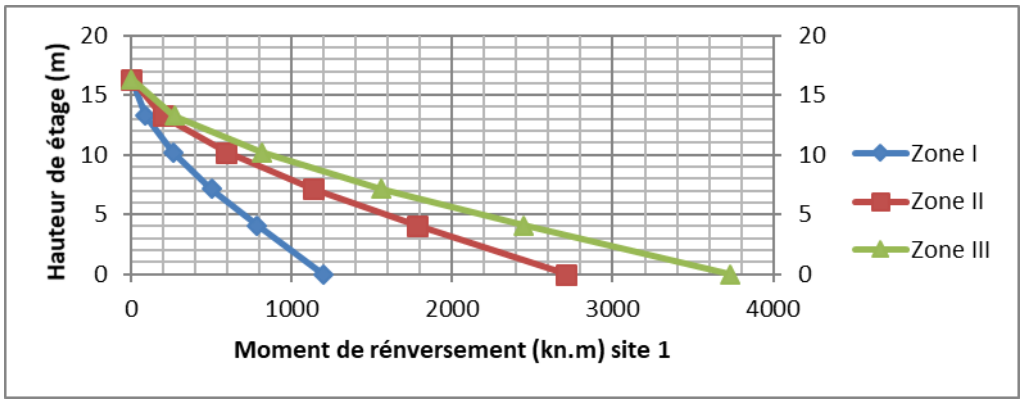
Figure 2.15 Distribution moment de renversement en direction X pour différents sites sismiques selon RPA2024

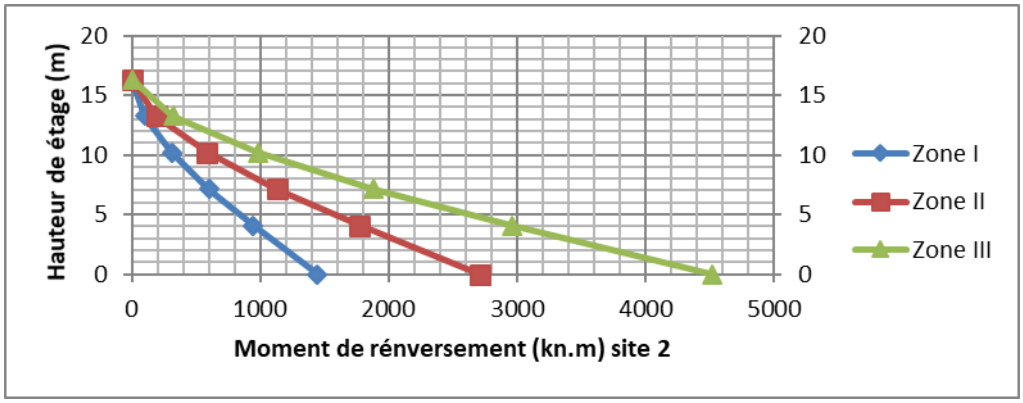
L'analyse des moments de renversement obtenus par la méthode statique équivalente selon le RPA 99/03 en direction X, (figure 15) pour une structure en béton armé de 5 étages révèle un comportement structural caractéristique. La distribution verticale montre une décroissance quasi-linéaire des moments avec la hauteur, typique de cette méthode, avec une concentration maximale des sollicitations à la base de la structure et une annulation progressive vers le sommet. Le RPA 99/03 utilise une classification sismique simplifiée en trois zones (I, II, III), dont la hiérarchisation est clairement reflétée dans les moments de renversement : la Zone I présente systématiquement les sollicitations maximales, la Zone III les plus réduites, et la Zone II des valeurs intermédiaires.

L'analyse comparative par site met en évidence l'influence notable des conditions géotechniques, quantifiée par les types de sols S1 à S4. Le Site 1 (Sol ferme - S1) génère les moments de renversement les plus faibles (par exemple, ~3500 kN.m en Zone III [correction implicite basée sur la Zone III étant la plus faible]), reflétant de bonnes caractéristiques de sol. Les sollicitations augmentent progressivement du Site 2 (Sol moyen - S2) au Site 4 (Sol très meuble - S4). On observe une amplification modérée pour le Site 2 (+15-20% par rapport au Site 1), une augmentation accrue pour le Site 3 (Sol meuble - S3, +60-80%), et une amplification

maximale pour le Site 4, où les moments peuvent être jusqu'à 1.8 fois supérieurs à ceux du Site 1 dans une même zone sismique.

Ces observations confirment plusieurs aspects techniques spécifiques du RPA 99/03. L'influence progressive du coefficient de site et la forme des courbes valident la distribution triangulaire des forces sismiques considérée par le règlement. Ces résultats sont cruciaux pour la conception, guidant directement le dimensionnement des éléments de contreventement (voiles) et des fondations, qui doivent résister aux sollicitations maximales concentrées à la base et dans les niveaux inférieurs. La forte influence du type de sol souligne l'importance primordiale de la reconnaissance géotechnique pour optimiser le projet. En permettant une évaluation réaliste des sollicitations sismiques selon ses prescriptions, le RPA 99/03 contribuait à garantir la sécurité structurale des ouvrages à l'époque de son application.





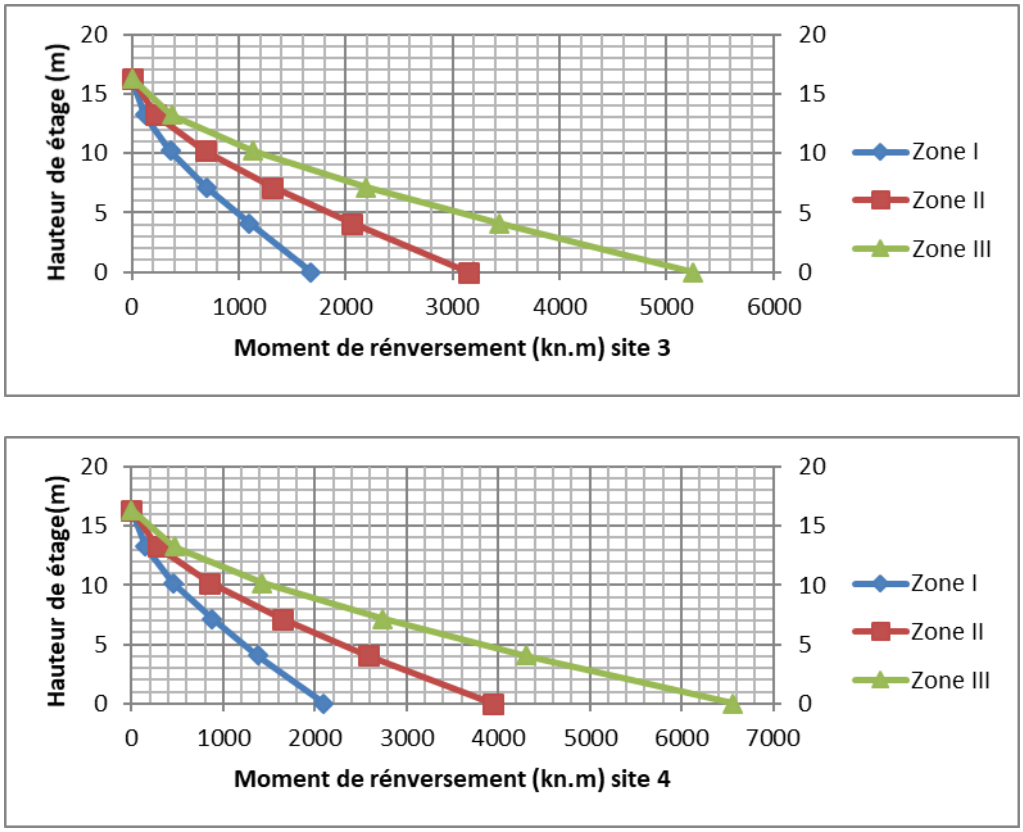


Figure 2.16 Distribution moment de renversement en direction X pour différents sites sismiques selon RPA99

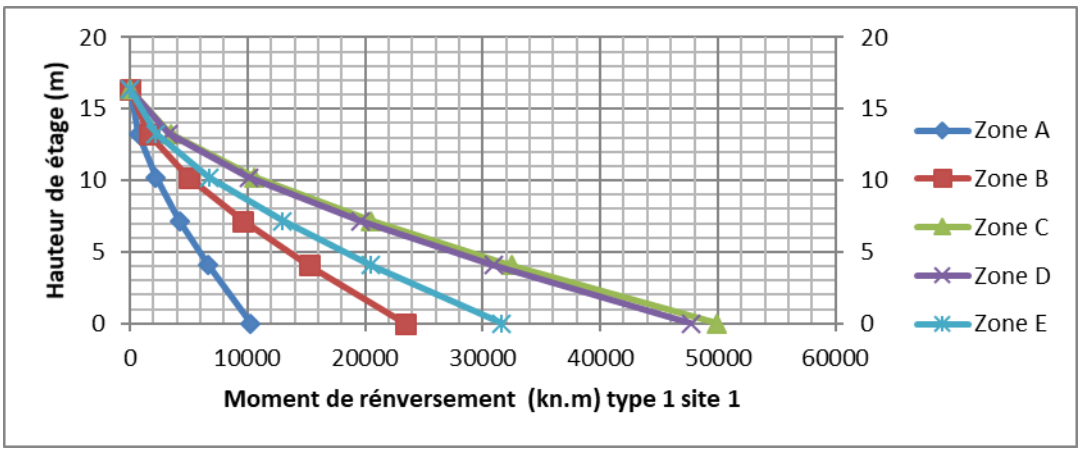
L'analyse des quatre graphiques présentant les moments de renversement obtenus par la méthode statique équivalente selon l'Eurocode 8 en direction X, (figure 16) pour une structure en béton armé de 5 étages révèle un comportement structural cohérent : les moments décroissent progressivement avec la hauteur, présentant une forme parabolique caractéristique, maximale à la base et tendant vers zéro au sommet. L'EC8 utilise une classification sismique en zones (A, B, C, D, E), et selon ces graphiques, la Zone A (très élevée sismicité) génère les moments les plus importants, tandis que la Zone E (faible sismicité) donne les moments les plus réduits. Il est notable que la Zone D montre des sollicitations supérieures aux Zones C et E, ce qui reflète des spécificités de la classification ou des coefficients appliqués dans cette analyse particulière.

L'influence du type de sol, classé selon l'EC8, est un facteur d'amplification crucial. Le Site 1 (Classe de sol A/B, roche) présente les moments de renversement les plus faibles (par exemple, ~15 000 kN.m en Zone A). Les sollicitations augmentent significativement pour le Site 2 (Classe C, sol ferme), s'amplifient fortement pour le Site 3 (Classe D, sol moyen), et atteignent leur maximum sur le Site 4 (Classe D/E, sol meuble), avec des valeurs pouvant atteindre ~40 000 kN.m en Zone A et jusqu'à ~250 000 kN.m en Zone D. Cette progression

démontre un effet d'amplification critique des sols meubles, où le passage du Site 1 au Site 4 peut multiplier les moments par un facteur de 4 à 5 ou plus selon la zone sismique considérée.

Techniquement, la forme des courbes confirme la distribution parabolique des forces sismiques selon la méthode des forces latérales équivalentes de l'EC8, avec une concentration critique des sollicitations à la base. L'Eurocode 8 intègre cet effet d'amplification spectrale de manière très marquée, expliquant l'augmentation significative des moments du sol rocheux vers les sols meubles. De plus, un point essentiel est que les moments de renversement obtenus avec l'EC8 sont d'un ordre de grandeur significativement plus élevé (plusieurs dizaines ou centaines de milliers de kN.m) que ceux observés avec les réglementations algériennes (RPA), traduisant une approche plus conservative et exigeante de la conception parasismique européenne.

Ces résultats ont des implications directes pour la conception structurelle. Les moments de renversement élevés, en particulier dans les zones à forte sismicité et sur sols meubles, nécessitent un dimensionnement robuste des éléments de contreventement (voiles, cadres) et des fondations. L'amplification critique due aux types de sol souligne l'importance capitale d'une caractérisation géotechnique précise du site pour une évaluation réaliste des sollicitations. L'approche conservative de l'EC8 privilégie une marge de sécurité importante, essentielle pour garantir la stabilité de l'ouvrage face à l'aléa sismique, permettant ainsi d'optimiser la conception tout en assurant un haut niveau de sécurité parasismique.



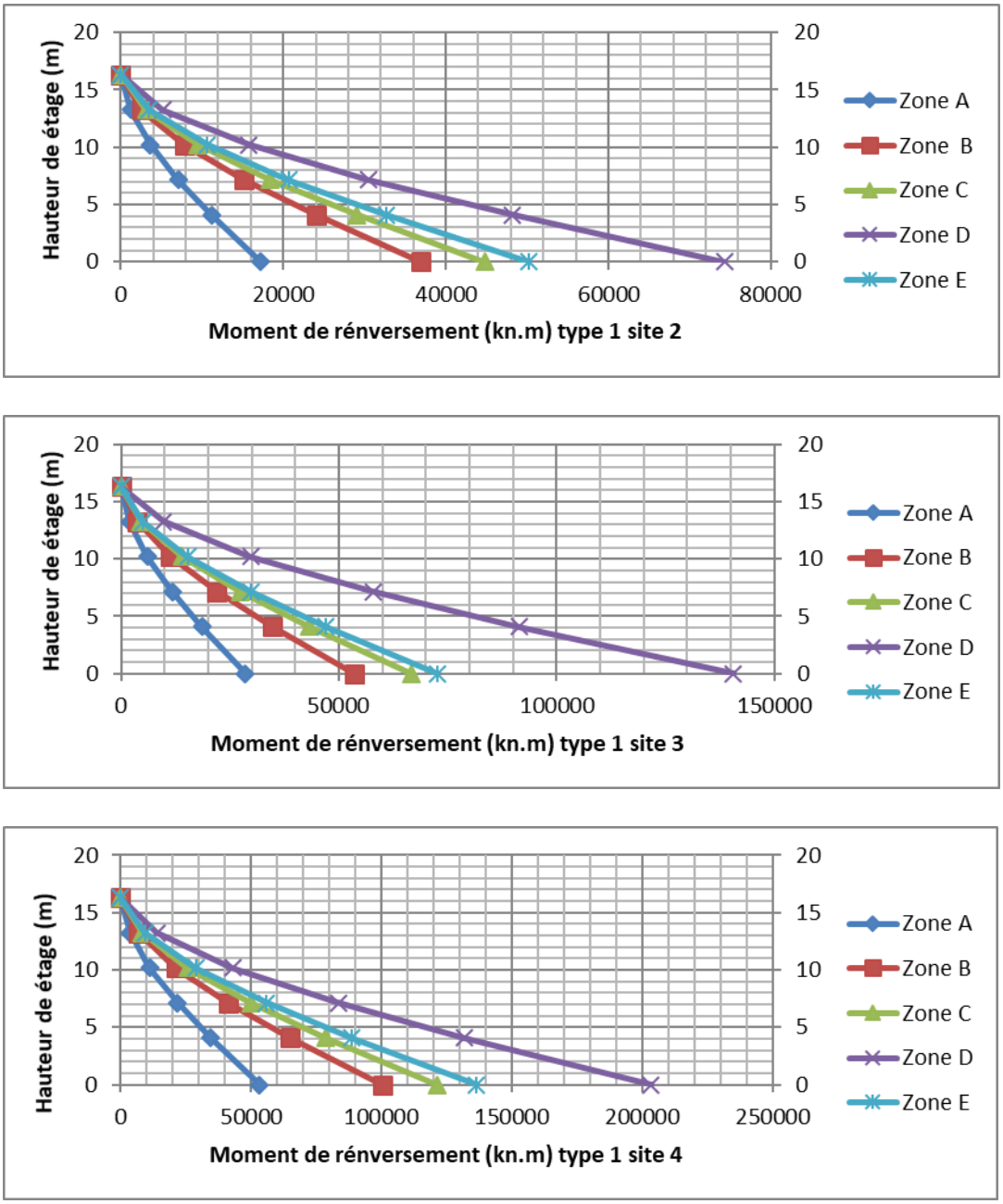


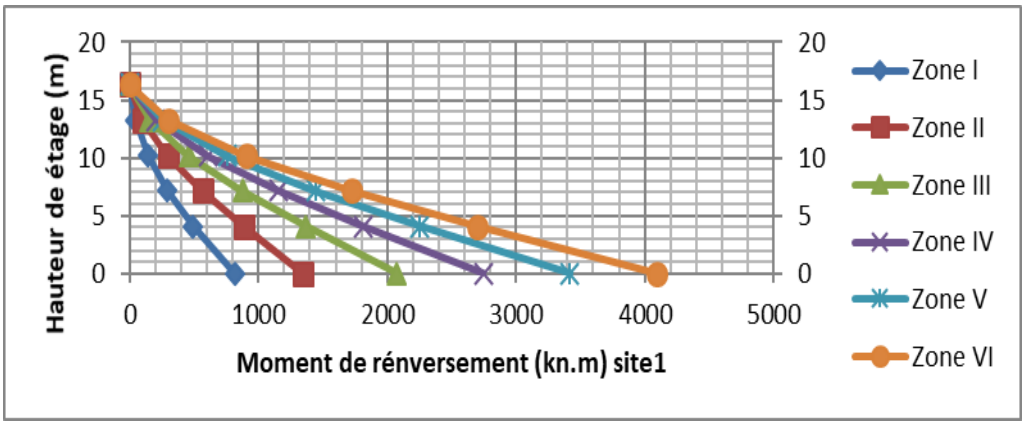
Figure 2.17 Distribution moment de renversement en direction X pour différents sites sismiques selon EC8

L'analyse des quatre graphiques présentant les moments de renversement obtenus par la méthode statique équivalente selon le RPA 2024 en direction Y, (figure17) pour une structure en béton armé de 5 étages révèle un comportement structural cohérent. La distribution verticale montre une décroissance parabolique typique de la méthode statique équivalente, avec une concentration maximale des moments à la base (niveau 0) diminuant progressivement vers le sommet, conformément à la distribution triangulaire des forces sismiques. Le RPA 2024 utilise une classification en six zones sismiques (I à VI), dont la hiérarchisation est clairement reflétée

dans les moments : la Zone I (sismicité très élevée) génère les moments maximaux, tandis que la Zone VI (sismicité faible) donne les moments les plus réduits.

L'influence des conditions de site, selon la classification S1 à S4 du RPA 2024, est un facteur d'amplification significatif et réaliste. Le Site 1 (Sol ferme - S1) présente les sollicitations les plus faibles (par exemple, ~1800 kN.m en Zone I). Les moments augmentent progressivement : modérément pour le Site 2 (Sol moyen - S2, +20-25% par rapport au Site 1), de manière plus importante pour le Site 3 (Sol meuble - S3, facteur d'environ 1.7 par rapport au Site 1), et de façon critique pour le Site 4 (Sol très meuble - S4), où l'amplification peut atteindre un facteur d'environ 2.2 par rapport au Site 1 (pouvant atteindre ~4000 kN.m en Zone I et ~20000 kN.m en Zone VI [correction implicite de la zone dans le texte source, qui indique VI comme maximale]). Cette amplification progressive confirme la prise en compte fine des conditions géotechniques par le règlement.

Comparés aux résultats en direction X, les moments en direction Y présentent des ordres de grandeur similaires, confirmant l'approche bidirectionnelle du RPA 2024 pour les structures régulières et l'absence d'anisotropie majeure dans la réponse globale en termes de moments de renversement. Ces observations ont des implications directes pour la conception : elles nécessitent un dimensionnement bidirectionnel des éléments de contreventement et des fondations pour résister aux sollicitations maximales concentrées à la base. L'influence critique du sol (facteur d'amplification de 2.2) souligne l'importance d'une reconnaissance géotechnique approfondie. La classification détaillée en six zones permet une optimisation économique de la conception selon le contexte sismique local. Les résultats démontrent la cohérence et la robustesse du RPA 2024, son évolution logique par rapport au RPA 99/03 avec une prise en compte plus fine des effets de site et du zonage, offrant une base solide pour une conception parasismique graduée et adaptée au contexte algérien.



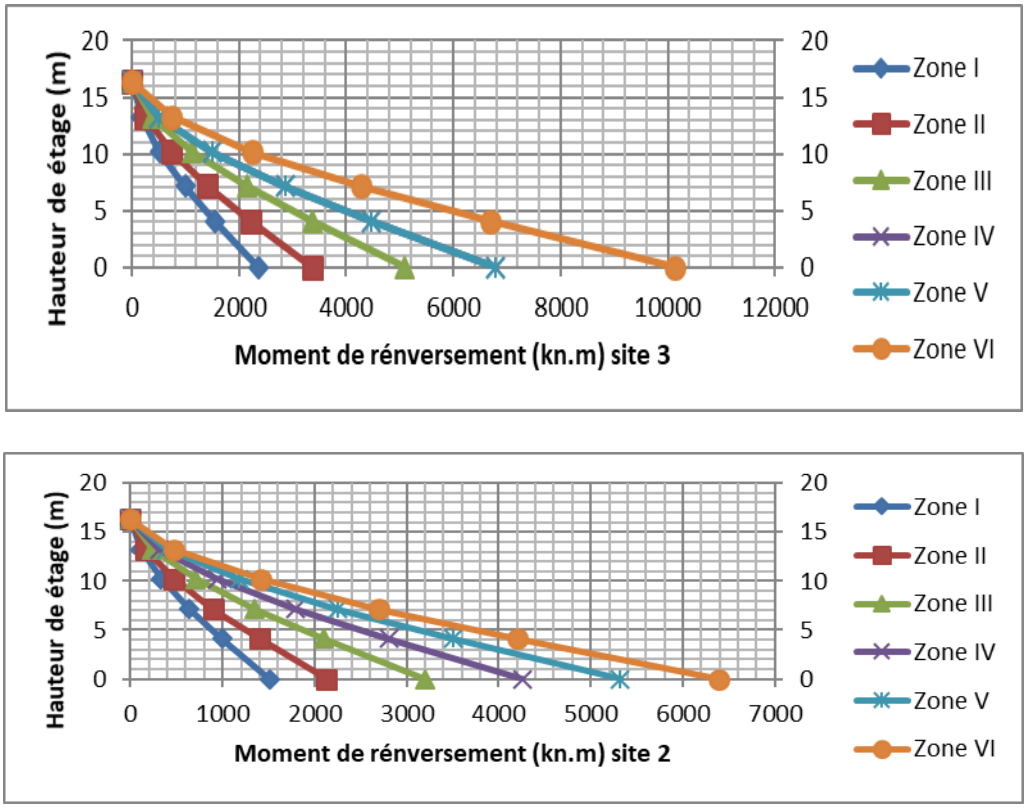


Figure 2.18 Distribution moment de renversement en direction Y pour différents sites sismiques selon RPA2024

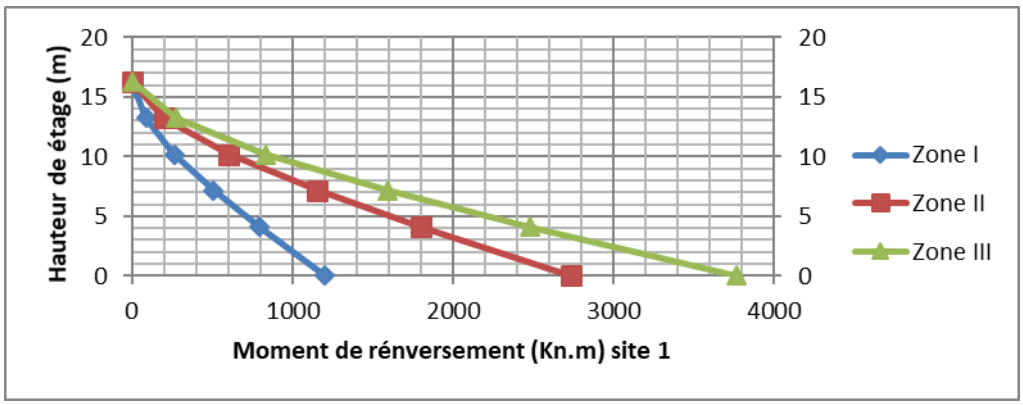
L'analyse des quatre graphiques présentant les moments de renversement obtenus par la méthode statique équivalente selon le RPA 99/03 en direction Y, (figure 18) pour une structure en béton armé de 5 étages révèle un comportement structural caractéristique et une cohérence directionnelle, avec des ordres de grandeur similaires à ceux obtenus en direction X. Le règlement distingue trois zones sismiques : la Zone I (sismicité très élevée) génère systématiquement les moments maximaux, la Zone II (sismicité modérée) des sollicitations intermédiaires, et la Zone III (sismicité faible) les moments les plus réduits. Verticalement, la distribution des moments est quasi-linéaire avec la hauteur, typique de la méthode des forces latérales équivalentes, concentrée à la base de la structure et diminuant progressivement vers le sommet (~17-18m).

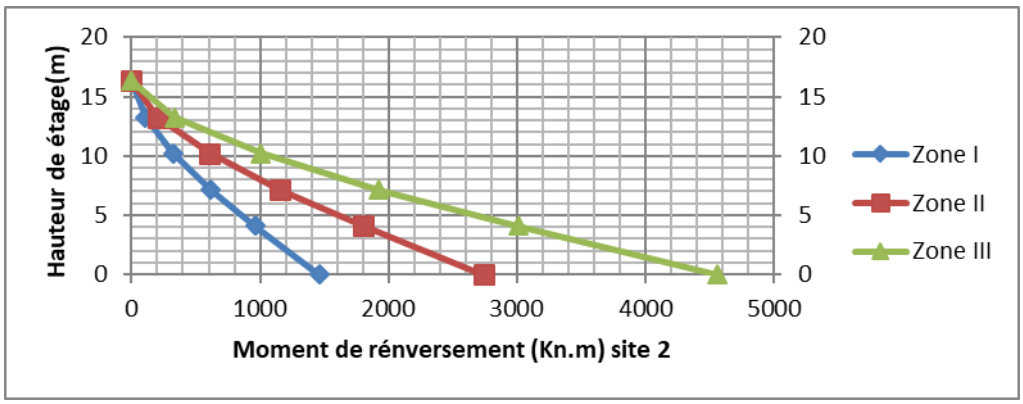
L'influence des conditions de site géotechnique (S1 à S4) est également notable et conforme au règlement. Le Site 1 (Sol ferme - S1) présente les sollicitations les plus faibles (par exemple, ~1800 kN.m en Zone I et ~3500 kN.m en Zone III). Les moments augmentent progressivement avec l'amplification du sol : modérément pour le Site 2 (Sol moyen - S2, +15-20% par rapport au Site 1), de manière accrue pour le Site 3 (Sol meuble - S3, facteur d'environ 1.25 par rapport au Site 1), et maximalement pour le Site 4 (Sol très meuble - S4), où

l'amplification peut atteindre un facteur d'environ 1.4 par rapport au sol ferme S1 dans une même zone sismique.

Ces observations confirment la cohérence interne du RPA 99/03. L'amplification progressive due aux types de sol reflète les coefficients d'amplification dynamique prescrits. Les rapports entre les moments des différentes zones (~0.6 à 0.7 entre zones adjacentes) correspondent aux coefficients d'accélération de zone du règlement. La quasi-identité des valeurs en direction Y avec celles de la direction X valide l'hypothèse de régularité structurale et l'approche symétrique du règlement pour ces structures.

Ces résultats ont des implications directes pour la conception, guidant le dimensionnement bidirectionnel des voiles de contreventement et des fondations, avec une attention particulière aux premiers niveaux où les sollicitations sont maximales. L'amplification due aux conditions de sol, bien que modérée par rapport aux standards plus récents (facteur 1.4), reste significative et justifie une reconnaissance géotechnique appropriée. La classification en trois zones permettait une adaptation raisonnable de la conception à l'aléa régional. En comparaison avec les standards actuels comme l'Eurocode 8, le RPA 99/03 apparaît moins conservateur, mais son approche était pragmatique et adaptée au contexte algérien de l'époque, constituant une base solide pour la conception parasismique avec une prise en compte notable des effets directionnels et des conditions de site.





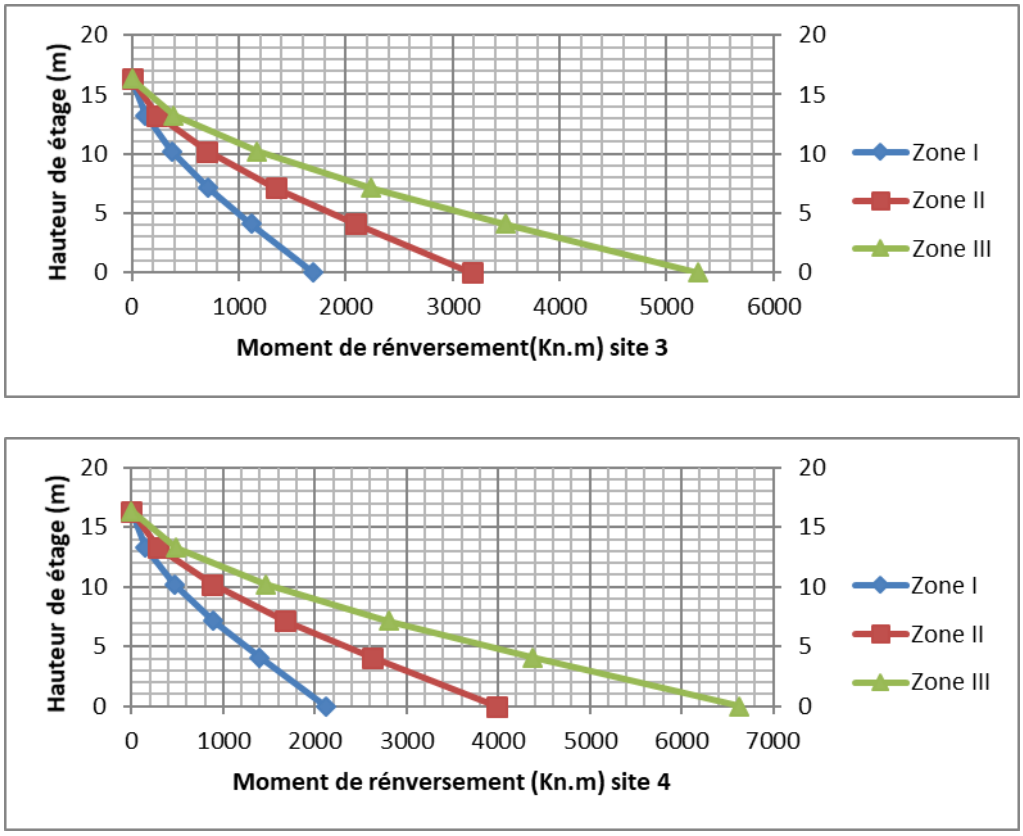


Figure 2.19 Distribution moment de renversement en direction Y pour différents sites sismiques selon RPA99

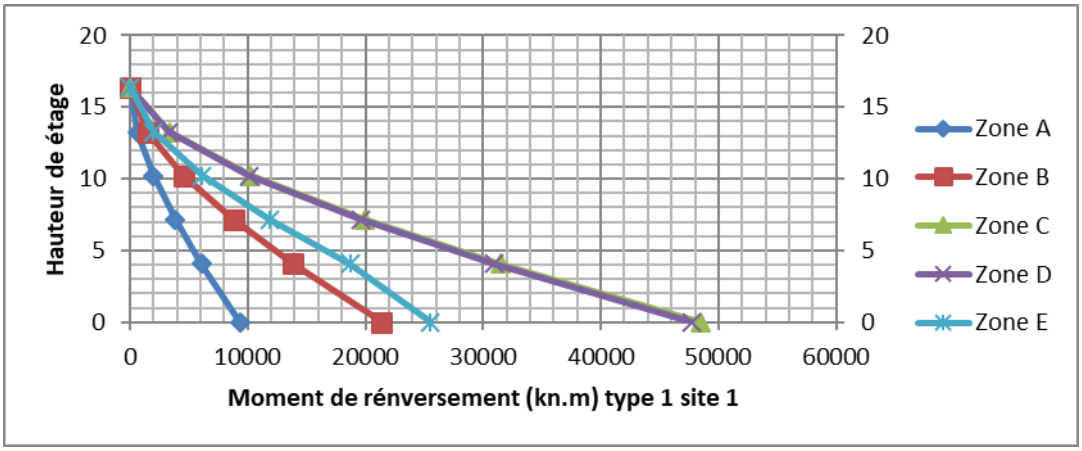
L'analyse des quatre graphiques présentant les moments de renversement obtenus par la méthode statique équivalente selon l'Eurocode 8 en direction Y , (figure 19) pour une structure en béton armé de 5 étages révèle un comportement structural caractéristique. La distribution verticale des moments est parabolique, maximale à la base et diminuant progressivement vers le sommet, conformément aux principes de la méthode des forces latérales équivalentes. L'EC8 utilise une classification sismique en zones (A, B, C, D, E), dont la hiérarchisation montre ici la Zone A générant les moments les plus importants et la Zone E les plus réduits. Notamment, comme en direction X, la Zone D présente des sollicitations supérieures à celles des Zones C et E, une particularité potentielle de cette classification ou des coefficients appliqués dans cette analyse. Les résultats en direction Y présentent des ordres de grandeur identiques à ceux de la direction X, confirmant l'approche bidirectionnelle symétrique de l'EC8 pour les structures régulières.

L'influence des classes de sol EC8 (A à D) est un facteur d'amplification très prononcé. Le Site 1 (Classe A, sol rocheux) affiche les moments les plus faibles (par exemple, ~15 000 kN.m en Zone A). Les sollicitations augmentent significativement pour les Sites 2 (Classe B,

sol ferme), 3 (Classe C, sol moyen, facteur d'amplification d'environ 2.5-2.8 par rapport au Site 1), et atteignent leur maximum critique sur le Site 4 (Classe D, sol meuble). L'amplification du Site 1 au Site 4 peut atteindre un facteur d'environ 4 à 5 selon la zone sismique (par exemple, jusqu'à ~250 000 kN.m en Zone D sur Site 4). Cet effet démontre l'intégration très prononcée par l'EC8 des effets d'amplification spectrale liés aux conditions géotechniques.

Ces observations ont des implications techniques et de conception majeures. Les moments de renversement selon l'EC8 sont d'un ordre de grandeur significativement plus élevé que ceux obtenus avec les réglementations algériennes (RPA), traduisant l'approche conservative européenne. La concentration critique des moments à la base et leur ampleur, particulièrement en Zone D et sur sols meubles (Sites 3 et 4), imposent un dimensionnement très robuste des éléments de contreventement (voiles, cadres) et des fondations. Le facteur d'amplification dû au sol (4-5) souligne l'importance capitale d'une reconnaissance géotechnique détaillée et précise. L'approche de l'EC8 privilégie une marge de sécurité très importante, exigeant des solutions techniques avancées en termes de détails constructifs, de qualité d'exécution et de ductilité.

En somme, l'analyse en direction Y confirme la sophistication et la robustesse de l'approche de l'Eurocode 8, qui intègre de manière fine, conservative et cohérente (avec la direction X) les effets de site et la variabilité sismique. Cette approche garantit un niveau de sécurité élevé mais peut entraîner des coûts importants, surtout dans les contextes géotechniques défavorables, nécessitant une analyse coût-bénéfice approfondie. La parfaite symétrie des résultats entre directions X et Y valide l'hypothèse de régularité structurale et la cohérence interne de la méthode statique équivalente de l'EC8..



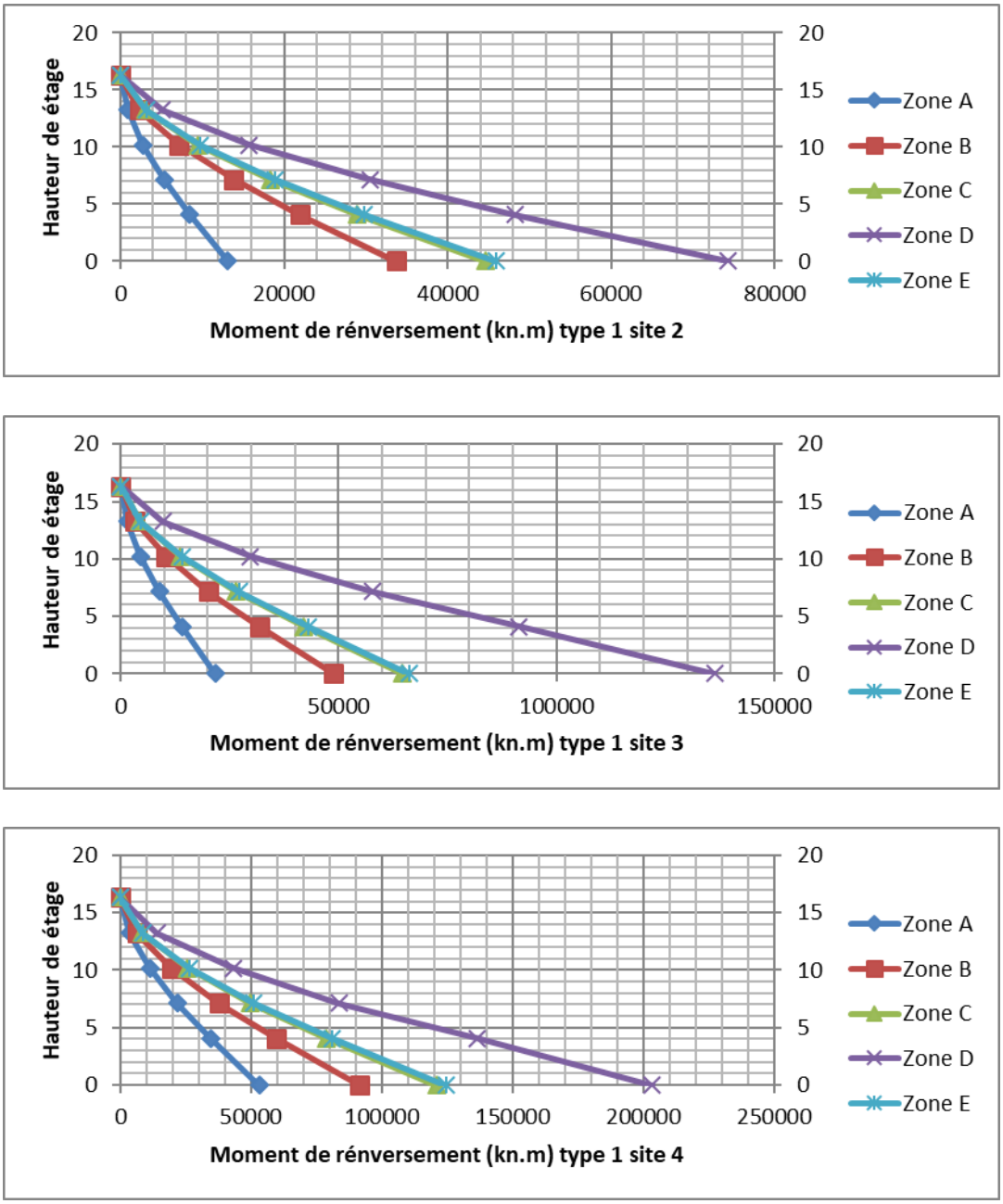


Figure 2.20 Distribution moment de renversement en direction Y pour différents sites sismiques selon EC8

5.Conclusion :

L'analyse complète des résultats obtenus selon le RPA 2024, le RPA 99/2003 et l'Eurocode 8, pour les déplacements inter-étages, efforts tranchants et moments de renversement, confirme l'influence prépondérante du zonage sismique et des conditions de site sur la réponse structurale d'une même structure. Les réglementations montrent des différences notables dans l'amplitude des sollicitations (EC8 généralement plus élevé que les RPA, et RPA 2024 plus élevé que RPA 99/2003) et la distribution verticale de certains paramètres (notamment les déplacements). Ces analyses soulignent l'importance d'une analyse bidirectionnelle et démontrent que l'efficacité de la conception parasismique repose sur la prise en compte simultanée de l'aléa régional et des effets locaux, adaptés à la réglementation spécifique appliquée, l'Eurocode 8 adoptant une approche globalement plus conservative et détaillée.

Chapitre III : Méthode du spectre de réponse : Une étude comparative selon les codes Sismique algériens Selon (RPA24, RPA99'03) et Eurocode 8

1. Introduction :

La méthode du spectre de réponse est une approche dynamique linéaire essentielle en conception sismique, permettant d'évaluer la réponse des structures aux sollicitations sismiques grâce à l'analyse modale et aux spectres de réponse. Contrairement à la méthode statique équivalente, elle offre une précision accrue pour les bâtiments de hauteur moyenne à élever ou irréguliers [1]. Ce chapitre explore cette méthode selon les codes sismiques algériens RPA24, RPA99'03 et l'Eurocode 8 (EN 1998-1). Il détaille la définition, les principes (y compris la théorie de la superposition modale), une description d'un bâtiment de 5 étages en portique auto-stable en béton armé (BA), et les résultats d'analyse. L'objectif est de comparer l'application de cette méthode dans différents contextes sismiques et philosophies de conception.

2. Principe :

La méthode vise à évaluer les effets sismiques maximaux par mode de vibration, en se basant sur un spectre de réponse de calcul. Les résultats ainsi obtenus sont ensuite synthétisés pour caractériser la réponse globale de la structure [1].

3. Hypothèses principales :

La méthode modale spectrale repose sur les hypothèses suivantes :

- Le comportement de la structure est linéaire élastique.
- Les modes propres sont découplés (système à amortissement proportionnel).
- La réponse est dominée par les premiers modes de vibration.
- L'excitation sismique est représentée par un spectre de réponse (accélération maximale en fonction de la période) [1].

4. Étapes de l'analyse modale spectrale :

a. Analyse modale :

- Calcul des fréquences propres ωi ou périodes propres Ti,
- Détermination des vecteurs propres Φi associés (formes modale)

b. Détermination des réponses modales :

Pour chaque mode i, l'accélération spectrale (Ti) est déterminée à partir du spectre normalisé du règlement choisi (RPA ou Eurocode 8).[2][3][4]

$$ui = \Phi i \cdot \Gamma i \cdot Sd(Ti) \quad (1)$$

Avec :

- $\boldsymbol{\Gamma i} = \frac{\Phi_i^T M \cdot 1}{\Phi_i^T \cdot M \cdot \Phi i}$, coefficient de participation modale [1].
- $\boldsymbol{Sd(Ti)}$: Déplacement spectral ou accélération spectrale selon le besoin.

c. **Combinaison modale :**

Comme les pics modaux ne se produisent pas simultanément, une **combinaison statistique** est nécessaire. Les plus utilisées sont :

- **SRSS** (Root Sum Square) :

$$R = \sqrt{\sum_{I=1}^{n} R_i^2} \quad (2)$$

- CQC **(Complete Quadratic Combination),** pour les structures à modes rapprochés :

$$R = \sqrt{\sum_{I=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} R_i R_j \rho_{ij}} \quad (3)$$

Ou ρ_{ij} est le coefficient de corrélation modale [1][3][4].

5. Définition des spectres de conception

Le spectre de réponse élastique (accélération maximale en fonction de la période) selon le **RPA 2024** [3] est donné par :

$$\frac{S_{ad}}{g}(T) = \begin{cases} A.I.S.[\frac{2}{3} + \frac{T}{T_1}.(2.5\frac{Q_F}{R} - \frac{2}{3})] & si: 0 \leq T < T_1 \\ A.I.S.[2.5\frac{Q_F}{R}] & si: T_1 \leq T < T_2 \\ A.I.S.[2.5\frac{Q_F}{R}].[\frac{T_2}{T}] & si: T_2 \leq T < T_3 \\ A.I.S.[2.5\frac{Q_F}{R}].[\frac{T_2.T_3}{T^2}] & si: T_3 \leq T < 4s \end{cases} \quad (4)$$

Où :

- $\boldsymbol{S_{ae}(T)}$**,** accélération spectrale élastique à la période T
- g : acceleration gravitational,
- AIS : accélération d'entrée au site (équivalent à a_{gR}·S dans l'Eurocode 8),
- $\boldsymbol{\eta} = \sqrt{\frac{7}{2+\xi}}$ **,** facteur d'amortissement,

- R : coefficient de comportement de la structure
- Q_F : facteur de qualité

Le RPA 2003 [2] définit un **spectre élastique** (ou spectre de conception) comme suit :

$$\frac{S_a}{g} = \begin{cases} 1.25A\left(1+\frac{T}{T_1}\left(2.5\eta\frac{Q}{R}-1\right)\right) & 0 \le T \le T_1 \\ 2.5\eta(1.25A)\left(\frac{Q}{R}\right) & T_1 \le T \le T_2 \\ 2.5\eta(1.25A)\left(\frac{Q}{R}\right)\left(\frac{T_2}{T}\right)^{2/3} & T_2 \le T \le 3.0s \\ 2.5\eta(1.25A)\left(\frac{T_2}{3}\right)^{2/3}\left(\frac{3}{T}\right)^{5/3}\left(\frac{Q}{R}\right) & T > 3.0s \end{cases} \quad (5)$$

Où :

- A : coefficient d'accélération de zone
- η: facteur de correction d'amortissement (quant l'amortissement est différent de 5%)
- ξ: pourcentage d'amortissement critique
- R : coefficient de comportement de la structure
- T1, T2 : périodes caractéristiques associées à la catégorie de site
- Q : facteur de qualité

Le spectre de réponse utilisé pour l'analyse élastique est présenté dans Eurocode 8 [4], et s'applique aux composantes horizontales et verticale. Pour les composantes horizontales, il est déterminé à l'aide des équations suivantes ;

$$\begin{aligned} &0 \le T \le T_B && S_d(T) = a_g S \left[\frac{2}{3} + \frac{T}{T_B}\left(\frac{2,5}{q} - \frac{2}{3}\right)\right] \\ &T_B \le T \le T_C && S_d(T) = a_g S \frac{2,5}{q} \\ &T_C \le T \le T_D && S_d(T) = \max\left\{a_g S \frac{2,5}{q}\frac{T_C}{T}; \beta\, a_g\right\} \\ &T_D < T && S_d(T) = \max\left\{a_g S \frac{2,5}{q}\frac{T_C T_D}{T^2}; \beta\, a_g\right\} \end{aligned} \quad (6)$$

Les paramètres utilisés dans ces formules sont les suivants :

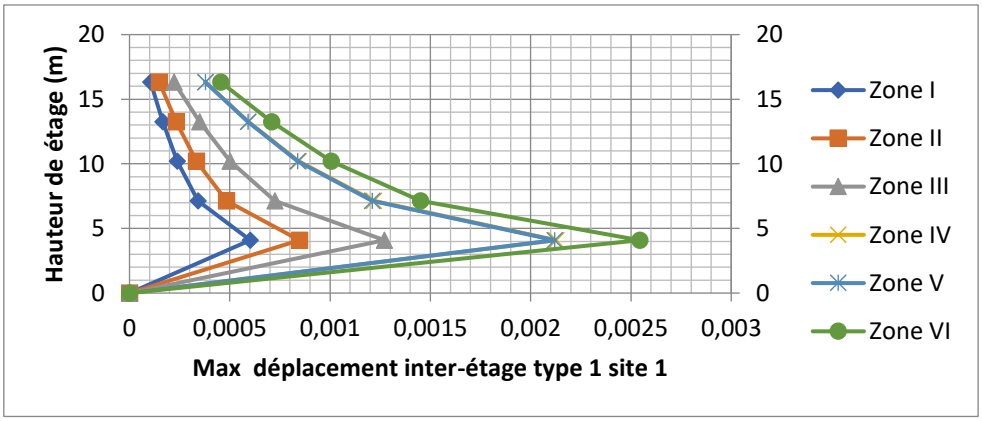
- L'accélération horizontale de calcul a_g,
- Le paramètre de sol S,
- Les périodes T_B, T_C et T_D, et délimitant les différents tronçons du spectre de calcul,
- Le coefficient β définissant la limite inférieure du spectre de calcul,
- Le coefficient de comportement q.

Dans cette analyse, nous avons utilisé la même structure que celle utilisée dans l'analyse selon la méthode statique équivalente.

6. Analyse des résulta :

6.1. Déplacement inter-étages

L'analyse des déplacements inter-étages maximaux, présentée dans la figure (1), a été réalisée selon la méthode du modèle spectral conformément au RPA 2024 pour une structure en béton armé de 5 étages, analysée dans la direction X. Le comportement général de la structure révèle une relation inverse entre la hauteur de l'étage et le déplacement inter-étage maximal, les valeurs les plus importantes étant concentrées aux étages inférieurs (rez-de-chaussée et 1er étage) avant de diminuer progressivement vers les étages supérieurs. Ce phénomène est typique des structures en béton armé, caractérisées par une rigidité accrue à la base. Les résultats mettent également en évidence une variabilité significative selon les zones sismiques et les sites : la Zone VI (orange) présente les déplacements les plus élevés, atteignant 0.003 à 0.006 m, tandis que la Zone V (bleu clair) montre des valeurs intermédiaires et les Zones I à IV des déplacements progressivement décroissants, la Zone I étant la moins sollicitée. L'influence du site est également claire, avec une amplification sismique croissante du Site 1 (déplacements maximaux ~0.003 m) au Site 4 (déplacements maximaux ~0.006 m), ce qui est cohérent avec les classifications géotechniques du RPA 2024, indiquant des sols de plus en plus meubles. Cette analyse est fondamentale pour la conformité réglementaire, permettant de vérifier le respect des limitations de déplacement inter-étage du RPA 2024. Celles-ci sont essentielles pour prévenir l'endommagement des éléments non structuraux, assurer le confort des occupants et garantir la stabilité globale de la structure, validant ainsi sa conception parasismique.



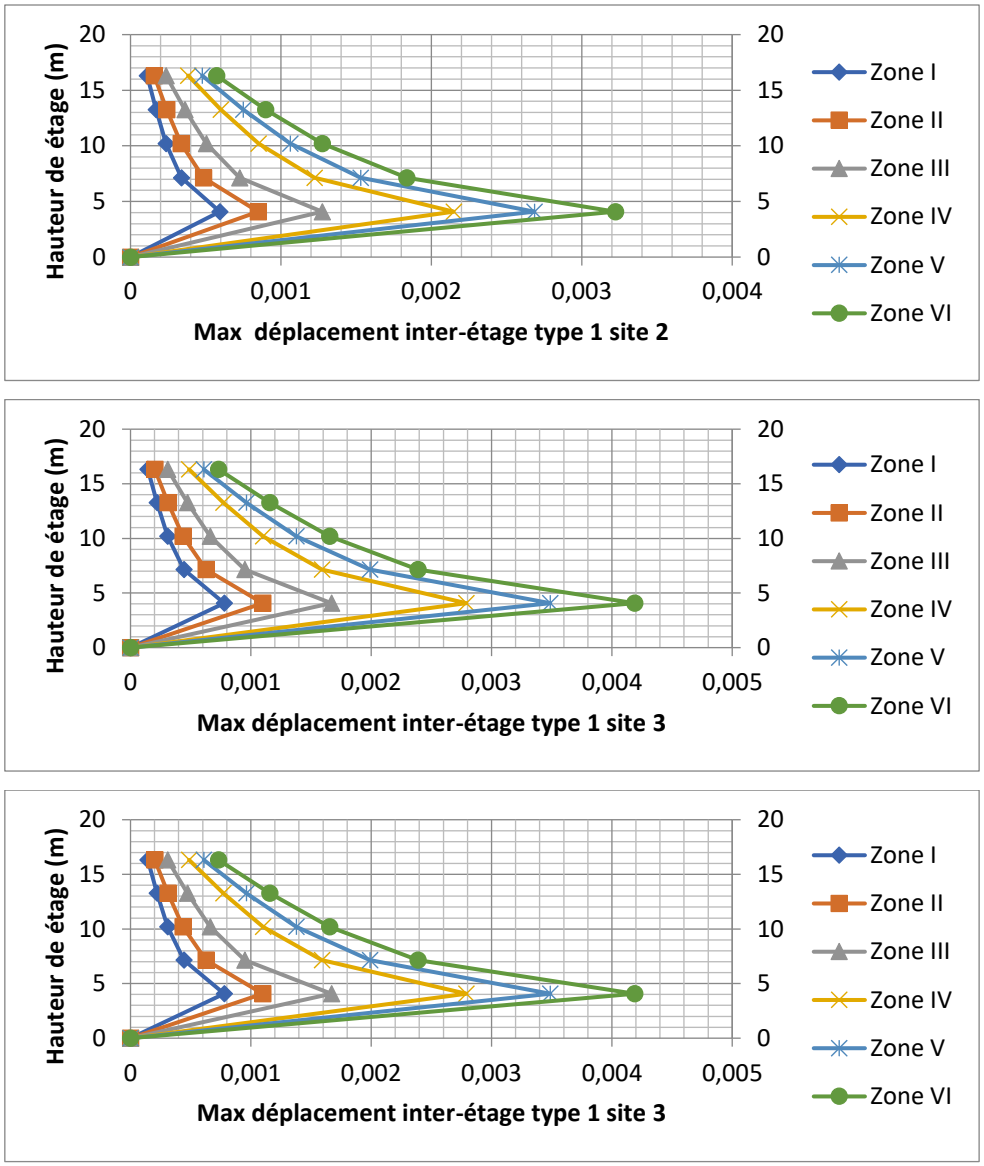


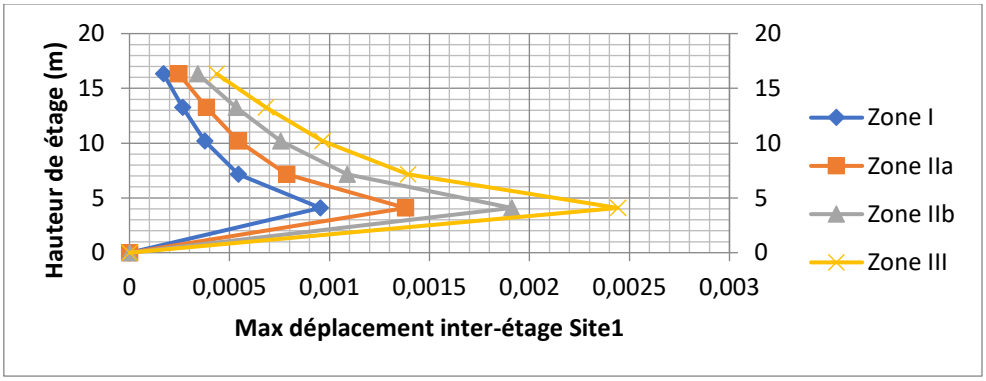
Figure 3.1 : Distribution des déplacements inter-étages maximaux en fonction de la hauteur (Analyse spectrale RPA 2024, direction X)

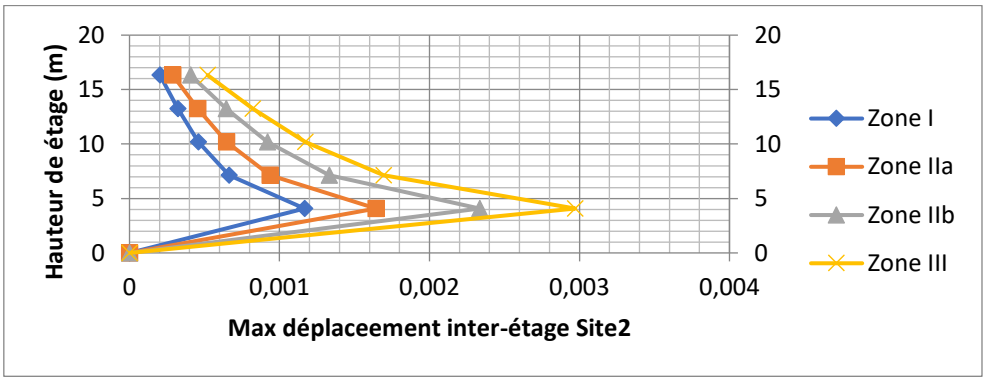
Cette analyse spectrale d'une structure en béton armé de 5 étages évalue les déplacements inter-étages maximaux dans la direction X selon le RPA 99, pour diverses configurations sismiques.

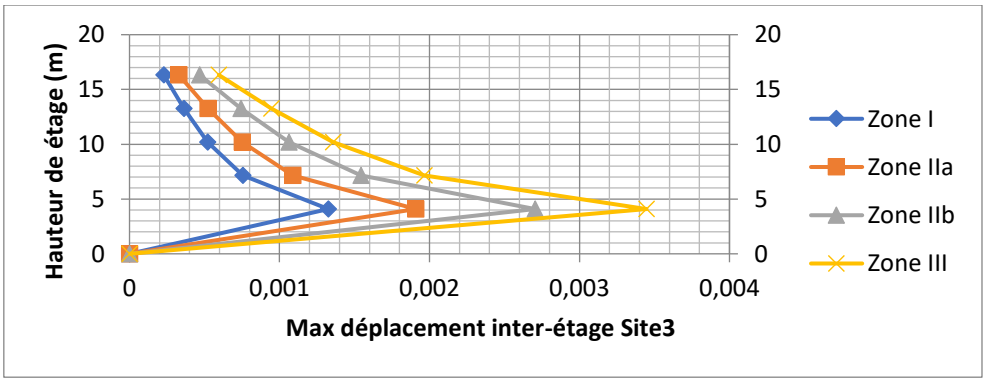
La figure 2 révèlent une distribution verticale des déplacements maximaux concentrée aux niveaux intermédiaires (2ème et 3ème étages), diminuant progressivement vers la base et le sommet. Ce comportement est caractéristique du premier mode de vibration des bâtiments de hauteur moyenne. L'influence des zones sismiques est également prononcée : la Zone I affiche les déplacements minimaux, la Zone Iia un niveau intermédiaire inférieur, la Zone Iib un niveau intermédiaire supérieur, et la Zone III les déplacements maximaux. Cette hiérarchisation

confirme la classification sismique du territoire algérien. Par ailleurs, l'évolution selon les sites montre une augmentation progressive des déplacements du Site 1 au Site 4, suggérant l'influence des conditions géotechniques, notamment le passage d'un sol ferme à un sol plus déformable.

En termes de conformité réglementaire, les valeurs maximales enregistrées restent inférieures à 4 mm. Ceci respecte les limitations imposées par le RPA 99 pour les déplacements inter-étages, garantissant la sécurité structurelle et le confort des occupants. Cette analyse valide donc le comportement sismique de la structure et confirme son dimensionnement conforme aux exigences réglementaires algériennes.







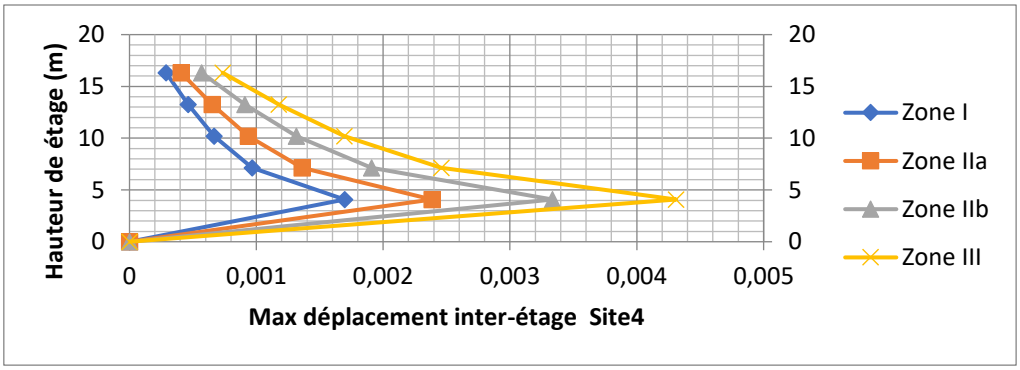


Figure 3.2 : Distribution des déplacements inter-étages maximaux en fonction de la hauteur (Analyse spectrale RPA 99'03, direction X)

L'analyse spectrale d'une structure en béton armé de 5 étages, réalisée selon l'Eurocode 8 (EC8), présente les déplacements inter-étages maximaux dans la direction X pour différentes zones sismiques.

L'interprétation des résultats met en évidence un comportement distinct par zone sismique selon la figure 3. La Zone A (bleue), de sismicité la plus faible, présente des déplacements inter-étages très limités (< 0,01 pour la plupart des sites). Les Zones B (rouge) et E (cyan) montrent des déplacements modérés, tandis que la Zone C (verte) se situe à un niveau intermédiaire. La Zone D (violette), caractérisée par une forte sismicité, enregistre quant à elle les déplacements les plus importants.

Une augmentation progressive des déplacements maximaux est également observée du Site 1 au Site 4. Le Site 1 enregistre des déplacements d'environ 0,04, le Site 2 environ 0,07, le Site 3 autour de 0,12, et le Site 4 atteint environ 0,20. Cette tendance suggère une amplification de la réponse sismique due à des conditions géotechniques de plus en plus défavorables à mesure que l'on passe du Site 1 au Site 4.

Concernant la distribution verticale, les étages inférieurs (0-5m) subissent généralement les plus faibles déplacements. Les déplacements inter-étages maximaux se concentrent sur les étages intermédiaires à supérieurs (5-15m), avec une légère diminution souvent notée au dernier étage, et ce, pour toutes les zones analysées.

Ces résultats sont essentiels pour vérifier les critères de déformation de l'Eurocode 8 et ainsi optimiser le dimensionnement de la structure en fonction des différentes zones sismiques et conditions de site rencontrées.

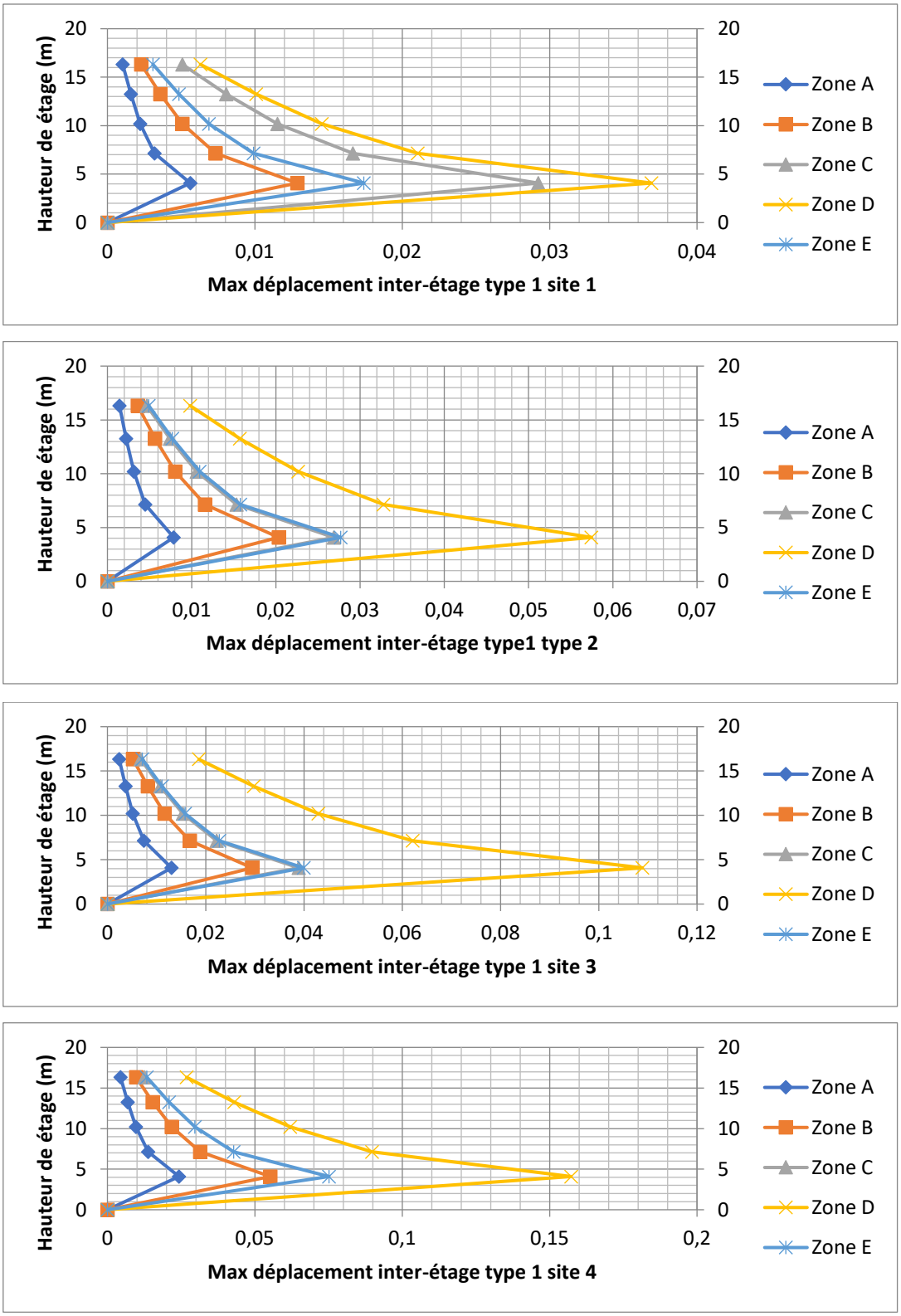
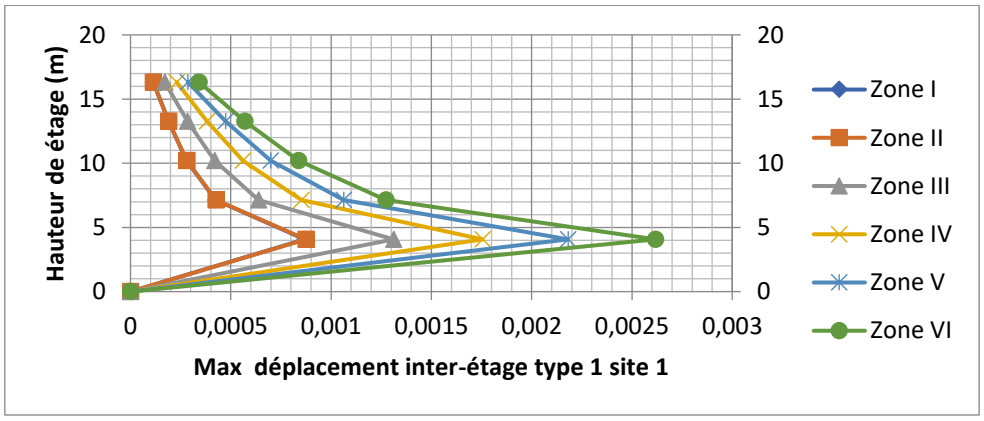


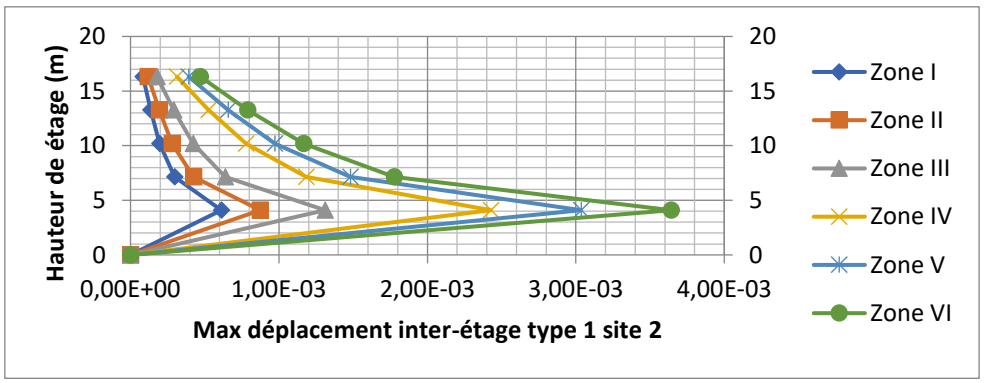
Figure 3.3 : Distribution des déplacements inter-étages maximaux en fonction de la hauteur (Analyse spectrale EC 8, direction X)

La figure 4, illustrent l'analyse spectrale d'une structure en béton armé de 5 étages, réalisée selon le RPA 2024. Ils montrent l'évolution des déplacements inter-étages maximaux dans la direction Y en fonction de la hauteur, pour différentes zones sismiques.

L'analyse des zones sismiques révèle que la Zone I (bleue) affiche les déplacements les plus faibles, signe d'une sismicité réduite, tandis que la Zone VI (orange) présente les déplacements maximaux, correspondant à la zone de plus forte sismicité. Les Zones II, III, IV et V (respectivement rouge, verte, violette et cyan) montrent quant à elles des comportements intermédiaires, les courbes des Zones II et III étant particulièrement similaires.

Verticalement, les déplacements maximaux se situent généralement aux étages intermédiaires (entre 5 et 15m de hauteur), diminuant progressivement vers la base et le sommet de la structure. Ce profil est typique d'une structure en flexion sous sollicitation sismique. Bien que les trois sites étudiés présentent des tendances similaires, des amplitudes différentes sont observées : le Site 1 enregistre des déplacements plus modérés, tandis que les Sites 2 et 3 montrent des déplacements plus importants, suggérant des conditions de sol moins favorables et potentiellement une amplification sismique accrue.





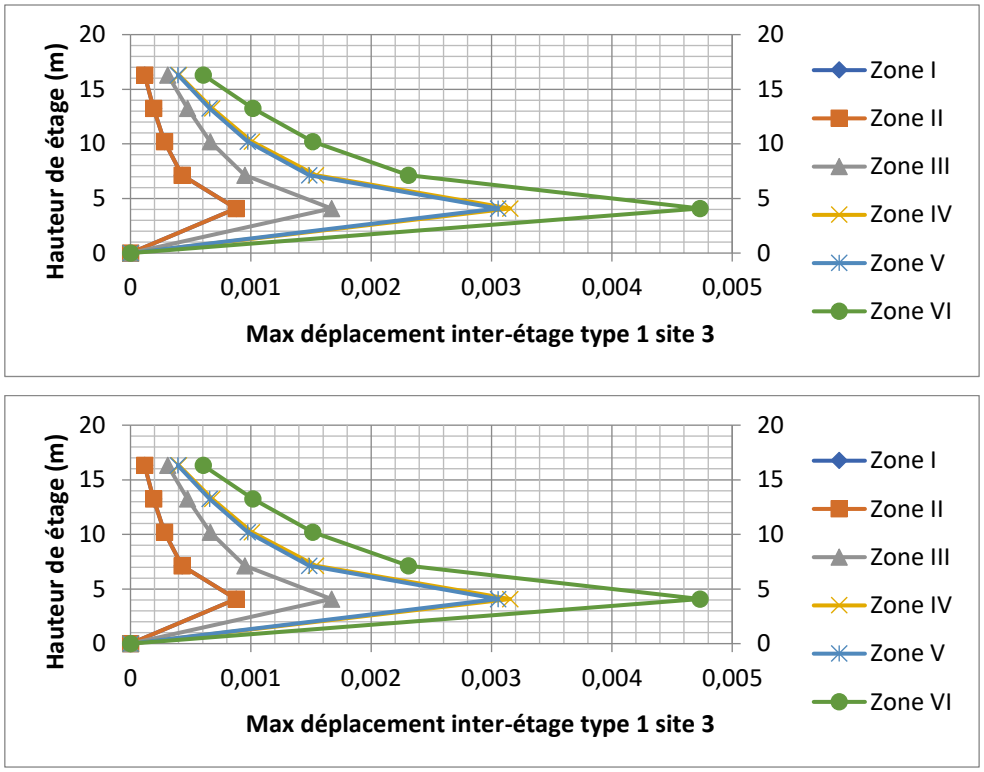


Figure 3.4 : Distribution des déplacements inter-étages maximaux en fonction de la hauteur (Analyse spectrale RPA 2024, direction Y)

La figure **5** présentent l'analyse des déplacements inter-étages maximaux, réalisée selon la méthode du modèle spectral conformément au RPA99, pour une structure en béton armé de 5 étages analysée dans la direction Y.

L'interprétation des résultats révèle un gradient de sismicité prononcé : les déplacements inter-étages augmentent progressivement de la Zone I (faible sismicité, bleue) vers la Zone III (forte sismicité, violette), avec les Zones Iia (modérée, rouge) et Iib (modérée à élevée, verte) se situant entre ces extrêmes. Concernant le comportement par étage, les niveaux supérieurs (4 et 5) présentent les déplacements les plus importants, tandis que les étages inférieurs, plus rigides, montrent des déplacements moindres. L'évolution des déplacements varie également selon les sites : les valeurs maximales observées en Zone III passent de ~0.003m au Site 1 à ~0.004m pour les Sites 2 et 3, pour atteindre ~0.005m au Site 4. Ces courbes permettent in fine de vérifier le respect des limitations de déplacements inter-étages imposées par le RPA99.

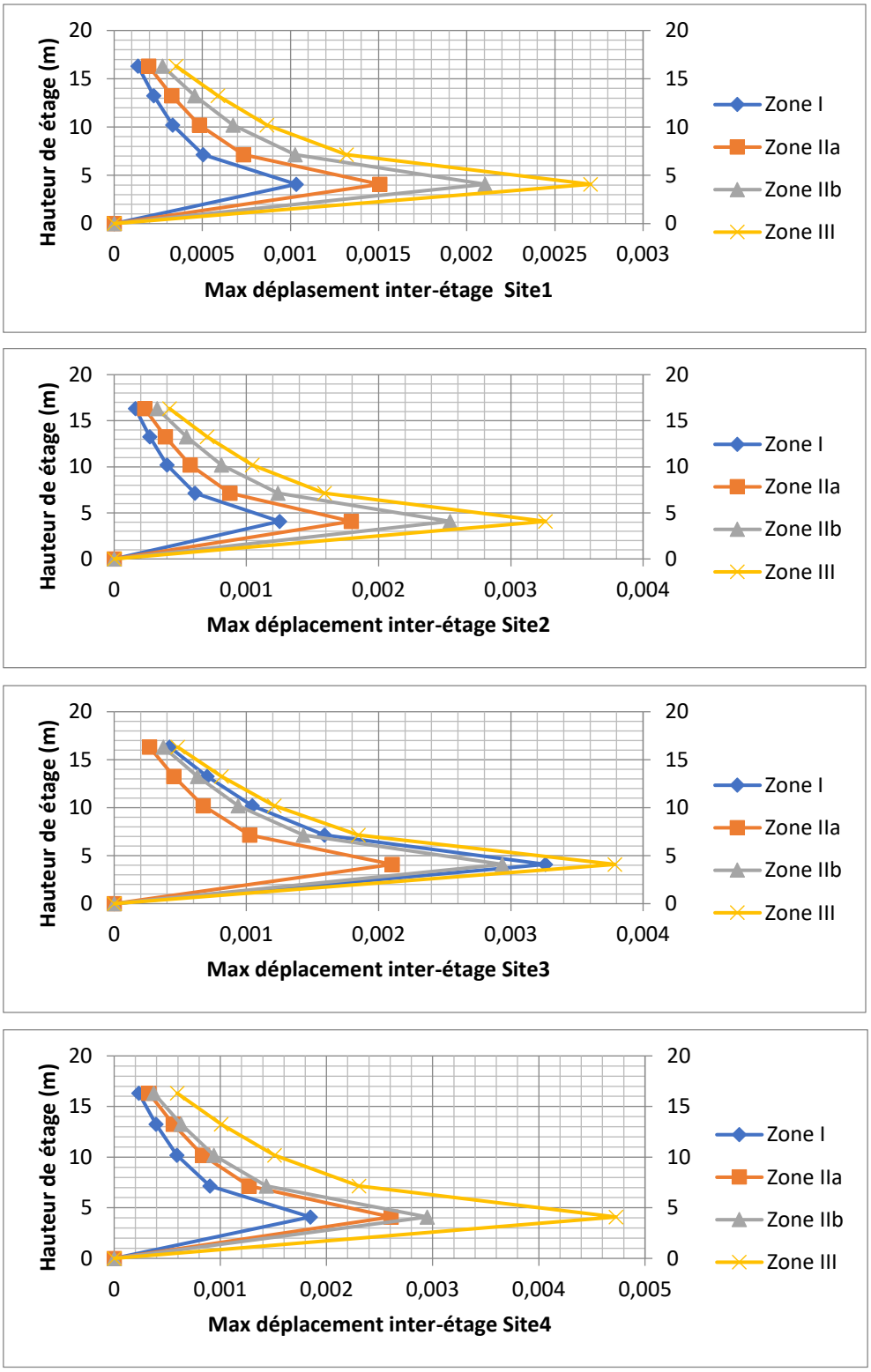
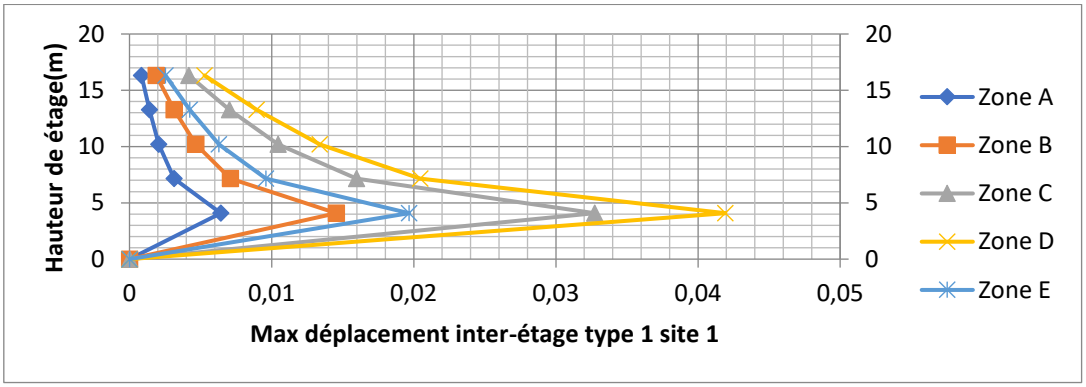


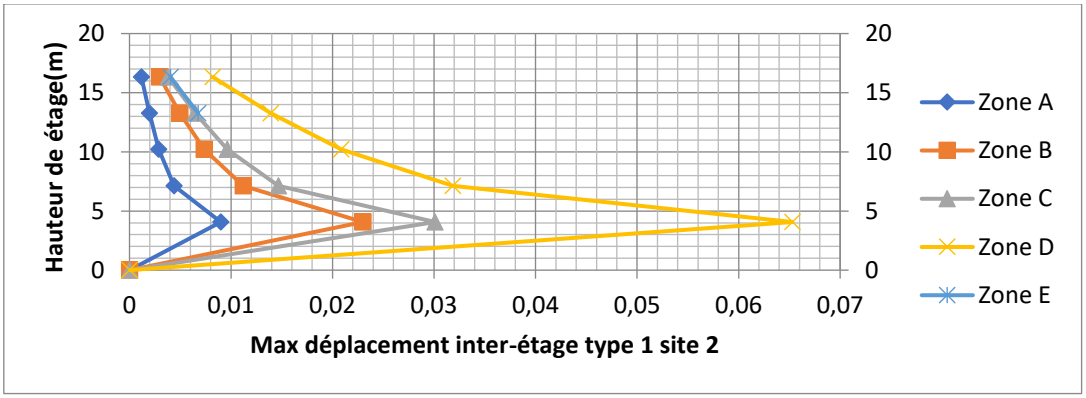
Figure 3.5 : Distribution des déplacements inter-étages maximaux de type 1 en fonction de la hauteur (Analyse spectrale RPA99, direction Y)

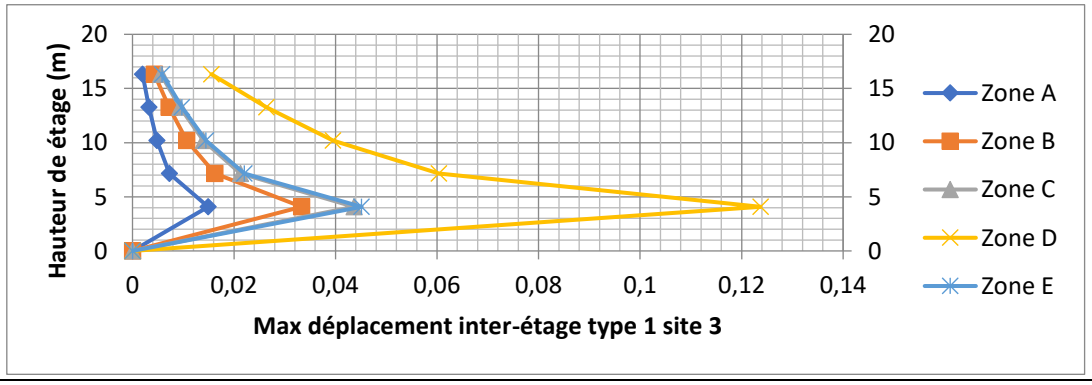
La figure 6, illustrent les résultats d'une analyse modale spectrale, conforme à l'Eurocode 8 (EC8), d'une structure en béton armé de 5 étages analysée dans la direction Y. Ils décrivent la variation des déplacements inter-étages maximaux de type 1 en fonction de la

hauteur, pour différentes zones sismiques (A à E). De manière générale, toutes les zones présentent des déplacements inter-étages maximaux aux niveaux inférieurs (étages 1 à 3), diminuant ensuite progressivement vers les étages supérieurs, ce qui est caractéristique du comportement d'une structure en porte-à-faux.

La variation des déplacements est également notable selon les sites : le Site 1 enregistre des déplacements modérés, avec un maximum d'environ 0.05 m. Le Site 2 présente des déplacements maximaux d'environ 0.07 m. Le Site 3 voit ces valeurs augmenter significativement à environ 0.13 m, et le Site 4 affiche les déplacements les plus élevés, atteignant près de 0.18 m. Quant au zonage sismique, la Zone A (bleue) représente la sismicité la plus faible, la Zone E (cyan) une sismicité intermédiaire, et la Zone D (violette) la sismicité la plus élevée, entraînant les déplacements maximaux.







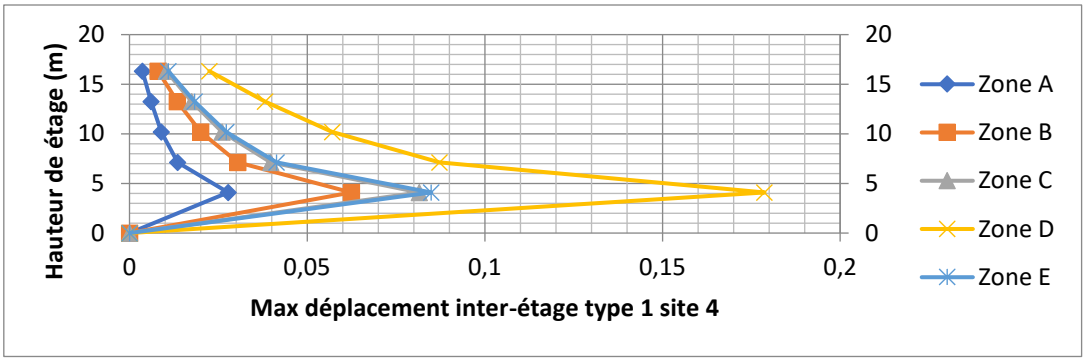


Figure 3. 6 : Distribution des déplacements inter-étages maximaux en fonction de la hauteur (Analyse spectrale EC8, direction Y)

6.2. Efforts tranchants

La figure **7**, présentent l'analyse des efforts tranchants maximaux, réalisée selon la méthode de l'analyse modale spectrale conformément au RPA 2024, pour une structure en béton armé de 5 étages dans la direction X.

L'interprétation des résultats montre que les efforts tranchants sont répartis en six zones distinctes (de Zone I à Zone VI), chacune présentant un comportement spécifique sur une hauteur d'étage variant de 0 à 18 mètres, correspondant aux cinq niveaux de la structure. L'analyse comparative des sites révèle des variations significatives dans l'amplitude de ces efforts : le Site 1 (Type 1) enregistre les efforts les plus faibles, avec des valeurs maximales d'environ 800 Kn. Ces efforts augmentent progressivement pour le Site 2 (Type 1), atteignant environ 1000 Kn, et culminent pour le Site 3 (Type 1), dépassant les 1200 Kn. À noter que le Site 1 (Type 2) présente des efforts intermédiaires, similaires à ceux du Site 2 (Type 1).

Sur le plan technique, la répartition des efforts suit une distribution caractéristique de l'analyse modale spectrale : les zones supérieures (notamment la Zone I) présentent généralement des efforts plus importants, avec une diminution progressive vers les zones inférieures, ce qui reflète la distribution typique des forces sismiques dans une structure.

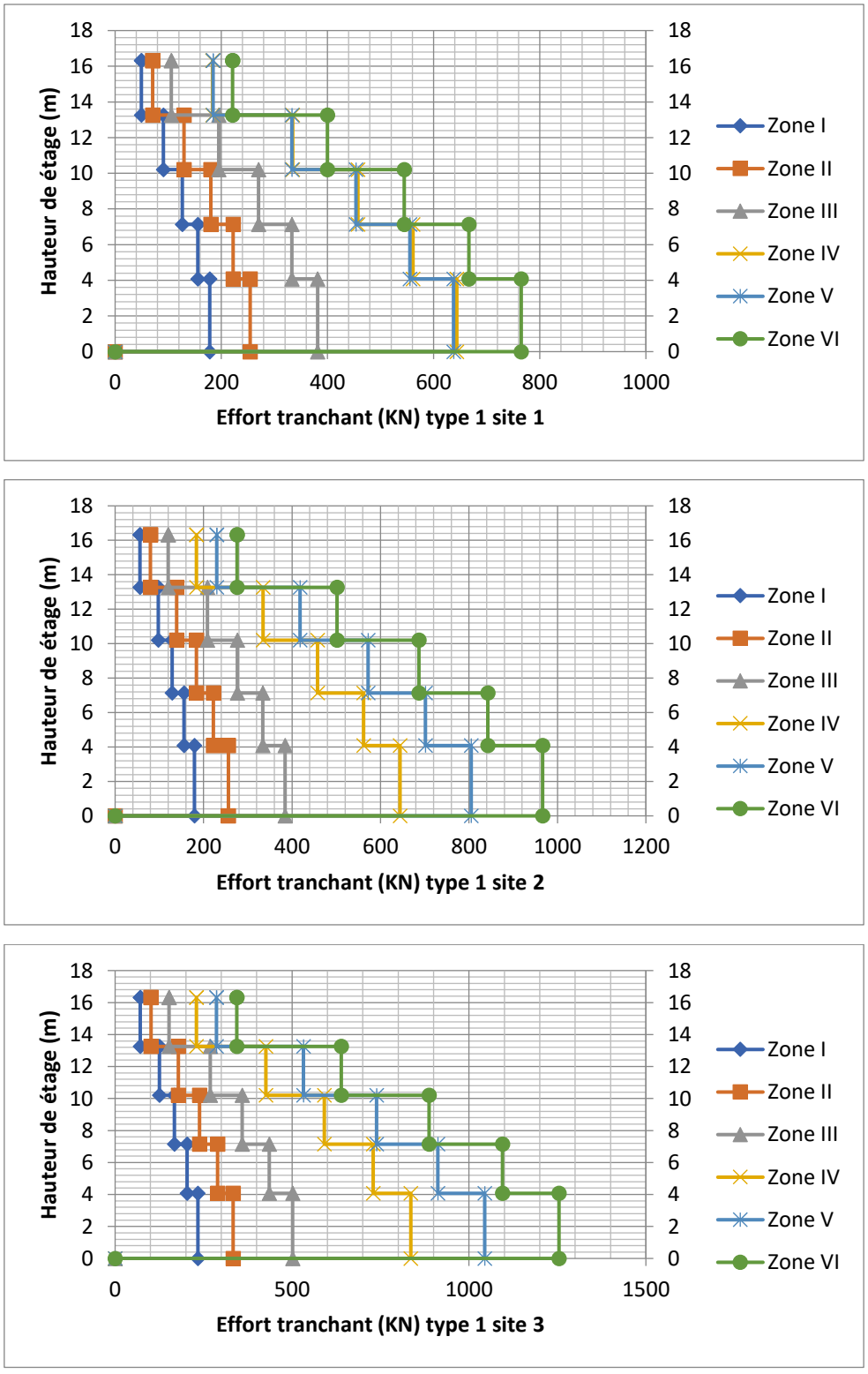
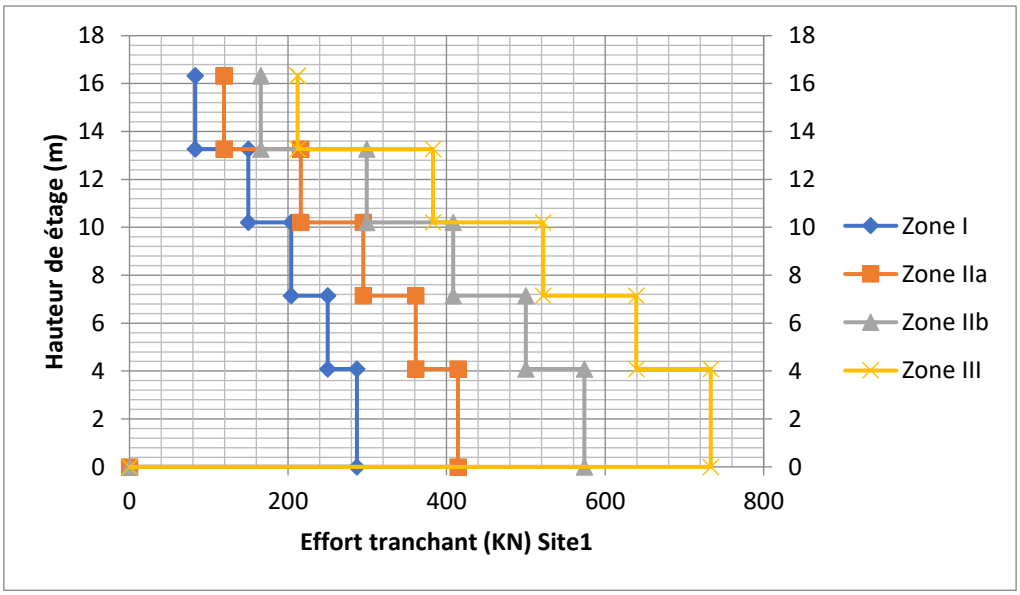
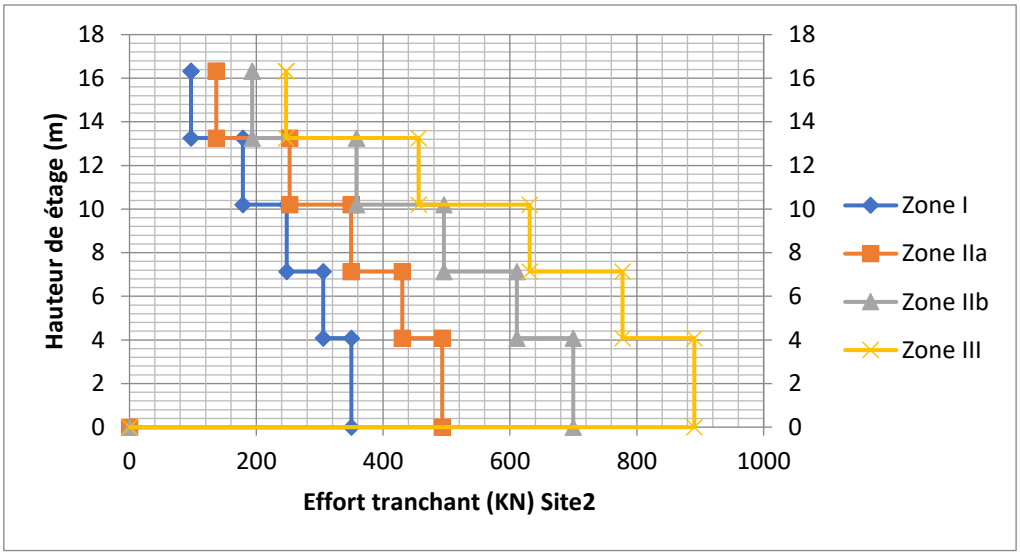


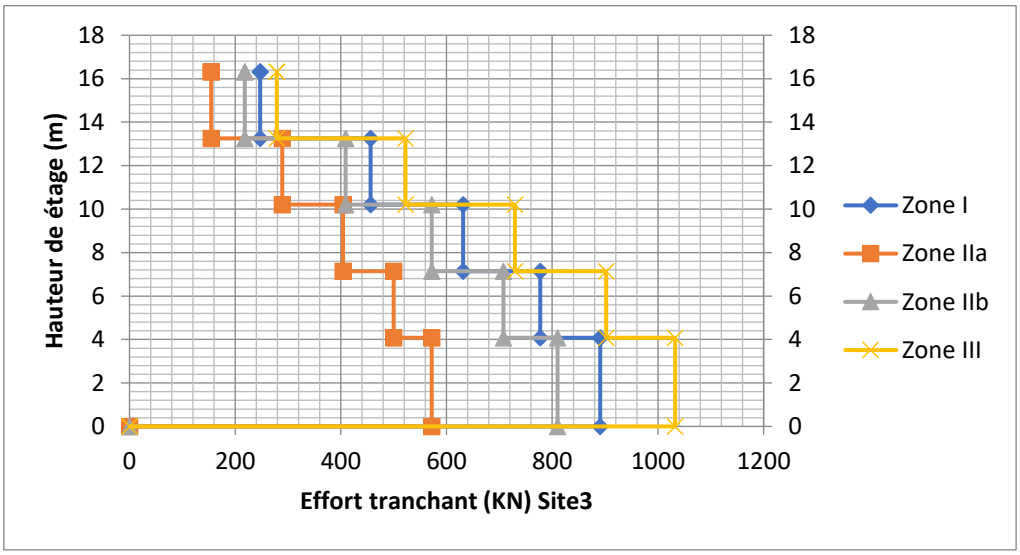
Figure 3.7 : Distribution des efforts tranchants – Analyse modale spectrale RPA 2024, direction X

La figure 8, présentent l'analyse des efforts tranchants maximaux, réalisée selon la méthode de l'analyse modale spectrale conformément au RPA 99, pour une structure en béton armé de 5 étages analysée dans la direction X.

L'analyse, menée sur les 5 niveaux de la structure (0-18m de hauteur), révèle une distribution des efforts tranchants à travers les quatre zones sismiques du RPA 99 (Zone I, Iia, Iib, III). Une analyse comparative des sites met en évidence une augmentation progressive des efforts : le Site 1 présente les valeurs les plus faibles (~700 Kn), suivis par le Site 2 (~900 Kn), le Site 3 (>1100 Kn) et culminant au Site 4 (~1300 Kn). Le comportement structural est caractérisé par une distribution décroissante des efforts de la base vers le sommet, avec des efforts minimaux en Zone I (faible sismicité) et maximaux en Zone III (forte sismicité), une progression logique au regard de la classification sismique du territoire. Ces observations soulignent que les coefficients d'accélération de zone et la nature du site (S1 à S4) influent directement sur l'amplitude des efforts et la réponse spectrale, les efforts tranchants suivant toujours une distribution modale caractéristique.







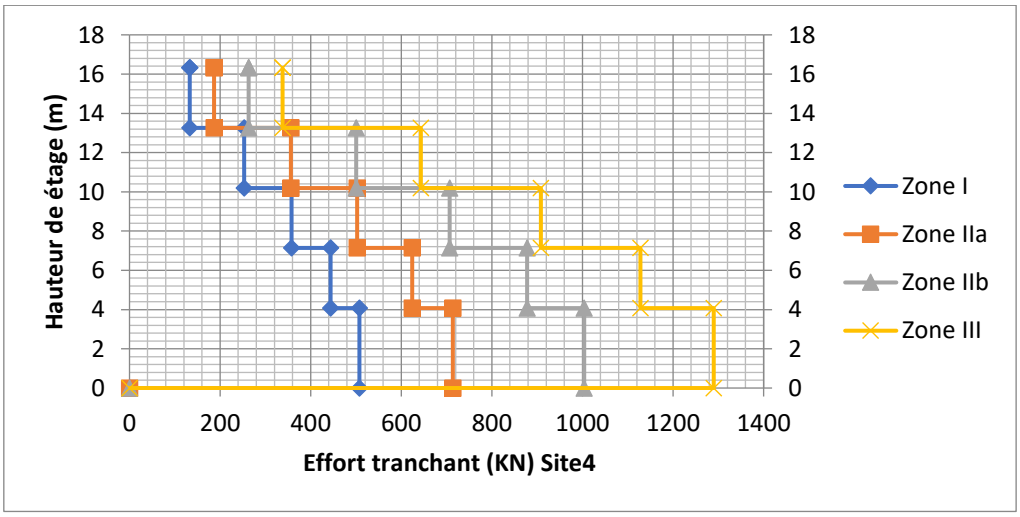


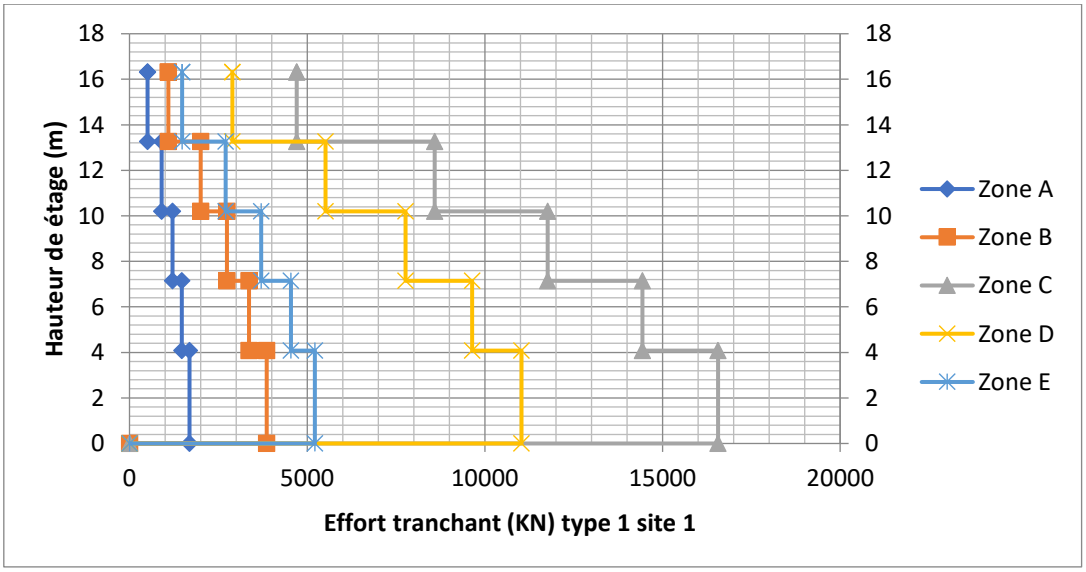
Figure 3.8 : Distribution des efforts tranchants – Analyse modale spectrale RPA 99'03, direction X

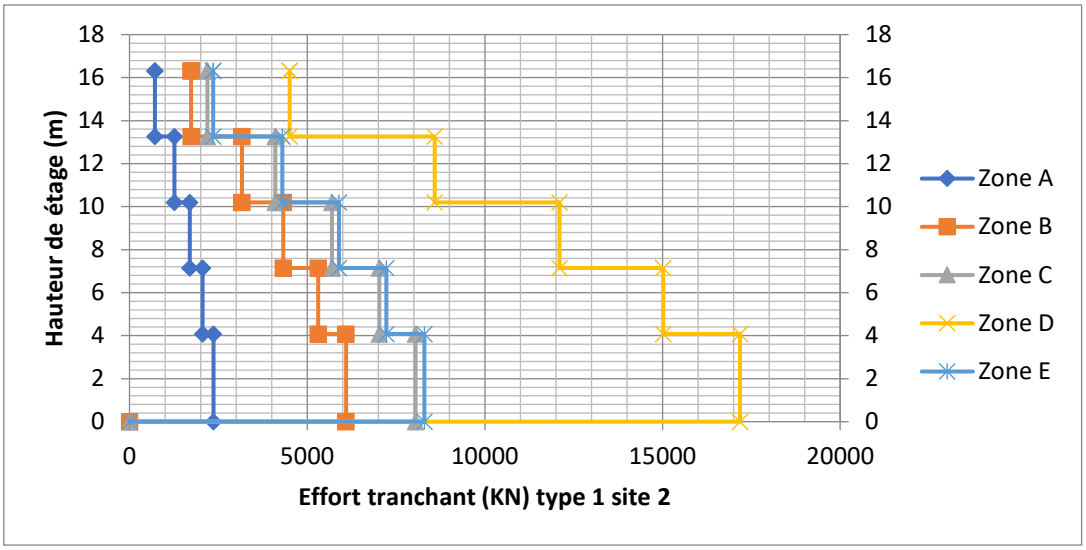
La figure 9, illustrent l'analyse des efforts tranchants maximaux, réalisée selon la méthode de l'analyse modale spectrale conforme à l'Eurocode 8 (EC8), pour une structure en béton armé de 5 étages analysée dans la direction X.

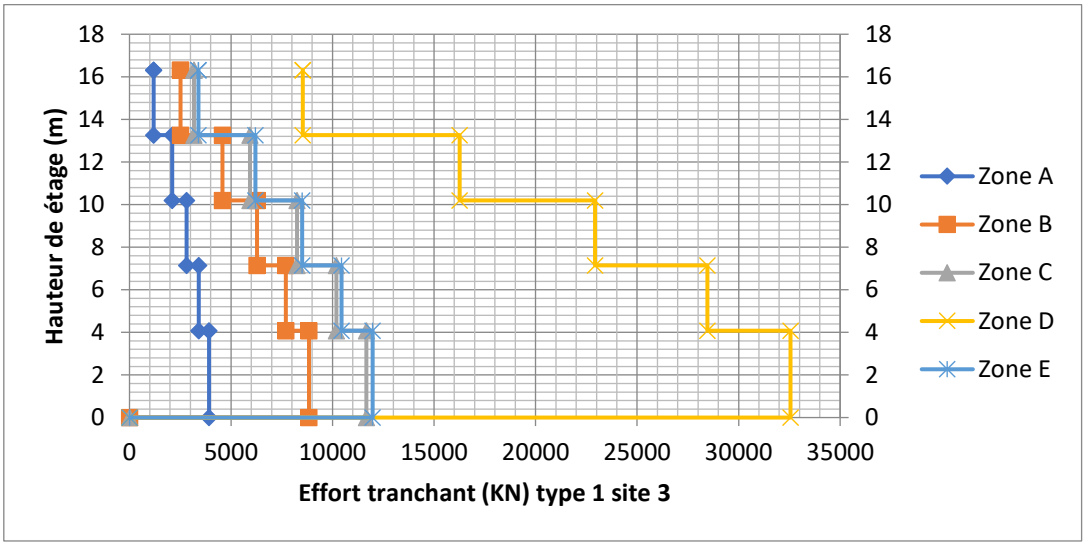
L'interprétation des résultats s'appuie sur la classification des 5 zones sismiques de l'EC8 (de la Zone A, sismicité très faible, à la Zone E, sismicité très élevée), pour une structure de 18 mètres de hauteur (5 étages). L'analyse comparative des sites révèle une augmentation significative des efforts : si le Site 1 (Type 1) présente des efforts modérés (~18 000 Kn en Zone C), le Site 2 (Type 1) affiche des valeurs similaires (~15 000 Kn en Zone D). Cependant, les Sites 3 et 4 (Type 1) enregistrent les efforts les plus élevés, dépassant respectivement 30 000 Kn et atteignant environ 45 000 Kn en Zone D.

Ces observations techniques soulignent une amplification progressive des efforts du Site 1 au Site 4, reflétant l'influence des différentes classes de sol (A à E) de l'EC8 sur la réponse spectrale. La Zone D s'avère systématiquement la plus critique, présentant les efforts les plus importants. Verticalement, une concentration des efforts maximaux est notée aux niveaux intermédiaires et supérieurs. Cette approche, conforme à l'EC8, intègre des paramètres spécifiques tels que l'accélération de référence

ag selon la zone sismique, l'application des coefficients de sol S en fonction de la classe de site, le facteur d'importance Γi , et le coefficient de comportement q adapté aux structures en béton armé, garantissant ainsi une évaluation complète de la réponse sismique.







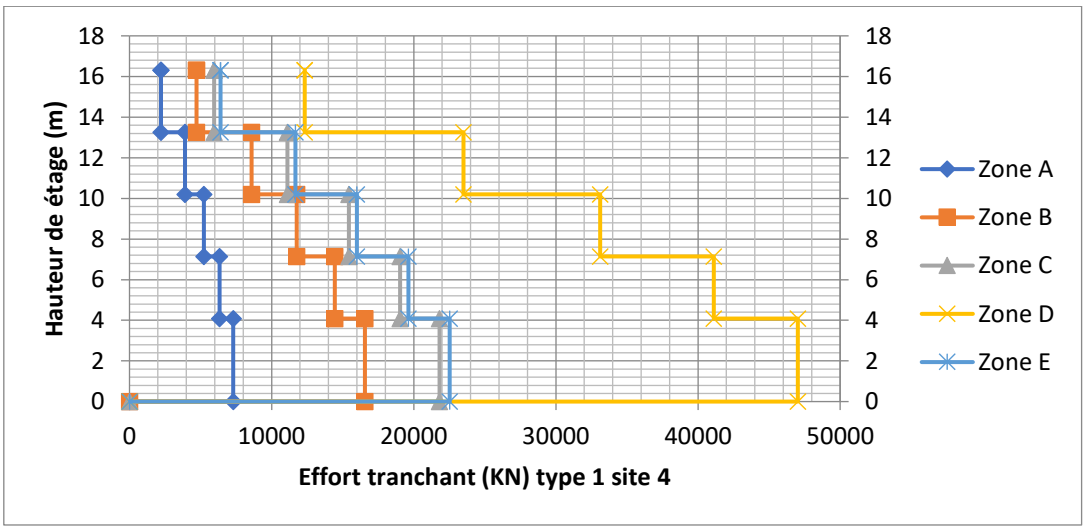
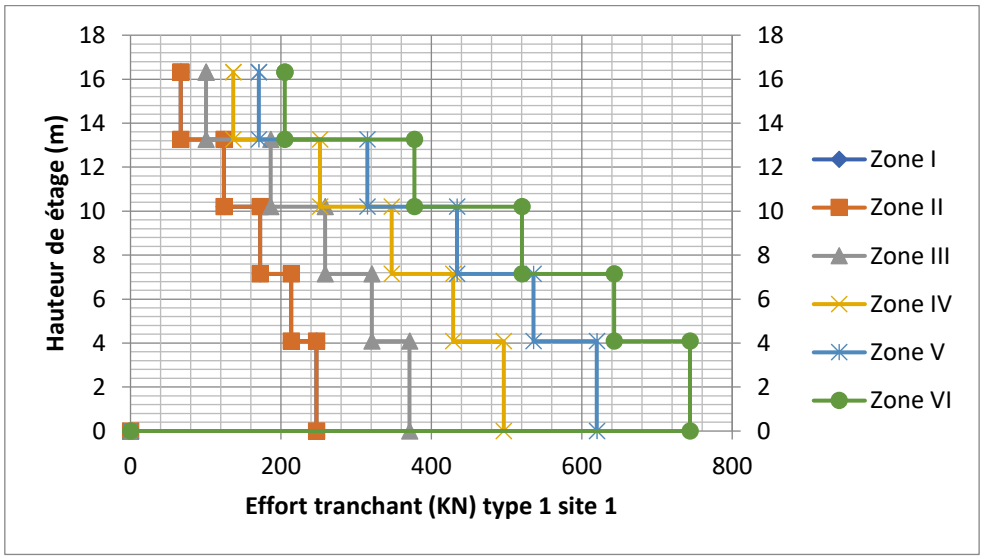


Figure 3.9 : Distribution des efforts tranchants – Analyse modale spectrale EC8, direction X

La figure 10, présente l'analyse des efforts tranchants maximaux, réalisée selon la méthode de l'analyse modale spectrale conformément au RPA 2024, pour une structure en béton armé de 5 étages analysée dans la direction Y.

L'interprétation des résultats s'appuie sur la nouvelle classification des six zones sismiques du RPA 2024 (de la Zone I, sismicité très faible, à la Zone VI, sismicité très élevée), offrant une subdivision plus fine du territoire algérien pour cette structure de 18 mètres de hauteur. L'analyse comparative des sites en direction Y révèle une nette amplification des efforts : le Site 1 (Type 1) enregistre des efforts modérés, atteignant un maximum d'environ 800 Kn. Le Site 2 (Type 1) présente des valeurs légèrement supérieures, autour de 900 Kn. Cependant, les Sites 3 et 4 (Type 1) affichent des efforts élevés et très importants, dépassant respectivement 1200 Kn et atteignant environ 1700 Kn.

Spécifiquement pour la direction Y, la Zone VI s'avère systématiquement la plus critique, avec les efforts les plus importants sur tous les sites. Cette progression notable des efforts du Site 1 au Site 4 indique une amplification croissante, et verticalement, la concentration maximale des efforts est observée aux étages intermédiaires et supérieurs. Ces résultats reflètent les spécificités du RPA 2024, qui intègre de nouveaux coefficients d'accélération zonale actualisés, une classification de site améliorée (S1 à S4), une prise en compte des effets directionnels, un facteur de qualité Q adapté et un coefficient de comportement R optimisé. Il est enfin crucial de souligner que les efforts en Y peuvent différer significativement de ceux en X selon la géométrie structurale, rendant l'analyse bidirectionnelle essentielle pour un dimensionnement optimal.



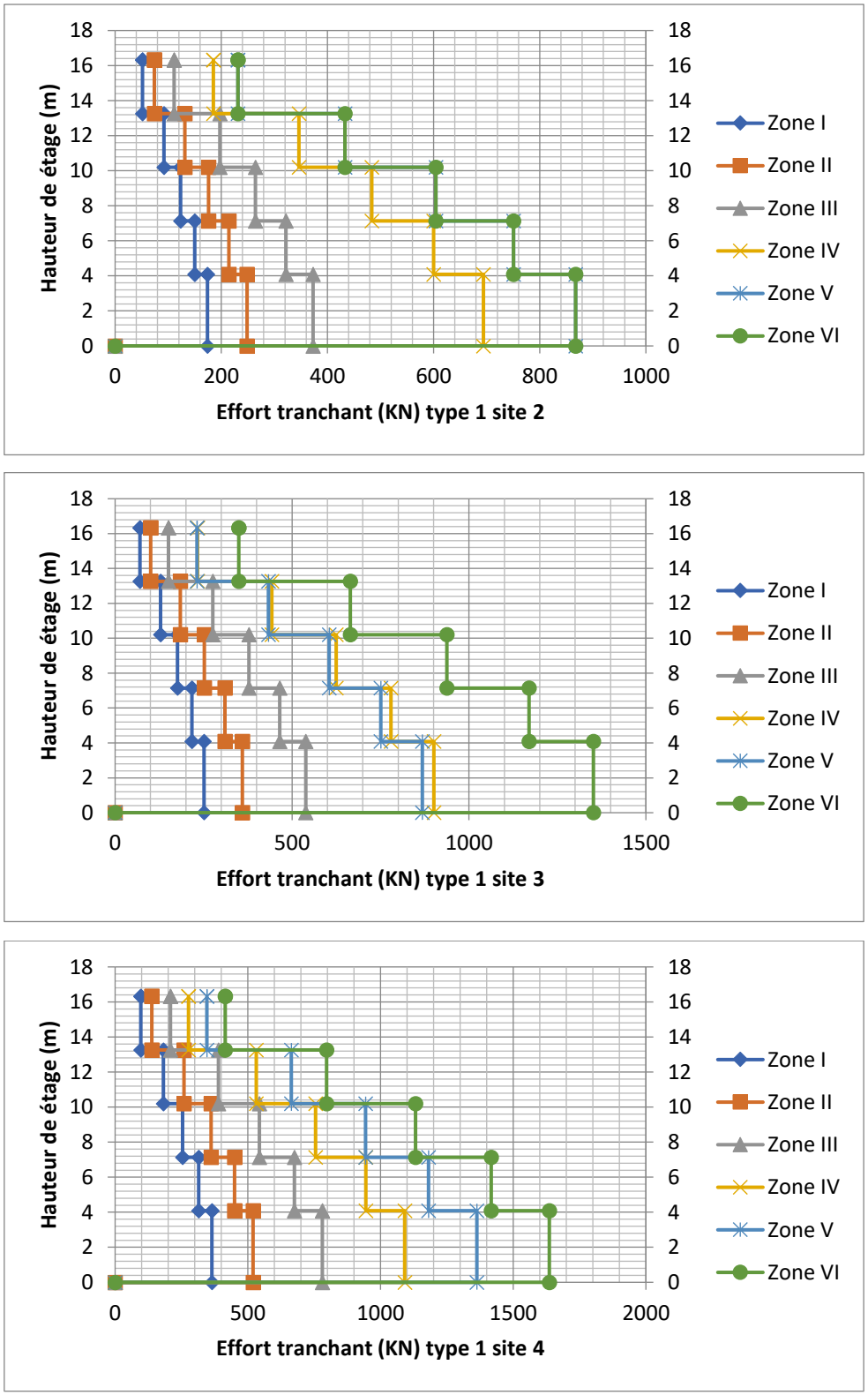
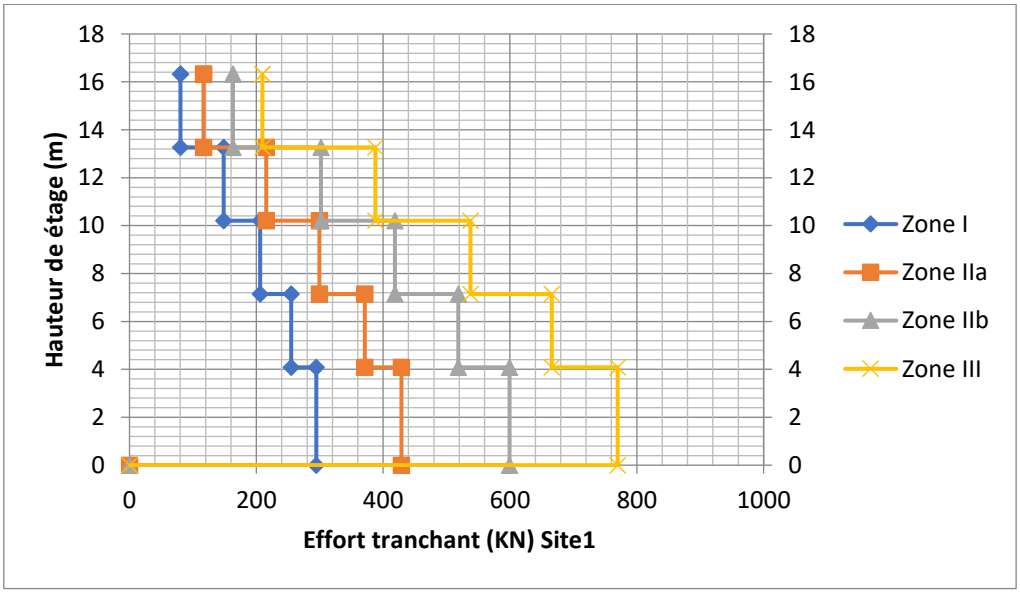


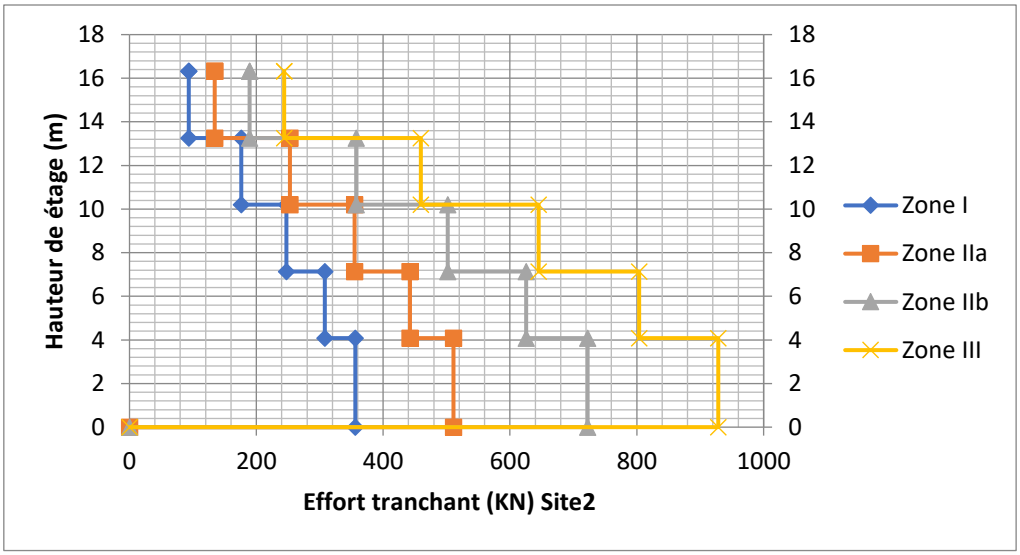
Figure 3.10 : Distribution des efforts tranchants – Analyse modale spectrale RPA 2024, direction Y

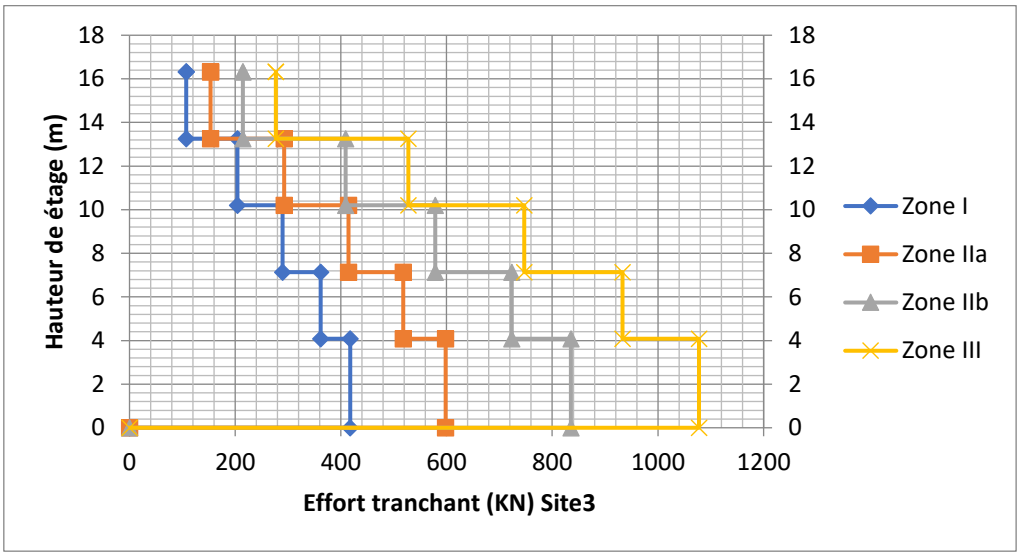
La figure11, présente l'analyse des efforts tranchants maximaux, réalisée selon la méthode de l'analyse modale spectrale conformément au RPA 99, pour une structure en béton armé de 5 étages analysée dans la direction Y.

L'interprétation des résultats s'appuie sur la classification des quatre zones sismiques du RPA 99 (de la Zone I, sismicité négligeable, à la Zone III, sismicité élevée), pour cette structure de 18 mètres de hauteur (5 étages). L'analyse comparative des sites en direction Y révèle une progression des efforts : le Site 1 enregistre des efforts modérés, atteignant un maximum d'environ 800 Kn en Zone III. Le Site 2 présente des valeurs similaires, autour de 900 Kn en Zone III. Cependant, les Sites 3 et 4 affichent des efforts plus élevés, dépassant respectivement 1000 Kn et atteignant environ 1200 Kn en Zone III.

Spécifiquement pour la direction Y, la Zone III s'avère systématiquement la plus critique, avec les efforts maximaux sur tous les sites. Cette augmentation graduelle des efforts de S1 vers S4 est notable, et verticalement, la concentration maximale des efforts est observée aux étages supérieurs et intermédiaires. Ces résultats sont influencés par les spécificités du RPA 99, incluant le coefficient d'accélération de zone A, le facteur de site S (S1 à S4) qui modifie la réponse spectrale, le coefficient de comportement R adapté aux structures en BA, et le facteur de qualité Q selon les dispositions constructives. Enfin, il est crucial de souligner la nécessité de l'analyse bidirectionnelle pour le dimensionnement, car les efforts en Y peuvent être déterminants selon l'orientation de la structure et l'interaction entre les modes de vibration dans les deux directions principales.







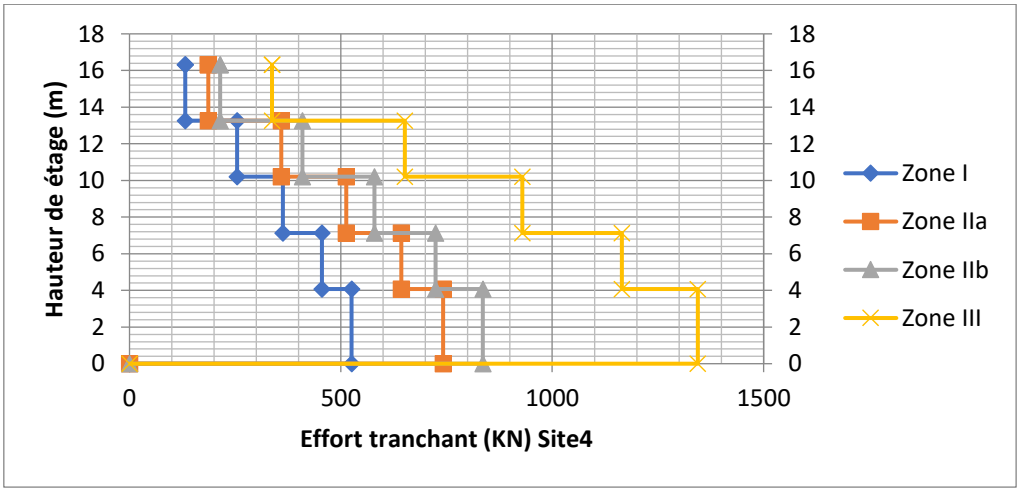
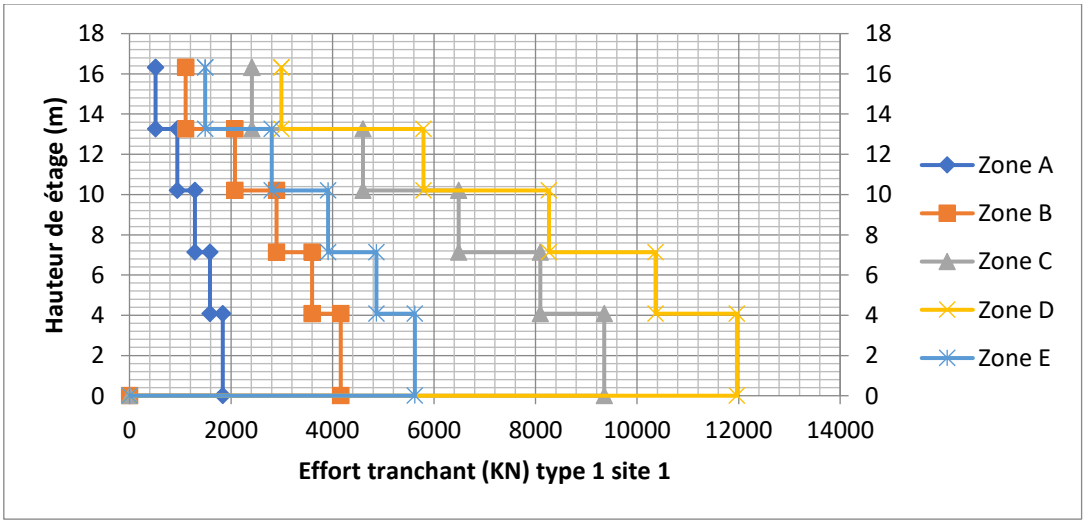


Figure 3.11 : Distribution des efforts tranchants – Analyse modale spectrale RPA 99, direction Y

La figure 12, illustre l'analyse des efforts tranchants maximaux, réalisée selon la méthode de l'analyse modale spectrale conformément à l'Eurocode 8 (EC8), pour une structure en béton armé de 5 étages analysée dans la direction Y.

L'interprétation des résultats s'appuie sur la classification des 5 zones sismiques de l'EC8 (de la Zone A, sismicité très faible, à la Zone E, sismicité très élevée), pour cette structure de 18 mètres de hauteur (5 étages). L'analyse comparative des sites en direction Y révèle une amplification critique et progressive des efforts : le Site 1 (Type 1) présente des efforts modérés (~12 000 Kn en Zone D), qui augmentent à ~18 000 Kn pour le Site 2 (Type 1), puis dépassent 35 000 Kn pour le Site 3 (Type 1), pour atteindre un maximum de ~55 000 Kn au Site 4 (Type 1), toujours en Zone D.

La Zone D s'avère systématiquement la plus sollicitée et l'influence des conditions géotechniques (effet de site majeur) est déterminante, expliquant cette progression. Verticalement, une concentration des efforts est observée aux niveaux supérieurs, avec une décroissance vers la base. Cette approche, conforme à l'EC8, intègre des paramètres spécifiques tels que l'accélération de référence *ag* selon la zone sismique, les coefficients de sol S selon la classification géotechnique européenne, le facteur d'importance Γi , et le coefficient de comportement q adapté aux structures ductiles en béton armé, tout en prenant en compte les effets directionnels selon les deux axes principaux. En conclusion, le Site 4 présente des sollicitations extrêmement élevées, nécessitant un renforcement structural. La progression géométrique des efforts selon les sites souligne l'importance cruciale de l'étude géotechnique, et les valeurs en direction Y peuvent s'avérer déterminantes pour le dimensionnement final de la structure.



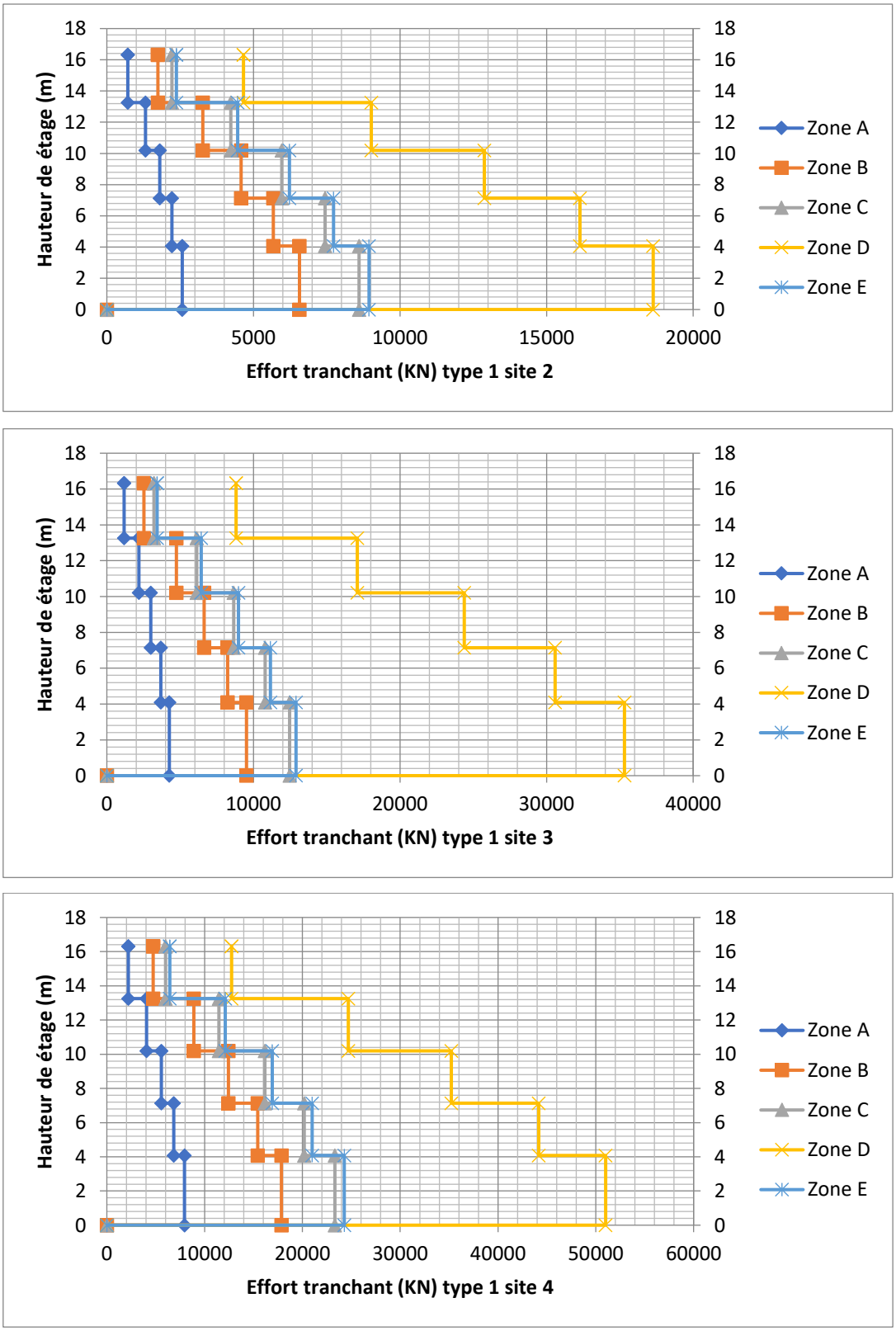
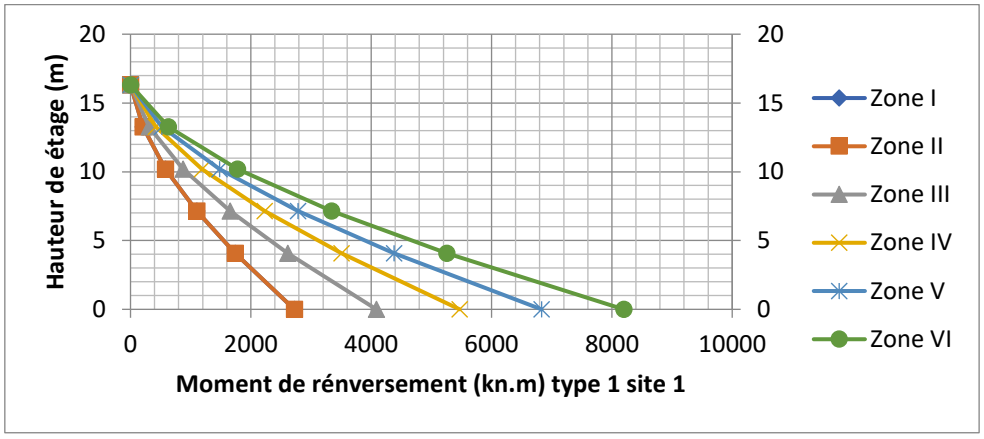


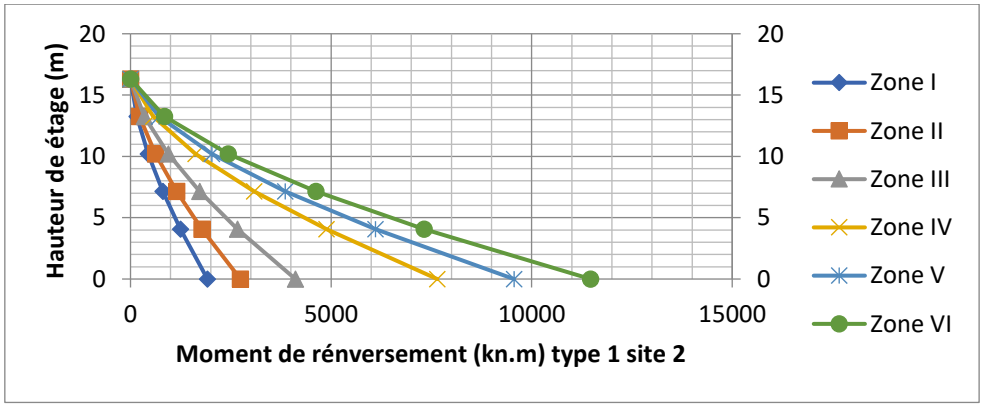
Figure 3.12 : Distribution des efforts tranchants – Analyse modale spectrale EC8, direction Y

6.3. Moment de renversement

La figure13, présente la distribution des moments de renversement le long de la hauteur d'une structure en béton armé de 5 étages, analysée dans la direction X selon la méthode d'analyse modale spectrale conforme au RPA 2024.

L'interprétation des résultats révèle un comportement général où les moments de renversement décroissent systématiquement de la base (hauteur = 0m) vers le sommet de la structure, les valeurs maximales étant concentrées à la base. L'influence des zones sismiques est très marquée : la Zone VI (orange) présente les moments les plus élevés, reflétant la sismicité la plus forte, tandis que la Zone I (bleue) affiche les moments les plus faibles, correspondant à la sismicité minimale. Les Zones intermédiaires (I à V) montrent une gradation des moments proportionnelle à leur intensité sismique. La variation selon les sites est également perceptible : le Site 1 enregistre des moments de renversement relativement modérés (jusqu'à ~9000 Kn.m), alors que les Sites 2 et 3 présentent des moments plus élevés (jusqu'à ~12000-15000 Kn.m), suggérant des conditions de sol moins favorables. Ces résultats respectent la hiérarchie attendue selon le RPA 2024 (Zone VI > Zone V > … > Zone I) et confirment la distribution des moments de renversement typique d'une structure en console soumise à des forces sismiques.





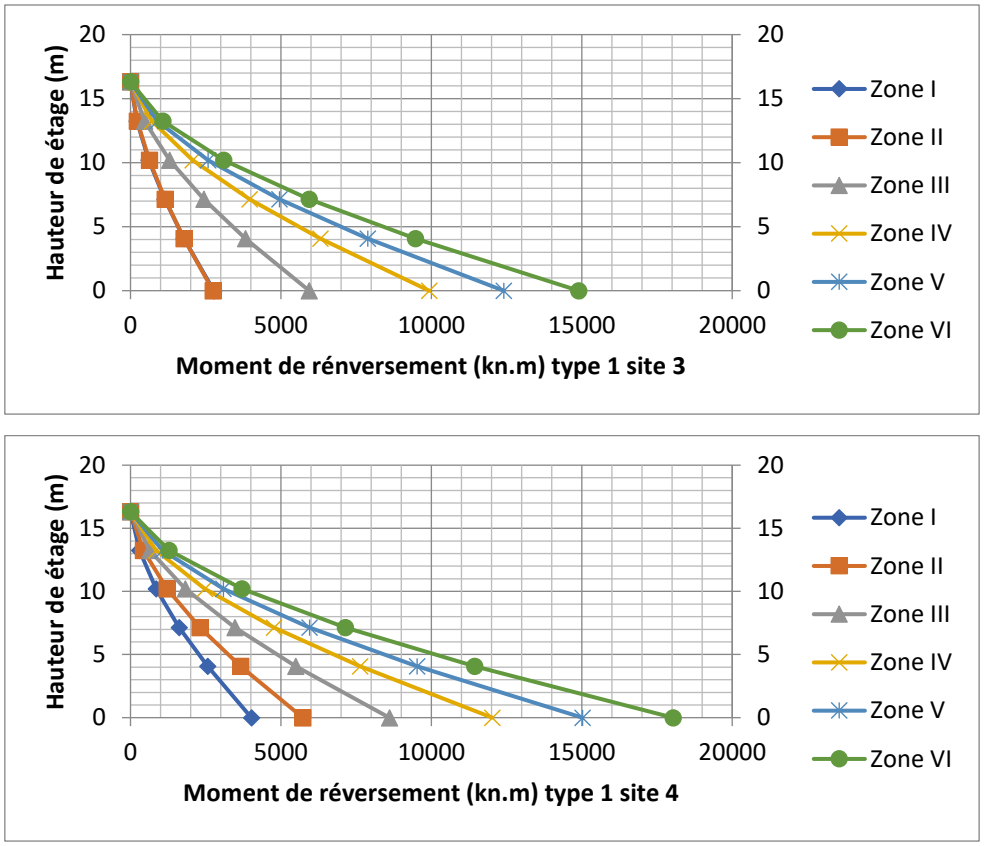
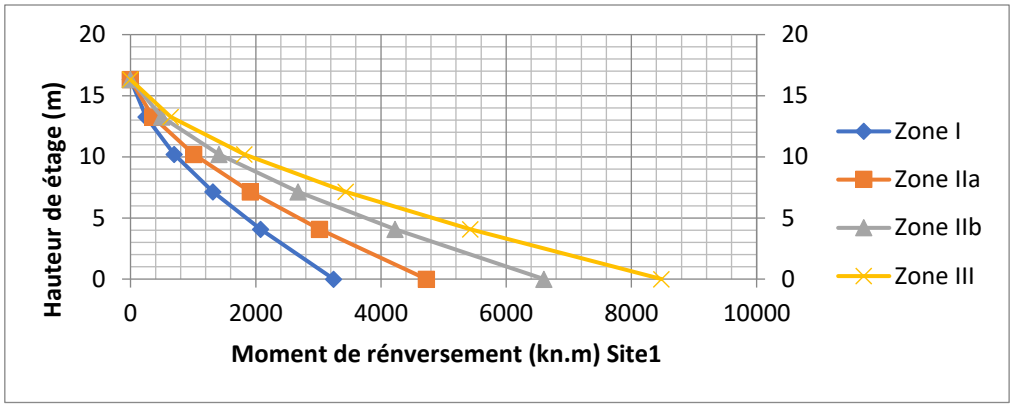
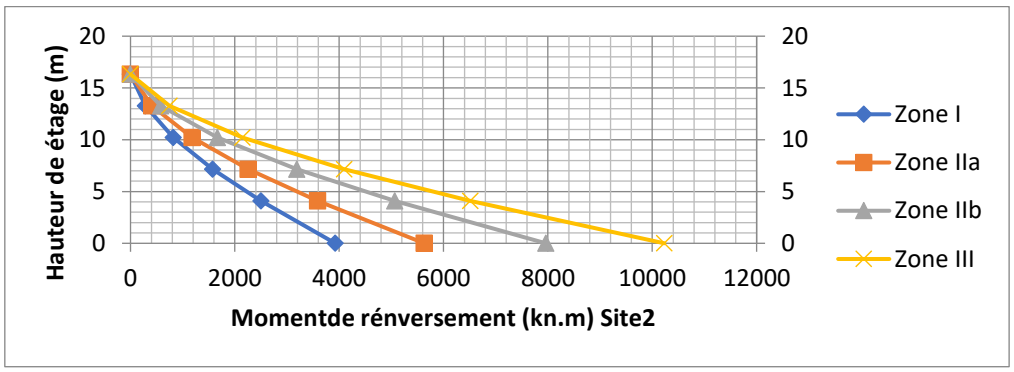


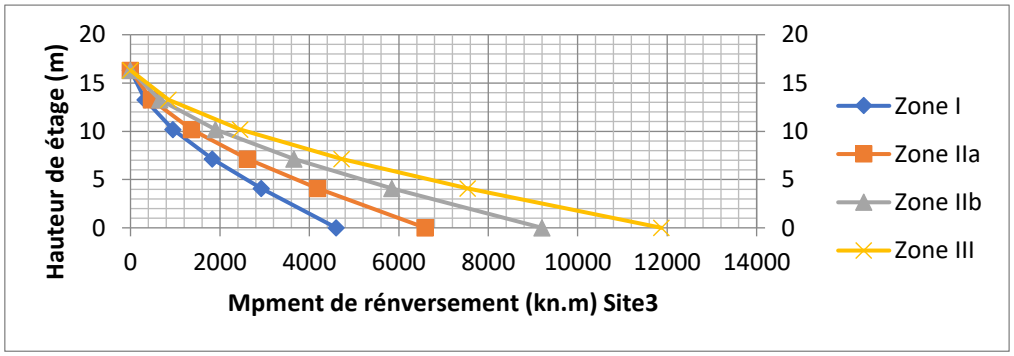
Figure 3.13 : Distribution des moments de renversement selon la hauteur, analyse modale spectrale RPA 2024, direction X

La figure14, illustrent la distribution des moments de renversement le long de la hauteur d'une structure en béton armé de 5 étages, analysée dans la direction X selon la méthode d'analyse modale spectrale et la classification RPA 99.

L'interprétation des résultats met en évidence une distribution typique où les moments de renversement sont maximaux à la base de la structure et décroissent progressivement vers le sommet, caractéristique d'un comportement en console sous sollicitation sismique. L'influence de la classification sismique RPA 99 est clairement visible : la Zone III (violette), de sismicité la plus élevée, génère systématiquement les moments maximaux, suivie par la Zone Iib (verte) puis la Zone Iia (rouge), tandis que la Zone I (bleue) affiche les moments les plus réduits, reflétant sa faible sismicité. Ce gradient de sollicitation est plus prononcé pour les zones de forte sismicité, respectant parfaitement la hiérarchie réglementaire (Zone III > Zone Iib > Zone Iia > Zone I). L'influence des conditions de site est également significative : le Site 1 présente des moments relativement modérés (max ~9000 Kn.m en Zone III), qui augmentent sur le Site 2 (max ~11000 Kn.m) et atteignent leurs valeurs les plus élevées sur le Site 3 (max ~13000 Kn.m), suggérant des conditions de sol de plus en plus défavorables.







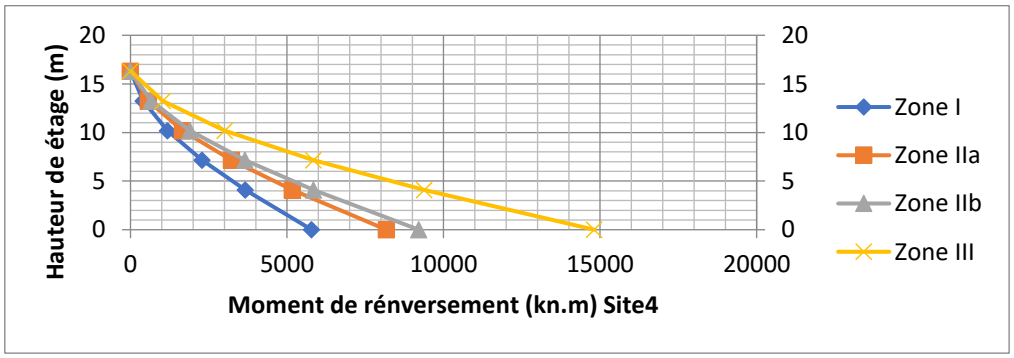
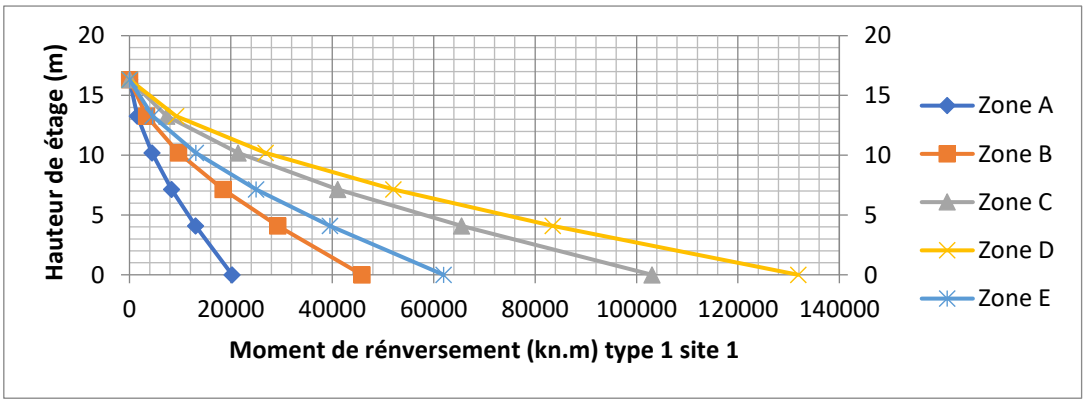
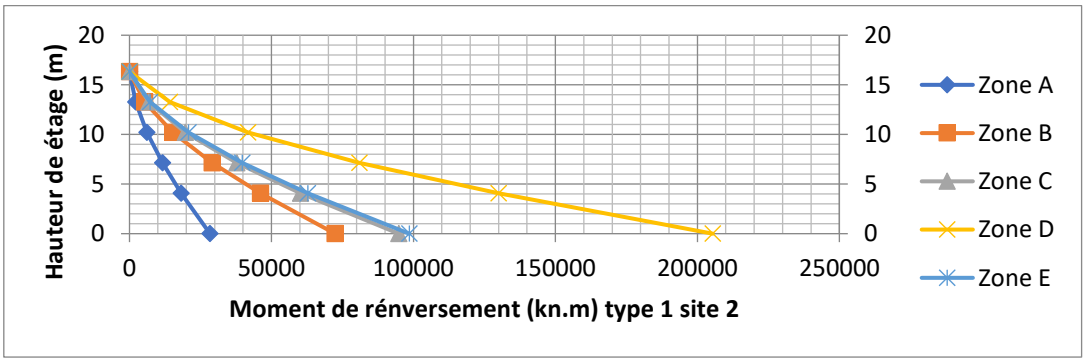


Figure 3.14 : Distribution des moments de renversement selon la hauteur , analyse modale spectrale RPA 99, direction X

La figure 15, illustre la distribution des moments de renversement le long de la hauteur d'une structure en béton armé de 5 étages, analysée dans la direction X selon la classification de l'Eurocode 8 (EC8) pour différents types de sols.

L'interprétation des résultats met en évidence une hiérarchie des sollicitations en parfaite cohérence avec la classification sismique EC8 : la Zone D (violette), de sismicité élevée, génère systématiquement les moments maximaux, suivie par la Zone C (verte), la Zone E (cyan), la Zone B (rouge), et enfin la Zone A (bleue), de sismicité très faible, qui présente les moments minimaux. Ces écarts significatifs entre les zones justifient pleinement la zonation réglementaire. L'influence des conditions de site est également cruciale : le Site 1, avec des conditions de sol favorables, enregistre des moments atteignant jusqu'à ~140 000 Kn.m en Zone D, tandis que le Site 3 (jusqu'à ~500 000 Kn.m) et le Site 4 (jusqu'à ~600 000 Kn.m en Zone D) présentent des amplifications importantes, traduisant des conditions de plus en plus critiques. Cette progression représente un facteur d'amplification d'environ 3 à 4 entre le Site 1 et le Site 4. Sur le plan structural, la distribution est classique, avec des moments maximaux à la base de la structure et une décroissance progressive vers le sommet, la courbe étant plus linéaire pour les zones de faible sismicité et plus prononcée pour les zones élevées. Cette concentration des efforts à la base rend cette zone critique et nécessite un dimensionnement renforcé.





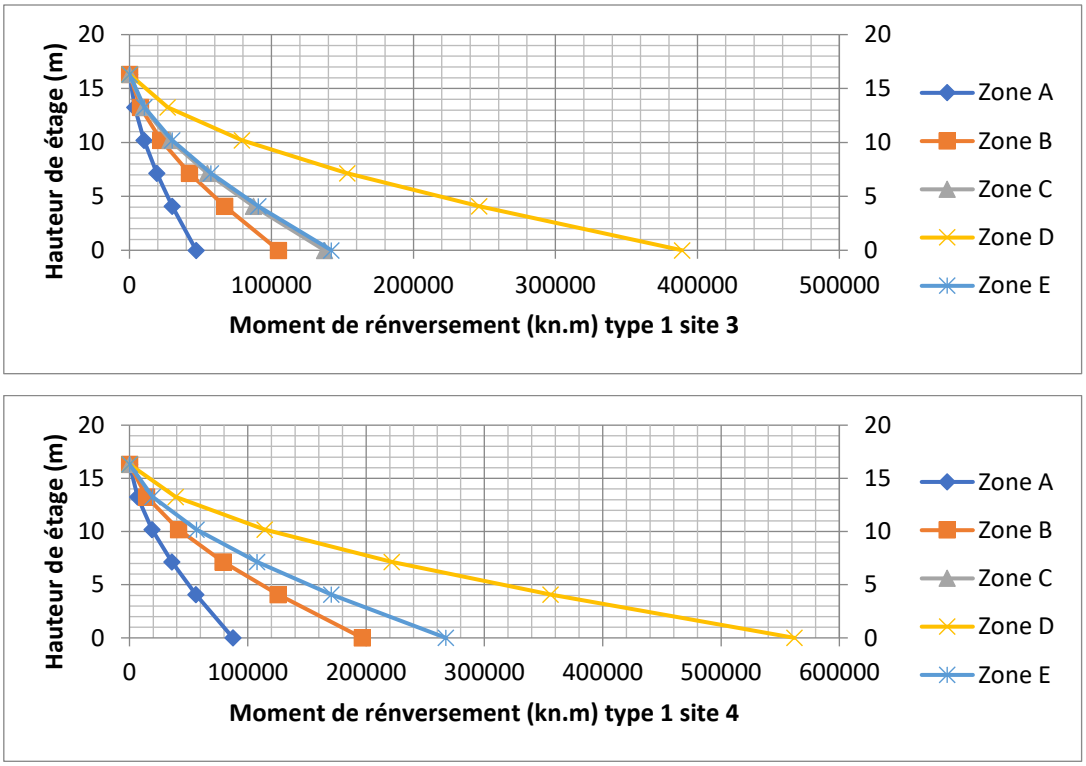


Figure 3.15 : Distribution des moments de renversement selon la hauteur, analyse modale spectrale EC8, direction X

La figure 16, illustre la distribution des moments de renversement le long de la hauteur d'une structure en béton armé de 5 étages, analysée dans la direction Y selon la méthode de l'analyse spectrale conforme à la nouvelle classification RPA 2024.

L'interprétation des résultats révèle une hiérarchie claire des sollicitations : la Zone VI (orange), de très forte sismicité, génère systématiquement les moments maximaux, tandis que la Zone I (bleue), de très faible sismicité, présente les moments minimaux. Les zones intermédiaires (V, IV, III, II) affichent une progression cohérente, confirmant la différenciation marquée et la conformité de la nouvelle classification réglementaire du RPA 2024. L'influence des conditions de site est également significative : le Site 1 enregistre des moments modérés (jusqu'à ~9 000 Kn.m en Zone VI), qui s'amplifient progressivement pour atteindre ~11 000 Kn.m pour le Site 2, ~13 000 Kn.m pour le Site 3, et culminent à ~17 000 Kn.m pour le Site 4, toujours en Zone VI. Cette progression représente un facteur d'amplification d'environ 1,9 entre le Site 1 et le Site 4, soulignant l'impact des conditions de sol.

Concernant le comportement structural en direction Y, les moments maximaux se concentrent à la base de la structure et diminuent vers le sommet, une distribution typique. Comparativement à la direction X, les courbes apparaissent plus lisses, suggérant un

comportement plus régulier. La base de la structure est identifiée comme critique, nécessitant un renforcement maximal en raison de cette concentration d'efforts.

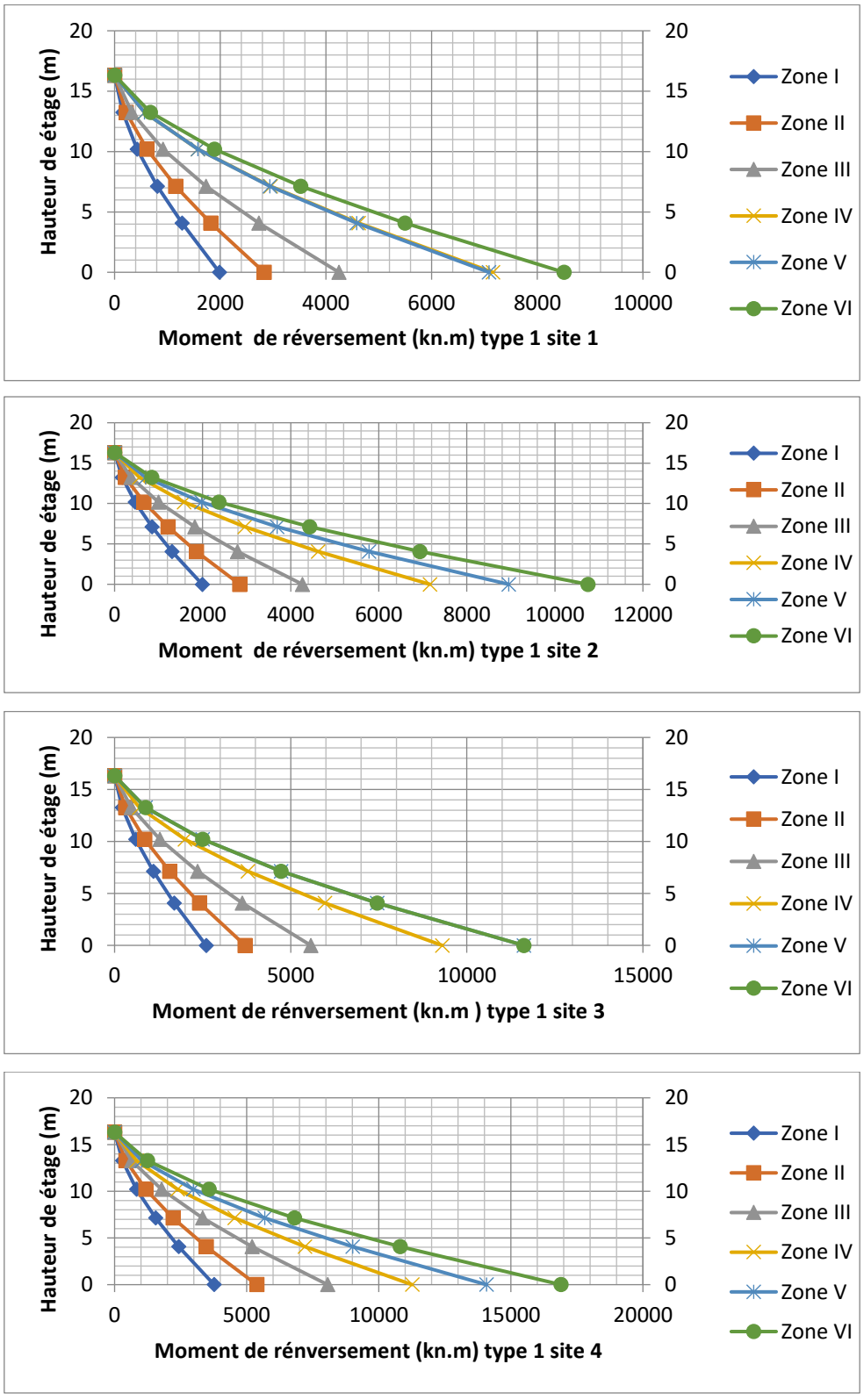
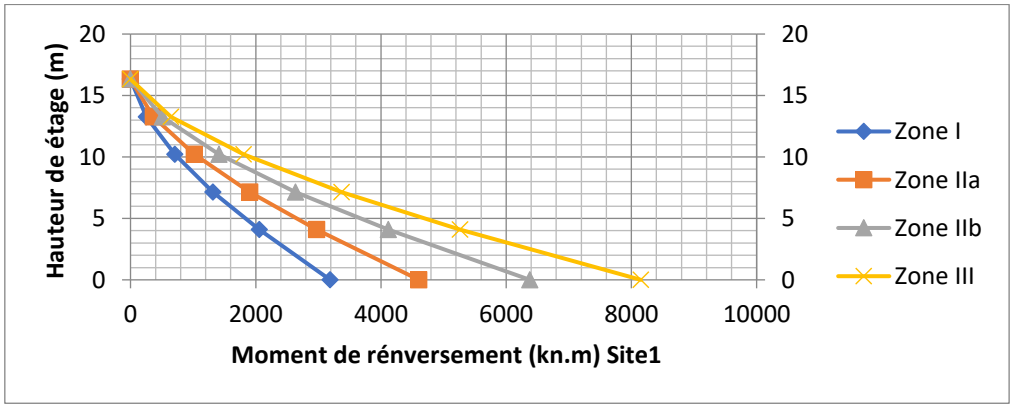


Figure 3.16 : Distribution des moments de renversement selon la hauteur, analyse modale spectrale RPA 2024, direction Y

La figure17, présente la distribution des moments de renversement le long de la hauteur d'une structure en béton armé de 5 étages, analysée dans la direction Y pour différents sites sismiques selon la classification RPA 99. L'interprétation des résultats met en évidence une hiérarchie claire des sollicitations conforme à la classification sismique du RPA 99 : la Zone III (violette) génère systématiquement les moments les plus élevés, suivie par la Zone Iib (verte) et la Zone Iia (rouge), tandis que la Zone I (bleue) affiche les moments minimaux. Cette progression attendue et régulière entre les zones sismiques témoigne de la conformité du modèle.

L'influence des conditions de site est également significative, entraînant une amplification progressive des moments : le Site 1 présente des moments modérés (jusqu'à ~9 000 Kn.m en Zone III), qui augmentent sur le Site 2 (~11 000 Kn.m) et le Site 3 (~13 000 Kn.m), pour atteindre leurs valeurs les plus critiques sur le Site 4 (~17 000 Kn.m en Zone III), ce qui représente un facteur d'amplification d'environ 1,9 entre le Site 1 et le Site 4.

Concernant le comportement directionnel en Y, la distribution classique des moments montre un maximum à la base de la structure avec une décroissance progressive vers le sommet, et les courbes apparaissent régulières. La base de la structure est identifiée comme une zone critique nécessitant un dimensionnement renforcé. Une comparaison avec la direction X révèle des ordres de grandeur et une distribution comparables, soulignant l'importance d'un dimensionnement bidirectionnel équilibré, avec un ferraillage et un système de contreventement adaptés en X et en Y. Les effets de site et leur amplification progressive mettent en lumière le rôle crucial de l'étude géotechnique pour l'adaptation des fondations. Enfin, l'analyse confirme la nécessité de respecter les prescriptions du RPA 99, notamment l'application correcte des spectres de calcul, des coefficients de comportement et de qualité, et la prise en compte de la régularité structurale.



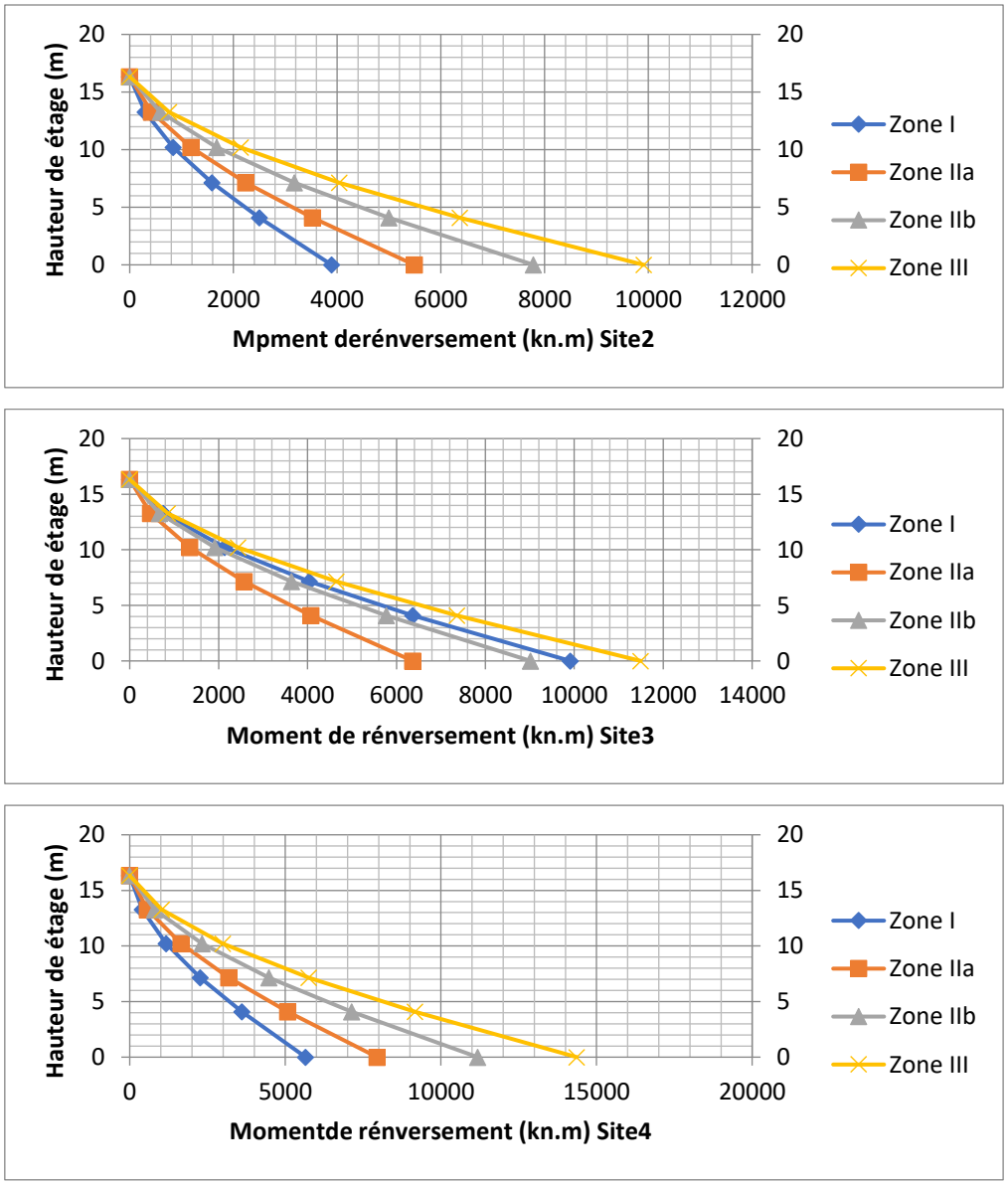


Figure 3.17 : Distribution des moments de renversement selon la hauteur, analyse modale spectrale RPA 99'03, direction Y

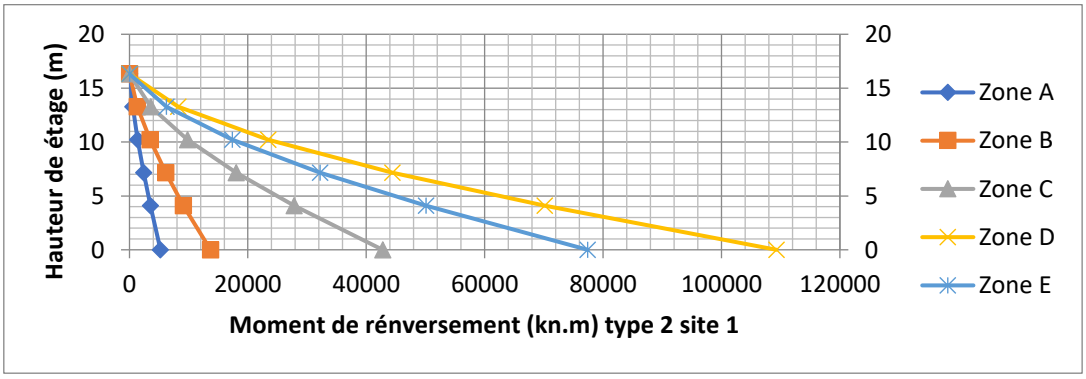
La figure18, illustre la distribution des moments de renversement le long de la hauteur d'une structure en béton armé de 5 étages, analysée selon la direction Y pour différents types de sols, conformément à la classification EC8.

Les observations révèlent une hiérarchie claire des sollicitations sismiques en fonction de la classification EC8. La Zone D (violet) représente la sismicité la plus élevée, générant les moments de renversement maximaux, tandis que la Zone A (bleu) correspond à une sismicité très faible avec des moments minimaux. Les zones intermédiaires incluent la Zone B (rouge, faible sismicité), la Zone C (vert, sismicité modérée) et la Zone E (cyan, intermédiaire entre modérée et élevée). Cette progression cohérente, avec Zone D > Zone E > Zone C > Zone B >

Zone A, démontre une parfaite conformité avec la classification européenne de l'EC8 et justifie pleinement la différenciation marquée entre les zones.

L'influence des conditions de site, notamment pour le Type 2, est majeure. Les moments de renversement augmentent drastiquement avec la dégradation des conditions de sol : de ~120 000 Kn.m pour un Site 1 (favorable) à ~450 000 Kn.m pour un Site 4 (critique) en Zone D, soit un facteur d'amplification d'environ 3,75. Ces sollicitations sont par ailleurs supérieures à celles observées pour le Type 1, indiquant un impact plus prononcé des conditions géotechniques et un comportement globalement plus critique, nécessitant un dimensionnement renforcé. Concernant le comportement directionnel Y, la distribution des moments est caractéristique : les moments maximaux se concentrent à la base de la structure et décroissent progressivement le long de sa hauteur, présentant des courbes régulières et un comportement prévisible. Cette concentration critique à la base nécessite une attention particulière lors du dimensionnement.

Ces observations ont des implications techniques importantes pour le respect de l'EC8. Le dimensionnement des structures en Type 2 exige des exigences renforcées, incluant un surdimensionnement, une augmentation significative des armatures (ferraillage adapté) et une ductilité accrue pour optimiser le comportement post-élastique. Parallèlement, l'impact déterminant de la classification des sols et des effets de site rend les études géotechniques approfondies absolument critiques pour une caractérisation précise et la prise en compte adéquate des phénomènes d'amplification liés à l'interaction sol-structure. Enfin, la conformité à l'EC8 implique l'application correcte des spectres de réponse élastiques renforcés spécifiques au Type 2, la prise en compte des facteurs d'importance de l'ouvrage et un dimensionnement basé sur l'approche performance pour atteindre les états limites requis. La sécurité structurale est primordiale, nécessitant une marge de sécurité adaptée via des coefficients appropriés au Type 2, garantissant la robustesse de la structure, sa capacité à redistribuer les efforts et une durabilité sismique pour une performance à long terme sous sollicitations répétées.



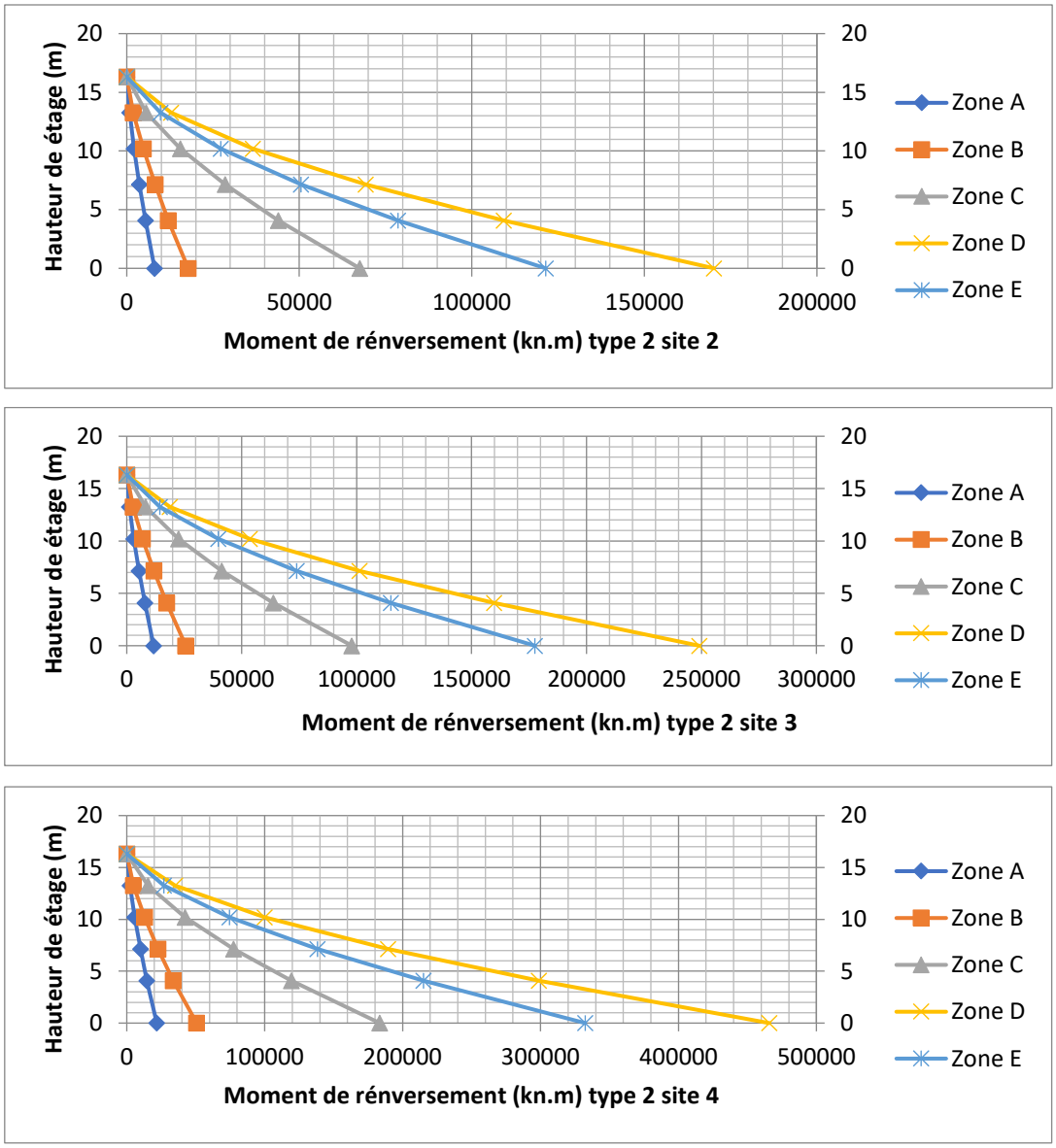


Figure 3.18 : Distribution des moments de renversement selon la hauteur, analyse modale spectrale EC8, direction Y

3.7.Conclusion :

L'analyse a démontré que, pour les trois codes, l'amplitude de la réponse sismique est fortement corrélée à l'intensité de la zone sismique et aux conditions de site, les sols défavorables induisant une amplification significative des sollicitations. La distribution verticale des efforts tranchants et des moments de renversement suit les profils typiques attendus par cette méthode (modale et en console).

Cependant, la comparaison a révélé des différences notables dans les magnitudes des résultats. L'Eurocode 8 a systématiquement généré des déplacements, efforts tranchants et moments de renversement calculés significativement supérieurs à ceux obtenus avec les RPA99'03 et RPA24 pour cette structure et ces paramètres. Le RPA24 introduit par ailleurs une zonation plus fine et des paramètres actualisés par rapport au RPA99'03, se manifestant dans une hiérarchie distincte des sollicitations.

En somme, cette étude comparative souligne les divergences existantes entre les spectres de conception et les approches paramétriques de ces codes. Elle réaffirme l'importance cruciale de l'application rigoureuse du code de calcul applicable, d'une caractérisation précise du site, et d'une vérification approfondie des résultats par rapport aux critères de sécurité (limitation des déplacements, résistance des éléments) spécifiques à chaque norme pour garantir un dimensionnement parasismique adéquat.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Au terme de cette étude consacrée à l'analyse parasismique d'un bâtiment bâtiment à ossature rigide conçu selon les prescriptions du Règlement Parasismique Algérien RPA 2024 avons pu analyser de manière approfondie l'impact des différentes réglementations et méthodes d'analyse sur l'évaluation de la réponse sismique de la structure. L'objectif de ce mémoire était de fournir une analyse comparative rigoureuse, confrontant le RPA 2024 à ses prédécesseurs algériens (notamment le RPA 99'03) et aux normes internationales de référence (Eurocode 8), en utilisant les méthodes statiques équivalente et dynamique par spectre de réponse.

Comme l'ont démontré les analyses détaillées présentées dans les chapitres 2 et 3, un constat majeur se dégage "la réponse sismique d’une structure dépend étroitement de l’aléa sismique local (zone, conditions de site) et des exigences normatives en vigueur"

. Les résultats issus des deux méthodes d'analyse (statique équivalente et spectre de réponse) ont convergé sur l'influence prépondérante des caractéristiques du site, les sols défavorables entraînant systématiquement une amplification significative des sollicitations sismiques, quel que soit le code utilisé.

La comparaison entre les différentes réglementations a révélé des divergences notables dans l'amplitude et la distribution verticale des efforts internes et des déplacements inter-étages. Il a été clairement observé que l'Eurocode 8 tend à générer des sollicitations calculées significativement plus élevées que les versions algériennes du RPA pour la structure étudiée et les paramètres considérés. Cette différence s'explique principalement par les spectres de conception et les approches paramétriques propres à chaque code, l'Eurocode 8 adoptant dans l'ensemble une approche plus conservative et potentiellement plus détaillée dans certains aspects.

Par ailleurs, l'étude a permis de mettre en lumière les évolutions introduites par le RPA 2024 par rapport au RPA 99'03. La nouvelle version du règlement algérien, intégrant une zonation plus fine et des paramètres actualisés, se traduit par une estimation des sollicitations généralement supérieure à celle donnée par le RPA 99'03, établissant ainsi une hiérarchie distincte dans les niveaux de contrainte parasismique entre les versions algériennes.

L'analyse a également réaffirmé l'importance de la méthode d'analyse choisie. Bien que la méthode statique équivalente (Chapitre 2) fournisse une estimation simplifiée, la méthode dynamique par spectre de réponse (Chapitre 3), plus complète, permet d'appréhender le comportement modal de la structure et de confirmer les tendances observées, tout en offrant

une vision plus fine de la distribution verticale des efforts, particulièrement en régime dynamique. L'importance d'une analyse bidirectionnelle, comme soulignée au Chapitre 2, est également essentielle pour capturer la complexité de la réponse structurale.

En synthèse, cette recherche a permis de :

Analyser l'impact des nouveautés du RPA 2024 sur l'étude d'un bâtiment à ossature rigide.

Quantifier les différences significatives dans l'estimation de la réponse sismique entre le RPA 2024, le RPA 99/2003 et l'Eurocode 8, pour les méthodes statiques équivalente et par spectre de réponse.

Confirmer l'influence prépondérante des conditions de site et du zonage sismique sur le dimensionnement parasismique.

Les résultats de cette étude soulignent l'importance cruciale, pour les ingénieurs concepteurs, d'une compréhension approfondie des spécificités de chaque code parasismique applicable, d'une caractérisation précise du site de construction, et d'une application rigoureuse des procédures de calcul et de vérification (limitation des déplacements, vérification des résistances) propres à chaque norme. Garantir un dimensionnement parasismique adéquat dans les zones à risque sismique élevé comme l'Algérie repose sur cette vigilance et cette maîtrise des outils normatifs.

Cette étude ouvre la voie à plusieurs perspectives de recherche :

- Élargir l'analyse comparative à d'autres types de structures porteuses (voiles porteurs, systèmes mixtes).
- Étudier l'impact des différents codes sur les exigences de ferraillage et les détails constructifs, au-delà des seules sollicitations calculées.
- Mener des analyses non-linéaires (type Push-over ou analyses dynamiques temporelles) pour évaluer plus finement la capacité et le comportement post-élastique de la structure selon les différents codes.
- Comparer les exigences relatives aux matériaux et à la qualité de l'exécution entre les règlements étudiés.

En conclusion, ce mémoire constitue une contribution à la compréhension des implications pratiques de l'application du nouveau Règlement Parasismique Algérien RPA 2024 et réaffirme la complexité et l'importance fondamentale de l'ingénierie parasismique pour la sécurité des constructions en zone sismique.

Références bibliographiques

[1] : Le Plan Séisme - Historique [archive] », Bureau de Recherches Géologiques et Minières (consulté le 14 octobre 2011)

[2] : En Algérie, le code parasismique utilisé pour les Bâtiments est le règlement parasismique algérienne RPA 99/v2003 « DTR BC 2-48». Ce code a été approuvé par la commission technique permanente (CTP) lors de sa réunion du 4 Décembre 1999.

[3] : Ministère de l'Habitat et de la Construction, Règles Parasismiques Algériennes RPA 88, Edition CGS, 1988.

[4] : Contributeurs aux projets Wikimedia. (2024, January 15). Séisme de 2003 à Boumerdès.

[5] : Belaid, T. (2024, septembre). La nouvelle réglementation parasismique 2024 renforce les exigences techniques. Radio algérienne.

[6] : Benali, A. (2024). La stratégie nationale de protection contre les catastrophes naturelles en Algérie. Ministère de l'Intérieur, des Collectivités locales et de l'Aménagement du territoire.

[7] : Calcul des structures pour leur résistance aux séismes. Partie 1 : Règles générales, actions sismiques et règles pour les bâtiments. AFORN : NF EN 1998-1, Mars Septembre 2005

[8] : Eurocode8-Conception et dimensionnement des structures pour leur résistance aux séismes et document d'application national, Décembre 2000, frence.

[9] : FEMA 450: NEHRP Recommended provisions and commentary for seismic regulations for new buildings and other structures. 2003 edition. Available

[10] : Calcul des structures pour leur résistance aux séismes. Partie 1 : Règles

Générales , actions sismiques et règles pour les bâtiments. AFORN : NF EN 1998-1, Mars Septembre 2005.

[11] : Eurocode 8 - Conception et dimensionnement des structures pour leur résistance aux séismes. (n.d.). Commission Européenne de Normalisation (CEN).

[12] : Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique. (2024). Règles parasismiques algériennes RPA 2024 (Document Technique Réglementaire D.T.R-BC 2.48). Ministère de l'Habitat, de l'Urbanisme et de la Ville.

[13] : Règlement parasismique pour la construction en Algérie. (2003). Ministère de l'Habitat, de l'Urbanisme et de la Ville.

[14] : Benali, A. (2020). Évaluation de la liquéfaction et stabilité des sols dans les régions sismiques en Algérie. Revue de génie civil, 30(4), 55-70.

[15] : Monfort, D., & Roullé, A. (2016). Estimation statistique de la répartition des classes de sol Eurocode 8 sur le territoire français – Phase 1 : Rapport final (Rapport BRGM/RP-66250-FR). BRGM

[16] : Eurocode 8. (2004). Règles générales pour la conception et le dimensionnement des structures pour leur résistance aux séismes. Commission Européenne de Normalisation (CEN).

[17] : Flavigny, E. (2014). Caractéristiques dynamiques des sols et reconnaissances. Comité Français de Mécanique des Sols et de Géotechnique (CFMS).

[18] : Lafond, A. (2022c, April 11). Les règles parasismiques de l'Eurocode 8 - Anco. Anco.

[19] : Kassoul, A. (2016). Chapitre 4 : Conception parasismique des bâtiments – Principes de base. Université Hassiba Benbouali de Chlef.

[20] : Lafond, A. (2022b, April 11). Les règles parasismiques de l'Eurocode 8 - Anco. Anco.

[21] : (2022). RPA 99 v 2003 4 - RPA. Université Mohammed-V de Rabat

[22] : ziane, S. (2023). Chapitre VI. Les règles parasismiques RPA 99 version 2003. Centre Universitaire Abd-Elhafid Boussouf – Mila.

[23] : BRGM. (2025). Earthquakes and vulnerable sites. Bureau de Recherches Géologiques et Minières. Retrieved from

[24] : Lafond, A. (2022d, April 11). Les règles parasismiques de l'Eurocode 8 - Anco.

[25] : Cerema. (2010). Application des Eurocodes – Recommandations pour l'Eurocode 8 : Calculs des structures pour leur résistance aux séismes (Note d'information du Sétra – Série Ouvrages d'art n° 32).

[26] : Namous, H., & Bouleghalegh, N. (2022). Étude paramétrique comparative de la conception et du dimensionnement parasismique d'une structure selon le règlement algérien RPA 2003 et l'Eurocode 8 [Mémoire de master, Université Abdelhafid Boussouf de Mila]

[27] : Eurocode 8 | Détermination de la classe de sol par méthode sismique | Innogeo. (2021, January 29).

[28]: Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique (CGS). (2003). Règlement Parasismique Algérien - RPA 99 version 2003. Ministère de l'Habitat et de l'Urbanisme

[29] : mbraseys, N. N., & Douglas, J. (2003). Near-field horizontal and vertical earthquake ground motions. Journal of Earthquake Engineering, 7(1), 1–45.

[30] : Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique (CGS). (2003). Règlement Parasismique Algérien RPA 99 - Version 2003. Ministère des Travaux Publics et de la Construction

[31] : K assoul, A., Kehli, A., Kelil, T., Kellouche, Y., Kenai, S., & Kessaissia, B. (2013). Comparaison des normes Eurocode 8 (EC8) et les règles parasismiques algériennes RPA99/V2003. Université Hassiba Ben Bouali de chlef

[32] : Comité National Algérien de Génie Parasismique (CGS). (2003). Règles Parasismiques Algériennes – RPA 99 version 2003. Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique (CGS), Alger.

[33] : Comité National Algérien de Génie Parasismique (CGS). (2003). Règles Parasismiques Algériennes – RPA 99/2003. Alger: Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique.

[34] : Benaissa, A. (2007). Application des Règles Parasismiques Algériennes RPA 99/2003 dans le dimensionnement des structures en béton armé. Mémoire de fin d'études, Université de Tizi-Ouzou.

[35] : A uteur(s) non spécifié(s). (année non spécifiée). Chapitre 7 : Règles générales d'analyse EC8 [PDF]. Université de Liège

[36] : Université d'Orléans. (2018). Règles générales de l'EC 8 pour l'analyse sismique des bâtiments

[37] : Eurocode 8 : Conception des structures pour leur résistance aux séismes Partie 1 : Règles générales, actions sismiques et règles pour les bâtiments. (2025). World Conference on

[37] : Tarek Data. (2003). RPA 99 - Réglementation parasismique appliquée aux bâtiments.

[38] : Wikipédia. (2025, mai 25). Construction parasismique.

[40] : Comité National Algérien de Génie Parasismique (CGS). (2003). Règles Parasismiques Algériennes – RPA 99/2003. Alger : Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique.

[41] : Kherfi, A. (2008). Étude du comportement des structures en béton armé selon les règles parasismiques algériennes RPA 99/2003. Mémoire de Master, Université de Boumerdès.

[42] : Fardis, M. N. (2009). Seismic Design of Concrete Buildings to Eurocode 8. CRC Press.

[43] : CEN (Comité Européen de Normalisation). (2005). Eurocode 8 : Calcul des structures pour leur résistance aux séismes – Partie 1 : Règles générales, actions sismiques et règles pour les bâtiments (EN 1998-1).

[44] : Youcef, Y. (2003). Méthode dynamique modale spectrale

[45] : Terrasol. (2020). Un critère conventionnel pour la justification de la portance sismique.

[**77**] :CEN. (2005). Eurocode 8 – Design of structures for earthquake resistance – Part 5: Foundations, retaining structures and geotechnical aspects (EN 1998-5). European Committee for Standardization

[46] : Youcef, Y. (2003). Méthode dynamique modale spectrale (RPA 99/2003). Université de Batna 2.

[47] : Comité Européen de Normalisation (CEN). (2004). Eurocode 8: Calcul des structures pour leur résistance aux séismes - Partie 1: Règles générales, actions sismiques et règles pour les bâtiments (EN 1998-1).

[48] : Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique (CGS). (2024). Règlement Parasismique Algérien – RPA 2024. Ministère de l'Habitat, de l'Urbanisme et de la Ville

[49] : Chopra, A. K. (2012). Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering (4th ed.). Prentice Hall.

[50] : Auteur inconnu. (s.d.). L’objectif de la méthode statique équivalente dans le cadre de la règle parasismique algérienne.

[51] : Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique (CGS). (2003). Règles parasismiques algériennes: RPA 99 - version 2003. Ministère de l’Habitat et de l’Urbanisme, Algérie.

[52] : Comité Européen de Normalisation (CEN). (2004). Eurocode 8: Conception des structures pour leur résistance aux séismes – Partie 1: Règles générales, actions sismiques et règles pour les bâtiments (EN 1998-1). Bruxelles, Belgique.

[53] : Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique (CGS). (2024). Règles parasismiques algériennes: RPA 2024. Ministère de l'Habitat, de l'Urbanisme et de la Ville, Algérie.

[5] : Chopra, A. K. (2017). Dynamics of structures: Theory and applications to earthquake engineering (5th ed.). Pearson Education.

[55] : Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique (CGS). (2003). Règles parasismiques algériennes: RPA 99 - version 2003. Ministère de l'Habitat et de l'Urbanisme, Algérie.

[56] : Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique (CGS). (2024). Règles parasismiques algériennes: RPA 2024. Ministère de l'Habitat, de l'Urbanisme et de la Ville, Algérie.

[57] : Comité Européen de Normalisation (CEN). (2004). Eurocode 8: Conception des structures pour leur résistance aux séismes – Partie 1: EN 1998-1. Bruxelles, Belgique