

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
المدرسة الوطنية العليا للأشغال العمومية
فرنسيس جانسون

École Nationale Supérieure des Travaux Publics
Francis Jeanson



Mémoire

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'État

Filière : Travaux Publics

Spécialité : Routes et Ouvrages

Thème

**Comparaison entre le comportement
sismique des structures conçues par
RPA2024 & RPA99/2003**

Présenté par :

DERRADJI Roumaïssa

MERABET Rania

Encadré par :

Dr.BENBOKHARI Abdellatif

Dr.LADJEL Mohamed

Promotion 2024 / 2025

Dédicace

Avant d'être un mémoire, ce travail est une histoire tissée de soutien, d'amour et de présence.

À ceux qui ont compté, à ceux qui ont cru en moi, je dédie ces pages.

À ma maman, pilier de ma vie. Pour tes sacrifices silencieux, ta patience sans fin et ton amour inépuisable. Tu as porté les deux rôles avec une force tranquille, sans jamais fléchir.

Tout ce que je suis, je te le dois.

À mon papa, qui n'est plus là, mais qui continue de vivre en moi, dans chacun de mes pas. Ce travail, je l'ai aussi fait pour toi. J'espère que, là où tu es, tu es fier de moi. Tu me manques à chaque étape.

À Manel, ma sœur, ma deuxième maman. Celle qui devine tout sans que je parle, qui me protège avec douceur, et m'entoure d'un amour constant. Merci d'être là, toujours.

À Badrou, mon frère, discret mais profondément présent. Ton calme, ta façon simple d'être là, sans bruit mais avec force, ont souvent été mon repère.

À Racha et Walid, ma belle-sœur et mon beau-frère de cœur. Vous êtes bien plus que de la famille par alliance. Merci pour votre tendresse, votre affection sincère, et ce sentiment d'être aimée, telle que je suis.

À Rania, ma binôme, ma meilleure amie. Ton amitié a été un phare, une main tendue, une présence essentielle. Merci d'avoir été là, du début à la fin.

À toute ma famille, pour leur confiance, leur amour discret ou exprimé, et pour avoir toujours cru en moi. Ce chemin, je l'ai parcouru avec vous dans le cœur.

Roumaissa

Dédicace

Je dédie ce travail, fruit de plusieurs années d'efforts et de persévérance, à ceux qui m'ont toujours soutenu, encouragé et inspiré.

À toi, ma chère maman LADAR Karima,

Ma source d'amour infini, de force et de tendresse. Rien de tout cela n'aurait été possible sans ton cœur immense, tes prières silencieuses et ton regard toujours bienveillant. Je te dois tout.

À mon père adoré MERABET Abdelkarim,

Pour ta patience, ton courage discret. Merci d'avoir été mon repère et mon exemple.

À mon frère Mohamed Amine et à son épouse Malak,

Pour votre présence constante, votre bienveillance et votre soutien tout au long de ce parcours.

À ma sœur Narimane et son époux Abdellatif,

Pour leur affection, leur présence rassurante et les encouragements qui ont souvent réchauffé mes journées difficiles.

À ma petite nièce Aseel,

Petit rayon de soleil qui apporte tant de joie dans nos vies. Tu es déjà une grande inspiration.

À ma meilleure amie et binôme Roumaïssa,

Pour ton amitié sincère, ton écoute, ta patience et tous ces moments partagés entre doutes et espoirs. Merci d'avoir été là, tout simplement.

Et à toute ma famille,

Merci pour l'amour, les encouragements, et les liens si précieux qui m'ont portée jusqu'ici. Cette réussite est aussi la vôtre.

Rania

Remerciements

*Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à Docteur **BENBOKHARI Abdellatif** et Docteur **LADJEL Mohamed**, nos encadrants, pour la qualité de leur accompagnement, la rigueur de leur suivi et la richesse de leurs conseils tout au long de ce travail.*

*Nous remercions également Monsieur **ZOURGUI Nadjib**, Chef de Département, pour son appui et ses orientations constructives.*

*Nos remerciements vont aussi aux **membres du jury**, pour l'honneur qu'ils nous font en évaluant ce travail et pour l'intérêt qu'ils lui ont porté.*

*Nous souhaitons également saluer **l'ensemble des enseignants et personnel** de l'ENSTP, ainsi que **Madame la Directrice**, pour leur engagement en faveur d'un enseignement d'excellence et d'un encadrement de qualité.*

À tous ceux qui ont contribué, directement ou indirectement, à l'aboutissement de cette thèse, nous témoignons notre profonde gratitude.

RESUME

L'Algérie, située au cœur d'une zone d'activité sismique intense, a connu au cours des dernières décennies plusieurs séismes dévastateurs, dont celui de Boumerdès en 2003, qui a mis en évidence les vulnérabilités structurelles de nombreuses constructions. Ces événements ont profondément marqué les pratiques de l'ingénierie civile et ont souligné l'impérieuse nécessité d'actualiser en permanence les outils réglementaires encadrant la conception parasismique des ouvrages.

Dans ce contexte, le Règlement Parasismique Algérien (RPA) a connu plusieurs évolutions depuis sa première parution. La version RPA 99/2003, élaborée en réaction au séisme de 2003, a longtemps constitué la référence nationale en matière de dimensionnement sismique. Toutefois, les progrès de la recherche scientifique, l'enrichissement des bases de données sismiques nationales, et l'intégration de nouvelles exigences normatives internationales ont conduit à l'élaboration d'une nouvelle version, le RPA 2024. Ce dernier introduit des modifications substantielles en matière de zonage sismique, de classification des sols, de modélisation tridimensionnelle et de coefficients d'importance, visant à renforcer la résilience des infrastructures face aux aléas naturels.

Ce mémoire s'inscrit dans une volonté d'analyse comparative approfondie entre ces deux versions du RPA, en évaluant leur impact respectif sur la performance sismique des structures. Pour cela, quatre types de systèmes structuraux ont été modélisés et analysés sur quatre types de sites représentatifs des sols algériens, selon les prescriptions de chaque version du règlement.

La méthodologie adoptée repose sur l'application de plusieurs outils d'analyse :

- Analyse PUSHOVER pour identifier les points de performance et les comportements post-élastiques ;
- Courbes de fragilité et matrices DPM pour quantifier les probabilités de dépassement d'états limites ;
- Analyse dynamique incrémentale (IDA) pour une approche plus réaliste de la demande sismique ;
- Et enfin, une évaluation économique des dommages pour estimer les coûts de réparation en fonction du type de structure, du sol et de la norme utilisée.

Ainsi, cette étude contribue à la réflexion sur l'adéquation des réglementations aux réalités sismiques du territoire national, et s'inscrit pleinement dans une démarche d'amélioration continue de la sécurité des ouvrages et de la protection des populations.

ABSTRACT

Algeria, located at the heart of an area of intense seismic activity, has experienced several devastating earthquakes over the past decades, including the 2003 Boumerdès earthquake, which revealed the structural vulnerabilities of many buildings. These events have had a profound impact on civil engineering practices and highlighted the urgent need for the continuous updating of regulatory tools governing seismic design.

In this context, the Algerian Seismic Code (RPA) has undergone several revisions since its initial publication. The RPA 99/2003 version, developed in response to the 2003 earthquake, served for a long time as the national reference for seismic design. However, advances in scientific research, the enrichment of national seismic databases, and the incorporation of new international normative requirements have led to the development of a new version: RPA 2024. This latest edition introduces substantial changes in seismic zoning, soil classification, three-dimensional modeling, and importance factors, aiming to enhance the resilience of infrastructure against natural hazards.

This thesis aims to conduct an in-depth comparative analysis between the two versions of the RPA, evaluating their respective impact on the seismic performance of structures. To this end, four types of structural systems were modeled and analyzed on four types of sites representative of Algerian soils, in accordance with the provisions of each version of the code.

The adopted methodology relies on the application of several analytical tools:

- PUSHOVER analysis to identify performance points and post-elastic behavior;
- Fragility curves and DPM matrices to quantify the probabilities of exceeding damage states;
- Incremental Dynamic Analysis (IDA) for a more realistic assessment of seismic demand;

And finally, an economic evaluation of damage to estimate repair costs based on the type of structure, soil, and applicable standard.

Thus, this study contributes to the ongoing discussion on the adequacy of seismic regulations with the seismic realities of the national territory, and is fully aligned with a continuous improvement approach to structural safety and population protection.

ملخص

تقع الجزائر في قلب منطقة ذات نشاط زلزالي مرتفع، وقد شهدت خلال العقود الماضية عدة زلازل مدمرة، من أبرزها زلزال بومرداس سنة 2003، الذي كشف عن هشاشة العديد من المنشآت. وقد شكلت هذه الأحداث نقطة تحول كبيرة في ممارسات الهندسة المدنية، وأبرزت الحاجة الملحة إلى تحديث دائم للأدوات التنظيمية التي توطر تصميم المنشآت لمقاومة الزلازل.

وفي هذا الإطار، عرف المدونة الباراسيزمية الجزائرية (RPA) عدة تطورات منذ صدورها الأول. فقد مثّلت نسخة RPA 99/2003، التي وُضعت عقب زلزال سنة 2003، المرجع الوطني الأساسي في مجال التصميم الزلزالي لسنوات طويلة. غير أن التقدم في البحث العلمي، وتوسيع قواعد البيانات الزلزالية الوطنية، إلى جانب اعتماد معايير تنظيمية دولية جديدة، أدى إلى صياغة نسخة جديدة وهي RPA 2024. وقد جاءت هذه الأخيرة بإصلاحات جوهرية شملت إعادة تقسيم المناطق الزلزالية، وتصنيف التربة، والنمذجة ثلاثية الأبعاد، وتحديد معاملات الأهمية للمنشآت، بهدف تعزيز قدرة البنية التحتية على الصمود أمام المخاطر الطبيعية.

يندرج هذا البحث ضمن مقاربة تحليلية مقارنة بين النسختين RPA 2003 و RPA 2024، بهدف تقييم تأثير كل منهما على الأداء الزلزالي للمنشآت. لتحقيق ذلك، تم نمذجة وتحليل أربعة أنواع من الأنظمة الإنشائية على أربعة أنواع من المواقع الجيوتقنية التي تمثّل التربة الجزائرية، وذلك وفقاً لمتطلبات كل نسخة من المدونة.

تعتمد المنهجية المتبعة على تطبيق مجموعة من أدوات التحليل، أهمها:

- التحليل الاستاتيكي غير الخطي (Pushover) لتحديد نقاط الأداء وسلوك ما بعد المرونة؛
 - منحنيات الهشاشة ومصفوفات احتمالية الضرر (DPM) لتقدير احتمالات تجاوز حدود الضرر؛
 - التحليل الديناميكي التزايدي (IDA) للحصول على رؤية أكثر واقعية لحجم الطلب الزلزالي؛
 - وأخيراً، تقييم اقتصادي للأضرار لتقدير تكاليف الإصلاح حسب نوع النظام والتربة والمدونة المعتمدة.
- وبالتالي، فإن هذا العمل يُسهم في إثراء النقاش حول مدى ملائمة اللوائح التنظيمية للواقع الزلزالي في الجزائر، ويُعد جزءاً من مسار البحث المستمر نحو تحسين سلامة المنشآت وحماية الأرواح والممتلكات.

SOMMAIRE

INTRODCUTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I : Recherche bibliographique.....	2
I.1. Introduction.....	2
I.2. Présentation du Règlement Parasismique Algérien	3
I.2.1. Le Règlement Parasismique Algérien 2003	3
I.2.2. Le Règlement Parasismique Algérien 2024.....	3
I.3. Critère de classification.....	4
I.3.1. Classification des zones sismiques	4
I.3.2. Classification des sites	5
I.3.3. Classification des bâtiments selon leur importance	9
I.3.4. Spectre de réponse	10
I.4. Analyse des différences spectrales entre les RPA 2003 et 2024 pour chaque système de contreventement	15
I.4.1. Système à ossature	16
I.4.2. Système à contreventement mixte, équivalent à une ossature	17
I.4.3. Système à contreventement mixte, équivalent à des voiles	19
I.4.4. Système de contreventement constitué par des voiles	20
I.5. Les combinaisons d'actions sismiques :	23
I.5.1. RPA 2003: une approche simplifiée	23
I.5.2. RPA 2024 : une modélisation tridimensionnelle	23
I.6. Importance de l'analyse non linéaire dans l'évaluation sismique des structures.....	25
I.7. Analyse statique non linéaire (Analyse PUSHOVER)	26
I.7.1. Définition de l'analyse PUSHOVER	26
I.7.2. Les limites de l'analyse PUSHOVER.....	27
I.7.3. Etat de l'art.....	29
I.7.4. Contexte Théorique de l'Analyse PUSHOVER Conventionnelle	33
I.7.5. Concepts Fondamentaux de l'Analyse Pushover	35
I.8. Matrices de Probabilité de Dommages (DPM)	36
I.8.1. Méthodes basées sur le spectre de capacité	37
I.9. Courbes de fragilité.....	40

I.9.1. Régression logistique	40
I.9.2. Fonction LOSS : Ratio de dommages.....	43
I.10. La méthode RISK-UE.....	44
I.10.1. Méthode LM-1	45
I.10.2. Méthode LM-2	48
I.11. Analyse dynamique temporelle non linéaire.....	49
I.11.1. Définition de l'analyse temporelle non linéaire.....	49
I.11.2. Comparaison entre l'analyse linéaire et l'analyse non linéaire.....	50
I.11.3. Avantages de l'analyse dynamique temporelle non linéaire.....	53
I.11.4. Méthodes de résolution des équations de mouvement.....	53
I.11.5. Algorithmes itératifs pour la résolution des équilibres dynamiques.....	54
I.11.6. Modèles d'amortissement	54
I.11.7. Modélisation des phénomènes hystérétiques	55
I.11.8. Solutions numériques pour un problème non linéaire	57
I.11.9. Utilisation des NTHA pour l'évaluation de la fragilité des structures.....	59
CHAPITRE II : Conception des cas d'étude.....	67
II.1. Introduction	68
II.2. Caractéristiques des structures modélisées.....	68
II.2.1. Typologie des systèmes de contreventement.....	69
II.2.2. Configuration géométrique.....	69
II.2.3. Répartition sur les sites.....	70
II.3. Hypothèses de modelisation	70
II.3.1. Comportement mécanique des matériaux.....	70
II.3.2. Charges structurales appliquées.....	71
II.3.3. Combinaisons réglementaires appliquées (RPA 2003 vs RPA 2024).....	71
II.4. Note de calcul	71
II.4.1. Prédimensionnement des éléments structuraux	72
II.5. Récapitulatif des caractéristiques des éléments structuraux.....	76
II.6. Justification de la sécurité.....	77
II.6.1. Répartition de l'effort tranchant entre éléments porteurs	78
II.6.2. Justification vis-à-vis de l'équilibre d'ensemble	78
II.6.3. Justification vis-à-vis de l'effet P- Δ	79

II.6.4. Justification vis-à-vis des déplacements inter-étages	80
II.6.5. Vérification de l'effort normal réduit	81
II.6.6. Vérification de l'effort tranchant à la base	81
II.7. Récapitulatif du ferrailage adopté.....	83
CHAPITRE III : Analyse pushover	90
III.1. Introduction	91
III.2. Résultats des courbes PUSHOVER idéalisé – SITE 01-.....	92
III.3. Interprétation des courbes pushover idéalisées -SITE 01-	94
III.4. Résultats des courbes PUSHOVER idéalisé – SITE 02-.....	95
III.5. Interprétation des courbes pushover idéalisées -SITE 02-	97
III.6. Résultats des courbes PUSHOVER idéalisé – SITE 03-.....	98
III.7. Interprétation des courbes pushover idéalisées -SITE 03-	100
III.8. Résultats des courbes PUSHOVER idéalisé –SITE 04-.....	101
III.9. Interprétation des courbes pushover idéalisées -SITE 04-	103
III.10. Effets des spectres RPA sur les déplacements spectraux selon le type de conception et le site.....	104
III.10.1. Résultats des points de performance pour les structures conçues par le RPA 2003 :.....	104
III.11. CONCLUSION	106
CHAPITRE IV : VULNERABILITE SISMIQUE – COURBE DE FRAGILITE – DPM – CALCUL DE COUT.....	107
IV.1. introduction	108
IV.2. Visualisation comparative des courbes de fragilité pour les systèmes structurels selon les normes RPA	109
IV.2.1. SITE 01	109
IV.2.2. SITE 02	111
IV.2.3. SITE 03	113
IV.2.4. SITE 04	115
IV.3. Interprétation comparative des courbes de fragilité : influence du type de système et du règlement parasismique.....	117

IV.3.1. SITE 01	117
IV.3.2. SITE 02	118
IV.3.3. SITE 03	120
IV.3.4. SITE 04	121
IV.4. Comparaison des performances sismiques selon le type de sol : influence des conditions de site sur la fragilité des structures.....	122
IV.4.1. Système à ossature	123
IV.4.2. Système mixte équivalent à une ossature.....	123
IV.4.3. Système mixte équivalent à des voiles.....	124
IV.4.4. Système contreventé par des voiles	124
IV.5. Évaluation des effets de site sur les dommages structurels attendus	125
IV.5.1. Système à ossature:	125
IV.5.2. Système mixte équivalent à une ossature :.....	126
IV.5.3. Système mixte équivalent à des voiles :.....	128
IV.5.4. Système contreventé par des voiles :	129
IV.6. Évaluation économique des dommages sismiques : calcul du coût de réparation selon les règlements RPA 2003 et RPA 2024	130
IV.6.1. Méthodologie de calcul	130
IV.6.2. Répartition détaillée des volumes de béton, d'acier et des coûts de réparation selon les sites, les systèmes structurels et les versions RPA (2003 vs 2024).....	131
IV.6.3. Interprétation technique et économique des résultats – Comparaison RPA 2003 vs RPA 2024.....	132
IV.7. Conclusion :	134
CHAPITRE V : Analyse incrémentale.....	135
V.1. introduction	136
V.2. Paramètres dynamiques issus de l'analyse incrémentale pour les structures étudiées sur les sites S1 à S4 selon le RPA (2003-2024)	137
V.3. Résultats d'ida comparatifs -système A OSSATURE-	138
V.3.1. Demande en ductilité.....	138
V.3.2. Déplacement.....	139
V.3.3. Indice de dommage.....	140
V.4. Résultats comparatifs -système mixte équivalent à une ossature –.....	141
V.4.1. Demande en ductilité.....	141

V.4.2. Déplacement.....	142
V.4.3. Indice de dommage.....	143
V.5. Résultats comparatifs -système mixte équivalent à des voiles-	144
V.5.1. Demande en ductilité.....	144
V.5.2. Déplacement.....	145
V.5.3. Indice de dommage.....	146
V.6. Résultats comparatifs -système contreventé par des voiles.....	146
V.6.1. Demande en ductilité.....	147
V.6.2. Déplacement.....	148
V.6.3. Indice de dommage.....	149
V.7. Conclusion :.....	149
Conclusion générale	151
ANNEXES	154
ANNEXE A : Modélisations des systèmes de contreventement étudiés	155
ANNEXE B : Justification de sécurité	159
ANNEXE C : Paramètres de calcul de l'effort sismique	170
bibliographie.....	174

LISTE DES FIGURES

Figure I-1 : Spectre de réponse S_{ae}	12
Figure I-2 : Spectres de réponse du système à ossature selon les RPA 2003 et 2024 pour les quatre types de site	16
Figure I-3 : Spectres de réponse du système à contreventement mixte, équivalent à une ossature selon les RPA 2003 et 2024 pour les quatre types de site.....	17
Figure I-4 : Spectres de réponse du système à contreventement mixte, équivalent à des voiles selon les RPA 2003 et 2024 pour les quatre types de site	19
Figure I-5 : Spectres de réponse du système contreventé par des voiles selon les RPA 2003 et 2024 pour les quatre types de site	20
Figure I-6 : Étapes de l'analyse de la réponse spectrale [3].	26
Figure I-7 : La non-linéarité des matériaux et la non-linéarité géométrique en analyse structurelle	27
Figure I-8 : Réponse statique multi-linéaire et bilinéaire de la force de base en fonction du déplacement du toit pour une structure MDOF	34
Figure I-9 : Répartition conventionnelle des forces latérales selon un schéma triangulaire inversé et un schéma uniforme.....	35
Figure I-10 : Estimation de l'état de dommage selon la méthodologie HAZUS	38
Figure I-11 : La régression linéaire et logistique	40
Figure I-12 : La procédure logistique pour développer une courbe de fragilité.....	42
Figure I-13 : Procédure de régression logistique appliquée à l'IDA	43
Figure II-9 : Dommage moyen selon l'intensité sismique et la vulnérabilité	47
Figure I-15 : Typologie des bâtiments selon la matrice RISK-UE BTM.....	49
Figure I-16 : Détermination du point de performance	49
Figure I-17 : Les courbes de fragilité	49
Figure I-18 : Modèle de Bouc-Wen	55
Figure I-19 : Modèle de Takeda	56
Figure I-20 : Modèle de Clough-Penzien	56
Figure I-21 : Nombre de mouvements du sol nécessaires pour une prédiction stable de la capacité médiane de ruine	62
Figure I-22 : Les étapes de l'analyse dynamique incrémentale (IDA) avec échelle des mouvements du sol.....	63
Figure I-24 : Génération des courbes IDA en utilisant l'interpolation spline cubique	64
Figure I-23 : Analyse dynamique incrémentale utilisant l'échelle des mouvements du sol	64
Figure I-25 : L'interpolation de la réponse et de la performance d'un bâtiment à partir d'une courbe IDA.....	65
Figure I-26 : Courbes d'analyse dynamique incrémentale utilisant différentes sollicitations sismiques et dérivation de la courbe médiane	65

Figure I-27 : La dégradation de la résistance et de la raideur	66
Figure II-1 : Les dimensions à respecter pour les poutres.....	72
Figure II-2 : Coffrage des poteaux	73
Figure II-3 : Coupe de voile en plan	74
Figure II-4 : Spécifications pour les nœuds poteaux-poutres.....	75
Figure II-5 : Épaisseur minimum en fonction des différentes configurations.....	75
Figure III-1 : Courbe pushover réelle (C.P) et courbe pushover idéalisée (C.I) du système à ossature sur le site S1 selon les RPA 2003 et RPA 2024.....	92
Figure III-2 : Courbe pushover réelle (C.P) et courbe pushover idéalisée (C.I) du système mixte équivalent à une ossature sur le site S1 selon les RPA 2003 et RPA 2024.....	92
Figure III-3 : Courbe pushover réelle (C.P) et courbe pushover idéalisée (C.I) du système mixte équivalent à des voiles sur le site S1 selon les RPA 2003 et RPA 2024.....	93
Figure III-4 : Courbe pushover réelle (C.P) et courbe pushover idéalisée (C.I) du Système contreventé par des voiles sur le site S1 selon les RPA 2003 et RPA 2024	93
Figure III-5 : Courbe pushover réelle (C.P) et courbe pushover idéalisée (C.I) du système à ossature sur le site S2 selon les RPA 2003 et RPA 2024.....	95
Figure III-6 : Courbe pushover réelle (C.P) et courbe pushover idéalisée (C.I) du système mixte équivalent à une ossature sur le site S2 selon les RPA 2003 et RPA 2024.....	95
Figure III-7 : Courbe pushover réelle (C.P) et courbe pushover idéalisée (C.I) du système mixte équivalent à des voiles sur le site S2 selon les RPA 2003 et RPA 2024.....	96
Figure III-8 : Courbe pushover réelle (C.P) et courbe pushover idéalisée (C.I) du Système contreventé par des voiles sur le site S2 selon les RPA 2003 et RPA 2024	96
Figure III-9 : Courbe pushover réelle (C.P) et courbe pushover idéalisée (C.I) du système à ossature sur le site S3 selon les RPA 2003 et RPA 2024	98
Figure III-10 : Courbe pushover réelle (C.P) et courbe pushover idéalisée (C.I) du système mixte équivalent à une ossature sur le site S3 selon les RPA 2003 et RPA 2024.....	98
Figure III-11 : Courbe pushover réelle (C.P) et courbe pushover idéalisée (C.I) du système mixte équivalent à des voiles sur le site S3 selon les RPA 2003 et RPA 2024.....	99
Figure III-12 : Courbe pushover réelle (C.P) et courbe pushover idéalisée (C.I) du Système contreventé par des voiles sur le site S3 selon les RPA 2003 et RPA 2024	99
Figure III-13 : Courbe pushover réelle (C.P) et courbe pushover idéalisée (C.I) du système à ossature sur le site S4 selon les RPA 2003 et RPA 2024.....	101
Figure III-14 : Courbe pushover réelle (C.P) et courbe pushover idéalisée (C.I) du système mixte équivalent à une ossature sur le site S4 selon les RPA 2003 et RPA 2024.....	101
Figure III-15 : Courbe pushover réelle (C.P) et courbe pushover idéalisée (C.I) du système mixte équivalent à des voiles sur le site S4 selon les RPA 2003 et RPA 2024.....	102
Figure III-16 : Courbe pushover réelle (C.P) et courbe pushover idéalisée (C.I) du Système contreventé par des voiles sur le site S4 selon les RPA 2003 et RPA 2024	102
Figure IV-1 : Les courbes de fragilité pour le système à ossature -S1-	109
Figure IV-2 : Les courbes de fragilité pour le système mixte équivalent à une ossature -S1-	109

Figure IV-3 : Les courbes de fragilité pour le système mixte équivalent à des voiles -S1-...	110
Figure IV-4 : Les courbes de fragilité pour le système contreventé par des voiles -S1-.....	110
Figure IV-5 : Les courbe de fragilité pour le système à ossature -S2-	111
Figure IV-6 : Les courbes de fragilité pour le système mixte équivalent à une ossature -S2-	111
Figure IV-7 : Les courbes de fragilité pour le système mixte équivalent à des voiles -S2-...	112
Figure IV-8 : Les courbes de fragilité pour le système contreventé par des voiles -S2-.....	112
Figure IV-9 : Les courbe de fragilité pour le système à ossature -S3-	113
Figure IV-10 : Les courbes de fragilité pour le système mixte équivalent à une ossature -S3-	113
Figure IV-11 : Les courbes de fragilité pour le système mixte équivalent à des voiles -S3-.	114
Figure IV-12 : Les courbes de fragilité pour le système contreventé par des voiles -S3-	114
Figure IV-13 : Les courbe de fragilité pour le système à ossature -S4-	115
Figure IV-14 : Les courbes de fragilité pour le système mixte équivalent à une ossature -S4-	115
Figure IV-15 : Les courbes de fragilité pour le système mixte équivalent à des voiles -S4-.	116
Figure IV-16 : Les courbes de fragilité pour le système contreventé par des voiles -S4-	116
Figure IV-17 : Probabilités de dépassement des états de dommage du système à ossature pour les sites S1 à S4 selon les versions RPA 2003 et RPA 2024	123
Figure IV-18 : Probabilités de dépassement des états de dommage du système mixte équivalent à une ossature pour les sites S1 à S4 selon les versions RPA 2003 et RPA 2024	123
Figure IV-19 : : Probabilités de dépassement des états de dommage du système mixte équivalent à des voiles pour les sites S1 à S4 selon les versions RPA 2003 et RPA 2024....	124
Figure IV-20 : : Probabilités de dépassement des états de dommage du système contreventé par des voiles pour les sites S1 à S4 selon les versions RPA 2003 et RPA 2024	124
Figure V-1 : La demande en ductilité pour le système à ossature.....	138
Figure V-2 : Déplacement pour le système à ossature	139
Figure V-3 : indice de dommage pour le système à ossature	140
Figure V-4 : La demande en ductilité pour système mixte équivalent à une ossature	141
Figure V-5: Déplacement pour le système mixte équivalent à une ossature	142
Figure V-6 : indice de dommage pour le système mixte équivalent à une ossature	143
Figure V-7 : La demande en ductilité pour système mixte équivalent à des voiles	144
Figure V-8 : Déplacement pour le système mixte équivalent à des voiles	145
Figure V-9 : indice de dommage pour le système mixte équivalent à des voiles	146
Figure V-10 : La demande en ductilité pour système contreventé par des voiles.....	147
Figure V-11 : Déplacement pour le système contreventé par des voiles	148
Figure V-12 : Indice de dommage pour le système contreventé par des voiles.....	149

Annexe A-1 : Vue en plan – Ossature simple.	155
Annexe A-2 : Vue tridimensionnelle – Ossature simple.	155
Annexe A-3 : Vue tridimensionnelle – Système mixte équivalent à une ossature.....	156
Annexe A-4 : Vue en plan – Système mixte équivalent à une ossature.....	156
Annexe A-5 : Vue tridimensionnelle – Système mixte équivalent à des voiles.....	157
Annexe A-6 : Vue en plan – Système mixte équivalent à des voiles.....	157
Annexe A- 7 : Vue tridimensionnelle – Système contreventé par des voiles.	158
Annexe A-8 : Vue en plan – Système contreventé par des voiles.....	158

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I-1 : Zones sismique -RPA2003- [1]	4
Tableau I-2 : Zones sismique-RPA2024- et coefficient d'accélération de zone au rocher, A. [2]	4
Tableau I-3 : Classification des sites -RPA2003-	5
Tableau I-4 : Classification des sites -RPA2024-	7
Tableau I-5 : Classification des bâtiments selon leur importance [2]	10
Tableau I-6 : Valeurs des paramètres décrivant les spectres de réponse élastique vertical de type1	13
Tableau I-7 : Valeurs des paramètres décrivant les spectres de réponse élastique vertical de type2	13
Tableau I-8 : Pondérations des coûts de réparation adoptées par la méthodologie HAZUS ...	39
Tableau I-9 : Équations des courbes de fragilité	41
Tableau I-10 : Comparaison entre l'analyse linéaire et l'analyse non linéaire des structures .	52
Tableau II-1 : Caractéristiques géométriques des structures modélisées	70
Tableau II-2 : Valeurs des charges structurales appliquées	71
Tableau II-3 : Tableau récapitulatif des caractéristiques dimensionnelles – Système à ossature	76
Tableau II-4 : Tableau récapitulatif des caractéristiques dimensionnelles – Système à contreventement mixte équivalent à une ossature.....	76
Tableau II-5 : Tableau récapitulatif des caractéristiques dimensionnelles – Système à contreventement mixte équivalent à des voiles.....	77
Tableau II-6 : Tableau récapitulatif des caractéristiques dimensionnelles – Système à contreventement constitué par des voiles	77
Tableau II-7 : Valeurs limites des déplacements inter-étages.....	80
Tableau II-8 : Ferrailage adopté pour le système à ossature – RPA 2003	84
Tableau II-9 : Ferrailage adopté pour le système à ossature – RPA 2024	84
Tableau II-10 : Ferrailage adopté pour le système mixte équivalent à une ossature – RPA 2003	85
Tableau II-11 : Ferrailage adopté pour le système mixte équivalent à une ossature – RPA 2024	85
Tableau II-12 : Ferrailage adopté pour le système mixte équivalent à des voiles – RPA 2003	86
Tableau II-13 : Ferrailage adopté pour le système mixte équivalent à des voiles – RPA 2024	87
Tableau II-14 : Ferrailage adopté pour le système à voiles – RPA 2003.....	87
Tableau II-15 : Ferrailage adopté pour le système à voiles – RPA 2003 (suite)	88
Tableau II-16 : Ferrailage adopté pour le système à voiles – RPA 2024.....	88

Tableau II-17 : Ferrailage adopté pour le système à voiles – RPA 2024 (suite)	89
Tableau III-1 : Les points de performance pour les structures conçues par le RPA 2003	104

Annexe B-1 : Répartition de l'effort tranchant entre éléments porteurs	159
Annexe B-2 : Vérification de la stabilité au renversement	160
Annexe B-3 : Vérification de l'effet $P-\Delta$ – Système à ossature	162
Annexe B-4 : Vérification de l'effet $P-\Delta$ – Système à contreventement mixte équivalent à une ossature.....	162
Annexe B-5 : Vérification de l'effet $P-\Delta$ – Système à contreventement mixte équivalent à des voiles	163
Annexe B-6 : Vérification de l'effet $P-\Delta$ – Système de contreventement constitué par des voiles	163
Annexe B-7 : Vérification des déplacements inter-étages – Système à ossature.....	164
Annexe B-8 : Vérification des déplacements inter-étages – Système à contreventement mixte équivalent à une ossature.....	165
Annexe B-9 : Vérification des déplacements inter-étages – Système à contreventement mixte équivalent à des voiles.....	165
Annexe B- 10 : Vérification des déplacements inter-étages – Système de contreventement constitué par des voiles	166
Annexe B-11 : Vérification de l'effort normal réduit	167
Annexe B-12 : Vérification de l'effort tranchant à la base	168

Annexe C-1 : coefficient d'accélération de zone A -RPA 2003-	170
Annexe C-2 : Valeurs du coefficient de comportement, R, pour les structures en béton armé - RPA2003	170
Annexe C-3 : Valeurs de ξ (%) -RPA 2003-	171
Annexe C-4 : Valeurs des Pondérations P_q -RPA 2003-	171
Annexe C-5 : Valeurs de T_1 et T_2	171
Annexe C-6 : Valeurs du coefficient de comportement, R, pour les structures en béton armé - RPA2024	172
Annexe C-7 : Valeurs des Pondérations P_q -RPA 2024-	172
Annexe C-8 : Valeurs des paramètres décrivant les spectres de réponse élastique de type 1 (Zones IV, V et VI)	173
Annexe C-9 : Valeurs des paramètres décrivant les spectres de réponse élastique de type 2 (Zones I,	173
Annexe C-10 : Valeurs de ξ (%) -RPA 2024-	173

LISTE DES ABBREVIATION

- **C.I** Courbe idéalisée
- **C.P** Courbe pushover
- **CQC** Complete Quadratic Combination
- **DPM** Damage Probability Matrix
- **Du** Déplacement ultime
- **Dy** Déplacement élastique
- **EMS-98** European Macroseismic Scale (1998)
- **FEMA** Federal Emergency Management Agency
- **Gdr** Global damage ratio
- **IDA** Incremental Dynamic Analysis
- **LDP** Analyse dynamique linéaire
- **LM1** Level Method 1
- **LM2** Level Method 2
- **MDOF** Multi Degree of Freedom system
- **MPA** Analyse pushover modale
- **MRF** Moment Resisting Frame
- **NGA** Next Generation Attenuation
- **NIBS** National Institute of Building Science
- **NSP** La méthode d'analyse statique non linéaire
- **NTHA** Nonlinear Time History Analysis
- **PESH** Potential Earth Science Hazards
- **PGA** Peak Ground Acceleration
- **RISK-UE** Réseau de recherche européen pour l'évaluation du risque sismique urbain
- **RPA** Règlement Parasismique Algérien
- **Sa** Accélération spectrale
- **Sd** Déplacement spectral
- **SDOF** Systèmes équivalents à un seul degré de liberté
- **SMRF** Special Moment Resisting Frame

INTRODUCTION

GENERALE

INTRODCUTION GENERALE

La vulnérabilité sismique des constructions en Algérie demeure une préoccupation majeure dans le domaine du génie civil. Ce constat ne relève pas uniquement des statistiques ou des archives des tremblements de terre, mais s'impose concrètement dans la pratique professionnelle, dans la conception des ouvrages neufs comme dans l'évaluation du bâti existant. Malgré l'existence d'un règlement parasismique depuis plusieurs décennies, les événements récents ont rappelé que la mise en œuvre des prescriptions réglementaires reste un enjeu complexe, tant sur le plan technique qu'opérationnel.

Plus qu'un simple référentiel, un règlement parasismique reflète un compromis entre le savoir scientifique, les réalités du sol national, les capacités industrielles, et les exigences de sécurité. L'entrée en vigueur du RPA 2024, après plus de vingt ans d'application de la version 2003, ne constitue donc pas une simple mise à jour technique, mais une tentative de refondation des principes sur lesquels repose la conception parasismique en Algérie. Cette évolution réglementaire intervient dans un contexte où la pression sur les milieux bâtis s'intensifie, où les contraintes économiques sont fortes, et où l'anticipation des risques devient un impératif.

S'intéresser aujourd'hui à l'impact réel d'un changement de réglementation ne relève pas d'un exercice purement académique. C'est une démarche nécessaire pour comprendre comment les choix normatifs influencent la sécurité, la durabilité, et le coût des structures. C'est aussi une manière de tester la robustesse des modèles actuels face aux réalités du terrain, et d'interroger la capacité des nouvelles prescriptions à répondre aux besoins de protection des biens et des personnes.

Ce travail s'inscrit dans cette volonté d'analyse critique. Il propose une lecture technique et appliquée des changements introduits par le RPA 2024, à travers des cas concrets de conception structurelle. Il ne s'agit pas de comparer des textes, mais d'observer comment une nouvelle approche réglementaire peut, ou non, modifier les logiques de dimensionnement et les résultats obtenus sur des projets réels ou représentatifs.

CHAPITRE I :

RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. Introduction

Le territoire algérien, caractérisé par un aléa sismique élevé sur sa bande nord, a connu au cours de son histoire plusieurs séismes destructeurs ayant engendré des pertes humaines et matérielles significatives. Ces événements ont mis en évidence la nécessité cruciale de mettre en place des réglementations strictes pour la conception parasismique des structures, en vue de renforcer la sécurité du bâti et de limiter les dégâts futurs. Dans ce contexte, le Règlement Parasismique Algérien (RPA) a été élaboré, puis mis à jour à plusieurs reprises, afin de refléter l'évolution des connaissances scientifiques, des données sismologiques, ainsi que des techniques de calcul et de construction. Le RPA 2003, conçu à la suite du séisme de Boumerdès de mai 2003, a constitué pendant près de deux décennies la référence nationale en matière de conception sismique. Toutefois, l'apparition de nouvelles données et l'évolution des exigences normatives internationales ont motivé l'introduction d'une nouvelle version, plus complète et actualisée : le RPA 2024.

Cette révision vise à intégrer les dernières avancées scientifiques et techniques en matière de génie parasismique, notamment en ce qui concerne l'utilisation des matériaux, les méthodes d'analyse, et la prise en compte du comportement réel des structures en cas de séisme. Les retours d'expérience récents ont en effet souligné les limites des approches simplifiées adoptées dans les anciens codes, telles que l'analyse statique équivalente ou l'analyse modale spectrale. Bien que largement utilisées, ces méthodes présentent des lacunes notables, notamment lorsqu'une structure dépasse son domaine élastique, adoptant un comportement non linéaire difficile à appréhender avec des modèles linéaires classiques. En effet, lors de séismes de forte intensité, les structures subissent des déformations importantes, provoquant la plastification des zones critiques et la redistribution des efforts internes. Le dimensionnement devient alors plus sensible aux déplacements qu'aux efforts, et la ruine structurelle est souvent liée au dépassement d'une limite de déformation plutôt qu'à une contrainte. Cela remet en cause la suffisance des analyses linéaires et souligne la nécessité de recourir à des méthodes plus représentatives, comme l'analyse temporelle non linéaire.

Cependant, en pratique, cette dernière reste difficilement applicable à l'échelle des bureaux d'études à cause de sa complexité et du manque de données d'entrée fiables. Face à ces limitations, une nouvelle approche a vu le jour : la méthode spectrale non itérative, fondée sur une logique de dimensionnement par déplacement. Elle repose sur la définition préalable d'un

déplacement cible, combinant l'analyse statique non linéaire (Pushover) et la réponse spectrale inélastique simplifiée, dans un format innovant dit accélérations-déplacements. Cette méthode vise à fournir une meilleure évaluation de la performance sismique des structures, tout en restant plus accessible et pratique que les analyses temporelles complètes. Ainsi, ce travail s'inscrit dans une perspective comparative entre le RPA 2003 et le RPA 2024, en analysant leurs évolutions majeures, les améliorations introduites, et leurs implications concrètes sur le dimensionnement des structures en zone sismique.

I.2. PRESENTATION DU REGLEMENT PARASISMIQUE ALGERIEN

I.2.1. Le Règlement Parasismique Algérien 2003

Le Règlement Parasismique Algérien 2003 (RPA 2003) est un document technique réglementaire qui définit l'ensemble des dispositions et exigences à respecter pour la conception, le calcul et la réalisation des bâtiments et ouvrages de génie civil en Algérie afin d'assurer leur résistance aux sollicitations sismiques. Ce règlement établit les méthodes d'analyse structurale, les coefficients de comportement dynamique, les critères de dimensionnement et les détails constructifs nécessaires pour garantir un niveau acceptable de protection parasismique des constructions en fonction des zones de sismicité du territoire algérien.

Le RPA 2003 constitue une révision et un perfectionnement des versions antérieures, intégrant les enseignements tirés des séismes historiques et récents ayant affecté le pays. Il classe les structures selon leur importance, définit les spectres de réponse en fonction des caractéristiques du sol et des zones sismiques, et prescrit les dispositions spécifiques pour différents systèmes constructifs (béton armé, maçonnerie, acier, etc.).

I.2.2. Le Règlement Parasismique Algérien 2024

Le Règlement Parasismique Algérien 2024 (RPA 2024) constitue une mise à jour majeure du RPA 2003, intégrant les avancées les plus récentes en ingénierie parasismique. Ce nouveau texte vise à corriger les insuffisances de l'ancienne version, à s'aligner sur les normes internationales, et à mieux prendre en compte les spécificités du contexte sismique algérien.

Le RPA 2024 s'appuie sur une base de données sismologiques élargie, incluant les enregistrements accélérométriques récents et l'analyse approfondie du comportement des structures lors des derniers événements sismiques survenus sur le territoire algérien.

I.3. CRITERE DE CLASSIFICATION

I.3.1. Classification des zones sismiques

Dans la version 2003 du Règlement Parasismique Algérien (RPA), le zonage sismique du territoire national était basé principalement sur des données historiques et géographiques. Le pays était divisé en quatre zones, en fonction de l'intensité sismique estimée, avec une approche relativement statique.

Tableau I-1 : Zones sismique -RPA2003- [1]

Sismicité	Zone
Négligeable	0
Faible	I
Moyenne	IIa & IIb
Élevée	III

En revanche, le RPA 2024 introduit un zonage révisé, fondé sur des données plus récentes, intégrant l'évolution de l'activité sismique et les résultats d'études probabilistes. Ce nouveau zonage permet une meilleure précision dans la répartition du risque, avec des ajustements notables dans certaines régions.

Ainsi, la transition du RPA 2003 au RPA 2024 marque une avancée importante vers une cartographie plus réaliste et adaptée au contexte sismique actuel de l'Algérie. Le territoire national est divisé en sept (07) zones de sismicité croissante.

Tableau I-2 : Zones sismique-RPA2024- et coefficient d'accélération de zone au rocher, A. [2]

Sismicité	Zone	A
Très faible	0	-
Faible	I	0.07
Faible à moyenne	IIa & IIb	0.10

Moyenne	III	0.15
Moyenne à élevée	IV	0.20
Elevée	V	0.25
Elevée	VI	0.30

I.3.2. Classification des sites

Dans le RPA 2003, la classification des sites reposait sur des méthodes d'investigation géotechnique classiques, telles que le pénétromètre statique, l'essai SPT, le pressiomètre Ménard, la résistance à la compression simple des échantillons de sol, ainsi que la mesure de la vitesse des ondes de cisaillement (V_s). Ces paramètres servaient à estimer la nature du sol et à déterminer sa capacité à amplifier les mouvements sismiques. Toutefois, leur interprétation restait souvent qualitative, avec une certaine marge d'appréciation laissée à l'ingénieur.

La classification géotechnique des sites selon le RPA 2003 est résumée dans le Tableau I-3, qui précise les paramètres mécaniques de chaque catégorie de sol [1].

Tableau I-3 : Classification des sites -RPA2003-

Catégorie	Description	q_c (MPa) (c)	N (d)	PI(MPA) (e)	E_p (MPa) (e)	q_u (MPa) (f)	V_s (m/s) (g)
S ₁	Rocheux(a)	-	-	>5	>100-	>10	≥800
S ₂	Ferme	>15	>50	>2	>20	>0.4	≥400-<800
S ₃	Meuble	1.5 ~ 15	10~ 50	1 ~ 2	5 ~ 20	0.1 ~ 0.4	≥200-<400
S ₄	Très Meuble ou présence de 3m au moins d'argile molle (b)	<1.5	<10	<1	<5	< 0.1	≥100-<200

(a) : La valeur de la vitesse de l'onde de cisaillement du rocher doit être mesurée sur site ou estimée dans le cas d'un rocher peu altéré. Les roches tendres ou très altérées peuvent être classées en catégorie S₂ dans le cas où V_s n'est pas mesurée. Le site ne peut être classé dans la catégorie S₁ s'il existe plus de 3 m de sols entre la surface du rocher et le niveau bas des fondations superficielles.

(b) : L'argile molle est définie par un indice de plasticité I_p > 20, une teneur en eau naturelle W_n ≥ 40%, une résistance non drainée C_u < 25 kPa et une vitesse d'onde de cisaillement V_s < 150 m/s.

(c) : Pénétromètre statique :
$$\bar{q}_c = \frac{\sum_i^n h_i}{\sum_i^n \left(\frac{h_i}{q_{ci}} \right)}$$

(d) : Essai SPT :
$$\bar{q}_c = \frac{\sum_i^n h_i}{\sum_i^n \left(\frac{h_i}{q_{ci}} \right)}$$

(e) : Pressiomètre :
$$\bar{p}_l = \frac{\sum_i^n h_i}{\sum_i^n \left(\frac{h_i}{p_{li}} \right)} \quad \bar{E}_p = \frac{\sum_i^n h_i}{\sum_i^n \left(\frac{h_i}{E_{pi}} \right)}$$

(f) : Résistance en compression simple :
$$\bar{q}_u = \frac{h_c}{\sum_i^n \left(\frac{h_i}{q_{ui}} \right)}$$

(g) : Vitesse des ondes de cisaillement :
$$\bar{v}_s = \frac{\sum_i^n h_i}{\sum_i^n \left(\frac{h_i}{v_{si}} \right)}$$

Avec :

h_i : épaisseur de la couche (i)

q_{ci} : résistance de pointe moyenne à travers la couche (i) .

N_i < 100, nombre de coups moyens non corrigé, enregistré à travers la couche (i) d'épaisseur h_i.

h_s : épaisseur totale des couches de sols granulaires (sables et/ou graviers).

p_{li} : Pression limite moyenne à travers la couche (i) d'épaisseur h_i

E_{pi} : module pressiométrique moyen à travers la couche n(i), d'épaisseur h_i

h_c : épaisseur totale des couches de sols cohérents, argile et/ou marne.

q_{ui} : résistance en compression simple à travers la couche (i) d'épaisseur h

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

V_{si} : vitesse d'onde de cisaillement à travers la couche (i) d'épaisseur h_i

Conformément à l'article 3.3.4 du RPA 2003, certaines conditions géotechniques particulières nécessitent des investigations approfondies et des études spécifiques en raison de leur influence significative sur la réponse sismique des structures. Ces conditions incluent notamment :

1. Présence d'argile très plastique (indice de plasticité $I_p > 75$) sur une épaisseur de plus de 6 m.
2. Présence sur une épaisseur de plus de 30 m d'une couche d'argile molle à moyennement raide ($q_c = 1.5$ à 5 MPA, $p_l = 0.5$ à 2 MPA, $E_p = 5$ à 25 MPA, $q_u = 0.1$ à 0.4 MPA).

Le RPA 2024 reprend les outils classiques de reconnaissance géotechnique tout en élargissant son approche par l'intégration de nouveaux paramètres. Il introduit notamment la prise en compte du cisaillement non drainé (C_u) et des caractéristiques pressiométriques (E_m , P_f , P_l), permettant une évaluation plus représentative du comportement des sols sous sollicitations dynamiques. Cette approche actualisée met l'accent sur la complémentarité des essais in situ pour affiner la classification des sites, en s'adaptant mieux aux conditions réelles du terrain. Le Tableau I-4 présente la classification géotechnique des sols selon le RPA 2024, en fonction de plusieurs critères mécaniques [2].

Tableau I-4 : Classification des sites -RPA2024-

Catégorie	Description	q_{c30} (MP A) (c)	N ₃₀ (coups) (d)	C_{u30} (kPa) (e)	R_{c30} (MPa) (f)	P_{l30} (MPa)) (e)	E_{p30} (MPa) (e)	V_{s30} (m/s) (g)
S ₁	Rocheux(a)	-	-	-	>10	>5	>100-	≥800
S ₂	Ferme	>15	>50	>100	0.4-10	>2	>20	360- 800
S ₃	Meuble	1.5 - 15	10-50	50- 100	0.1-0.4	1 - 2	5 - 20	180-3 60
S ₄	Tres Meuble ou Presence < 1.5 de 3 m, au moins, d'argile	<1.5	<10	<50	<0.1	<1	<5	<180

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

	molle (b)							
S ₅	Site nécessitant investigations approfondies et études spécifiques (cf. § 3.3.3)	-	-	-	-	-	-	-

(a) : L'argile molle est définie par un indice de plasticité $I_p > 20$, une teneur en eau naturelle

$W_n \geq 40\%$, une résistance non drainée $C_u < 25$ kPa et une vitesse d'onde de cisaillement $V_s < 180$ m/s.

Il convient de calculer les valeurs moyennes sur une profondeur totale de 30 m au moins, sauf dans le cas de rocher, conformément aux expressions suivantes :

(b) : Pénétrromètre statique : $q_{c30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{h_i}{q_{ci}} \right)}$

(c) : Essai SPT : $N_{30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{h_i}{N_i} \right)}$

(d) : Essai de résistance au cisaillement non drainé : $C_{U30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{h_i}{C_{ui}} \right)}$

(e) : Essai de résistance à la compression simple : $R_{c30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{h_i}{R_{ci}} \right)}$

(f) : Caractéristiques pressiométriques : $E_{p30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{h_i}{E_{pi}} \right)}$ $p_{l30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{h_i}{p_{li}} \right)}$

(g) : Vitesse des ondes de cisaillement : $V_{s30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{h_i}{V_{si}} \right)}$

Avec :

h_i : épaisseur de la couche i

q_{ci} : résistance de pointe moyenne à travers la couche i

N_i : nombre de coups moyen non corrigé enregistré à travers la couche i

C_{ui} : résistance au cisaillement non drainée de la couche i

R_{ci} : Resistance a la compression simple dans la couche i

E_{pi} : module pressiométrique moyen à travers la couche i

P_{li} : pression Ji mite moyenne à travers la couche i

V_{si} : vitesse de l'onde de cisaillement dans la couche i

Dans le RPA 2024, l'article 3.2.2 introduit une actualisation des critères géotechniques nécessitant des investigations approfondies. Ces nouvelles exigences tiennent compte de l'évolution des connaissances sur l'impact des sols sur la réponse sismique des structures. Ainsi, les cas suivants imposent la réalisation d'études spécifiques :

1. Présence d'argile très plastique (indice de plasticité $I_p > 75$) sur une épaisseur de plus de 7.5 m.
2. Présence sur une épaisseur de plus de 37 m d'une couche d'argile molle à moyennement raide ($q_c = 1.5$ à 5 MPa, $Pl = 0.5$ à 2 MPa, $E_p = 5$ à 25 MPa, $C_u \leq 50$ kPa, $R_c = 0.1$ à 0.4 MPa)

I.3.3. Classification des bâtiments selon leur importance

Le niveau minimal de protection sismique accordé à un bâtiment dépend de sa destination et de son importance stratégique, sociale ou économique vis-à-vis des objectifs de protection fixés par la collectivité. Cette importance est prise en compte dans le dimensionnement parasismique à travers une classification en groupes.

Le RPA 2003 prévoit une classification des ouvrages en quatre (04) groupes d'importance (1A, 1B, 2 et 3), définis principalement selon la fonction et le niveau de risque associé à l'ouvrage. Cette classification permet de déterminer des niveaux de sécurité minimaux, sans toutefois intégrer de coefficient numérique pour moduler l'action sismique.

Autrement dit, aucune valeur chiffrée de coefficient d'importance n'est assignée aux différents groupes. La prise en compte de l'importance d'un ouvrage restait qualitative, ce qui limitait son intégration explicite dans les calculs.

Le RPA 2024 reprend la même logique de classification en quatre groupes, mais introduit une amélioration majeure : l'attribution explicite d'un coefficient d'importance, I , à chaque groupe.

Ce coefficient permet de moduler directement l'action sismique de calcul, en fonction de l'importance du bâtiment. Le tableau ci-dessous résume cette nouvelle disposition :

Tableau I-5 : Classification des bâtiments selon leur importance [2]

Groupe d'importance	Désignation	Coefficient d'importance (I)
1A	Bâtiments d'importance vitale	1.40
1B	Bâtiments de grande importance	1.20
2	Bâtiments d'importance moyenne	1.00
3	Bâtiments de faible importance	0.80

Le coefficient d'importance modifie directement l'intensité de l'action sismique de calcul :

- Pour les bâtiments du groupe 1A ($I=1,40$), les forces sismiques de calcul sont augmentées de 40%
- Pour les bâtiments du groupe 1B ($I=1,20$), elles sont augmentées de 20%
- Pour les bâtiments du groupe 2 ($I=1,00$), elles restent inchangées (valeur de référence)
- Pour les bâtiments du groupe 3 ($I=0,80$), elles sont réduites de 20%

I.3.4. Spectre de réponse

Le spectre de réponse est un outil fondamental en ingénierie parasismique, permettant de représenter la réponse dynamique d'un système à un degré de liberté soumis à une excitation sismique. Il s'agit d'une représentation graphique ou mathématique qui montre comment un oscillateur idéal réagit à un mouvement du sol, en fonction de sa période propre et de son amortissement.

En RPA2003, L'action sismique est représentée par le spectre de calcul suivant [1] :

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

A : coefficient d'accélération de zone

η : facteur de correction d'amortissement (quand l'amortissement est différent de 5%), $\eta = \sqrt{\frac{7}{2+\xi}}$

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

En revanche il existe deux types fondamentaux de spectres de réponse élastique dans RPA2024:

- ✓ Type 1 : applicable aux zones sismiques IV, V et VI (zones de forte sismicité)
- ✓ Type 2 : applicable aux zones sismiques I, II et III (zones de sismicité modérée)

Le choix entre ces deux types dépend de la magnitude moment M_w des séismes qui contribuent le plus à l'aléa sismique du site :

- ✓ Si $M_w \leq 5.5$, on adopte le Type 1
- ✓ Si $M_w > 5.5$, on adopte le Type 2

Le spectre de réponse élastique normalise par rapport à la valeur de l'accélération de la pesanteur (g), $\frac{S_{ae}}{g}(T)$, pour les composantes horizontales de l'action sismique, est défini par [2] :

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

Avec :

- $\frac{S_{ae}}{g}(T)$: spectre de réponse élastique normalise par rapport à la valeur de l' accélération de la pesanteur, g ;
- T : période de vibration d'un système linéaire à un seul degré de liberté ;
- A : coefficient d'accélération de calcul pour un sol de classe S1 pour la période de retour de non effondrement $T_r=475$ ans ;
- T_1 : limite inférieure des périodes correspondant au palier d'accélération spectrale constante ;
- T_2 : limite supérieure des périodes correspondant au palier d'accélération spectrale constante ;
- T_3 : valeur définissant le début de la branche à déplacement spectral constant ;
- I : coefficient d'importance ;
- S : coefficient de site ;
- η : coefficient de correction de l'amortissement. $\eta = \sqrt{\frac{7}{2+\xi}}$

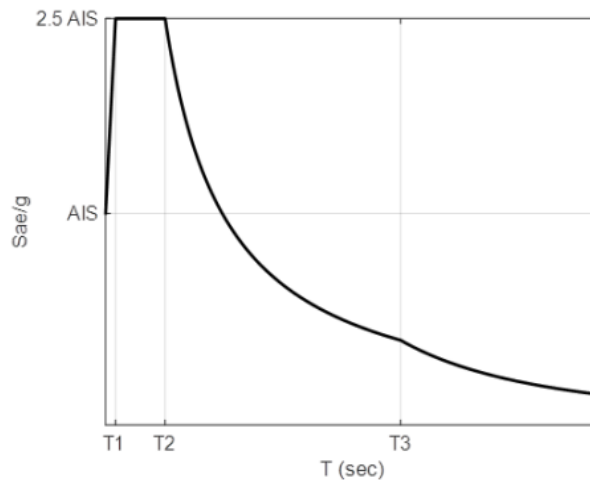


Figure I-1 : Spectre de réponse S_{ae}

Si la composante horizontale de l'action sismique reste prédominante dans le dimensionnement parasismique, la composante verticale peut également jouer un rôle significatif, en particulier dans les structures rigides ou sensibles aux efforts normaux. Le RPA 2024 recommande, pour certains cas spécifiques, l'utilisation d'un spectre vertical, généralement exprimé comme une fraction du spectre horizontal. Cette approche permet de mieux représenter les sollicitations dynamiques réelles subies par les éléments structuraux ou les équipements.

La composante verticale de l'action sismique doit être représentée par un spectre de réponse élastique, $\frac{S_{ve}}{g}(T)$, est donné par [2] :

$$\frac{S_{ve}}{g}(T) = \begin{cases} A_v \cdot I \cdot \left[1 + \frac{T}{T_1} \cdot (2.5\eta - 1) \right] & si : 0 \leq T < T_1 \\ A_v \cdot I \cdot [2.5\eta] & si : T_1 \leq T < T_2 \\ A_v \cdot I \cdot [2.5\eta] \cdot \left[\left(\frac{T_2}{T} \right)^\alpha \right] & si : T_2 \leq T < T_3 \\ A_v \cdot I \cdot [2.5\eta] \cdot \left[\left(\frac{T_2 T_3}{T^2} \right)^\alpha \right] & si : T_3 \leq T < 4s \end{cases} \quad (I-3)$$

Tableau I-6 : Valeurs des paramètres décrivant les spectres de réponse élastique vertical de type1

Site	$\frac{A_v}{A}$	$T_1(s)$	$T_2(s)$	$T_3(s)$	α
S ₁	0.90	0.05	0.20	1.0	0.6
S ₂	0.90	0.05	0.30	1.0	0.6
S ₃	0.90	0.05	0.40	1.0	0.6
S ₄	0.90	0.05	0.50	1.0	0.6

Tableau I-7 : Valeurs des paramètres décrivant les spectres de réponse élastique vertical de type2

Site	$\frac{A_v}{A}$	$T_1(s)$	$T_2(s)$	$T_3(s)$	α
S ₁	0.55	0.05	0.15	1.0	0.8

S ₂	0.55	0.05	0.20	1.0	0.8
S ₃	0.55	0.05	0.25	1.0	0.8
S ₄	0.55	0.05	0.30	1.0	0.8

Pour éviter une analyse de structure non linéaire explicite lors des calculs, la capacité d'une structure à dissiper l'énergie, essentiellement par son comportement ductile, est prise en compte en effectuant une analyse élastique basée sur un spectre de réponse réduit par rapport à celui élastique, appelé spectre de calcul. Cette réduction est réalisée par l'introduction d'un facteur de réduction des forces élastiques, dénommé coefficient de comportement de la structure, R , ainsi que d'un facteur de pénalité dénommé facteur de qualité, Q_F

L'action sismique horizontale est représentée par le spectre de calcul suivant [2] :

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

Où :

$\frac{S_{ad}}{g}(T)$: spectre de calcul normalisé par rapport à la valeur de l'accélération de la pesanteur, g

R : coefficient de comportement de la structure ;

Q_F : facteur de qualité.

Les valeurs du spectre de calcul ne doivent en aucun cas être inférieures à $(0.2A.I.)$.

Pour la composante verticale de l'action sismique, le spectre de calcul est donné par [2] :

$$\frac{S_{vd}}{g}(T) = \begin{cases} A.I. \left[\frac{2}{3} + \frac{T}{T_1} \cdot \left(\frac{2.5}{R} - \frac{2}{3} \right) \right] & si : 0 \leq T < T_1 \\ A.I. \left[\frac{2.5}{R} \right] & si : T_1 \leq T < T_2 \\ A.I. \left[\frac{2.5}{R} \right] \cdot \left[\frac{T_2}{T} \right]^\alpha & si : T_2 \leq T < T_3 \\ A.I. \left[\frac{2.5}{R} \right] \cdot \left[\frac{T_2 T_3}{T^2} \right]^\alpha & si : T_3 \leq T < 4s \end{cases} \quad (I-5)$$

Avec l'accélération de calcul du sol dans la direction verticale, A_v , S étant pris égal à 1.0, Q_F étant pris égal à 1.0.

I.4. ANALYSE DES DIFFERENCES SPECTRALES ENTRE LES RPA 2003 ET 2024 POUR CHAQUE SYSTEME DE CONTREVENTEMENT

Afin de mieux cerner les effets de la nature du sol sur la réponse dynamique des structures, une comparaison a été effectuée entre les spectres de réponse définis dans les RPA 2003 et 2024 pour les quatre types de systèmes de contreventement considérés. Voici les principales observations :

I.4.1. Système à ossature

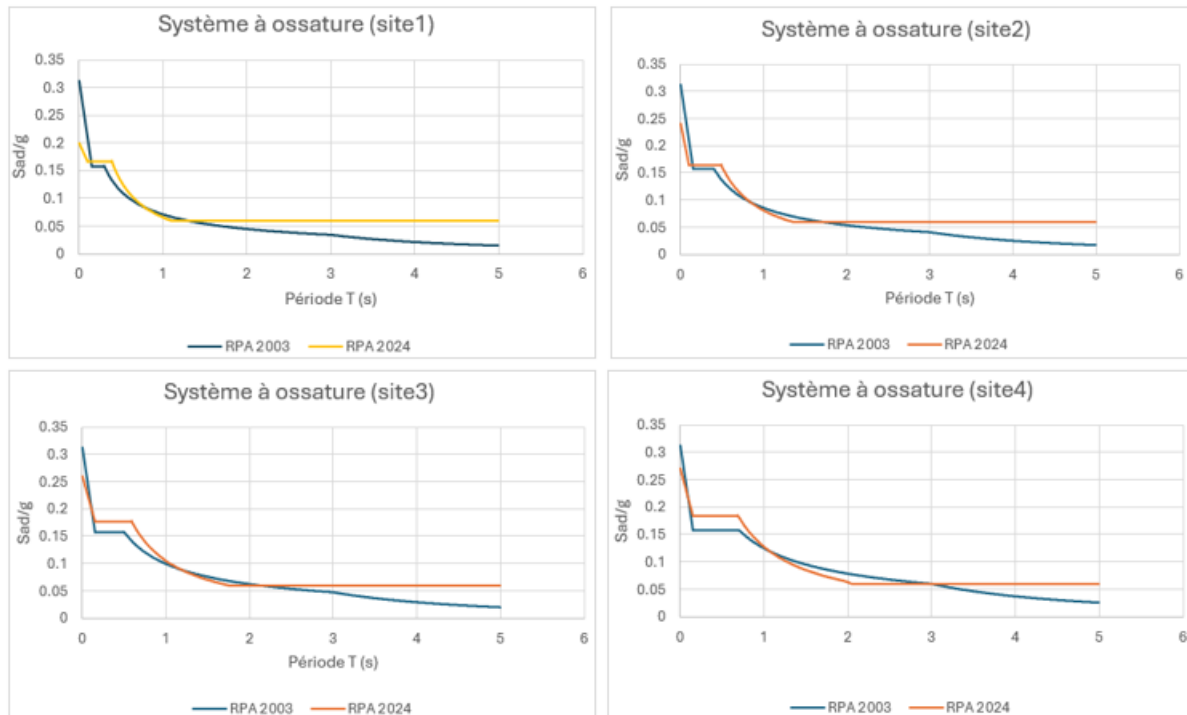


Figure I-2 : Spectres de réponse du système à ossature selon les RPA 2003 et 2024 pour les quatre types de site

Les quatre graphes dans la Figure I-2, permettent d'illustrer les différences introduites entre les versions RPA 2003 et RPA 2024. Bien que les courbes varient légèrement d'un site à l'autre, des tendances globales communes se dégagent et permettent de mieux analyser l'évolution de la demande spectrale en fonction de la période :

1. Différences en période courte ($T < 0.5$ s) :

Sur l'ensemble des sites analysés, on observe que, dans l'intervalle des courtes périodes (inférieures à 0,5 seconde), la courbe du RPA 2024 est légèrement inférieure à celle du RPA 2003 jusqu'à environ 0,2 seconde. Cela traduit une réduction de la sollicitation sismique pour les structures très rigides ou de faible hauteur.

Entre 0,2 s et 0,5 s, la courbe du RPA 2024 devient progressivement supérieure, indiquant une augmentation de la demande sismique pour les structures à faible ou moyenne période. Cette évolution peut influencer directement le dimensionnement des bâtiments dans cette zone de réponse dynamique.

2. Comportement à moyenne période ($0.5 \text{ s} < T < 2 \text{ s}$) :

Dans cet intervalle de période, la courbe du RPA 2024 reste généralement au-dessus de celle du RPA 2003 pour l'ensemble des sites étudiés. Cela se traduit par une demande spectrale plus importante pour les structures de hauteur moyenne ou présentant une certaine flexibilité.

Le spectre du RPA 2024 se montre ainsi plus conservateur dans ce domaine, pouvant engendrer un renforcement des éléments structuraux.

3. Comportement à longue période ($T > 2 \text{ s}$) :

Dans le domaine des longues périodes, le spectre du RPA 2024 reste globalement constant, tandis que celui du RPA 2003 diminue progressivement. La courbe du RPA 2024 se situe ainsi au-dessus de celle du RPA 2003 dans cette zone.

Cette différence peut entraîner une sollicitation plus importante sur les structures élancées ou souples, dont la période propre est élevée.

I.4.2. Système à contreventement mixte, équivalent à une ossature

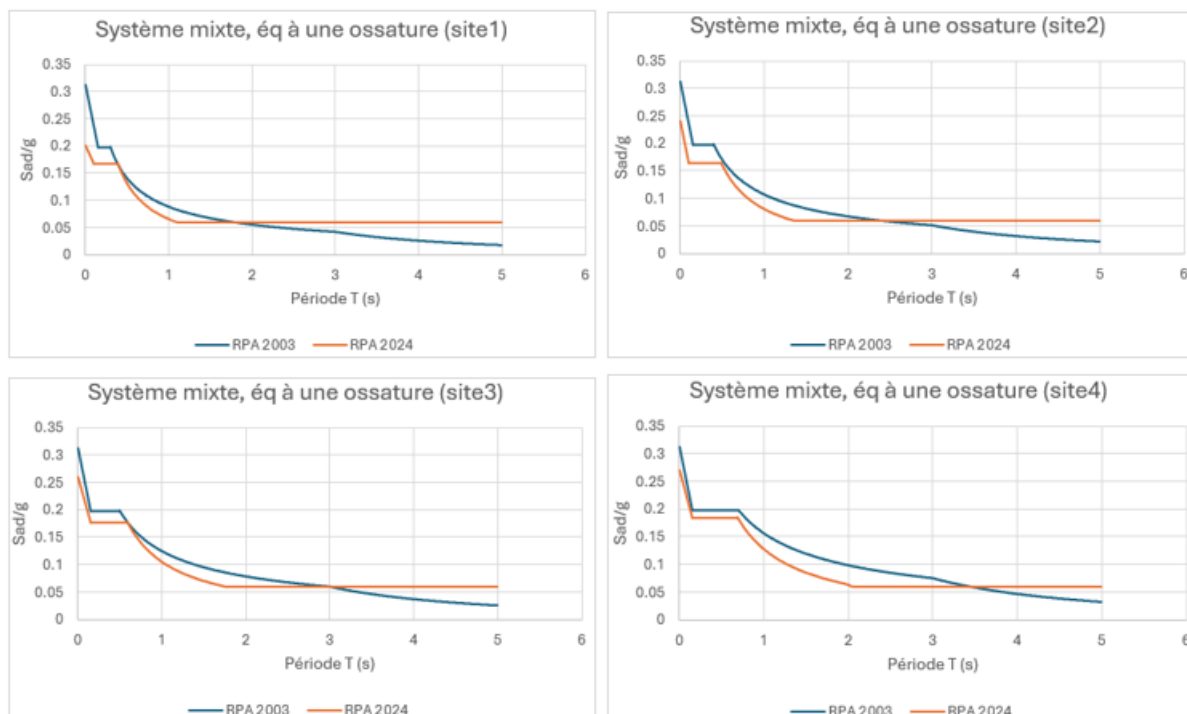


Figure I-3 : Spectres de réponse du système à contreventement mixte, équivalent à une ossature selon les RPA 2003 et 2024 pour les quatre types de site

Les quatre graphes présentés illustrent la comparaison des spectres de réponse pour un système de contreventement mixte équivalent à une ossature, appliqué à quatre sites différents. Les courbes des deux règlements RPA 2003 et RPA 2024 sont tracées pour chaque site, permettant d'observer les différences de comportement sismique en fonction de la période propre du système.

1. Observations globales des spectres de réponse :

Différence en période courte ($T < 0,5$ s) :

Dans l'intervalle des courtes périodes, la courbe du RPA 2003 est systématiquement supérieure à celle du RPA 2024. Cette configuration indique que, pour les structures à faible période, le règlement de 2003 impose des sollicitations plus élevées que celles prévues dans le RPA 2024.

Stabilité des spectres pour des périodes moyennes ($0,5 \text{ s} < T < 2 \text{ s}$) :

Pour les périodes moyennes, la tendance se poursuit : le spectre du RPA 2003 reste au-dessus de celui du RPA 2024. L'écart reste relativement constant sur cette plage, ce qui se traduit par une diminution généralisée de la demande spectrale dans le nouveau règlement, sur les structures de hauteur intermédiaire.

Réponse à longue période ($T > 2 \text{ s}$) :

À partir de 2 secondes, les deux courbes se rapprochent progressivement. À partir d'un certain seuil de période, la courbe du RPA 2024 dépasse celle du RPA 2003. Le spectre du RPA 2024 devient alors légèrement supérieur, traduisant une augmentation de la sollicitation pour les structures souples ou élancées selon le nouveau règlement.

I.4.3. Système à contreventement mixte, équivalent à des voiles

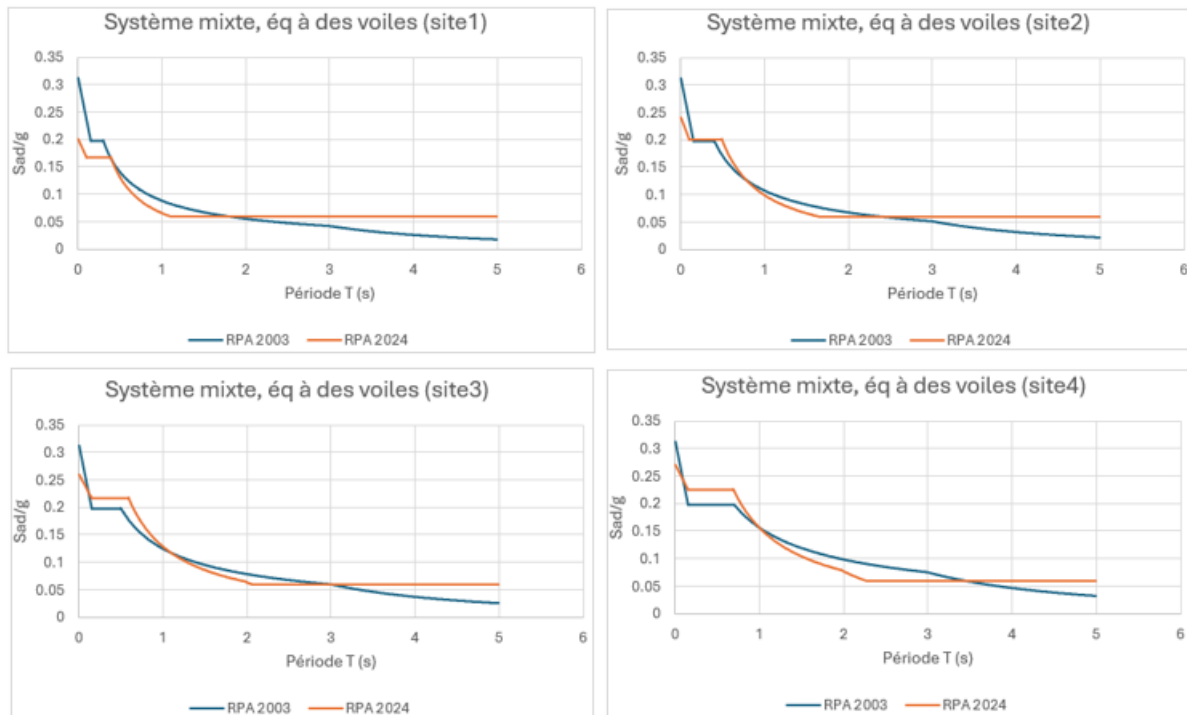


Figure I-4 : Spectres de réponse du système à contreventement mixte, équivalent à des voiles selon les RPA 2003 et 2024 pour les quatre types de site

Les quatre graphes illustrent les différences dans la réponse sismique d'un système de contreventement mixte équivalent à des voiles, appliqué à des sites de types différents. La comparaison des spectres de réponse entre le RPA 2003 et le RPA 2024 montre des tendances similaires à celles observées dans les systèmes à ossature, mais avec des nuances dues à la présence de voiles, qui influencent la réponse dynamique du bâtiment.

1. Comportement à faible période ($T < 0,5$ s) :

Pour les périodes inférieures à 0.5 seconde, le spectre du RPA 2003 se situe au-dessus de celui du RPA 2024. Cela indique une sollicitation initiale plus importante dans l'ancienne version du règlement pour les structures à comportement rigide ou à faible période.

2. Comportement à période moyenne ($0,5 \text{ s} < T < 2 \text{ s}$) :

À Dans cet intervalle, les courbes des deux règlements sont généralement proches, avec des points de croisement. Selon la période considérée, le spectre du RPA 2024 peut être alternativement au-dessus ou en dessous de celui du RPA 2003. Cette configuration traduit une

répartition variable des sollicitations dynamiques sur les structures à période moyenne, sans tendance dominante.

3. Comportement à longue période ($T > 2$ s) :

Pour les longues périodes, la courbe du RPA 2024 dépasse clairement celle du RPA 2003. Cela se traduit par une augmentation de la demande spectrale pour les structures souples ou élancées dans la version 2024, avec un spectre qui reste relativement constant.

4. Effets des voiles sur la réponse sismique : Le système à contreventement mixte, équivalent à des voiles montre une réduction de la réponse sismique par rapport aux systèmes à ossature simple. Le rôle des voiles est primordial dans la dissipation de l'énergie sismique et dans l'augmentation de la rigidité de l'ensemble de la structure. Le RPA 2024 semble mieux prendre en compte cette rigidité supplémentaire, en adaptant les coefficients d'amortissement et en réajustant les paramètres dynamiques pour mieux correspondre à la réalité du comportement des structures en présence de voiles.

I.4.4. Système de contreventement constitué par des voiles

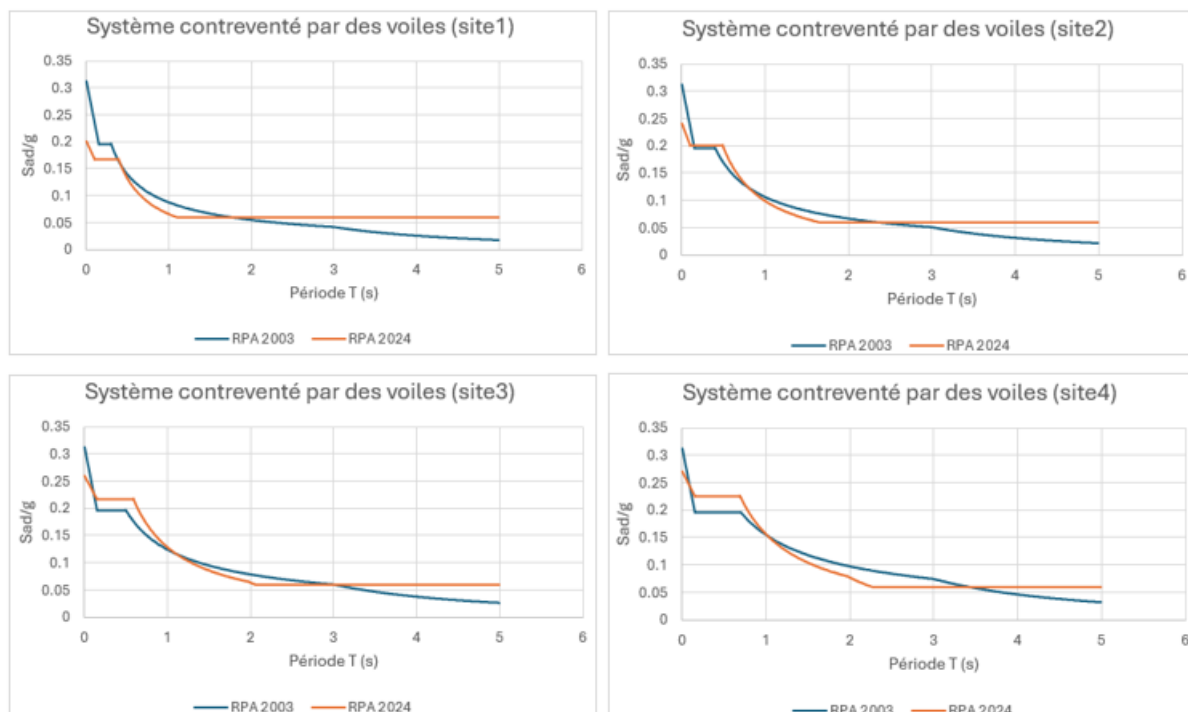


Figure I-5 : Spectres de réponse du système contreventé par des voiles selon les RPA 2003 et 2024 pour les quatre types de site

Les quatre graphes montrent l'évolution des spectres de réponse pour un système contreventé par des voiles sur les différents types de sols, selon les prescriptions du RPA 2003 et du RPA 2024. Comme dans les cas précédents, on observe une différence importante dans le comportement des systèmes vis-à-vis des périodes de vibration.

1. Comportement à faible période ($T < 0,5$ s) :

Pour les périodes courtes, la courbe du RPA 2003 est systématiquement supérieure à celle du RPA 2024. Cela implique une sollicitation plus importante dans l'ancienne version pour les structures rigides, notamment sur des sols plus durs.

2. Comportement à période moyenne ($0,5 \text{ s} < T < 2 \text{ s}$) :

Pour cette plage de période, la différence entre le RPA 2003 et le RPA 2024 devient moins marquée, avec des spectres relativement similaires pour les sites 1 et 2. Cependant, le RPA 2024 continue de maintenir un niveau d'accélération plus stable, ce qui suggère une meilleure gestion de la flexibilité des structures mixtes, qui intègrent des voiles.

Ce comportement est particulièrement important pour les structures intermédiaires et semi-rigides, où le RPA 2024 assure une réponse plus contrôlée face aux sollicitations sismiques.

4. Comportement à longue période ($T > 2$ s) :

Au-delà de 2 secondes, le spectre du RPA 2024 devient dominant, se situant au-dessus de celui du RPA 2003, garantissant une réponse plus stable pour les structures souples ou les bâtiments de grande hauteur, et ce, même dans des zones de forte amplification sismique. Cette gestion des effets de sol par le RPA 2024 représente une amélioration importante par rapport au RPA 2003, qui, dans cette gamme de périodes, continuait de sous-estimer les besoins de protection pour les structures souples.

4. Effets des voiles sur la réponse sismique :

L'intégration des voiles dans le système de contreventement permet de réduire la réponse sismique, car ces éléments ajoutent de la rigidité à la structure. Les voiles permettent ainsi une meilleure dissipation de l'énergie sismique et améliorent la stabilité des bâtiments sous forte sollicitation sismique.

Le RPA 2024 prend mieux en compte cette rigidité supplémentaire des voiles, et propose un dimensionnement plus précis des éléments de contreventement, en particulier dans des zones à forte activité sismique.

Cette étude comparative entre le RPA 2003 et le RPA 2024, appliquée aux quatre systèmes étudiés (ossature, contreventement mixte équivalent à une ossature, contreventement mixte, équivalent à voiles, et contreventement par des voiles) sur les quatre types de sites (sols durs, intermédiaires, meubles et très meubles) met en évidence plusieurs évolutions dans la manière de traiter l'action sismique et la protection parasismique des structures.

Le RPA 2024 se distingue par une approche plus conservatrice par rapport au RPA 2003, en particulier dans la gestion des effets de site. Les principaux points de cette évolution incluent :

1. Renforcement de la sécurité des structures rigides :

Le RPA 2024 présente des accélérations spectrales plus élevées pour des périodes longues ($T > 2$ s), traduisant une prise en compte plus poussée des sollicitations subies par les structures souples ou élancées, notamment dans les zones soumises à des effets d'amplification du sol.

2. Réduction de la réponse à courte période :

Pour les périodes courtes ($T < 0,5$ s), le RPA 2024 présente généralement des valeurs inférieures à celles du RPA 2003. Cette évolution entraîne une diminution de la demande sismique sur les structures rigides ou peu élevées.

3. Équilibre à période moyenne :

Dans la plage intermédiaire ($0,5 \text{ s} < T < 2 \text{ s}$), les spectres des deux règlements sont très proches, parfois superposés. Aucune tendance dominante ne se dégage de manière systématique, ce qui traduit une approche équilibrée entre les deux versions du code.

4. Intégration des effets de sol :

Le RPA 2024 traduit mieux l'influence des effets de site sur la réponse spectrale, en particulier pour les sols meubles et très meubles. Il introduit une évolution dans la forme des spectres, visant à ne pas sous-estimer les effets d'amplification dans les zones sensibles.

5. Effets des systèmes de contreventement :

Les systèmes incluant des voiles, qu'ils soient mixtes ou exclusivement composés de voiles, montrent globalement des spectres plus faibles en raison de leur rigidité. Le RPA 2024 reflète cette rigidité additionnelle de manière plus explicite à travers ses courbes spectrales.

En conclusion, le RPA 2024 marque une évolution dans la modélisation de la demande sismique en introduisant une répartition plus nuancée de l'accélération spectrale selon les périodes, les types de systèmes porteurs et les conditions de site. Ces ajustements visent à renforcer la cohérence entre les modèles de calcul et le comportement réel des structures soumises aux séismes.

I.5. LES COMBINAISONS D'ACTIONS SISMQUES :

I.5.1. RPA 2003: une approche simplifiée

Le RPA 2003 considère l'action sismique comme une action accidentelle, représentée par une composante horizontale unique (E). Deux combinaisons principales sont proposées [1] :

$$G + Q + E \quad (I-6)$$

$$0.8G \pm E \quad (I-7)$$

Pour les poteaux dans les ossatures autostables, une combinaison spécifique est introduite :

$$G + Q + 1.2E \quad (I-8)$$

Dans les ossatures autostables, une combinaison spécifique est utilisée :

$$G + Q + 1.2E \quad (I-9)$$

Bien que les effets verticaux ne soient pas explicitement modélisés, il est suggéré que la charge d'exploitation dans la combinaison (I-6) peut, en partie, représenter l'influence de l'accélération verticale (environ 40 à 60 %).

I.5.2. RPA 2024 : une modélisation tridimensionnelle

Le RPA 2024 introduit une approche plus exhaustive. L'action sismique est modélisée par trois composantes simultanées [2] :

- ✓ E_x et E_y : deux composantes horizontales orthogonales
- ✓ E_z : une composante verticale

Les combinaisons d'actions deviennent :

$$G + \psi \cdot Q + E1 \quad (I-10)$$

$$G + \psi \cdot Q + E2 \quad (I-11)$$

Avec $E1$ et $E2$ définies par :

$$E1 = \pm E_x \pm 0.3 E_y \quad (I-12)$$

$$E2 = \pm 0.3 E_x \pm E_y \quad (I-13)$$

La composante verticale E_z est prise en compte si le produit $A_v \cdot I \cdot g$ dépasse 0.25g, auquel cas les combinaisons suivantes s'appliquent :

$$G + \psi \cdot Q + E3, E4, E5 \quad (I-14)$$

Où :

- $E3 = \pm E_x \pm 0.3 E_y \pm 0.3 E_z$
- $E4 = \pm 0.3 E_x \pm E_y \pm 0.3 E_z$
- $E5 = \pm 0.3 E_x \pm 0.3 E_y \pm E_z$

Le RPA 2024 marque une avancée notable en matière de modélisation sismique, en intégrant explicitement les trois composantes du mouvement sismique et en généralisant les combinaisons de cas de charge. Il offre une approche plus réaliste et précise de la réponse structurale, tout en renforçant la sécurité des bâtiments. En comparaison, le RPA 2003 repose sur des hypothèses simplificatrices, aujourd'hui partiellement dépassées face à l'évolution des connaissances et des exigences internationales.

I.6. IMPORTANCE DE L'ANALYSE NON LINEAIRE DANS L'EVALUATION SISMIQUE DES STRUCTURES

Modélisation du Comportement Réel : Lorsque les structures sont soumises à des séismes, elles dépassent fréquemment leur domaine élastique, entraînant des déformations plastiques et des comportements non linéaires complexes. Les approches d'analyse linéaire ne parviennent pas à représenter avec exactitude ces phénomènes, tandis que les analyses non linéaires offrent une modélisation plus précise des déformations, de la plasticité et des effets hystérétiques des structures.

Prédiction des Déformations et des Endommagements : Les analyses non linéaires aident à prédire avec plus de précision les déformations inélastiques, les formations de joints plastiques et les capacités d'absorption d'énergie des structures. Cela permet de déterminer le potentiel de dommages et de planifier des stratégies de modernisation efficaces.

Évaluation de la Capacité de Résistance : Les méthodes non linéaires comme l'analyse PUSHOVER permettent de déterminer la courbe de capacité de l'élément structurel, montrant le comportement élastique et plastique de la structure. Cette courbe est essentielle pour évaluer différents niveaux de performance, tels que l'utilisation immédiate, la sécurité des personnes et le pré-effondrement.

Intégration des Modes Supérieurs : Les méthodes statiques non linéaires, telles que l'analyse Pushover adaptative, peuvent intégrer l'effet des modes supérieurs avec une interaction complète entre eux. Cela permet d'évaluer plus précisément le comportement global de la structure, y compris les interactions entre les différents modes de vibration.

Conformité aux Réglementations : Les analyses non linéaires sont souvent nécessaires pour se conformer aux réglementations sismiques modernes, qui exigent une évaluation détaillée des performances structurelles sous les effets des séismes. Les méthodes non linéaires sont ainsi essentielles pour garantir la sécurité des structures face aux tremblements de terre.

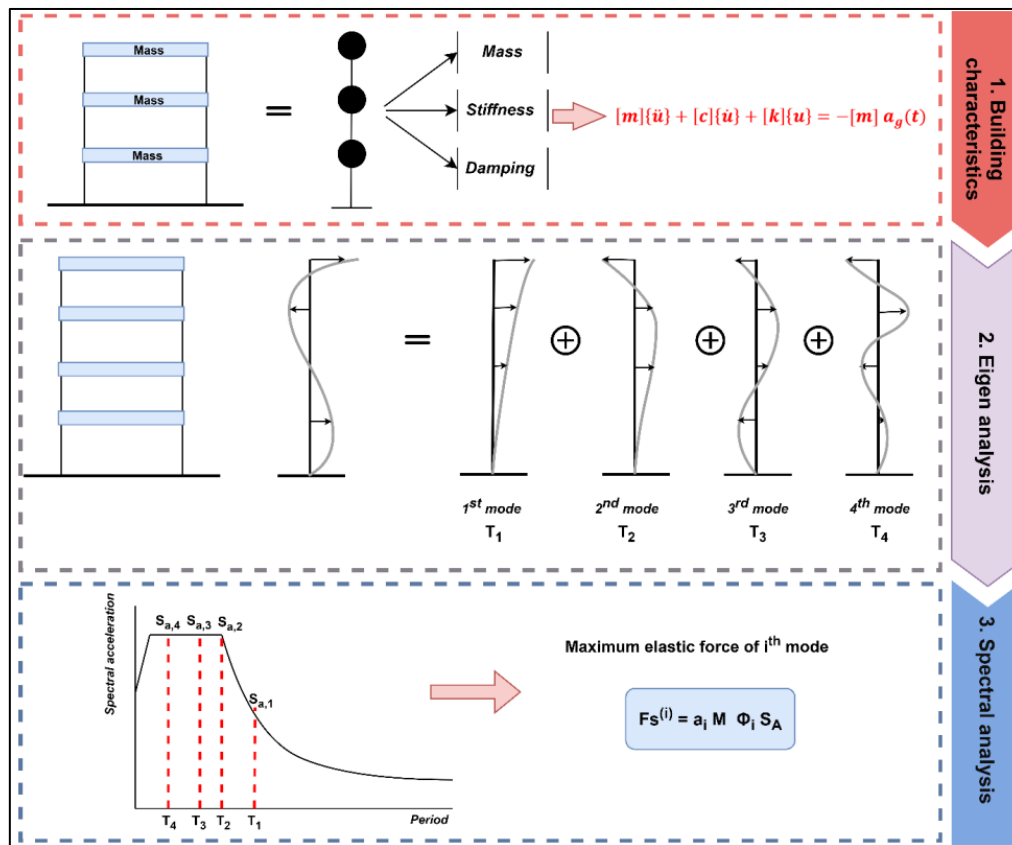


Figure I-6 : Étapes de l'analyse de la réponse spectrale [3].

I.7. ANALYSE STATIQUE NON LINEAIRE (ANALYSE PUSHOVER)

I.7.1. Définition de l'analyse PUSHOVER

L'analyse PUSHOVER est une procédure statique qui utilise une technique non linéaire simplifiée pour estimer les déformations structurelles sous sollicitation sismique. Lors d'un séisme, les structures se réorganisent d'elles-mêmes : lorsque certains éléments d'une structure atteignent leur limite d'élasticité ou défont, les forces dynamiques exercées sur le bâtiment sont redistribuées vers d'autres composants.

L'analyse PUSHOVER simule ce phénomène en appliquant progressivement des charges jusqu'à l'identification du point faible de la structure. Le modèle est ensuite mis à jour pour intégrer les modifications résultant de cette faiblesse. Une seconde itération permet d'observer comment les charges sont redistribuées. La structure est alors de nouveau « poussée » jusqu'à la découverte du deuxième point faible. Ce processus est répété jusqu'à ce qu'un schéma global de plastification de la structure sous chargement sismique soit identifié.

L'analyse PUSHOVER est couramment utilisée pour évaluer la capacité sismique des structures existantes et figure dans plusieurs directives récentes relatives au renforcement parasismique. Elle peut également être utile dans la conception basée sur la performance des nouveaux bâtiments, en particulier ceux qui reposent sur la ductilité ou la redondance pour résister aux forces sismiques.

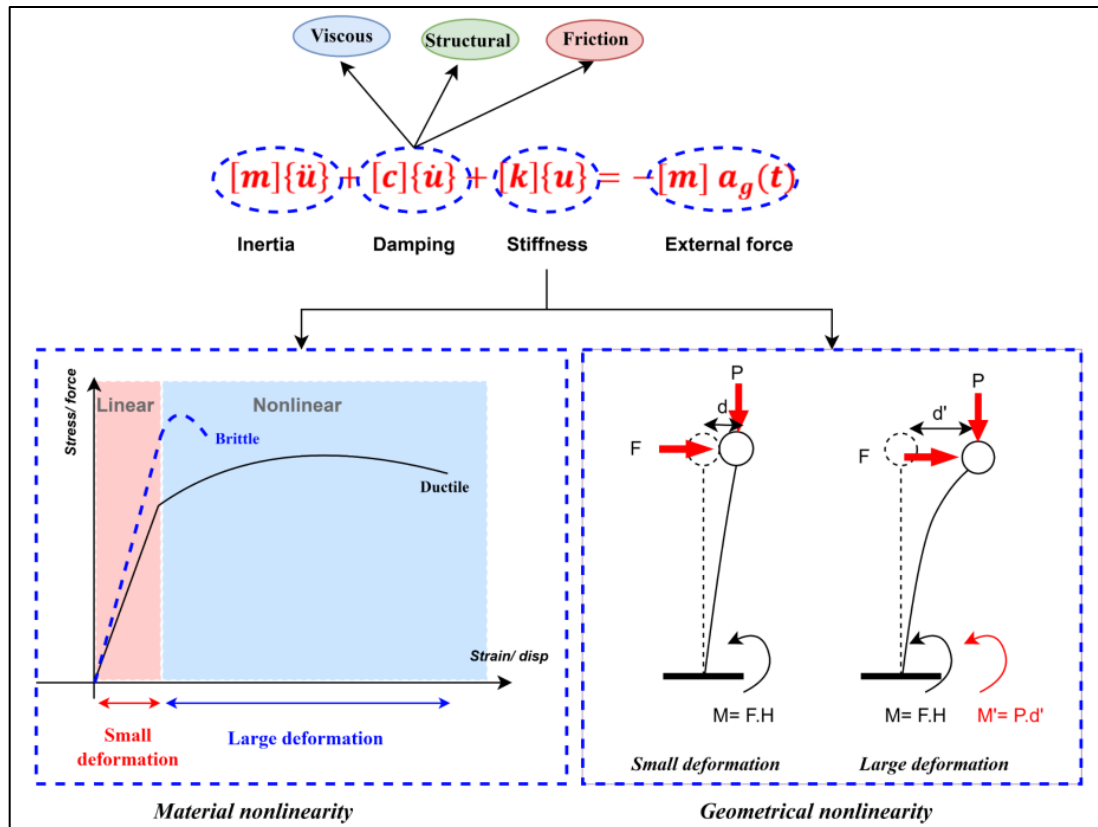


Figure I-7 : La non-linéarité des matériaux et la non-linéarité géométrique en analyse structurelle

I.7.2. Les limites de l'analyse PUSHOVER

La méthode d'analyse statique non linéaire (NSP) ne doit pas être utilisée pour les structures dans lesquelles les effets des modes supérieurs sont significatifs, sauf si une évaluation par analyse dynamique linéaire (LDP) est également réalisée. Pour déterminer si ces effets sont significatifs, une analyse modale spectrale de réponse doit être effectuée sur la structure en utilisant un nombre suffisant de modes pour capturer 90 % de la participation de masse. Une seconde analyse spectrale de réponse doit ensuite être réalisée en ne considérant que la participation du premier mode. Les effets des modes supérieurs doivent être considérés comme significatifs si le cisaillement dans un étage quelconque, calculé à partir de l'analyse modale

tenant compte de tous les modes nécessaires pour atteindre 90 % de participation de masse, dépasse 130 % du cisaillement correspondant obtenu en ne considérant que la réponse du premier mode [4].

« La méthode Pushover ne permet pas de concevoir une bonne solution, elle se limite à l'évaluation d'une solution existante. Si l'ingénieur commence avec un système de contreventement inadéquat, l'analyse peut soit rendre ce système acceptable par des modifications, soit démontrer qu'il est inadapté. Toutefois, elle ne garantit pas l'obtention d'un système structurel optimal et sécurisé. » [5].

Bien que la méthode Pushover soit largement utilisée pour évaluer la performance sismique des structures, elle présente plusieurs limites et inconvénients qu'il convient de souligner :

I.7.2.1. Hypothèses Simplificatrices

Représentation par un Système à Un Seul Degré de Liberté : Cette méthode repose sur l'hypothèse que la structure peut être assimilée à un système équivalent à un seul degré de liberté, supposant ainsi qu'un seul mode de vibration domine et que sa forme reste inchangée durant l'analyse. Toutefois, cette hypothèse ne reflète pas toujours la réalité, car de nombreuses structures présentent des réponses influencées par plusieurs modes vibratoires.

I.7.2.2. Modélisation des Efforts Sismiques

Action Sismique Unidirectionnelle : L'approche Pushover considère généralement le séisme comme une force appliquée dans une seule direction, ce qui constitue une simplification excessive, car les sollicitations sismiques réelles sont souvent bidirectionnelles, voire multidirectionnelles.

I.7.2.3. Négligence des Modes Supérieurs

Influence des Modes Supérieurs : L'approche conventionnelle de l'analyse Pushover ne prend pas en compte les effets des modes vibratoires supérieurs. Cette limitation peut induire des écarts significatifs dans l'évaluation des déformations et des sollicitations internes des structures.

I.7.2.4. Approximations dans l'Estimation de la Demande Sismique

Précision des Résultats : L'application de la méthode Pushover repose sur plusieurs simplifications qui peuvent altérer l'estimation de la demande sismique et, par conséquent, influencer la fiabilité des résultats obtenus.

I.7.2.5. Difficultés dans la Prédiction des Déformations

Précision Limitée des Déformations : Bien que les variantes adaptatives de la méthode Pushover offrent une amélioration théorique, elles ne permettent qu'une légère optimisation des résultats en termes d'efforts et restent peu précises pour l'évaluation des déformations réelles des bâtiments.

I.7.2.6. Complexité et Temps de Calcul

Comparaison avec l'Analyse Temporelle Non Linéaire : L'analyse temporelle non linéaire demeure la méthode la plus fiable pour évaluer le comportement d'une structure sous charges sismiques, mais elle est souvent complexe et nécessite un temps de calcul important. En revanche, la méthode Pushover, bien que plus simple à mettre en œuvre, reste moins précise et peut conduire à une évaluation partielle de la réponse structurelle.

I.7.3. Etat de l'art

Une revue détaillée de la littérature sur le développement de l'analyse pushover depuis les années 1970 a été réalisée.

La nécessité de l'analyse pushover, ses objectifs, son degré d'adoptabilité, sa convivialité, sa faisabilité, ainsi que ses avantages et inconvénients depuis ses débuts ont été discutés par divers chercheurs. [6]

Freeman et al. (1965) : La méthode Pushover a été initialement proposée par Freeman et ses collaborateurs en 1965. Ils ont utilisé une approche empirique pour étudier la performance sismique de 80 bâtiments aux États-Unis, combinant des méthodes analytiques avec des spectres de réponses de site pour estimer les effets structuraux maximaux, les demandes maximales de ductilité et la période équivalente de vibration.

Takeda, Sozen, Gulkan (1970-1974) : L'utilisation de l'analyse statique inélastique dans le génie sismique remonte aux travaux de Takeda et Sozen (1970) ou à des travaux antérieurs, lorsqu'un modèle conceptuel réaliste pour prédire la réponse dynamique d'un élément en béton armé a été étudié sur la base d'une relation force-déplacement statique qui reflète les changements de rigidité lors du chargement et du déchargement de l'élément. Le développement s'est poursuivi lorsque Gulkan et Sozen (1974) ont dérivé un système à un seul degré de liberté pour représenter la structure à plusieurs degrés de liberté par le biais d'une structure équivalente ou de substitution. La courbe charge-déplacement de ce substitut à la structure réelle est évaluée par analyse par éléments finis ou par calcul manuel afin d'obtenir la rigidité initiale et après déformation, la limite d'élasticité et la résistance ultime.

Kilar et Fajfar (1996) : ont décrit une procédure de calcul étape par étape pour déterminer la relation entre le cisaillement de la base et le déplacement du toit d'éléments de grande taille. La procédure proposée est applicable aux structures de bâtiments de tous matériaux. Les effets des forces axiales sur les moments de la limite élastique ont été pris en considération. Les résultats ont révélé que la procédure proposée d'analyse pushover des structures éclaire certaines des caractéristiques clés du comportement structurel non linéaire, en particulier, et est capable d'estimer la résistance réelle et les mécanismes plastiques globaux.

Le document FEMA-273 (1997) : fournit des lignes directrices techniquement solides et acceptables pour la réhabilitation sismique des bâtiments. Les lignes directrices pour la réhabilitation sismique des bâtiments sont destinées à servir d'outil pour les professionnels de la conception, de document de référence pour les responsables de la réglementation des bâtiments et de base pour le développement et la mise en œuvre futurs des dispositions et des normes du code de la construction. Ce document est destiné à un groupe d'utilisateurs primaires, à savoir les architectes, les ingénieurs et les responsables de la construction, en particulier les membres de la communauté technique chargés d'élaborer et d'utiliser les codes et les normes de construction, et d'effectuer la conception et l'analyse des bâtiments. Le document détaille les différents niveaux de performance sismique des bâtiments pour les composants structurels et non structurels. Il présente également les différentes procédures d'analyse utilisées pour la réhabilitation sismique des bâtiments.

Le document ATC-40 : fournit une méthodologie recommandée, complète et techniquement solide, pour l'évaluation sismique et la conception de la réhabilitation des bâtiments existants en béton. Bien qu'il ne soit pas destiné à la conception de nouveaux bâtiments, ses procédures analytiques restent applicables. Ce document s'applique au système structurel global ainsi qu'à ses éléments et composants. La méthodologie utilisée est basée sur la performance : les critères d'évaluation et de conception de la réhabilitation sont exprimés en termes d'objectifs de performance, qui définissent les niveaux souhaités de performance sismique lorsque le bâtiment est soumis à des niveaux spécifiques de mouvements sismiques du sol.

Ashraf Habibullah, S.E., et Stephen Pyle, S.E. (1998) : dans leur ouvrage *"Practical Three Dimensional Nonlinear Static Pushover Analysis"*, présentent toutes les étapes pratiques utilisées pour réaliser l'analyse pushover à l'aide du logiciel SAP2000.

Laogan et Elnashai (1999) : ont étudié la performance structurelle et l'aspect économique des bâtiments en béton armé de grande hauteur et haute résistance situés dans des zones sismiques. Deux types d'analyses inélastiques ont été réalisées : l'analyse pushover statique et les analyses dynamiques. Le programme SAP a été utilisé pour effectuer l'analyse élastique 2D des structures. L'étude a conclu que le rapport bénéfice-coût dépend fortement du facteur de coût lié aux armatures.

Fajfar et Eeri M (2000) ont présenté une méthode d'analyse sismique non linéaire simplifiée, qui associe l'analyse pushover des systèmes à degrés de liberté multiples (MDOF) à l'analyse par spectre de réponse des systèmes équivalents à un seul degré de liberté (SDOF). Les résultats obtenus avec cette méthode se sont révélés très précis, à condition que la structure oscille principalement selon son premier mode. De plus, ces résultats étaient cohérents avec ceux obtenus par l'analyse temporelle (time history analysis) ainsi que par des essais expérimentaux.

Goel et Chopra (2004) : ont réalisé une analyse pushover modale (MPA) pour un ensemble de 20 enregistrements de mouvements sismiques, correspondant à des probabilités de dépassement de 2 % et 10 % sur une période de 50 ans. La procédure MPA a été appliquée à chacun des six bâtiments étudiés et pour chacun des 20 enregistrements sismiques. Les effets des modes supérieurs ont été analysés et comparés aux résultats de l'analyse temporelle non linéaire (time history analysis).

Han et Chopra (2006) ont développé une procédure approximative pour une évaluation précise de la demande sismique, basée sur la méthode d'analyse pushover modale (MPA). Trois bâtiments de 3, 9 et 20 étages ont été analysés pour déterminer leurs capacités aux états limites et pour estimer les courbes IDA (Incremental Dynamic Analysis) à l'aide des procédures disponibles sur un ensemble de 20 enregistrements de mouvements sismiques. Les trois bâtiments ont montré une réponse satisfaisante et une bonne précision de la procédure approximative basée sur la MPA pour les états de dommage).

Etedali S. et Irandegani (2015) ont proposé un nouveau schéma de chargement latéral pour l'analyse pushover des structures, afin d'évaluer la pertinence et la performance de cette distribution de charges dans l'estimation du comportement sismique des bâtiments.

Des études analytiques ont été menées sur des portiques de 3, 4, 12 et 20 étages pour des structures en acier MRF (Moment Resisting Frame) et en béton SMRF (Special Moment Resisting Frame). Les résultats ont montré que, pour les structures en acier à faible période, un schéma de chargement triangulaire était approprié. En revanche, avec l'augmentation de la période fondamentale, une distribution de charges latérales uniforme était plus adaptée.

De plus, il a été observé qu'avec l'augmentation de la période, le schéma de chargement latéral recommandé par FEMA pourrait ne pas fournir des résultats précis.

Ashwini et al. (2020) : ont souligné que l'analyse statique non linéaire constitue une méthode appropriée pour évaluer la performance d'un système structurel. Le choix judicieux de l'approche de modélisation et du schéma de chargement est crucial pour obtenir une évaluation fiable de la performance.

Cette étude vise à évaluer et comparer la réponse d'une structure existante en béton armé de huit étages en appliquant différentes approches de modélisation et schémas de chargement recommandés par FEMA 356.

Les résultats indiquent avec une grande clarté que, dans tous les cas, la forme de la distribution des charges latérales influence fortement la réponse du bâtiment. Cet effet est particulièrement marqué lorsque différents schémas de chargement sont pris en compte. Il a également été observé que la différence entre les divers schémas de chargement est très faible.

Ashwini et al. (2023) ont souligné que l'analyse statique non linéaire constitue une méthode appropriée pour évaluer la performance d'un système structural. Le choix du schéma de chargement est essentiel pour parvenir à une évaluation précise de la performance. Cependant, ces distributions de charges ne reflètent pas exactement les effets des caractéristiques dynamiques variables lors de la réponse inélastique, ni l'influence des modes supérieurs. Par conséquent, une sélection minutieuse du schéma de chargement est nécessaire.

L'analyse présentée vise à évaluer et comparer la réponse d'une structure en béton armé de huit étages en appliquant des schémas de chargement prescrits par plusieurs réglementations, à l'aide du logiciel ETABS 18.1.1.

Les résultats montrent avec une grande clarté que, dans tous les cas, la forme de la distribution des charges latérales influence fortement la réponse du bâtiment. Cet effet est particulièrement notable lorsque différents schémas de chargement sont considérés et analysés. Il a également été constaté que le premier mode est prédominant, tandis que l'influence des modes supérieurs est négligeable.

I.7.4. Contexte Théorique de l'Analyse PUSHOVER Conventionnelle

Dans l'analyse PUSHOVER conventionnelle, il est supposé que la réponse d'un système à plusieurs degrés de liberté (MDOF) puisse être représentée par un système équivalent à un seul degré de liberté (ESDOF).

Cela implique que la réponse est contrôlée par un seul mode et que la forme de ce mode $\{\Phi\}$ reste constante tout au long de l'évolution temporelle de la réponse, quel que soit le niveau de déformation[7]. Ainsi, l'équation différentielle d'un système à plusieurs degrés de liberté (MDOF), en définissant $X = \{\Phi\}x_t$ comme le déplacement relatif du système MDOF, ou x_t est le déplacement du toit, peut s'écrire comme :

$$[M]\{\Phi\}\ddot{X}_t + [C]\{\Phi\}\dot{X}_t + [F] = -M\{1\}\ddot{X}_g \quad (I-15)$$

Où **M** et **C** sont respectivement la matrice de masse et la matrice d'amortissement, **F** représente le vecteur des forces aux étages, et $\ddot{x}_g$ désigne l'accélération du sol.

Si le déplacement du système ESDOF $\hat{x}$ est défini comme :

$$\hat{x} = \frac{\{\Phi\}^T M \{\Phi\}}{\{\Phi\}^T M \{1\}} x_t \quad (I-16)$$

En pré-multipliant l'équation (1) par $\{\Phi\}^T$ et en substituant $\hat{x}$ à partir de l'équation (I-16), l'équation suivante est obtenue pour la réponse du système ESDOF [5]:

$$\hat{M}\ddot{\hat{x}} + \hat{C}\dot{\hat{x}} + \hat{F} = -\hat{M}\ddot{x}_g \quad (I-17)$$

Où $\hat{M}$, $\hat{C}$ et $\hat{F}$ représentent les propriétés du système ESDOF et sont définis par :

$$\hat{M} = \{\Phi\}^T M \{1\} \quad (I-18)$$

$$\hat{C} = \{\Phi\}^T C \{\Phi\} \frac{\{\Phi\}^T M \{1\}}{\{\Phi\}^T M \{\Phi\}} \quad (I-19)$$

$$\hat{F} = \{\Phi\}^T F \quad (I-20)$$

Les caractéristiques force-déformation du système SDOF équivalent peuvent être déterminées à partir des résultats de l'analyse pushover non linéaire du système MDOF, qui produit généralement un diagramme de force de base (V) en fonction du déplacement du toit (x_t ou δ_t), comme illustré dans la Figure I-8.

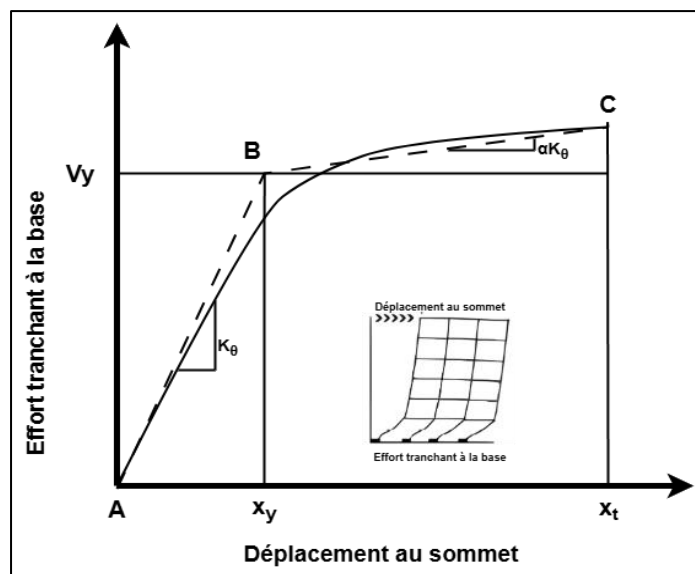


Figure I-8 : Réponse statique multi-linéaire et bilinéaire de la force de base en fonction du déplacement du toit pour une structure MDOF

La courbe de la force de base en fonction du déplacement du toit doit être représentée par une relation bilinéaire afin de définir la résistance à la "plastification" (V_y), la raideur "élastique" effective ($K_e = V_y / \delta_y$) et la raideur d'écrouissage (ou d'adoucissement) ($K_s = \alpha K_e$) de la structure, comme illustré dans la Figure I-8 [8].

I.7.5. Concepts Fondamentaux de l'Analyse Pushover

Généralement, dans la méthode Pushover, la structure est soumise à un schéma de chargement latéral prédéterminé ou adaptatif et est poussée statiquement jusqu'au déplacement cible. La charge latérale peut être appliquée sous forme de force ou de déplacement. Le chargement est monotone, en tenant compte des effets du comportement cyclique, des inversions de charge et des approximations de l'amortissement. À mesure que l'intensité du chargement augmente, les points faibles et les modes de rupture de la structure sont identifiés. [9] [10]

Ces aspects fondamentaux de l'analyse pushover sont décrits ci-dessous :

I.7.5.1. Schéma de chargement latéral

Pour une évaluation de la performance, le choix du schéma de chargement est souvent plus critique que la détermination précise du déplacement cible. Ce choix joue un rôle clé, car il doit provoquer une déformation de la structure similaire à celle observée lors d'un séisme.

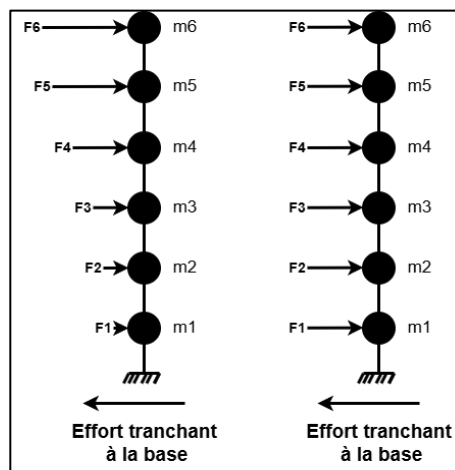


Figure I-9 : Répartition conventionnelle des forces latérales selon un schéma triangulaire inversé et un schéma uniforme

Conformément aux méthodes conventionnelles, comme illustré dans la Figure I-9, on utilise généralement un schéma triangulaire inversé ou un schéma uniforme, en accord avec la

répartition codifiée des forces latérales statiques. Toutefois, l'utilisation de formes de charge adaptatives est en augmentation. L'importance de la forme de chargement devient plus significative lorsque la réponse de la structure n'est pas dominée par un seul mode. [5] [11].

I.7.5.2. Déplacement cible

Le déplacement cible estime le déplacement global attendu sous l'effet du séisme de conception, correspondant au niveau de performance sélectionné. Une définition pratique du déplacement cible est le déplacement du toit au centre de masse de la structure. Ce déplacement peut être calculé en utilisant toute méthode prenant en compte les effets de la réponse non linéaire sur l'amplitude du déplacement. [5] [9] [12].

I.7.5.3. Forces appliquées vs. Déplacements appliqués

Historiquement, et en raison des avancées dans la compréhension de la dynamique des structures, la conception parasismique repose principalement sur l'application de forces plutôt que sur le déplacement. Bien que les méthodes de conception modernes soient devenues plus rigoureuses, cette approche basée sur la force n'a pas changé de manière significative depuis son apparition au début des années 1900. [13].

Cependant, les déplacements structurels sont une cause majeure des dommages dans les bâtiments soumis aux séismes. Ainsi, des techniques simples permettant d'estimer ces déplacements ont été développées, ouvrant la voie à une approche de conception basée sur le déplacement. Cette approche est aujourd'hui considérée comme efficace pour la conception et le contrôle des structures face aux charges sismiques. [5].

I.8. MATRICES DE PROBABILITE DE DOMMAGES (DPM)

Les DPM sont un outil utilisé dans l'évaluation de la vulnérabilité sismique pour prédire la probabilité qu'un bâtiment ou une structure se trouve dans un état de dommage particulier, donné un certain niveau d'intensité du séisme. La DPM offre une méthode systématique pour quantifier la probabilité de différents niveaux de dommages, basée sur des données historiques, des observations empiriques ou des modèles analytiques. Elle présente généralement les probabilités des différents états de dommage (par exemple, aucun dommage, dommage léger, dommage important, effondrement) pour différents niveaux d'intensité du mouvement du sol.

La DPM est précieuse dans l'analyse des risques sismiques car elle aide à estimer les pertes potentielles, à prioriser les efforts de mitigation et à développer des plans d'intervention d'urgence. En utilisant les DPM, les parties prenantes peuvent mieux comprendre la vulnérabilité des bâtiments et des infrastructures face aux séismes, ce qui conduit à des processus de prise de décision mieux informés dans les stratégies de préparation aux catastrophes et de réduction des risques.

I.8.1. Méthodes basées sur le spectre de capacité

HAZUS (Hazard US) est un résultat majeur d'un projet réalisé pour le National Institute of Building Science (NIBS) dans le cadre d'un accord de coopération avec la Federal Emergency Management Agency (FEMA). Ce projet important visait à développer une méthodologie applicable à l'échelle nationale pour estimer les pertes potentielles dues aux séismes à l'échelle régionale.[14] [15].

La méthodologie constitue un cadre complet comprenant plusieurs modules principaux. Ceux-ci incluent l'estimation des dangers potentiels liés aux sciences de la Terre (Potential Earth Science Hazards - PESH), qui comprennent le mouvement du sol, la défaillance du sol (liquéfaction, glissements de terrain, rupture de surface de faille) et les tsunamis/seiches. L'inventaire est méticuleusement divisé en plusieurs catégories : bâtiments, installations, systèmes de transport, systèmes d'utilités et installations de matières dangereuses. Chaque catégorie est subdivisée en classes prédéfinies de bâtiments présentant des caractéristiques similaires en termes de dommages et de pertes.

Les dommages physiques directs sont calculés pour chaque classe de bâtiment afin de déterminer la probabilité d'absence, de dommages légers, modérés, étendus et complets, aussi bien pour les dommages structurels que non-structurels dus à chaque type de PESH. Les dommages physiques induits par l'inondation, le feu, les matières dangereuses et les débris sont également estimés. Les pertes économiques et sociales directes, dues aux victimes, aux personnes rendues sans abri, et aux pertes financières directement liées aux dommages, sont calculées. Les pertes économiques indirectes liées à l'arrêt des activités, pouvant provoquer une réaction en chaîne dans l'économie régionale, sont aussi prises en compte.

La composante d'évaluation de la vulnérabilité de la procédure est une partie cruciale du module des dommages physiques directs. Elle est basée sur la méthode du spectre de capacité de l'ATC-40 [16]. Dans cette méthode, le point de performance d'un type de bâtiment sous un scénario spécifique de secousse sismique (ou PESH) est déterminé à partir de l'intersection entre un spectre accélération-déplacement, représentant le mouvement du sol, et un spectre de capacité (courbe de pushover) représentant le déplacement horizontal de la structure sous une charge latérale croissante [17], comme illustré à la Figure I-10.

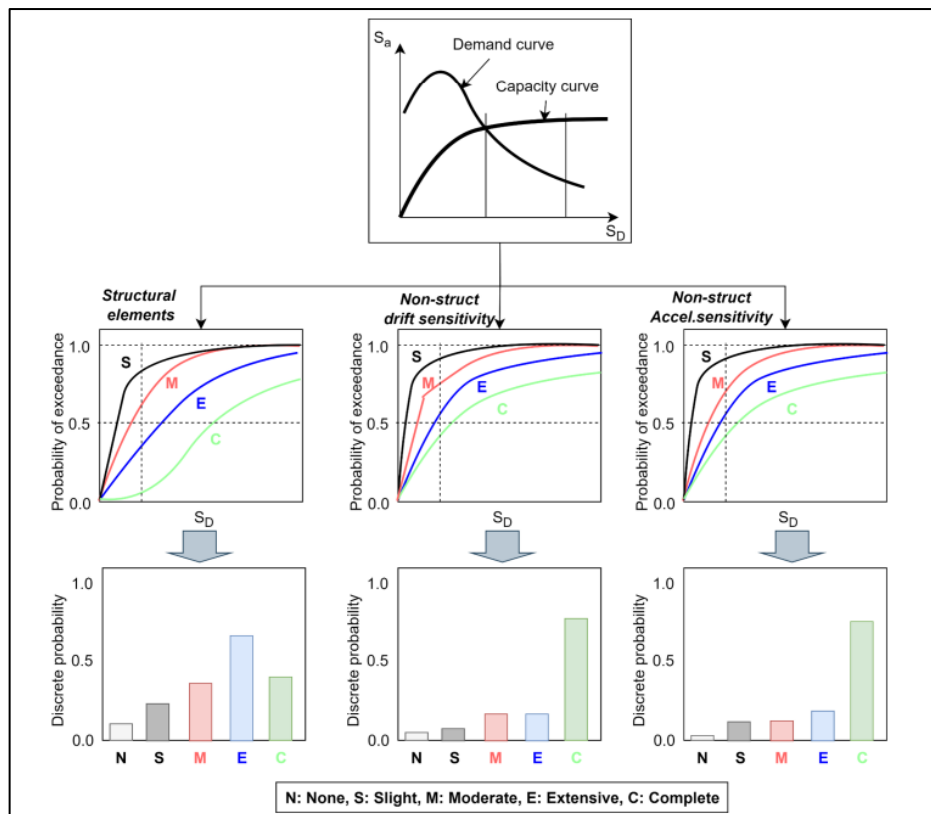


Figure I-10 : Estimation de l'état de dommage selon la méthodologie HAZUS

Le spectre de demande est réduit pour tenir compte à la fois de l'amortissement et des effets de durée. Cette réduction vise à prendre en compte l'amortissement hystérétiques qui se produit lors du comportement inélastique de la structure, où l'amortissement est basé sur la surface enfermée par la boucle hystérétique au déplacement et à l'accélération de réponse maximale. Un facteur de réduction est appliqué à l'amortissement hystérétiques en fonction de la durée de la secousse pour simuler la dégradation (par exemple, pincement) de la boucle hystérétique durant la réponse cyclique.

Le spectre de capacité pour chaque classe de bâtiment aux États-Unis a été créé en utilisant des bâtiments modèles conçus selon différents niveaux de pratiques de conception. Le point de performance obtenu à partir d'un bâtiment moyen est utilisé comme entrée de déplacement dans les courbes de vulnérabilité aux états limites. Cela permet de déterminer la probabilité qu'un bâtiment se trouve dans une bande spécifique de dommages. Des phrases de transition peuvent être utilisées pour relier ces idées. Les courbes de vulnérabilité sont une représentation probabiliste d'une distribution log normale où l'écart-type combine l'incertitude du seuil des états de dommage, les propriétés de capacité du bâtiment, et l'incertitude liée à la demande du mouvement du sol.

Une fois les courbes construites pour tous les états de dommage (léger, modéré, étendu et complet), le coût de réparation peut être estimé en sommant les probabilités multipliées par le poids de chaque état de dommage, comme illustré dans le Tableau I-8.

Tableau I-8 : Pondérations des coûts de réparation adoptées par la méthodologie HAZUS

Etat de dommage	Aucun	Léger	Modéré	Étendu	Complet
Ratio de dommage en %	0	2	10	50	100

Bien que cette méthode soit efficace sur le plan computationnel, l'utilisation de l'Analyse Probabiliste du Risque Sismique (PSHA) dans les modèles de pertes régionales est théoriquement moins robuste que la représentation du risque sismique par la génération d'un grand nombre de scénarios sismiques compatibles en termes de magnitude, localisation et fréquence d'occurrence avec la sismicité régionale [18].

La méthode HAZUS impose une limite de hauteur des bâtiments pour la création des courbes de vulnérabilité et de capacité. Pour d'autres types de structures, une calibration est nécessaire, par exemple : la Turquie, réalisée par Bommer et al. [19], l'évaluation du risque sismique d'Oslo documentée par Molina et Lindholm [20], l'estimation des pertes à Taïwan (utilisant une version modifiée de HAZUS appelée Haz-Taiwan) comme discuté par Yeh et al. [21], ainsi que le projet RISK UE pour l'évaluation du risque dans 7 villes européennes. De plus, la méthode nécessite des informations précises sur le bâtiment, telles que les détails de l'armature, ce qui peut représenter un défi.

I.9. COURBES DE FRAGILITE

Diverses études ont été menées concernant la construction de références pour les courbes de fragilité. Celles-ci représentent les probabilités d'atteindre ou de dépasser un état limite de dommage ou de performance, sous forme de fonctions de densité cumulative (CDF). De nombreuses équations ont été proposées pour générer des courbes de fragilité, comme le résume le Tableau I-9. Cependant, l'équation générale pour la construction des courbes de fragilité est exprimée dans l'Équation (I-21).

$$CDF = P[ds = DS | IM = im] \quad (I-21)$$

Où :

- **DS** représente l'état limite de dommage ou de performance.
- **IM** est la mesure du mouvement du sol (par exemple, PGA, PGV, etc.).

Les fonctions des courbes de fragilité sont, dans certains cas, utilisées pour ajuster des données expérimentales ou des probabilités calculées.

I.9.1. Régression logistique

Statistiquement, la régression logistique est un modèle qui utilise la fonction logit pour ajuster une variable dépendante binaire (0 ou 1, vrai ou faux). Elle convertit les log-odds en probabilités à l'aide d'une fonction sigmoïde, comme illustré dans la Figure I-11.

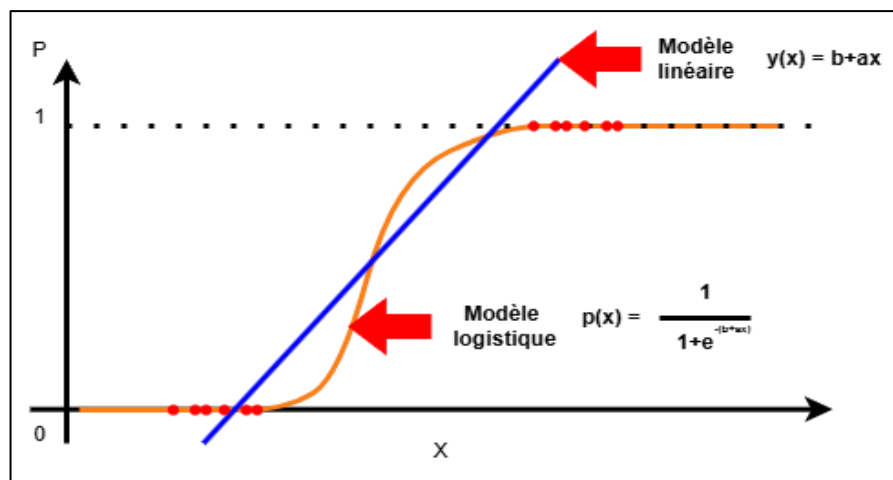


Figure I-11 : La régression linéaire et logistique

I.9.1.1. Odds et log-odds

Les *odds* (ou log-odds) représentent le rapport entre les événements vrais et faux. Par exemple, si nous avons cinq bâtiments de même hauteur et de même type soumis à un séisme et que quatre d'entre eux sont endommagés, alors les *odds* des structures endommagées sont de 4 contre 1, comme expliqué dans l'Équation (I-22).

$$Odds_{(damage)} = \frac{Damaged}{Undamaged} \Leftrightarrow \log(Odds_{(damage)}) = \log\left(\frac{Damaged}{Undamaged}\right) \quad (I-22)$$

Les *odds* peuvent être calculés à partir de la probabilité, comme indiqué dans l'Équation (I-23).

$$Odds = \frac{p}{1 - p} \quad (I-23)$$

Où p est la probabilité d'occurrence (des bâtiments endommagés dans l'exemple précédent).

Tableau I-9 : Équations des courbes de fragilité

Chercheurs	Équation	Paramètres
Singhal et Kiremidjian [22]	$P_{[MMI]}[d MMI] = \int P_{[d S_a]}[d S_a] f[S_a MMI] d_s$	▪ $P_{[MMI]}[d MMI]$: Probabilité conditionnelle d'un état limite pour une intensité MMI. ▪ $P_{[MMI]}[d S_a]$: Probabilité de dépassement pour S_a. ▪ $f[S_a MMI]$: Densité de probabilité conditionnelle de S_a à MMI.
Yamaguchi et Yamazaki [23]	$P(x) = \Phi\left(\frac{\ln(x) - \lambda}{\sigma}\right)$	▪ $\Phi(.)$: fonction de répartition de la loi normale standardisée. ▪ λ: moyenne des échantillons logarithmiques $\ln(x)$. ▪ σ: écart-type des échantillons logarithmiques $\ln(x)$.
Kircil et Polat [24]	$FR(x) = \Phi\left(\frac{\ln(x) - \lambda}{\sigma}\right)$	▪ $\Phi(.)$: fonction de répartition de la loi normale standardisée.

CHAPITRE II : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

		▪ λ : moyenne des échantillons logarithmiques des mouvements sismiques $\ln(x)$. ▪ σ : écart-type des échantillons logarithmiques $\ln(x)$.
Ibrahim et El-Shami [25]	$P[D PGA] = \Phi\left(\frac{\ln(PGA) - \lambda}{\sigma}\right)$	▪ $\Phi(\cdot)$: fonction de répartition de la loi normale standardisée. ▪ λ : moyenne des valeurs $\ln(PGA)$. ▪ σ : écart-type des valeurs $\ln(PGA)$.
Jeon et al. [26]	$P[D > C IM] = \Phi\left(\frac{\ln(S_a/S_c)}{\sqrt{\beta_D^2 + \beta_C^2 + \beta_{EM}^2}}\right)$	▪ D : demande sismique due à une réplique. ▪ C : capacité structurelle. S_a : demande sismique. ▪ $\beta_D, \beta_C, \beta_{EM}$: variabilités associées à la demande, à la capacité et au modèle.

La Figure I-12 résume la procédure logistique pour développer une courbe de fragilité.

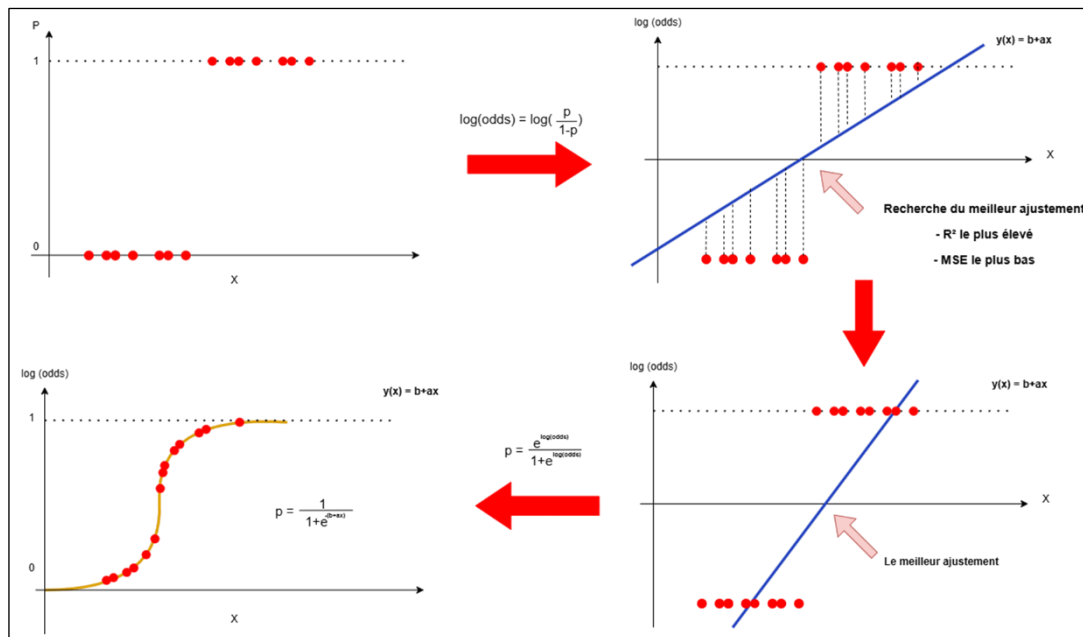


Figure I-12 : La procédure logistique pour développer une courbe de fragilité.

Ce processus peut être utilisé lorsque plusieurs réponses sont enregistrées dans le cas de l'IDA ou de l'ISA et que les états limites de dommage/performance sont définis. Ensuite, une classification binaire permet de séparer les points dépassant et ne dépassant pas les seuils, comme illustré dans la Figure I-13.

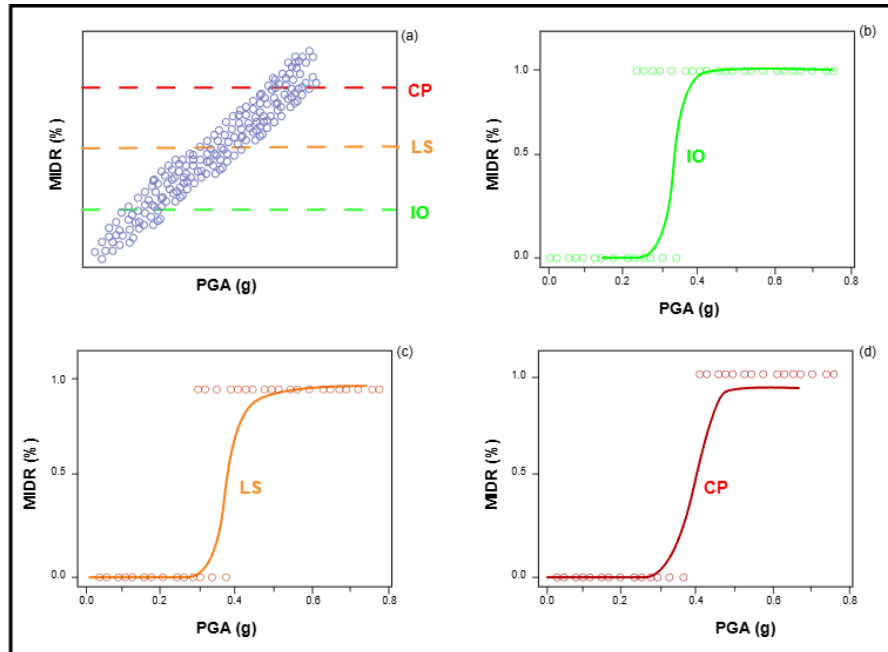


Figure I-13 : Procédure de régression logistique appliquée à l'IDA

- a) Nuage de points obtenus à partir de l'ISA ou de l'IDA.
- b) Courbe de fragilité pour l'état limite IO.
- c) Courbe de fragilité pour l'état limite LS, et d) Courbe de fragilité pour l'état limite C.

I.9.2. Fonction LOSS : Ratio de dommages

Le ratio de dommages des structures est un facteur clé dans l'évaluation de la performance et de la sécurité des bâtiments et autres infrastructures. Il est souvent classé en différents niveaux en fonction des dommages observés et du comportement structurel. Ces catégories incluent des dommages légers (SD), des dommages modérés (MD), des dommages étendus (EC) et un effondrement total (CC), fournissant ainsi un cadre pour comprendre l'étendue des dégâts et les risques potentiels pour la sécurité des occupants.

De nombreuses études ont proposé des seuils de niveaux de performance basés sur le ratio de déplacement inter-étage maximal (MIDR) ainsi que sur les courbes de fragilité afin d'évaluer quantitativement le ratio de dommages des structures. Cela permet une meilleure

compréhension de l'impact des différentes sollicitations sismiques et des types de structures sur les dommages des bâtiments.

De plus, les équations des courbes de fragilité développées par les chercheurs offrent une approche systématique pour exprimer la probabilité d'atteindre ou de dépasser un certain état limite de dommages ou de performance, ce qui est essentiel pour l'évaluation des risques et l'élaboration de stratégies de mitigation.

Le ratio de dommages global (GDr) indique le coût des dommages subis par un bâtiment par rapport à son coût initial. Il peut être calculé à l'aide des courbes de fragilité pour différents états de dommages et du ratio de dommages associé à chaque état. L'équation (I-24) représente la formule du GDr.

$$\begin{aligned} GDr &= \sum PE(Ds = d) Dr \\ &= [P_{nodamage} - P_{slight}] Dr1 \\ &+ [P_{slight} - P_{moderate}] Dr2 \\ &+ [P_{moderate} - P_{extensive}] Dr3 \\ &+ [P_{extensive} - P_{complete}] Dr4 \end{aligned} \quad (I-24)$$

Où $PE(Ds = d)$ est la probabilité de dépassement d'un état de dommage (d). Dr est le ratio de dommages correspondant à un état de dommage (d).

I.10. LA METHODE RISK-UE

Les séismes figurent parmi les catastrophes naturelles les plus redoutables pouvant affecter une structure au cours de sa durée de vie. Leur caractère soudain, leur intensité élevée et l'importante quantité d'énergie qu'ils libèrent en font une menace sérieuse pour l'environnement bâti.

Les dommages importants observés lors de récents événements sismiques soulignent l'urgence et la nécessité d'une évaluation rigoureuse du risque sismique, dans le but d'anticiper les effets potentiels de futurs séismes. En réponse à cet enjeu, de nombreux gouvernements, centres de recherche et organismes internationaux ont développé des méthodologies et des outils permettant d'analyser, de quantifier et de gérer efficacement ce risque.

Le projet RISK-UE (Risk – Urban Environment) a été mené entre 2001 et 2004 dans le cadre du 5e Programme-Cadre de Recherche et Développement (PCRD) de l'Union européenne. Ce projet a été officiellement validé en 2003. Il visait à élaborer une méthodologie modulaire et harmonisée pour l'évaluation du risque sismique, en particulier dans les environnements urbains européens.

L'objectif principal du projet RISK-UE était de développer des outils permettant de simuler des scénarios sismiques réalistes à l'échelle des villes, en évaluant les impacts globaux que pourrait générer un ou plusieurs séismes plausibles. Il visait également à produire une estimation cohérente du risque sismique à grande échelle, tout en prenant en compte les spécificités des typologies de bâtiments présentes en Europe.

Ce projet a été mis en œuvre pour la première fois dans sept villes européennes pilotes, situées dans différents pays, notamment en Espagne, en Italie et en France. Toutefois, la méthodologie développée est adaptable à toutes les typologies constructives européennes et peut être étendue à d'autres contextes.

Le cadre méthodologique du projet repose sur deux approches complémentaires permettant d'évaluer la vulnérabilité sismique à grande comme à petite échelle :

- La méthode empirique de premier niveau (LM1)
- La méthode analytique de second niveau (LM2)

Ces deux approches ont été conçues afin de permettre une évaluation à la fois généralisée (à l'échelle urbaine) et spécifique (à l'échelle du bâtiment) des dommages et des pertes potentielles en cas de séisme.

I.10.1. Méthode LM-1

La méthode LM1 (Level Method 1), dite empirique, est la première approche développée dans le cadre du projet. Elle repose sur l'analyse des données de dommages observés sur le terrain à la suite de séismes réels, ou issus d'expérimentations.

Elle a été élaborée par Giovinazzi et Lagomarsino, sur la base de l'échelle macrosismique européenne EMS-98, et présentée dans les travaux de Mouroux & Le Brun. La méthode LM1

est particulièrement adaptée aux contextes où les études de microzonage sismique sont absentes ou incomplètes, mais où l'on dispose d'informations macrosismiques fiables.

La méthode LM1 est utilisée pour définir les classes de vulnérabilité, calculer les indices de vulnérabilité et établir les matrices de probabilité de dommage (DPM) propres à la matrice typologique du projet RISK-UE (BTM – Building Typology Matrix). En tenant compte de la qualité et de la quantité des données disponibles pour l'analyse de la vulnérabilité, plusieurs schémas de modification de l'indice de vulnérabilité peuvent être appliqués afin d'ajuster le niveau de précision de l'évaluation.[27].

La procédure d'estimation des dommages, telle que décrite dans les chapitres précédents des documents de référence du projet, peut être résumée selon les étapes suivantes :

1. Calcul de l'indice de vulnérabilité. [27], [28].
2. Estimation du dommage moyen,
3. Génération de la matrice de probabilité de dommage (DPM) et des courbes de fragilité à l'aide d'une loi bêta. [28], [29].

Étape 1 : Estimation de l'indice de vulnérabilité V_i

L'indice de vulnérabilité V_i constitue une mesure synthétique de la susceptibilité d'un bâtiment à subir des dommages en cas de séisme. Il est calculé à partir d'un ensemble de paramètres qualitatifs liés à la configuration, à la typologie et à l'état du bâtiment.

La formule utilisée pour déterminer V_i est la suivante :

$$\bar{V}I = V_I^* + \Delta V_R + \Delta V_m \quad (I-25)$$

Étape 2 : Estimation du dommage moyen (μ_D)

La méthode LM1 définit des fonctions de vulnérabilité semi-empiriques moyennes qui établissent une corrélation entre le niveau moyen de dommage (μ_D), l'intensité macrosismique (I) et l'indice de vulnérabilité (V_i). Ces fonctions sont ajustées aux points discrets de la matrice de probabilité de dommage (DPM). Le dommage moyen doit être estimé à partir de l'indice de vulnérabilité V_i issu de la typologie BTM, et de l'intensité sismique correspondante I, selon la relation définie par l'équation (I-26).

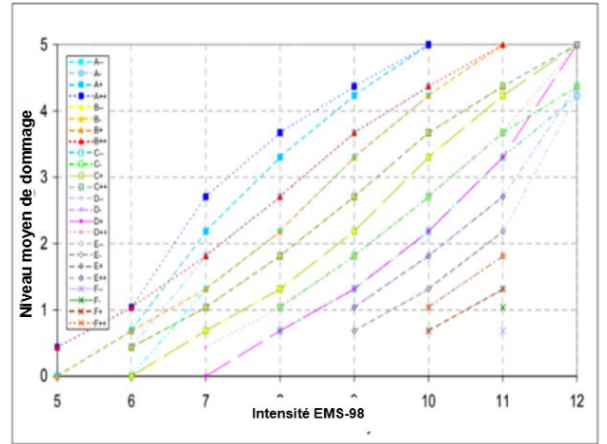


Figure I-14 : Dommage moyen selon l'intensité sismique et la vulnérabilité

$$\mu_D = 2.5 + \tanh\left(\frac{I + 6.25\bar{V}_I - 13.1}{2.3}\right) \quad (I-26)$$

Étape 3 : Estimation de la distribution des dommages (matrice de probabilité de dommage et courbes de fragilité) :

La distribution des dommages est calculée à l'aide de la loi bêta. Cette distribution est utilisée pour établir une matrice de probabilité de dommage (DPM) continue pour chaque classe de vulnérabilité, selon les formulations définies par les équations I-27 à I-31.

$$p_\beta(X) = \frac{\Gamma(t)}{\Gamma(r)\Gamma(t-r)} \frac{(X-a)^{r-1}(b-X)^{t-r-1}}{(b-a)^{t-1}} \quad (I-27)$$

$$CDF : P_\beta(X) = \int_a^x p_\beta(\varepsilon) d\varepsilon \quad (I-28)$$

Où : a, b, t et q sont les paramètres de la distribution, et x est la variable continue dont les valeurs sont comprises entre a et b.

Les paramètres de la loi bêta sont corrélés au dommage moyen μ_D selon la relation suivante :

$$a=0 ; b=6 ; t=8 ;$$

$$r = t (0.007\mu D^3 - 0.052\mu D^2 + 0.2875\mu D) \quad (I-29)$$

‘Le paramètre t influence la dispersion de la distribution ; lorsqu’on utilise $t = 8$, la loi bêta prend une forme très proche de celle de la distribution binomiale.’

La fonction de densité de probabilité bêta discrète est calculée à partir des probabilités associées aux niveaux de dommage k et $k+1$ ($k = 0, 1, 2, 3, 4, 5$), selon la formule suivante :

$$pk = P\beta(k + 1) - P\beta(k) \quad (I-30)$$

La courbe de fragilité, qui définit la probabilité d’atteindre ou de dépasser un certain niveau de dommage, est obtenue directement à partir de la distribution bêta cumulative de probabilité selon la relation suivante :

$$P(D \geq Dk) = 1 - P\beta(k) \quad (I-31)$$

I.10.2. Méthode LM-2

La seconde approche, appelée méthode de second niveau (LM-2), repose sur des études analytiques des structures, réalisées soit par une analyse détaillée de type « time history », soit à l’aide d’une analyse simplifiée telle que l’analyse pushover. Cette méthode est similaire à celle adoptée dans le projet HAZUS et utilise deux ensembles de modèles de comportement/sollicitation des bâtiments : le modèle de capacité et le modèle de fragilité. [28]

Le modèle de capacité (type pushover) : Le modèle de capacité ou courbe force-déplacement d’une structure représente la réponse maximale attendue d’un bâtiment pour une sollicitation sismique donnée. Ce modèle considère uniquement la réponse du premier mode, en supposant que ce dernier domine le comportement structurel et contrôle l’évolution des dommages.

Le modèle de fragilité : Ce modèle est utilisé pour prédire les probabilités conditionnelles qu’un bâtiment atteigne ou dépasse un état de dommage donné. Formellement, il exprime la $Psk(Ds = \text{or} > ds | Y=y_k)$, où y_k est un niveau spécifique du mouvement sismique au sol. La probabilité conditionnelle d’être dans un état de dommage donné correspond à la différence entre deux courbes de fragilité adjacentes.

CHAPITRE II : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

L'objectif de cette méthode est d'évaluer les dommages ou les pertes susceptibles de survenir pendant ou après un événement sismique spécifique, que ce soit pour un bâtiment individuel ou pour un groupe de bâtiments. Pour atteindre cet objectif, cinq étapes doivent être suivies :

- ❖ **ÉTAPE 1** : Sélectionner un bâtiment modèle dans la typologie BTM de RISK-UE, représentant de manière adéquate les caractéristiques du bâtiment ou du groupe de bâtiments à étudier (matériau de construction, système structurel, classe de hauteur, niveau de conception et de performance attendu ou identifié, etc.).
- ❖ **ÉTAPE 2** : Définir le modèle de capacité (pushover) du bâtiment sélectionné, puis le convertir en spectre de capacité.
- ❖ **ÉTAPE 3** : Déterminer ou modéliser le spectre de demande sismique spécifique au site du bâtiment.
- ❖ **ÉTAPE 4** : Calculer ou modéliser la réponse attendue du bâtiment (performance) en croisant le spectre de capacité et le spectre de demande, et identifier le point d'intersection (point de performance).
- ❖ **ÉTAPE 5** : À partir du modèle de fragilité correspondant, estimer les probabilités conditionnelles que, pour un point de performance donné, le bâtiment ou le groupe de bâtiments atteigne ou dépasse certains états de dommage.

RISK-UE BTM

No.	Label	Description	Name
1	M11L		Low-Rise
2	M11M		Mid-Rise
3	M12L		Low-Rise
4	M12M	Simple stone	Mid-Rise
5	M12H		High-Rise
6	M13L		Low-Rise
7	M13M	Massive stone	Mid-Rise
8	M13H		High-Rise

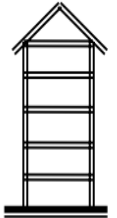


Figure I-15 : Typologie des bâtiments selon la matrice RISK-UE BTM

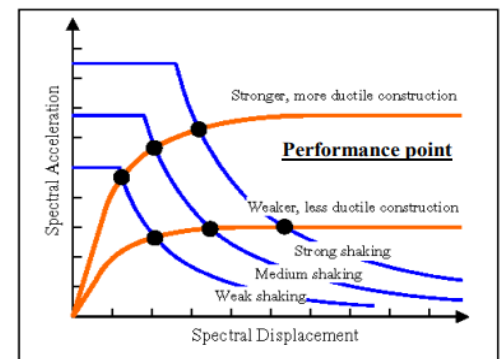


Figure I-16 : Détermination du point de performance

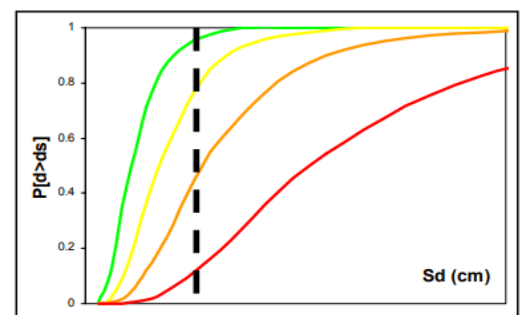


Figure I-17 : Les courbes de fragilité

I.11. ANALYSE DYNAMIQUE TEMPORELLE NON LINEAIRE

I.11.1. Définition de l'analyse temporelle non linéaire

L'analyse dynamique temporelle non linéaire (NTHA) des bâtiments est une méthode qui simule la réponse dynamique d'une structure soumise à un mouvement sismique donné. Parmi

toutes les méthodes d'analyse sismique, lorsqu'elle est bien réalisée, elle représente fidèlement l'action réelle d'un séisme sur une structure. Elle permet de prendre en compte le comportement non linéaire des éléments structuraux, tels que la fissuration, la plastification et la rupture, ainsi que l'interaction entre la structure et ses fondations. [30].

La NTHA est particulièrement importante pour les bâtiments présentant des irrégularités en géométrie, en répartition de masse ou en rigidité, ou ceux dotés de systèmes structuraux complexes comme les murs couplés, les cadres avec remplissage, les isolateurs de base et les dissipateurs d'énergie actifs ou passifs. Ces structures peuvent présenter un comportement non linéaire même à des niveaux de sollicitation modérés, en raison des non-linéarités géométriques, matérielles et structurelles qui apparaissent au sein de la structure et de ses éléments. Ainsi, la NTHA est un outil indispensable pour l'analyse sismique des structures complexes, irrégulières ou à exigences de performance élevées. [31], [32].

I.11.2. Comparaison entre l'analyse linéaire et l'analyse non linéaire

I.11.2.1. Analyse linéaire

L'analyse linéaire repose sur l'hypothèse que la structure réagit proportionnellement aux charges appliquées. Cela signifie que les relations entre efforts et déplacements suivent des lois linéaires, que les propriétés des matériaux restent constantes et que la géométrie initiale de la structure ne subit pas de modifications significatives.

Cette approche est largement utilisée dans l'ingénierie structurelle en raison de sa simplicité et de sa rapidité de mise en œuvre. Elle permet de résoudre efficacement de nombreux problèmes courants tels que :

- **La flexion élastique**, où les déformations restent dans le domaine élastique des matériaux.
- **Le flambage linéaire**, où les instabilités sont évaluées sous de faibles niveaux de charges.
- **Les vibrations modales**, où l'analyse des fréquences propres permet d'évaluer le comportement dynamique de la structure.

Toutefois, l'analyse linéaire présente des limites notables. Elle ne prend pas en compte des phénomènes complexes comme :

- Les grandes déformations, où les variations géométriques influencent la réponse structurelle.
- La plasticité des matériaux, essentielle pour étudier le comportement des structures sous charges extrêmes.
- La fissuration du béton ou des autres matériaux, modifiant la rigidité et la capacité portante.
- Les interactions de contact, telles que les appuis mobiles, les assemblages ou les frottements.

En conséquence, bien que l'analyse linéaire soit suffisante pour de nombreuses applications standards, elle devient inadaptée lorsque des effets non linéaires influencent la stabilité et la résistance d'une structure.

I.11.2.2. Analyse non linéaire

L'analyse non linéaire est une approche plus avancée qui prend en compte les comportements complexes des structures. Contrairement à l'analyse linéaire, elle intègre des relations non proportionnelles entre les charges et les déformations, ce qui permet de modéliser plus précisément la réalité physique des matériaux et des structures.

Cette méthode est particulièrement adaptée aux situations où :

- Les déformations sont importantes, entraînant des modifications notables de la géométrie.
- Les matériaux présentent des comportements non linéaires, tels que la plasticité, la viscoélasticité ou l'endommagement.
- Des fissurations et dégradations progressives apparaissent, influençant la rigidité de la structure.

- Le contact entre éléments structuraux devient significatif, par exemple dans les assemblages mécaniques ou les interactions sol-structure.

Bien que l'analyse non linéaire soit plus précise et mieux adaptée aux situations extrêmes, elle présente plusieurs inconvénients :

- **Un coût computationnel élevé**, nécessitant des ressources informatiques importantes.
- **Une complexité accrue**, exigeant des modèles plus sophistiqués et une expertise avancée pour l'interprétation des résultats.
- **Des difficultés de convergence numérique**, notamment lorsque les équations d'équilibre deviennent instables ou fortement dépendantes des conditions initiales.

Ainsi, l'analyse non linéaire est essentielle pour des études approfondies sur la stabilité, la résistance ultime et la durabilité des structures, en particulier dans des domaines comme le génie parasismique. Le compare l'analyse linéaire et l'analyse non linéaire selon plusieurs critères essentiels. Le **Tableau I-10** présente un récapitulatif comparatif entre l'analyse linéaire et l'analyse non linéaire selon plusieurs critères fondamentaux.

Tableau I-10 : Comparaison entre l'analyse linéaire et l'analyse non linéaire des structures

Critères	Analyse linéaire	Analyse non linéaire
Principe	Réponse proportionnelle aux charges appliquées	Réponse non proportionnelle aux charges appliquées
Propriétés des matériaux	Constantes (élasticité linéaire)	Variables (plasticité, endommagement, fissuration)
Géométrie de la structure	Supposée inchangée	Peut évoluer sous l'effet des grandes déformations
Complexité de calcul	Faible, résolution rapide	Élevée, nécessite des ressources computationnelles importantes
Utilisation		Comportements complexes (grandes déformations, plasticité, contact)

	Problèmes courants (flexion élastique, flambage, vibrations modales)	
Précision des résultats	Approximative, valable pour les faibles déformations	Plus réaliste, adaptée aux charges extrêmes et conditions réelles
Exemples d'application	Calcul des poutres et dalles sous charges classiques	Étude des structures soumises à des séismes, charges dynamiques, grandes déformations

I.11.3. Avantages de l'analyse dynamique temporelle non linéaire

- Une meilleure compréhension de la réponse structurelle face à un ensemble sélectionné de séismes permet une conception optimisée.
- Dans de nombreux cas, moins conservatrice que l'analyse statique ou l'analyse par spectre de réponse.
- La conception basée sur la performance permet une meilleure évaluation et compréhension des différents niveaux de performance.
- Les logiciels sont facilement accessibles et conviviaux.
- Optimiser la mise à niveau sismique des installations grandes ou critiques.
- Nécessaire pour une analyse « rationnelle » des structures non conformes aux codes.

I.11.4. Méthodes de résolution des équations de mouvement

Étant donné que la NTHA évalue la réponse dynamique des structures sous des charges variables dans le temps, elle nécessite la résolution de systèmes d'équations différentielles non linéaires, décrivant l'équilibre dynamique et le comportement de la structure. Toutefois, cette approche a un coût computationnel élevé par rapport aux méthodes d'analyse statique ou modale, ce qui impose un compromis entre la précision et le temps de calcul.

Les principales méthodes numériques utilisées pour résoudre les équations du mouvement sont:

- Méthode de Newmark-beta
- Méthode Wilson-Theta

- Méthode α de Hilber–Hughes–Taylor
- Méthode des différences centrales
- Méthode alpha généralisée
- Règle du trapèze avec la formule de différence arrière du second ordre (TR-BDF2)

Ces méthodes nécessitent le découpage de l'intervalle de temps en petits sous-intervalles appelés pas de temps, et leur précision ainsi que leur stabilité varient selon la méthode choisie

I.11.5. Algorithmes itératifs pour la résolution des équilibres dynamiques

La NTHA nécessite également le choix d'un algorithme itératif approprié pour résoudre les équations d'équilibre dynamique à chaque pas de temps. Parmi les algorithmes classiques, on retrouve :

- Newton-Raphson généralisé
- Krylov-Newton
- Newton-Sécant
- Procédure quasi-Newton BFGS

I.11.6. Modèles d'amortissement

Les modèles d'amortissement sont des paramètres cruciaux qui influencent l'exactitude et la fiabilité des résultats de la NTHA. L'amortissement est influencé par plusieurs phénomènes, comme le glissement, la plastification et la fissuration des composants structurels et non structurels, ainsi que les interactions sol-structure. Comme il est difficile de modéliser précisément tous ces phénomènes, des modèles simplifiés sont souvent utilisés, notamment l'amortissement visqueux équivalent.

Les modèles d'amortissement les plus courants en analyse sismique sont :

- Modèle de Rayleigh 1896 ;
- Modèle de Caughey 1960 ;
- Modèle de Wilson-Penzien 1972 ;

- Modèle d'Adhikari 2006.

Dans les logiciels d'analyse structurelle, l'amortissement de Rayleigh est largement utilisé en raison de sa simplicité et de sa capacité à représenter la dissipation d'énergie structurelle. Cependant, certains modèles ne correspondent qu'à quelques modes de vibration et ne représentent pas toujours fidèlement le comportement du système et. De nouveaux modèles proportionnels ont été développés pour améliorer la correspondance des ratios d'amortissement sur une large gamme de fréquences.

I.11.7. Modélisation des phénomènes hystérétiques

Un autre aspect clé de la NTHA est la modélisation des phénomènes hystérétiques des éléments structuraux soumis à des charges cycliques, comme c'est le cas lors des séismes. Parmi les modèles couramment utilisés, on retrouve :

I.11.7.1. Modèle de Bouc-Wen

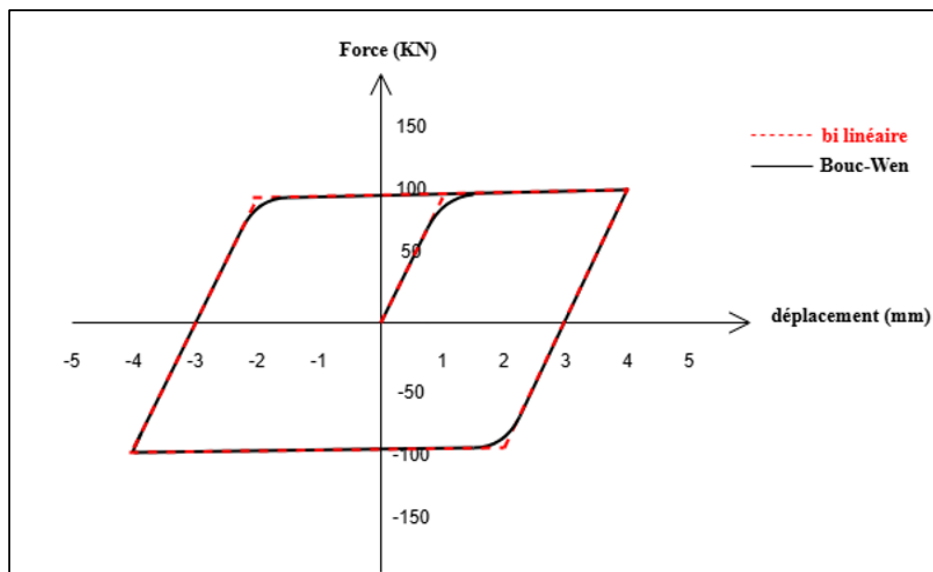


Figure I-18 : Modèle de Bouc-Wen

I.11.7.2. Modèle de Takeda

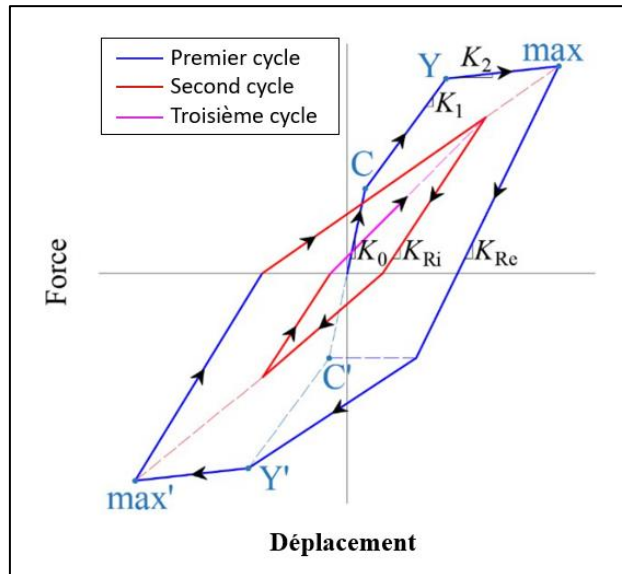


Figure I-19 : Modèle de Takeda

I.11.7.3. Modèle de Clough-Penzien

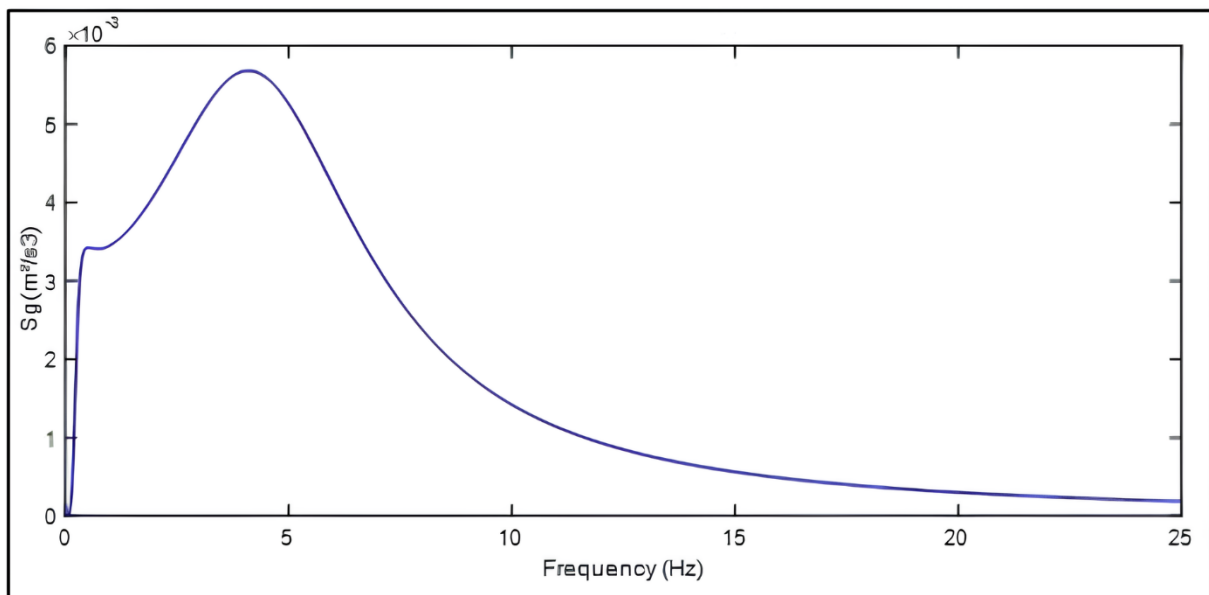


Figure I-20 : Modèle de Clough-Penzien

Ces modèles permettent de représenter la dissipation d'énergie et les effets de pincement observés dans les structures durant un tremblement de terre.

I.11.8. Solutions numériques pour un problème non linéaire

L'équation du mouvement pour un système à plusieurs degrés de liberté (MDOF) peut être exprimée sous forme matricielle comme suit :

$$[m]\{\ddot{X}(t)\} + [c]\{\dot{X}(t)\} + [k]\{X(t)\} = \{F(t)\} \quad (I-32)$$

Où $[k]$ est la matrice globale de rigidité, $[c]$ représente l'amortissement dépendant de la vitesse et $[m]$ est la matrice globale de masse, obtenue par l'assemblage des matrices élémentaires individuelles. $\{X(t)\}$, $\{\dot{X}(t)\}$ et $\{\ddot{X}(t)\}$ représentent respectivement les vecteurs de déplacement, de vitesse et d'accélération du système. Enfin, $\{F(t)\}$ désigne le vecteur des forces appliquées.

Les solutions exactes, analytiques ou sous forme fermée des équations du mouvement sont généralement impossibles à obtenir pour des systèmes ou des structures de grande taille, géométriquement complexes et constitués de plusieurs éléments. Cette difficulté s'accroît encore lorsque le système est non linéaire et/ou soumis à une excitation aléatoire (comme un enregistrement sismique), ce qui rend sa représentation exacte impossible ou très difficile, nécessitant donc des approches approximatives ou numériques.

Plusieurs méthodes permettent d'obtenir ces solutions de manière approximative, telles que l'intégration directe, l'oscillation libre ou l'équation de Duffing. [33], [34], [35]. La méthode de l'intégration directe est largement utilisée tant pour l'analyse analytique qu'informatique en raison de sa précision, mais elle est aussi coûteuse en termes de calcul et complexe à mettre en œuvre [36].

La plupart des structures sont modélisées comme des systèmes à plusieurs degrés de liberté (MDOF) comportant deux modes de vibration ou plus. La technique de superposition modale permet de transformer les équations du mouvement de la structure du système de coordonnées physiques vers un système de coordonnées modales. La méthode de superposition modale et la méthode d'intégration directe sont deux techniques distinctes utilisées pour résoudre les problèmes d'analyse dynamique. Les problèmes d'analyse dynamique linéaire sont souvent résolus à l'aide de la technique de superposition modale, car la réponse d'une structure ou d'un système est proportionnelle aux charges ou aux excitations appliquées. Cependant, cette

méthode n'est pas adaptée aux problèmes non linéaires, car elle suppose que la réponse de la structure est une combinaison linéaire de ses modes propres de vibration.

L'analyse non linéaire rapide (FNA) [37] est une approche qui décompose les non-linéarités en éléments concentrés et utilise des vecteurs de Ritz au lieu des vecteurs propres[38], [39]. La FNA est potentiellement une approche utile pour les concepteurs de nouveaux bâtiments, notamment pour l'isolation de base ou les conceptions basées sur la capacité, à condition qu'elle soit mise en œuvre de manière appropriée, par exemple en spécifiant et garantissant l'emplacement des éléments soumis à la plastification. Cependant, bien que rapide, la FNA n'est pas précise pour toutes les structures ; elle est efficace uniquement lorsque le nombre d'éléments sujets aux non-linéarités est relativement faible par rapport au nombre total d'éléments[40]. Un exemple typique est un système modulaire empilé avec des amortisseurs non linéaires entre chaque module.

Une technique plus précise, qui ne présente pas cette limitation de la FNA, est l'analyse dynamique non linéaire par intégration directe numérique en domaine temporel (DI). Toutefois, comme mentionné précédemment, cette méthode implique un coût de calcul élevé [41].

En conclusion, le choix de la méthode la plus appropriée dépend du compromis entre précision, stabilité, efficacité et des caractéristiques spécifiques du problème à résoudre.

I.11.8.1. Paramètre d'entrée

Le choix des paramètres d'entrée appropriés pour l'analyse non linéaire temporelle des structures est essentiel, car ils influencent la précision et la fiabilité de la réponse structurelle. Cependant, certains paramètres peuvent avoir une influence plus importante que d'autres, en fonction des caractéristiques du problème, des objectifs d'analyse et des critères de performance. Par exemple, la sélection et le calibrage des enregistrements de mouvements du sol sont essentiels pour obtenir des résultats fiables dans l'analyse non linéaire temporelle[42].

Le modèle structurel, qui comprend les éléments et les connexions structurelles, est un autre paramètre important qui doit être soigneusement créé, calibré et validé sur la base de données expérimentales ou de codes de conception. Par exemple, le modèle d'élément poutre à fibres est largement utilisé dans l'analyse élasto-plastique en ingénierie sismique, et sa précision a été

vérifiée à plusieurs reprises [43]. Il présente une grande efficacité et précision pour prédire la réponse des structures en béton soumises à un séisme[44], [45].

Il est bien connu [46], que le choix d'un modèle d'amortissement approprié pour simuler la dissipation d'énergie dans les structures soumises à des charges dynamiques, comme les séismes, joue un rôle essentiel pour obtenir des résultats fiables en analyse non linéaire temporelle. Le modèle d'amortissement de Rayleigh, une forme simple et largement utilisée, suppose une combinaison linéaire des matrices de masse et de rigidité pour définir la matrice d'amortissement. Pour améliorer ce modèle, le modèle d'amortissement de Caughey a été développé, utilisant une fonction polynomiale de la fréquence propre pour ajuster les ratios d'amortissement sur plusieurs modes.

Afin de surmonter les limites des modèles d'amortissement mentionnés ci-dessus, le modèle de Wilson-Penzien ajuste les ratios d'amortissement pour chaque mode en résolvant un problème généralisé de valeurs propres.

Les recherches d'Adhikari [47] ont conduit au développement de modèles proportionnels généralisés qui utilisent des fonctions de base pour étendre le modèle de Rayleigh. Plus récemment, Lee [48] a proposé un nouveau modèle d'amortissement proportionnel capable d'ajuster une courbe de ratio d'amortissement dans le domaine fréquentiel.

Il est important de noter que chaque modèle d'amortissement présente des avantages et des inconvénients selon le type de problème d'ingénierie considéré. Par conséquent, il est essentiel de choisir le modèle d'amortissement le plus approprié pour garantir la précision et la fiabilité des analyses dynamiques non linéaires.

I.11.9. Utilisation des NTHA pour l'évaluation de la fragilité des structures

(NTHA - Nonlinear Time History Analysis) est une méthode avancée permettant d'évaluer la réponse des structures soumises à des sollicitations sismiques réalistes. Cette approche repose sur la simulation du comportement structurel sous l'effet d'accélération sismiques enregistrées ou synthétiques, offrant une représentation détaillée des mécanismes de déformation et d'endommagement. En utilisant des analyses incrémentales, il est possible d'étudier la progression des dommages en fonction de l'intensité sismique et de déterminer des seuils de ruine. Les résultats obtenus, tels que les dérives inter-étages et les accélérations absolues,

servent ensuite à établir des courbes de fragilité qui quantifient la probabilité d'atteindre un état de dommage donné pour un niveau de sollicitation donné. Toutefois, la mise en œuvre de cette méthode dépend fortement de la complexité du modèle structural, de la qualité des données d'entrée et des compétences de l'analyste. Pour pallier ces contraintes, des stratégies de simplification sont souvent adoptées, allant des modèles multi-degrés de liberté (MDoF) simplifiés aux modèles élément par élément détaillés. L'intégration des NTHA dans l'évaluation de la fragilité permet ainsi d'améliorer la précision des analyses et de mieux quantifier les incertitudes associées aux performances structurales. [49].

I.11.9.1. Sélection et mise à l'échelle des enregistrements sismiques

- **Objectif de la sélection des enregistrements sismiques :**

Pour analyser le comportement des structures face aux séismes, il est essentiel de choisir des enregistrements sismiques représentatifs couvrant l'ensemble du spectre de réponse d'une structure, depuis le régime élastique, en passant par le comportement inélastique, jusqu'à l'effondrement global.

La variabilité record-to-record, due aux différences dans les mécanismes de la source sismique, l'atténuation du signal à travers le sol et les effets locaux du site, doit être prise en compte en sélectionnant un ensemble diversifié d'enregistrements sismiques.

- **Critères de sélection des enregistrements sismiques selon l'EN 1998-1 :**

La norme européenne EN 1998-1 impose plusieurs règles pour garantir une sélection représentative des enregistrements sismiques :

- Durée cohérente avec la magnitude :** La durée des enregistrements doit être en accord avec la magnitude et les caractéristiques du séisme correspondant à l'accélération de référence (a_g).
- Concordance spectrale :** Pour des périodes entre $0.2T_1$ et $2T_1$ (où T_1 est la période fondamentale de la structure dans la direction analysée), le spectre élastique moyen avec un amortissement de 5%, obtenu à partir de l'ensemble des enregistrements, doit être au moins 90% du spectre de réponse élastique de référence.

- c. **Ajustement spectral ("Spectral Matching")** : Il est possible d'ajuster les spectres des enregistrements à un spectre de conception ou à un spectre spécifique au site pour garantir qu'ils représentent le même niveau de menace sismique.

La méthode de sélection et d'ajustement des enregistrements influence directement la courbe de fragilité des structures, comme démontré par Gehl et al. (2014). La Figure II-6 illustre les effets de différentes méthodes d'ajustement du spectre naturel au spectre de réponse élastique de référence.

- **Mise à l'échelle et sélection en fonction de l'intensité sismique :**

L'évaluation du comportement sismique des structures nécessite plusieurs analyses non linéaires effectuées à différents niveaux d'intensité sismique afin de représenter divers scénarios de tremblements de terre.

Il faut cependant s'assurer que la mise à l'échelle des enregistrements reste raisonnable. En effet :

- ✓ Une mise à l'échelle excessive peut altérer la distribution fréquentielle et fausser l'énergie du signal.
 - ✓ Il est préférable de choisir des enregistrements correspondant à une magnitude de référence associée au scénario de séisme étudié.
- **Nombre d'enregistrements requis pour une estimation fiable** : Les réponses structurelles calculées sont sensibles aux caractéristiques spécifiques des enregistrements utilisés. Afin d'obtenir une estimation probabiliste robuste, il est nécessaire de tester plusieurs enregistrements sismiques.

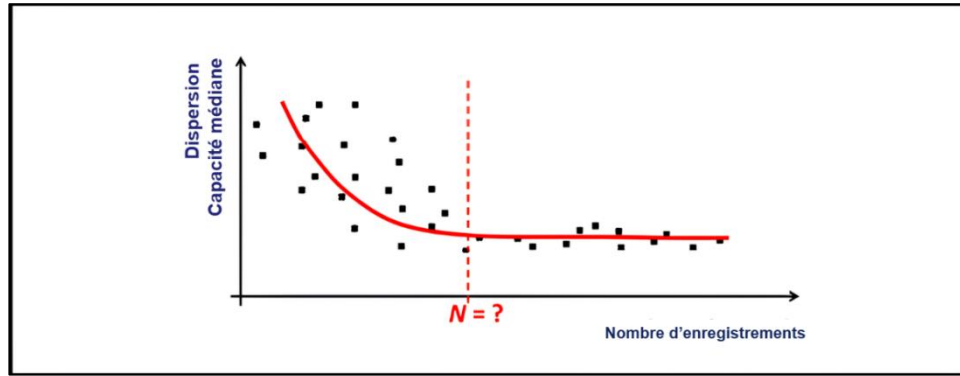


Figure I-21 : Nombre de mouvements du sol nécessaires pour une prédiction stable de la capacité médiane de ruine

La Figure I-21 montre l'évolution de la dispersion et de la capacité médiane en fonction du nombre d'enregistrements utilisés. Un nombre insuffisant de signaux peut entraîner une variabilité importante, rendant l'estimation incertaine.

Les paramètres influençant la stabilité des résultats sont :

- **Type d'analyse** : Dynamique non linéaire, statique non linéaire ou méthodes simplifiées.
- **Hypothèses de sélection des enregistrements** : Sélection basée sur l'intensité, la magnitude ou les effets locaux du site.
- **Type de structure** : Différents systèmes structuraux réagissent différemment aux excitations sismiques.

Pour les analyses dynamiques non linéaires, l'ATC-58 (FEMA P-58, 2012) recommande l'utilisation de 11 paires de signaux sismiques (soit 22 enregistrements, incluant les deux composantes orthogonales du mouvement).

I.11.9.2. Analyse incrémentale

L'Incremental Dynamic Analysis (IDA), développé par Vamvatsikos et Cornell en 2002, est une méthode complète permettant d'extraire la distribution conditionnelle de la réponse structurelle (par exemple, les dérives inter-étages maximales ou les accélérations maximales des planchers) en fonction d'un indice d'intensité (IM) pour différents niveaux de cet indice, allant de l'élasticité jusqu'à l'effondrement global. [49].

CHAPITRE II : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

Cette approche consiste à soumettre un modèle structural à une analyse non linéaire transitoire sous l'effet d'une série d'enregistrements sismiques (accelerogrames) qui sont progressivement amplifiés jusqu'à atteindre l'état d'effondrement de la structure.

Concernant l'application de cette procédure, l'amplitude de chaque mouvement sismique sélectionné doit être augmentée progressivement, et une analyse non linéaire de l'historique de réponse doit être effectuée jusqu'à ce qu'une instabilité dynamique globale ou une instabilité numérique survienne dans l'analyse. Cela indique soit l'effondrement de la structure, soit une dérive d'étage dépassant les limites d'effondrement non simulées, soit une augmentation importante de la dérive d'étage pour de faibles incréments de l'accélération spectrale, ce qui affecte la structure (voir Figure I-22).

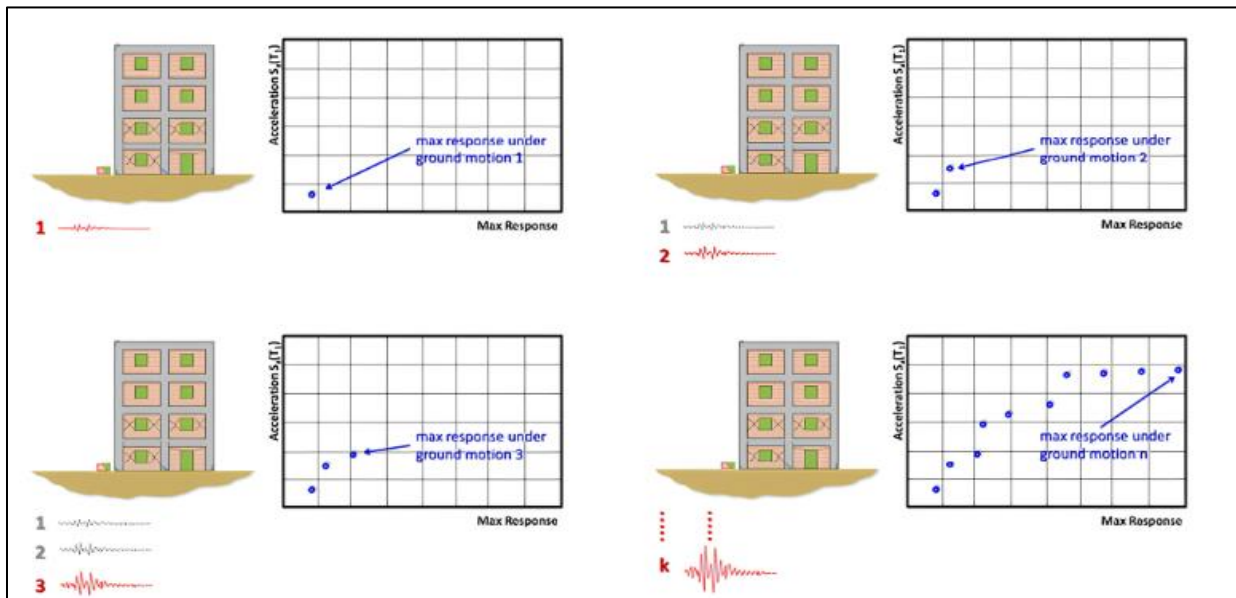


Figure I-22 : Les étapes de l'analyse dynamique incrémentale (IDA) avec échelle des mouvements du sol

Comme illustré dans la Figure I-23, le résultat de l'Incremental Dynamic Analysis (IDA) est un ensemble de points discrets, obtenus en faisant varier l'échelle des mouvements sismiques sélectionnés. Ces points représentent la relation entre l'indice d'intensité (IM) et le paramètre de demande étudié, tel que l'accélération spectrale du premier mode $S_{a,ds4}(T_1)$ ou la dérive inter-étage maximale.

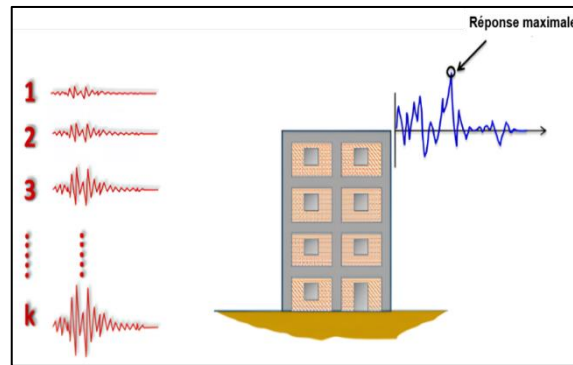


Figure I-24 : Analyse dynamique incrémentale utilisant l'échelle des mouvements du sol

Pour obtenir des courbes continues, la technique d'interpolation par spline cubique est utilisée afin de réduire le temps de calcul. Cette méthode garantit la continuité de la première et de la seconde dérivée aux points de raccordement (voir Figure I-24).

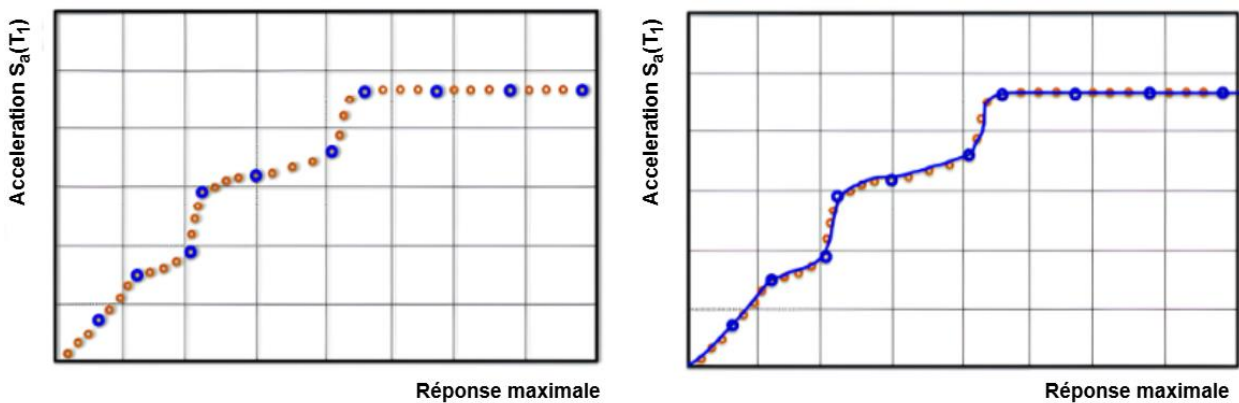


Figure I-23 : Génération des courbes IDA en utilisant l'interpolation spline cubique

Le point où chaque courbe IDA devient plate identifie le niveau de l'indice d'intensité (IM) au-delà duquel il est supposé que l'effondrement global de la structure se produira.

La courbe IDA lissée, obtenue grâce à la technique d'interpolation, permet d'observer plusieurs phénomènes, comme illustré dans la Figure I-25.

Dans un premier temps, la courbe IDA commence sous forme d'une ligne droite dans la zone élastique, où il existe une proportionnalité directe entre l'indice d'intensité (IM) et le paramètre de demande (DM) (Figure I-25).

Au-delà de cette première portion linéaire, la courbe prend l'apparence d'une série de paliers : l'IM est progressivement augmenté jusqu'à atteindre un nouveau seuil d'endommagement. La

partie à faible pente après ce seuil traduit la variabilité de la réponse, liée à de légères variations de l'IM. Cela reflète les incertitudes associées aux seuils d'endommagement (Figure I-25).

Enfin, la dernière portion de la courbe (Figure I-25) correspond à l'instabilité dynamique globale. À ce stade, un faible accroissement de l'IM entraîne une augmentation illimitée du DM, signifiant l'atteinte de l'état d'effondrement global.

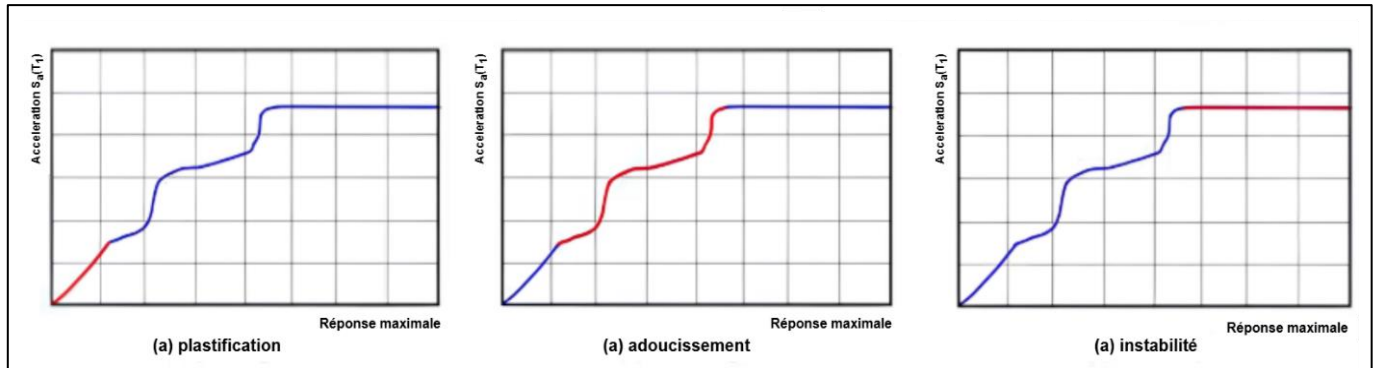


Figure I-25 : L'interpolation de la réponse et de la performance d'un bâtiment à partir d'une courbe IDA

Le processus doit être répété pour l'ensemble des enregistrements sismiques sélectionnés. La courbe IDA médiane est définie comme la valeur correspondant au 50% des réponses maximales enregistrées à chaque niveau de l'IM, comme illustré dans la Figure I-26.

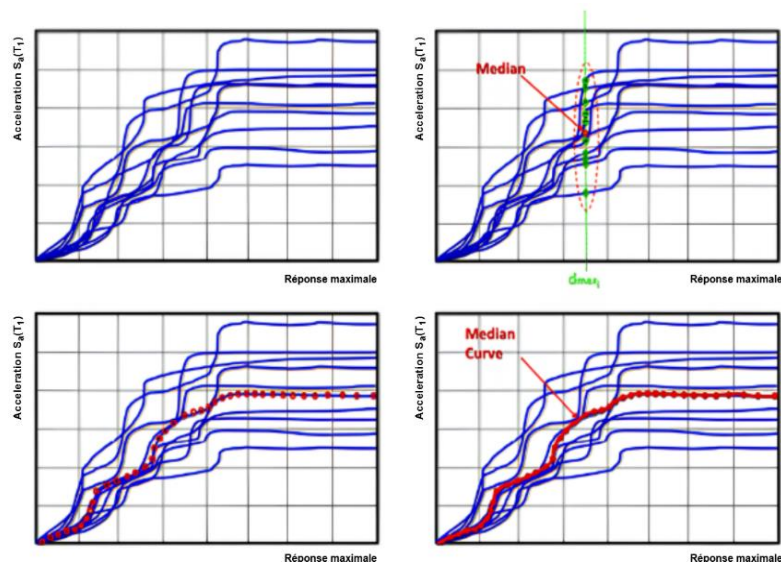


Figure I-26 : Courbes d'analyse dynamique incrémentale utilisant différentes sollicitations sismiques et dérivation de la courbe médiane

La Figure I-27 présente les valeurs médianes ainsi que l'intervalle correspondant à chaque seuil d'endommagement. Concernant les seuils d'endommagement léger, modéré et étendu, l'analyste peut les estimer comme une progression des dommages locaux affectant plusieurs

éléments structurels et non structurels, en combinant les niveaux de performance structurelle et non structurelle). Il est alors possible d'assigner les valeurs de dérive inter-étage (ID) correspondantes sur le graphe IDA pour en déduire la capacité médiane en termes d'accélération spectrale.

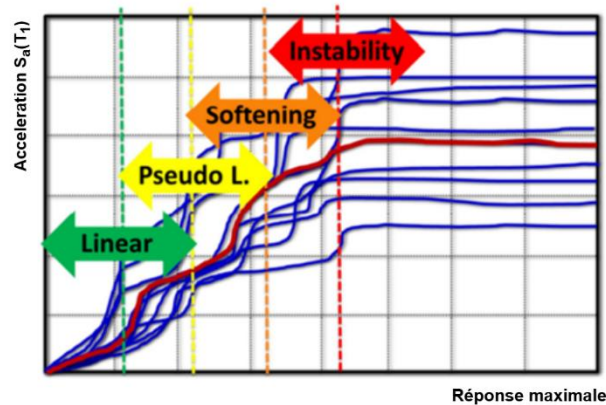


Figure I-27 : La dégradation de la résistance et de la raideur

La capacité médiane d'effondrement $S_a(T)$ est atteinte pour le niveau d'IM provoquant soit une instabilité numérique, soit un mode d'effondrement non simulé, comme mentionné précédemment. À noter que, si des modèles 2D sont utilisés, la capacité médiane d'effondrement doit être prise comme la plus petite valeur obtenue dans l'une des deux directions.

La dispersion due à la variabilité des enregistrements peut être estimée directement en tant que déviation standard logarithmique des enregistrements sélectionnés.

Par exemple, la formule suivante peut être utilisée pour calculer la dispersion record-to-record associée à chaque seuil d'endommagement :

$$\beta = \sqrt{\ln(1 + \text{CoV}^2)} \quad \text{Avec :} \quad \text{CoV} = \frac{\text{STDEV}}{\text{Mean}} \quad (I-33)$$

CHAPITRE II :

CONCEPTION DES CAS D'ETUDE

II.1. INTRODUCTION

La présente partie vise à confronter les effets des évolutions réglementaires du code parasismique algérien sur le comportement des structures soumises à des actions sismiques. Afin de répondre à cette problématique, une série de modélisations a été réalisée à l'aide des logiciels Robot Structural Analysis et ETABS, en s'appuyant sur les dispositions des versions RPA 2003 et RPA 2024.

L'étude porte sur quatre types de systèmes de contreventement : les portiques simples, les structures avec voiles en béton armé, et les systèmes mixtes portiques + voiles. Chaque configuration est étudiée sur quatre sites sismiques différents, afin de mettre en évidence l'influence de la zonation, des effets de site, et des charges sismiques associées.

Pour chaque structure modélisée, les vérifications réglementaires ont été systématiquement effectuées : déplacement inter-étage, stabilité globale (renversement, effet $P-\Delta$), vérification des efforts normaux réduits, efforts tranchants. Les données de dimensionnement, extraites du logiciel Robot, ont permis de générer des tableaux comparatifs pour chaque cas d'étude.

Cette première partie pratique se focalise sur la modélisation, l'obtention des résultats de dimensionnement et la comparaison des caractéristiques structurales résultantes sous l'effet des deux règlements. Elle précède l'analyse de performance à travers les méthodes d'analyse de capacité « PUSHOVER », L'analyse dynamique non linéaire, ainsi que les courbes de fragilité présentées ultérieurement.

II.2. CARACTERISTIQUES DES STRUCTURES MODELISEES

Dans le cadre de cette étude comparative, seize (16) modèles de structures ont été créés pour chaque version du règlement parasismique, soit un total de trente-deux (32) modélisations.

Ces structures ont été choisies de manière à couvrir une gamme représentative des systèmes de contreventement couramment employés dans le bâtiment en Algérie.

II.2.1. Typologie des systèmes de contreventement

Les systèmes étudiés sont décrits comme suit :

- **Système 1** : Système à ossature, la résistance à l'effort tranchant à la base du bâtiment dépasse 65 % de la résistance à l'effort tranchant du système structural dans son ensemble. L'ossature (poutres et poteaux) est le principal élément assurant le contreventement horizontal.
- **Système 2** : Système à contreventement mixte, équivalent à une ossature. La résistance de l'ossature à l'effort tranchant est comprise entre 50 % et 65 % de la résistance totale du système. L'ossature reste significativement sollicitée, mais des voiles peuvent y être associés.
- **Système 3** : Système à contreventement mixte, équivalent à des voiles. La résistance des voiles à l'effort tranchant est comprise entre 50 % et 65 % de la résistance totale. Les voiles jouent un rôle prépondérant dans le contreventement, avec un apport secondaire des éléments d'ossature.
- **Système 4** : Système de contreventement constitué par des voiles. La résistance des voiles dépasse 65 % de la résistance totale à l'effort tranchant. Le contreventement est entièrement assuré par les voiles, tandis que l'ossature participe uniquement au transfert vertical des charges.

Chaque système a été modélisé selon les prescriptions du RPA 2003 puis du RPA 2024, afin d'évaluer les effets des évolutions normatives sur leur comportement et leur dimensionnement.

'Les modélisations numériques de chacun de ces systèmes sont présentées en Annexe A-1, comprenant pour chaque configuration une vue en plan et une vue tridimensionnelle.'

II.2.2. Configuration géométrique

Les modèles ont été conçus sur la base d'un bâtiment-type comportant :

Tableau II-1 : Caractéristiques géométriques des structures modélisées

Système	Nombre de niveaux	Hauteur d'un étage (m)	Hauteur totale (m)	Nombre de travées X	Portée X (m)	Nombre de travées Y	Portée Y (m)
1	3	3,20	9,60	5	4,00	5	4,00
2	5	3,20	16,00	5	4,00	5	4,00
3	5	3,20	16,00	5	4,00	5	4,00
4	10	3,20	32,00	5	4,00	5	4,00

II.2.3. Répartition sur les sites

Afin d'étudier l'influence de la nature du sol sur le comportement sismique des structures, les quatre modèles ont été implantés sur quatre types de sites différents, conformément à la classification des sols du RPA. Il est à noter que toutes les structures sont situées dans une même zone sismique, à savoir la Zone 6 selon le RPA 2024, équivalente à la Zone III dans le RPA 2003, garantissant ainsi une cohérence dans la comparaison.

Les caractéristiques détaillées des types de site sont déjà présentées dans la partie théorique.

II.3. HYPOTHESES DE MODELISATION

La réalisation des modèles numériques a nécessité d'adopter un ensemble précis d'hypothèses techniques et méthodologiques afin d'assurer la cohérence et la fiabilité des résultats obtenus. Ces hypothèses sont détaillées selon les axes suivants :

II.3.1. Comportement mécanique des matériaux

Les caractéristiques mécaniques des matériaux adoptées pour la modélisation sont :

- **Béton armé (C25/30)**

Résistance caractéristique à la compression $f_{28}=25$ MPa.

Module d'élasticité $E=31\ 000$ MPa.

Coefficient de Poisson $\nu=0,2$.

- **Acier haute adhérence (HA Fe400)**

Résistance élastique caractéristique $f_y=400$ MPa.

Module d'élasticité $E=200\,000$ MPa.

Coefficient de Poisson $\nu=0,3$.

- **Poids volumique du béton : 25 kN/m^3**

II.3.2. Charges structurales appliquées

Les charges appliquées sur l'ensemble des structures étudiées sont identiques et correspondent aux valeurs normatives recommandées pour les bâtiments à usage résidentiel, comme précisé dans le Tableau II-2 :

Tableau II-2 : Valeurs des charges structurales appliquées

Type de charge	Notation	Valeur adoptée
Charges permanentes	G	5 kN/m ²
Charges d'exploitation	Q	1,5 kN/m ²

II.3.3. Combinaisons réglementaires appliquées (RPA 2003 vs RPA 2024)

Les combinaisons d'actions adoptées pour les modélisations respectent strictement les recommandations du RPA 2003 et du RPA 2024. Étant donné les évolutions significatives entre les deux versions réglementaires, les différences principales (coefficients d'amplification, combinaisons de charges, spectres réglementaires) ont été prises en compte explicitement. Ces aspects sont détaillés dans la partie théorique du présent mémoire.

II.4. NOTE DE CALCUL

Afin d'illustrer clairement la démarche de dimensionnement adoptée dans cette étude, nous présentons dans cette section une note de calcul type, conforme aux prescriptions des règles parasismiques algériennes 2003 et 2024.

Cette note vise à détailler les étapes de prédimensionnement et de vérification des principaux éléments structuraux, à savoir les poteaux, les poutres, les voiles et les planchers, en tenant compte des exigences normatives en vigueur.

II.4.1. Prédimensionnement des éléments structuraux

II.4.1.1. Prédimensionnement des poutres

Le prédimensionnement des poutres justifié par l'article 7.5 des deux RPA99 et RPA24, a pour objectif d'assurer une répartition efficace des charges verticales vers les poteaux tout en assurant la rigidité horizontale du système structural

D'après les articles 7.5.1 du RPA 99 et du RPA 24, les poutres doivent respecter les dimensions indiquées dans la Figure II-1. [1], [2].

RPA 2003 :

$$\begin{cases} b \geq 20 \text{ cm} \\ h \geq 30 \text{ cm} \\ h / b \leq 4.0 \\ b_{\max} \leq (1.5h + b_1) \end{cases}$$

RPA 2024 :

$$\begin{cases} b \geq 25 \text{ cm} : \text{en zones IV, V et VI} \\ h \geq 30 \text{ cm} \\ h / b \leq 4.0 \\ b_{\max} \leq (1.5h + b_1) \end{cases}$$

Où : h peut être ramenée à 20 cm dans les ouvrages contreventés par voiles.

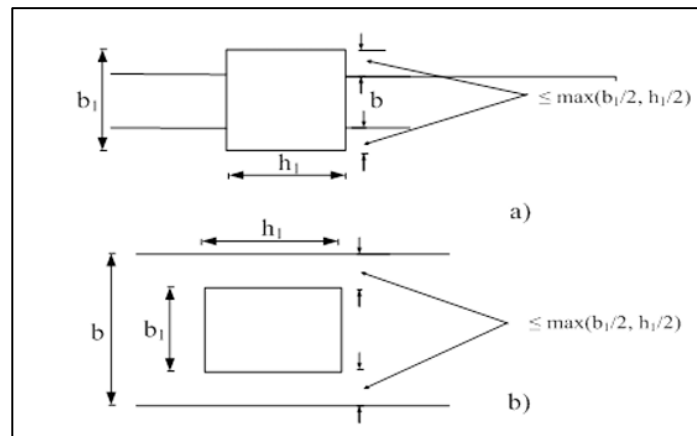


Figure II-1 : Les dimensions à respecter pour les poutres

II.4.1.2. Prédimensionnement des poteaux

Le prédimensionnement des poteaux en béton armé, justifié par l'article 7.4 des deux RPA99 et RPA24, vise à garantir la reprise des charges verticales et une contribution complémentaire à la stabilité latérale de la structure.

CHAPITRE II : CONCEPTION DES CAS D'ETUDE

D'après le RPA 99 et le RPA 24 article 7.4.1, Les poteaux doivent être coulés sur toute leur hauteur (h_e) en une seule fois (voir Figure II-2). Les dés de calage sont interdits. Les dimensions de la section transversale des poteaux doivent satisfaire les conditions indiquées dans cette même Figure.[1], [2].

RPA 2003 :

$$\begin{cases} \text{Min}(b_1, h_1) \geq 25 \text{ cm} : \text{en zones I, II} \\ \text{Min}(b_1, h_1) \geq 30 \text{ cm} : \text{en zone III} \\ \text{Min}(b_1, h_1) \geq l_{cl} / 20 : \text{quelle que soit la zone} \\ 1/4 < b_1 / h_1 < 4 : \text{quelle que soit la zone} \end{cases}$$

RPA 2024 :

$$\begin{cases} \text{Min}(b_1, h_1) \geq 25 \text{ cm} : \text{en zones I, II et III} \\ \text{Min}(b_1, h_1) \geq 30 \text{ cm} : \text{en zones IV, V et VI} \\ \text{Min}(b_1, h_1) \geq l_{cl} / 20 : \text{quelle que soit la zone} \\ 1/4 < b_1 / h_1 < 4 : \text{quelle que soit la zone} \end{cases}$$

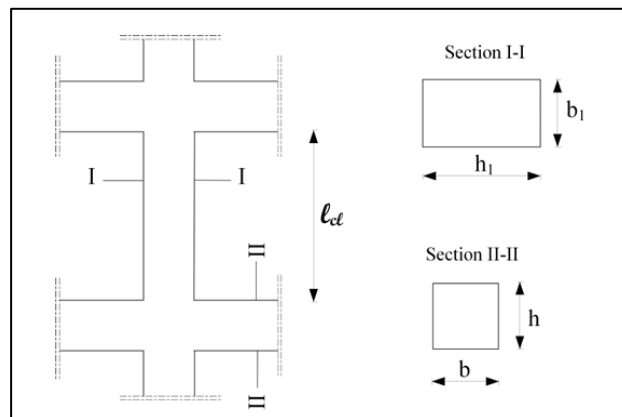


Figure II-2 : Coffrage des poteaux

II.4.1.3. Prédimensionnement des voiles

Le pré dimensionnement des murs en béton armé justifiés par l'article 7.7.1 du RPA servent à contreventer le bâtiment en reprenant les efforts horizontaux (séisme et vent).

RPA 2003 :

D'après le RPA 99 article 7.7.1, les éléments satisfaisants la condition ($L \geq 4 e$) sont considérés comme des voiles, contrairement aux éléments linéaires[1], avec :

L : porté du voile,

e : épaisseur du voile.

CHAPITRE II : CONCEPTION DES CAS D'ETUDE

L'article 7.7.1 RPA99, l'épaisseur minimale est de 15 cm, de plus l'épaisseur doit être déterminé en fonction de la hauteur libre d'étage h_e et des conditions de rigidité aux extrémités

À partir de la hauteur libre d'étage $h_e = 2.86$ et des conditions de rigidité aux extrémités, on a :

$$e \geq \max \left(e_{min}; \frac{h_e}{25}, \frac{h_e}{22}, \frac{h_e}{20} \right) \quad (II-1)$$

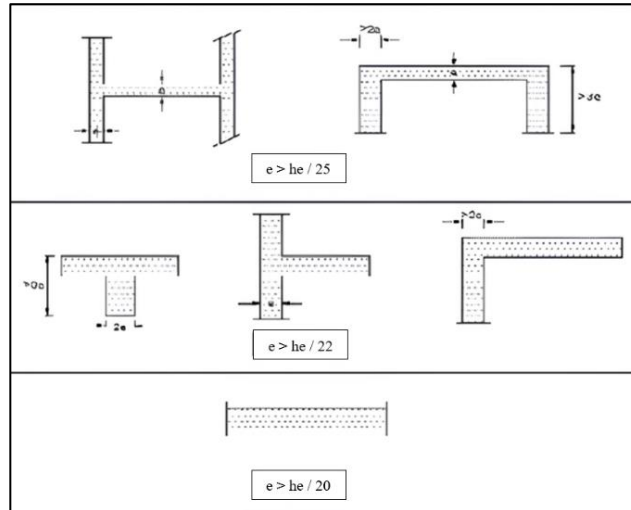


Figure II-3 : Coupe de voile en plan

RPA 2024 :

Selon l'article 7.7.1 du RPA 2024, les éléments de contreventement doivent satisfaire la condition exprimée par l'équation (II-2), comme illustré à la Figure II-4. [2].

$$l_v \geq \max \left(\frac{h_e}{3}, 4b_w, 1 \text{ m} \right) \quad (II-2)$$

Où : l_v représente la longueur du voile.

L'épaisseur minimale (b_w) doit respecter la condition définie par l'équation (II-3) :

$$b_w \geq \max \left(15 \text{ cm}, \frac{h_e}{20} \right) \quad (II-3)$$

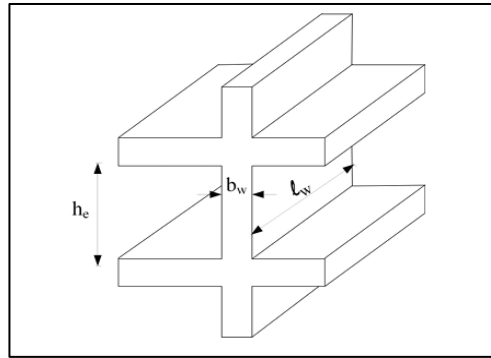


Figure II-4 : Spécifications pour les nœuds poteaux-poutres

Par ailleurs, en complément des résultats issus des calculs de dimensionnement et des vérifications requises, l'épaisseur doit également être déterminée, pour des raisons de stabilité de forme (non flambement), en fonction de h_e , la hauteur libre du niveau, ainsi que des conditions de rigidité aux extrémités, comme illustré à la Figure II-5.[2].

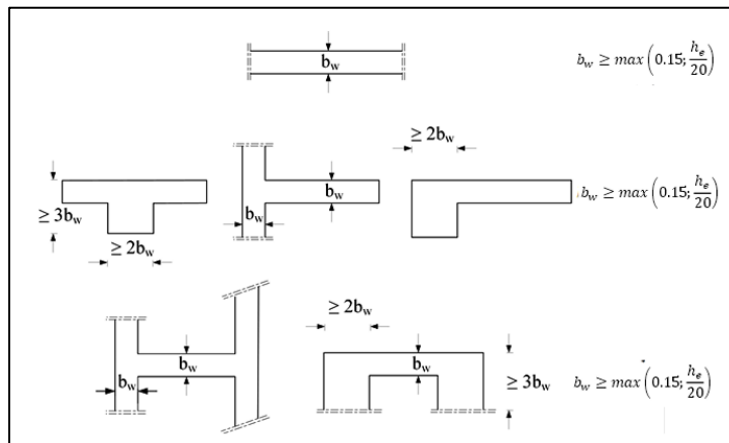


Figure II-5 : Épaisseur minimum en fonction des différentes configurations

II.4.1.4. Prédimensionnement des planchers

Dans le cadre de cette étude, le prédimensionnement des planchers n'a pas été abordé de manière détaillée, car l'objectif principal réside dans l'analyse dynamique de la structure sous conditions sismiques, tout en garantissant la cohérence du modèle pour les calculs de réponse sismique.

Cependant, afin d'assurer une répartition adéquate des charges et garantir une distribution efficace des efforts, les planchers ont été modélisés comme une membrane rigide. Cette approche permet de représenter correctement le rôle des diaphragmes rigides, assurant la transmission des charges latérales vers les éléments de contreventement, tels que les poteaux et les voiles.

II.5. RECAPITULATIF DES CARACTERISTIQUES DES ELEMENTS STRUCTURAUX

Dans cette section, nous présentons les tableaux récapitulatifs des caractéristiques dimensionnelles et des données de ferrailage pour chaque type de système de contreventement. Les tableaux suivants comparent les résultats obtenus pour les différentes configurations sous les règlements RPA 2003 et RPA 2024.

Chaque système est présenté dans son propre tableau, où sont indiquées les dimensions des éléments structuraux (poteaux, poutres, voiles, planchers) ainsi que les informations sur le ferrailage (armature des poutres, des poteaux et des voiles). Ces tableaux permettent de visualiser les différences entre les deux règlements, tout en comparant les effets de ces modifications sur les dimensions des éléments et sur la répartition des efforts.

- **Système à ossature :**

Tableau II-3 : Tableau récapitulatif des caractéristiques dimensionnelles – Système à ossature

		RPA 2003				RPA 2024			
		S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
Poteau	h (cm)	30	35	30	35	40	40	40	40
	b (cm)	30	35	30	35	40	40	40	40
Poutre	h (cm)	30	30	30	30	30	30	30	30
	b (cm)	35	35	35	35	35	35	35	35
Voile	e (cm)								
Plancher	e (cm)	15	15	15	15	15	15	15	15

- **Système à contreventement mixte équivalent à une ossature :**

Tableau II-4 : Tableau récapitulatif des caractéristiques dimensionnelles – Système à contreventement mixte équivalent à une ossature

		RPA 2003				RPA 2024			
		S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
Poteau	h (cm)	40	40	40	40	45	45	45	45
	b (cm)	40	40	40	40	45	45	45	45
Poutre	h (cm)	35	35	35	35	35	35	35	35
	b (cm)	40	40	40	40	40	40	40	40
Voile	e (cm)	15	15	15	15	15	15	15	15
	l (m)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.75	1.75	1.75	1.75
Plancher	e (cm)	15	15	15	15	15	15	15	15

CHAPITRE II : CONCEPTION DES CAS D'ETUDE

- Système à contreventement mixte équivalent à des voiles :

Tableau II-5 : Tableau récapitulatif des caractéristiques dimensionnelles – Système à contreventement mixte équivalent à des voiles

		RPA 2003				RPA 2024			
		S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
Poteau	h (cm)	40	40	40	40	40	40	40	40
	b (cm)	40	40	40	40	40	40	40	40
Poutre	h (cm)	35	35	35	35	35	35	35	35
	b (cm)	40	40	40	40	45	45	45	45
Voile	e (cm)	15	15	15	15	15	15	15	15
	l (m)	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
Plancher	e (cm)	15	15	15	15	15	15	15	15

- Système à contreventement constitué par des voiles :

Tableau II-6 : Tableau récapitulatif des caractéristiques dimensionnelles – Système à contreventement constitué par des voiles

		RPA 2003				RPA 2024			
		S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
Poteau (NIV1,2,3,4)	h (cm)	50	50	60	60	50	50	60	60
	b (cm)	50	50	60	60	50	50	60	60
Poteau (NIV5, 6, 7)	h (cm)	45	45	55	55	45	45	55	55
	b (cm)	45	45	55	55	45	45	55	55
Poteau (NIV8, 9, 10)	h (cm)	40	40	50	50	40	40	50	50
	b (cm)	40	40	50	50	40	40	50	50
Poutre	h (cm)	35	35	35	35	35	35	35	35
	b (cm)	40	40	45	45	45	45	45	45
Voile	e (cm)	20	20	20	20	20	20	20	20
	l (m)	6	6	6	6	6	6	6	6
Plancher	e (cm)	20	20	20	20	20	20	20	20

II.6. JUSTIFICATION DE LA SECURITE

Cette section présente les vérifications nécessaires pour assurer la stabilité et la sécurité des structures soumises à des charges sismiques. Les principales vérifications incluent l'effort normal réduit, les déplacements inter-étages, l'effet P- Δ et le renversement. Ces critères

permettent de garantir la résistance et la déformabilité des éléments de la structure sous l'action des séismes. Les vérifications sont réalisées selon les normes RPA 2003 et RPA 2024, en se concentrant sur le comportement dynamique des structures lors d'un séisme.

Par la suite, nous présentons en annexes, les tableaux récapitulatifs des vérifications effectuées pour chaque type de système de contreventement, en tenant compte des moments et efforts extraits du logiciel Robot Structural Analysis (Robot EXT).

II.6.1. Répartition de l'effort tranchant entre éléments porteurs

La vérification de la répartition de l'effort tranchant à la base du bâtiment entre les différents éléments porteurs (voiles et poteaux) a été réalisée conformément aux exigences du RPA. Elle permet de classer les systèmes de contreventement en fonction de la contribution relative des voiles et des ossatures. Chaque configuration – ossature simple, système mixte équivalent à une ossature, système mixte équivalent à des voiles, et système entièrement contreventé par des voiles – répond à des seuils précis de répartition, garantissant une réponse sismique cohérente avec les prescriptions réglementaires.

Les résultats de cette vérification sont disponibles en *Annexe B-1*.

II.6.2. Justification vis-à-vis de l'équilibre d'ensemble

Selon l'article 5.5 du RPA, la condition d'équilibre concerne la stabilité globale de la structure face aux effets de renversement induits par les sollicitations les plus défavorables.

Pour que le bâtiment soit considéré comme stable vis-à-vis du renversement, il est nécessaire de vérifier la condition suivante, définie par l'équation (II-4) :

$$\frac{M_s}{M_r} \geq 1.30 \quad (II-4)$$

- $M_r = \sum F_i \times h_i$
- M_s : moment stabilisant ;
- M_r : moment renversant dû à l'effort sismique ;
- W : Poids du bâtiment ;
- F_i : Force sismique de niveau i ;
- h_i : hauteur du niveau i , calculé à partir de la base du bâtiment

Le moment de renversement induit par l'action sismique sera calculé par rapport au niveau de contact sol-fondation.

Les détails de cette vérification sont présentés en *Annexe B-2*.

II.6.3. Justification vis-à-vis de l'effet P-Δ

Selon l'article 5.9 du RPA, Les effets du 2° ordre (ou effet P-Δ) peuvent être négligés dans le cas des bâtiments si la condition suivante est satisfaite à tous les niveaux :

$$\theta_k = \frac{P_k \cdot \Delta_k}{V_k \cdot h_k} \leq 0.10 \quad (II-5)$$

Avec :

- Δ_k défini comme : $\Delta_k = \delta_k - \delta_{k-1}$
- P_k : poids total de la structure et des charges d'exploitation associées au-dessus du niveau « k »

$$P_k = \sum_{i=k}^n (G_i + \psi \cdot Q_i) \quad (II-6)$$

- V_k : effort tranchant d'étage au niveau "k" : $V_k = \sum_{i=k}^n F_i$
- Δ_k : déplacement relatif du niveau « k » par rapport au niveau « k-1 »
- h_k : hauteur du niveau « k ».

Selon la valeur de θ_k , il convient de considérer que :

- Si $(0.10 \leq \theta_k \leq 0.20)$, les effets P-Δ peuvent être pris en compte, de manière approchée, en amplifiant les effets de l'action sismique calculés au moyen d'une analyse élastique du 1° ordre par le facteur $(\frac{1}{1-\theta_k})$.
- Si $(\theta_k \geq 0.20)$, la structure est potentiellement instable et doit être redimensionnée.

L'évaluation de l'effet du second ordre (P-Δ) a été réalisée conformément aux prescriptions du RPA 2003 et du RPA 2024. Les résultats détaillés sont présentés dans les tableaux de l'*Annexe B-3* à *Annexe B-6*.

II.6.4. Justification vis-à-vis des déplacements inter-étages

Selon l'article 5.10 du RPA, les déplacements relatifs latéraux inter-étages, calculés à partir de l'équation (III.4) de l'article 4.5.2 et réduits par le coefficient ν en fonction du groupe d'importance, ne doivent pas dépasser la limite admissible Δ_k , fixée par le Tableau II-7 et l'équation (II-7) :

$$\delta k = \frac{R}{Q} \cdot \delta ek \quad (II-7)$$

δek : Déplacement élastique dû aux forces sismiques F_i (y compris l'effet de torsion)

R : Coefficient de comportement

Q : Coefficient de qualité

$$\nu A \cdot \Delta_k \leq \Delta_k \quad (II-8)$$

Tableau II-7 : Valeurs limites des déplacements inter-étages

Type de Structure	Déplacement limite : Δ_k
Bâtiments en Acier	0.0100 h_k
Bâtiments en Béton Armé	0.0075 h_k
Bâtiment en PAF	0.0050 h_k
Bâtiments en Bois	0.0075 h_k
Bâtiments en Maçonnerie Chaînée	0.0050 h_k
<i>Légende : h_k est la hauteur du niveau « k »</i> <i>Le coefficient réducteur ν_A est défini en § 1.2 : il est pris égal à 0.5</i>	

La vérification des déplacements inter-étages réduits a été effectuée pour l'ensemble des systèmes de contreventement étudiés, conformément aux exigences des règlements RPA 2003 et RPA 2024. Les résultats détaillent, pour chaque site et chaque niveau, les valeurs calculées ainsi que leur comparaison aux seuils admissibles définis par la réglementation en vigueur. L'ensemble des résultats détaillés sont présentés dans les tableaux de l'*Annexe B-7* à *Annexe B-10*.

II.6.5. Vérification de l'effort normal réduit

On entend par effort normal réduit, selon l'article 7.1.3 du RPA, le rapport :

$$v = \frac{Nd}{Bc \cdot F_{cj}} \quad (II-9)$$

Où :

- N_d : Désigne l'effort normal de compression de calcul s'exerçant sur une section de béton.
- B_c : Est l'aire (section brute) de cette dernière.
- f_{cj} : Est la résistance caractéristique du béton à j jours où $j = 28$ jours.

Pour RPA 2003 : $v \leq 0.30$

Pour RPA 2024 : $v \leq 0.35$

La vérification de l'effort normal réduit a été réalisée pour les différents systèmes de contreventement implantés sur chacun des quatre sites étudiés, conformément aux seuils fixés par les règlements RPA 2003 et RPA 2024. Les résultats correspondants sont regroupés en *Annexe B-11*.

II.6.6. Vérification de l'effort tranchant à la base

Selon l'article 4.3.6 du RPA, la force sismique totale obtenue par l'analyse modale spectrale V_{dyn} ne doit pas être inférieure à 80 % de celle obtenue par la méthode statique équivalente V_{calc}

$$V_{dyn} > 0.8V_{calc} \quad (II-10)$$

II.6.6.1. Méthode statique équivalente

Cette méthode consiste à modéliser l'action sismique par une force unique V appliquée à la base de la structure. Son application est soumise à des conditions de régularité géométrique définies par le règlement parasismique algérien.

II.6.6.2. Vérification des conditions

Pour le RPA 2024, la méthode statique équivalente est applicable aux quatre structures étudiées, car elles sont régulières en plan et en élévation, et leur hauteur est inférieure à 32 m pour les trois premières structures, et égale à 32 m pour la dernière structure (limite fixée en zone VI selon l'article 4.1.2).

Pour le RPA 2003, la méthode statique équivalente est utilisée uniquement pour les trois premières structures. Le quatrième bâtiment, d'une hauteur de 32 m, dépasse la limite autorisée de 30 m en zone

III. De plus, il est contreventé par voiles. Par conséquent, la méthode modale spectrale a été utilisée pour ce cas.

II.6.6.3. Méthode dynamique modale spectrale

Lorsque les conditions d'application de la méthode statique ne sont pas réunies, on utilise la méthode modale spectrale. Elle permet d'analyser le comportement dynamique de la structure en déterminant les effets maximaux associés à chaque mode de vibration à partir d'un spectre de réponse. Les contributions modales sont ensuite combinées pour obtenir la réponse globale de la structure.

Dans notre étude, cette méthode a été utilisée uniquement pour la quatrième structure selon RPA 2003, pour respecter les exigences réglementaires et garantir une évaluation plus précise de la réponse sismique.

L'effort tranchant total à la base V est déterminé à partir des expressions réglementaires définies par le RPA 2003 et le RPA 2024, selon les méthodes d'analyse retenues.

Formule selon le RPA 2003 :

$$V = \frac{A \cdot D \cdot Q}{R} \cdot W \quad (II-11)$$

Où :

- **A** : coefficient d'accélération de zone (Voir *Annexe C-1*)
- **D** : facteur d'amplification dynamique moyen (*C-1*)
- **Q** : facteur de qualité (Voir *Annexe C-4*)
- **R** : coefficient de comportement global de la structure (Voir *Annexe C-2*)
- **W** : poids total de la structure

Formule selon le RPA 2024 :

$$V = \lambda \times \left(\frac{S_{ad}}{g} \right) (T^0) \times W \quad (II-12)$$

Où :

- **λ** : coefficient de réduction en fonction de la période et du nombre de niveaux (*C-3*)

- $(\frac{S_{ad}}{g})(T_0)$: l'accélération spectrale à la période fondamentale (C-2)
- g : l'accélération de la pesanteur
- W : poids total de la structure

Les paramètres nécessaires à l'évaluation de V pour chacun des 32 systèmes ont été déterminés conformément aux exigences réglementaires.

Compte tenu du nombre important de systèmes étudiés (32 au total), les paramètres nécessaires au calcul de l'effort sismique à la base sont regroupés sous forme de tableaux en annexe, afin d'alléger la présentation dans le corps du texte.

La vérification de l'effort sismique total à la base a été effectuée pour l'ensemble des systèmes étudiés, conformément aux exigences du RPA 2003. Les résultats détaillés sont disponibles en **Annexe B-12**.

II.7. RECAPITULATIF DU FERRAILLAGE ADOPTE

Après avoir effectué les calculs de dimensionnement à l'aide du logiciel *Robot Structural Analysis*, les résultats des moments et efforts ont permis de déterminer le ferrailage adopté pour chaque système de contreventement.

Les éléments de poutres et poteaux ont été dimensionnés en tenant compte des charges verticales et sismiques, avec des calculs spécifiques pour les poutres en flexion simple et les poteaux en flexion composée déviée.

'Le ferrailage en travée a été négligé, car, dans le cadre de notre recherche, les rotules plastiques se forment principalement aux extrémités des poutres, ce qui constitue le point d'intérêt principal de l'analyse menée.'

Les résultats des calculs sont présentés dans les tableaux ci-après. Ils résument les dimensions et le ferrailage adopté pour chaque élément structural (poutres, poteaux...) selon les exigences des règlements RPA 2003 et RPA 2024. Ces tableaux permettent de comparer les résultats obtenus pour chaque type de système de contreventement et de mettre en évidence les différences de dimensionnement liées aux prescriptions de chaque règlement.

Ce ferrailage sera par ailleurs utilisé comme base d'entrée pour l'analyse pushover. Il s'agit d'un ferrailage estimatif, établi notamment pour évaluer les quantités d'acier mises en œuvre, en tenant

CHAPITRE II : CONCEPTION DES CAS D'ETUDE

compte du fait que certains diamètres employés dans les calculs ne sont pas disponibles sur le marché local.

- Système à ossature :

Tableau II-8 : Ferrailage adopté pour le système à ossature – RPA 2003

		RPA 2003					
		S1			S2		
		Section As (cm ²)		Choix	Section As (cm ²)		Choix
Fer poutre	Longitudinal	3.4	5.1	4*HA12 + 5*HA12	3.5	6	4*HA12+ 6*HA16
	Transversal			4*HA8			4*HA8
Fer poteau	Longitudinal	7.2		4*HA16	9,8		4HA12+4HA14
	Transversal			4*HA8			4*HA8

		RPA 2003					
		S3			S4		
		Section As (cm ²)		Choix	Section As (cm ²)		Choix
Fer poutre	Longitudinal	4,6	6,5	3* HA 14 + 6 * HA 12	5.9	6.6	4* HA 14 + 6 * HA 12
	Transversal			4*HA8			4*HA8
Fer poteau	Longitudinal	7.2		4HA16	9.8		4HA12+4HA14
	Transversal			4*HA8			4*HA8

Tableau II-9 : Ferrailage adopté pour le système à ossature – RPA 2024

		RPA 2024					
		S1			S2		
		Section As (cm ²)		Choix	Section As (cm ²)		Choix
Fer poutre	Longitudinal	4,2	6,8	3*HA16 + 5*HA14	5,8	8,6	3*HA16 + 5*HA16
	Transversal			4*HA8			4*HA8
Fer poteau	Longitudinal	12.8		4*HA14 + 4*HA12	12.8		4*HA16 + 4*HA12
	Transversal			4*HA8			4*HA8

		RPA 2024					
		S3			S4		
		Section As (cm ²)		Choix	Section As (cm ²)		Choix
Fer poutre	Longitudinal	6,4	9,2	3*HA16 + 5*HA14	6,7	9,5	3*HA16 + 5*HA16
	Transversal			4*HA8			4*HA8
Fer poteau	Longitudinal	12.8		4*HA18 + 4*HA12	12.8		4*HA18 + 4*HA16
	Transversal			4*HA8			4*HA8

- Système à contreventement mixte équivalent à une ossature :

Tableau II-10 : Ferrailage adopté pour le système mixte équivalent à une ossature – RPA 2003

		RPA 2003					
		S1			S2		
		Section As (cm ²)		Choix	Section As (cm ²)		Choix
Fer poutre	Longitudinal	9	10.2	6*HA14 +3*HA16+3HA14	11.8	13.1	6*HA16 + 7*HA16
	Transversal			4*HA8			4*HA8
Fer poteau	Longitudinal	12.8		4*HA16+4*HA14	12,8		8*HA16
	Transversal			4*HA8			4*HA8
Fer voile	Longitudinal			14*HA14			16*HA14
	Transversal			26*HA8			26*HA8

		RPA 2003					
		S3			S4		
		Section As (cm ²)		Choix	Section As (cm ²)		Choix
Fer poutre	Longitudinal	12.9	14.1	3*HA20+3HA14+ 4*HA 20+2*HA12	14.1	15.4	3* HA 20+ 3HA14+8HA16
	Transversal			4*HA8			4*HA8
Fer poteau	Longitudinal	19.4		4HA16+4HA20	21.8		4HA20+4HA18
	Transversal			4*HA8			4*HA8
Fer voile	Longitudinal			6*HA12			6*HA12
	Transversal			26*HA6			26*HA6

- Système à contreventement mixte équivalent à une ossature :

Tableau II-11 : Ferrailage adopté pour le système mixte équivalent à une ossature – RPA 2024

		RPA 2024					
		S1			S2		
		Section As (cm ²)		Choix	Section As (cm ²)		Choix
Fer poutre	Longitudinal	10,6	11,2	2x (3*HA18 + 2*HA16)	11,1	11,9	5*HA18 + 5*HA18
	Transversal			4*HA8			4*HA8
Fer poteau	Longitudinal	16.2		4*HA16 + 4*HA18	16.2		4*HA16 + 4*HA18
	Transversal			4*HA8			4*HA8
Fer voile	Longitudinal			14*HA14			16*HA14
	Transversal			26*HA8			26*HA8

		RPA 2024					
		S3			S4		
		Section As (cm ²)		Choix	Section As (cm ²)		Choix
Fer poutre	Longitudinal	12,4	13,3	2x (3*HA18 + 2*HA16)	14,4	12,3	(6*HA18 + 2*HA16 + 2*HA14)
	Transversal			4*HA8			4*HA8
Fer poteau	Longitudinal	21.2		8*HA20	24.2		4*HA25 + 8*HA20
	Transversal			4*HA8			4*HA8
Fer voile	Longitudinal			18*HA12			14*HA14
	Transversal			26*HA8			26*HA8

- Système à contreventement mixte équivalent à des voiles :

Tableau II-12 : Ferrailage adopté pour le système mixte équivalent à des voiles – RPA 2003

		RPA 2003					
		S1			S2		
		Section As (cm ²)		Choix	Section As (cm ²)		Choix
Fer poutre	Longitudinal	9.8	11	7* HA 14 + 6* HA 16	12.1	13.3	6*HA18+ 5*HA18
	Transversal			4*HA10			4*HA10
Fer poteau	Longitudinal	12.8		4*HA16+4*HA14	12,8		8*HA16
	Transversal			4*HA10			4*HA10
Fer voile	Longitudinal			14HA12			14HA12
	Transversal			26HA8			26HA8

		RPA 2003					
		S3			S4		
		Section As (cm ²)		Choix	Section As (cm ²)		Choix
Fer poutre	Longitudinal	13.7	14.9	4* HA 14+4HA16 + 4HA20+2HA14	13.7	14.9	4* HA 14+4HA16 +4HA20+2HA14
	Transversal			4*HA10			4*HA10
Fer poteau	Longitudinal	22.4		4HA20+4HA18	23.6		8HA20
	Transversal			4*HA10			4*HA10
Fer voile	Longitudinal			14HA12			14HA12
	Transversal			26HA8			26HA8

- Système à contreventement mixte équivalent à des voiles :

Tableau II-13 : Ferrailage adopté pour le système mixte équivalent à des voiles – RPA 2024

		RPA 2024					
		S1			S2		
		Section As (cm ²)		Choix	Section As (cm ²)		Choix
Fer poutre	Longitudinal	12,6	11,2	3*HA20 + 2*HA16 + 3*HA18 + 2*HA16	12,5	12,2	5*HA18 + 5*HA18
	Transversal			4*HA10			4*HA10
Fer poteau	Longitudinal	16,2		4*HA16 + 4*HA20	16,2		4*HA16 + 4*HA18
	Transversal			4*HA10			4*HA10
Fer voile	Longitudinal			14*HA14			16*HA14
	Transversal			26*HA8			26*HA8

		RPA 2024					
		S3			S4		
		Section As (cm ²)		Choix	Section As (cm ²)		Choix
Fer poutre	Longitudinal	15,4	13,3	3*HA25 + 2*HA20 + 6*HA20	18,4	16,2	6*HA25 + 2*HA20 + 2*HA14
	Transversal			4*HA10			4*HA10
Fer poteau	Longitudinal	23,2		8*HA20	25,4		4*HA25 + 8*HA20
	Transversal			4*HA10			4*HA10
Fer voile	Longitudinal			18*HA12			14*HA14
	Transversal			26*HA8			26*HA8

- Système de contreventement constitué par des voiles :

Tableau II-14 : Ferrailage adopté pour le système à voiles – RPA 2003

		RPA 2003					
		S1			S2		
		Section As (cm ²)		Choix	Section As (cm ²)		Choix
Ferrailage poutre	Longitudinal	13,6	15,9	9* HA 14 + 8* HA 16	14,2	16,4	8*HA16+ 7*HA18
	Transversal			4*HA10			4*HA10
Ferrailage poteau (NIV1, 2, 3,	Longitudinal	20		4HA16+4HA20	20,2		8*HA18
	Transversal			4*HA10			4*HA10
Ferrailage poteau (NIV5,6,7)	Longitudinal	17,6		4HA14+4HA20	22		8*HA20
	Transversal			4*HA10			4*HA10
Ferrailage poteau (NIV8,9,10)	Longitudinal	19,2		4HA16+4HA20	22,2		8*HA20
	Transversal			4*HA10			4*HA10
Ferrailage voile	Longitudinal			44*HA12			44*HA12
	Transversal			26*HA8			26*HA8

Tableau II-15 : Ferrailage adopté pour le système à voiles – RPA 2003 (suite)

		RPA 2003					
		S3			S4		
		Section As (cm ²)		Choix	Section As (cm ²)		Choix
Ferrailage poutre	Longitudinal	17.7	18.4	9* HA 16 + 6* HA 20	20,9	21,5	7* HA 20 + 7* HA 20
	Transversal			4*HA10			4*HA10
Ferrailage poteau (NIV1, 2, 3,	Longitudinal	28.8		4HA20+8HA16	28.8		4HA20+8HA16
	Transversal			4*HA10			4*HA10
Ferrailage poteau (NIV5,6,7)	Longitudinal	24.2		8HA14+4HA20	30		8HA18+4HA20
	Transversal			4*HA10			4*HA10
Ferrailage poteau (NIV8,9,10)	Longitudinal	25.8		8HA20	30.6		8HA18+4HA20
	Transversal			4*HA10			4*HA10
Ferrailage voile	Longitudinal			44*HA12			44*HA12
	Transversal			26*HA8			26*HA8

- Système de contreventement constitué par des voiles :

Tableau II-16 : Ferrailage adopté pour le système à voiles – RPA 2024

		RPA 2024					
		S1			S2		
		Section As (cm ²)		Choix	Section As (cm ²)		Choix
Ferrailage poutre	Longitudinal	11,2	14,3	5*HA18 + 5*HA20	17,5	15,6	6*HA20 + 6*HA20
	Transversal			4*HA10			4*HA10
Ferrailage poteau (NIV1, 2, 3, 4)	Longitudinal	21.2		4*HA20 + 4*HA18	21.6		4*HA20 + 4*HA18
	Transversal			4*HA10			4*HA10
Ferrailage poteau (NIV5,6,7)	Longitudinal	17.2		4*HA18 + 4*HA16	22.1		4*HA20 + 4*HA18
	Transversal			4*HA10			4*HA10
Ferrailage poteau (NIV8,9,10)	Longitudinal	13.8		4*HA14 + 4*HA16	20.6		4*HA20 + 4*HA18
	Transversal			4*HA10			4*HA10
Ferrailage voile	Longitudinal			44*HA12			44*HA12
	Transversal			26*HA8			26*HA8

Tableau II-17 : Ferrailage adopté pour le système à voiles – RPA 2024 (suite)

		RPA 2024					
		S3			S4		
		Section As (cm ²)		Choix	Section As (cm ²)		Choix
Ferrailage poutre	Longitudinal	17,3	16,3	6*HA20 + (3HA25+2HA20)	22.8	23,1	5*HA25 + 5*HA25
	Transversal			4*HA10			4*HA10
Ferrailage poteau (NIV1, 2, 3, 4)	Longitudinal	32.9		4HA25+8HA16	35.6		8HA20+4HA20
	Transversal			4*HA10			4*HA10
Ferrailage poteau (NIV5,6,7)	Longitudinal	27.8		8HA16+4HA20	32.2		8HA18+4HA20
	Transversal			4*HA10			4*HA10
Ferrailage poteau (NIV8,9,10)	Longitudinal	25.8		4HA20+8HA16	30.6		4HA20+8HA18
	Transversal			4*HA10			4*HA10
Ferrailage voile	Longitudinal			44*HA12			44*HA12
	Transversal			26*HA8			26*HA8

CHAPITRE III :

ANALYSE PUSHOVER

III.1. INTRODUCTION

Dans le cadre de cette étude, les courbes pushover idéalisées ont été établies pour quatre systèmes structuraux (ossature, système mixte équivalent à une ossature, système mixte équivalent à des voiles et système contreventé par des voiles) implantés sur des sites aux conditions géotechniques variées (site rocheux, site ferme, site meuble et site très meuble). Ces courbes permettent d'évaluer le comportement sismique global des structures selon les prescriptions des règlements RPA 2003 et RPA 2024. L'analyse repose sur l'interprétation des points de performance définis par l'intersection entre la courbe capacité et la courbe de demande. Ces points de performance permettent d'identifier les déplacements maximaux atteints, les sollicitations dynamiques engagées, et les rapports de ductilité ($\mu = D_u/D_y$) caractérisant la capacité de la structure à dissiper l'énergie sismique. Chaque configuration est ensuite analysée afin de déterminer son niveau de performance, sa vulnérabilité relative et le palier de dommage atteint. Cette approche comparative permet ainsi de mettre en évidence l'effet des caractéristiques du sol, du type de système porteur, et de l'évolution réglementaire sur la réponse sismique globale des structures.

'Les figures présentées dans cette section illustrent la comparaison entre les courbes pushover (C.P) et les courbes idéalisées (C.I) obtenues pour les quatre systèmes sur les (S1 S2 S3 S4), selon les prescriptions du RPA 2003 et du RPA 2024.'

III.2. RESULTATS DES COURBES PUSHOVER IDEALISEE – SITE 01-

❖ Système à ossature :

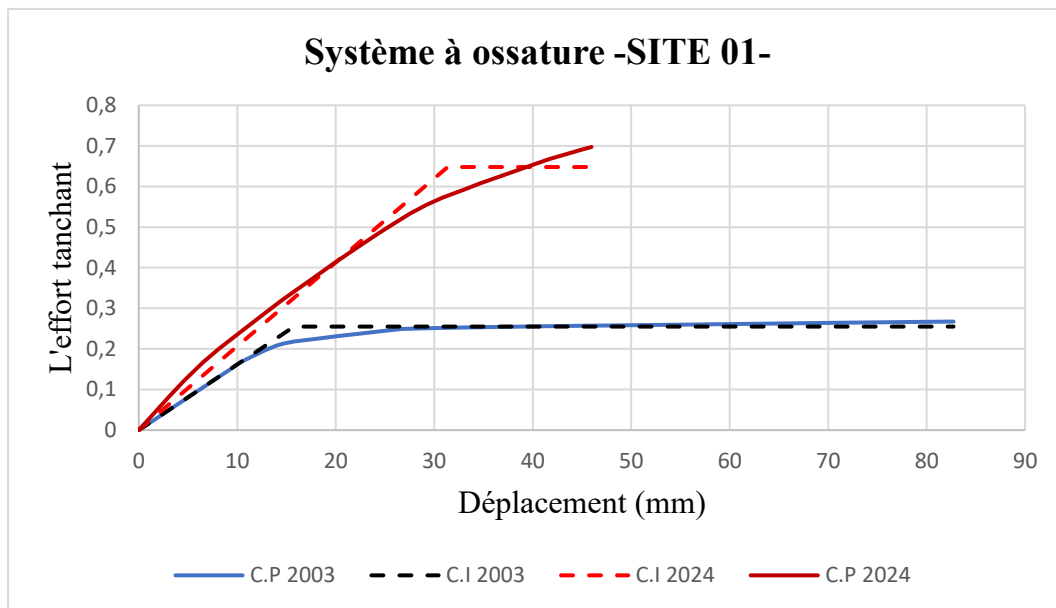


Figure III-1 : Courbe pushover réelle (C.P) et courbe pushover idéalisée (C.I) du système à ossature sur le site S1 selon les RPA 2003 et RPA 2024

❖ Système mixte équivalent à une ossature :

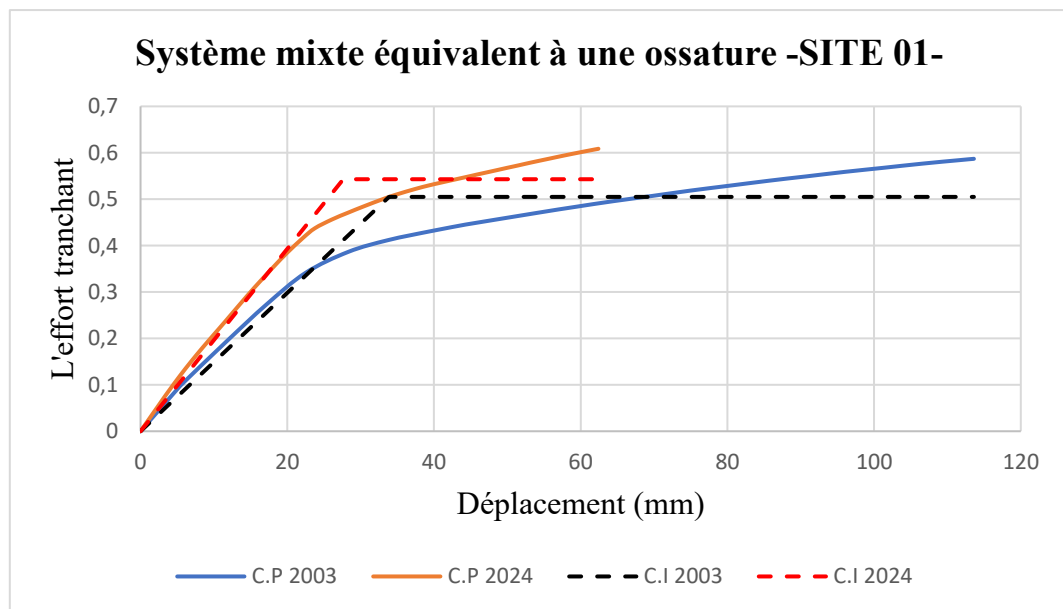


Figure III-2 : Courbe pushover réelle (C.P) et courbe pushover idéalisée (C.I) du système mixte équivalent à une ossature sur le site S1 selon les RPA 2003 et RPA 2024

❖ Système mixte équivalent à des voiles :

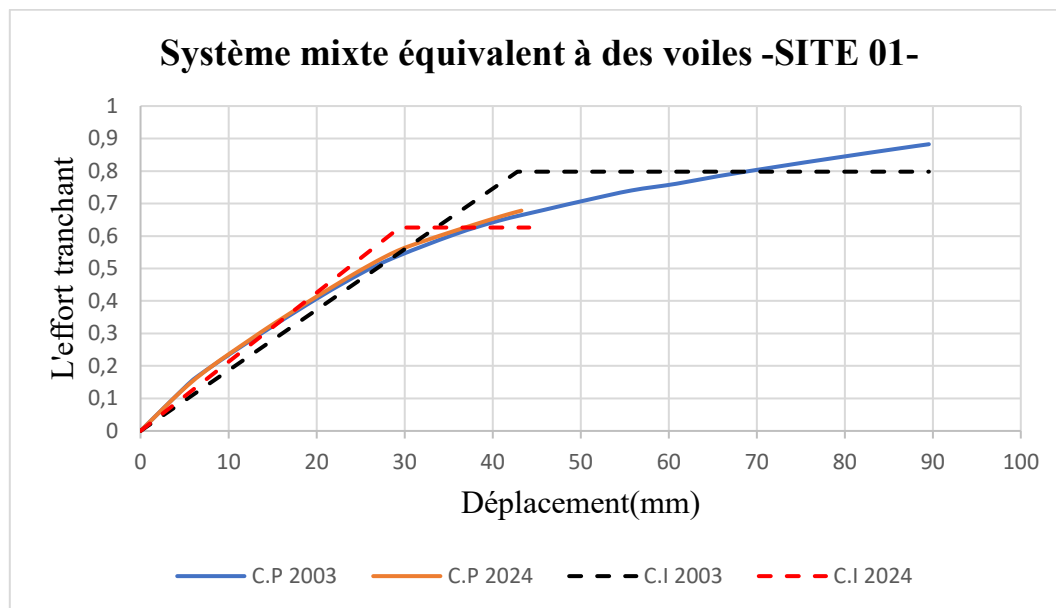


Figure III-3 : Courbe pushover réelle (C.P) et courbe pushover idéalisée (C.I) du système mixte équivalent à des voiles sur le site S1 selon les RPA 2003 et RPA 2024

❖ Système contreventé par des voiles :

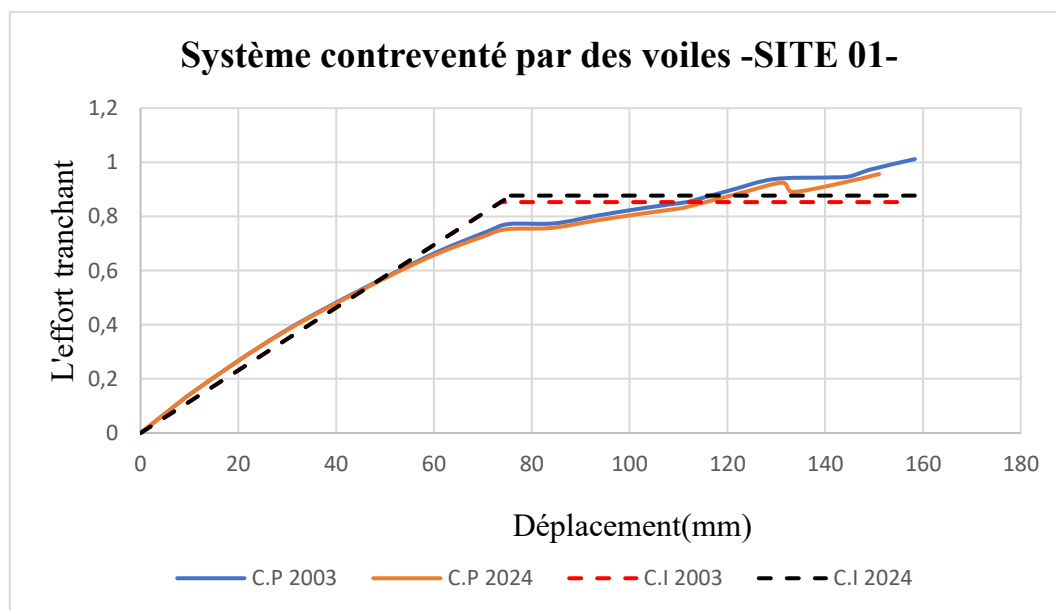


Figure III-4 : Courbe pushover réelle (C.P) et courbe pushover idéalisée (C.I) du Système contreventé par des voiles sur le site S1 selon les RPA 2003 et RPA 2024

III.3. INTERPRETATION DES COURBES PUSHOVER IDEALISEES -SITE 01-

❖ Système à ossature

Le point de performance se situe, selon le RPA 2003, à un déplacement spectral $S_d = 0.037$ m. En RPA 2024, ce point est atteint à $S_d = 0.034$ m. La comparaison met en évidence une légère réduction de la demande en déplacement (-8%). Le rapport de ductilité chute de $\mu = 5.25$ à $\mu = 1.47$, révélant une réduction importante de la capacité de déformation plastique. Sur la base des courbes, les points de performance se situent dans le palier plastique pour les deux règlements.

❖ Système mixte équivalent à une ossature

Sous RPA 2003, le point de performance est atteint à $S_d = 0.036$ m. En RPA 2024, S_d augmente légèrement à 0.037 m. La ductilité diminue cependant de $\mu = 3.35$ à $\mu = 2.26$. Les deux règlements positionnent le point de performance dans le palier plastique, mais avec une réserve de ductilité plus importante en RPA 2003.

❖ Système mixte équivalent à des voiles

Le déplacement spectral au point de performance passe de $S_d = 0.039$ m à $S_d = 0.042$ m, marquant une hausse modérée de la demande en déplacement. Le rapport de ductilité diminue de $\mu = 2.09$ à $\mu = 1.50$. Dans les deux cas, le point de performance se situe dans le palier élastique pour le RPA 2003 et au palier plastique pour le RPA 2024. Cette évolution reflète un léger renforcement de la rigidité du système, probablement dû à l'introduction des effets directionnels ($X + 30\% Y$) dans RPA 2024, tout en conservant une bonne capacité d'absorption d'énergie.

❖ Système contreventé par des voiles

Ce système conserve une excellente stabilité entre les deux règlements. Le point de performance reste pratiquement inchangé : $S_d = 0.054$ m en RPA 2003 contre $S_d = 0.055$ m en RPA 2024. Le rapport de ductilité passe de $\mu = 2.09$ à $\mu = 2.11$. Dans les deux cas, le point de performance se situe dans le palier plastique. Ce résultat confirme l'efficacité du système voile.

III.4. RESULTATS DES COURBES PUSHOVER IDEALISEE – SITE 02-

❖ Système à ossature :

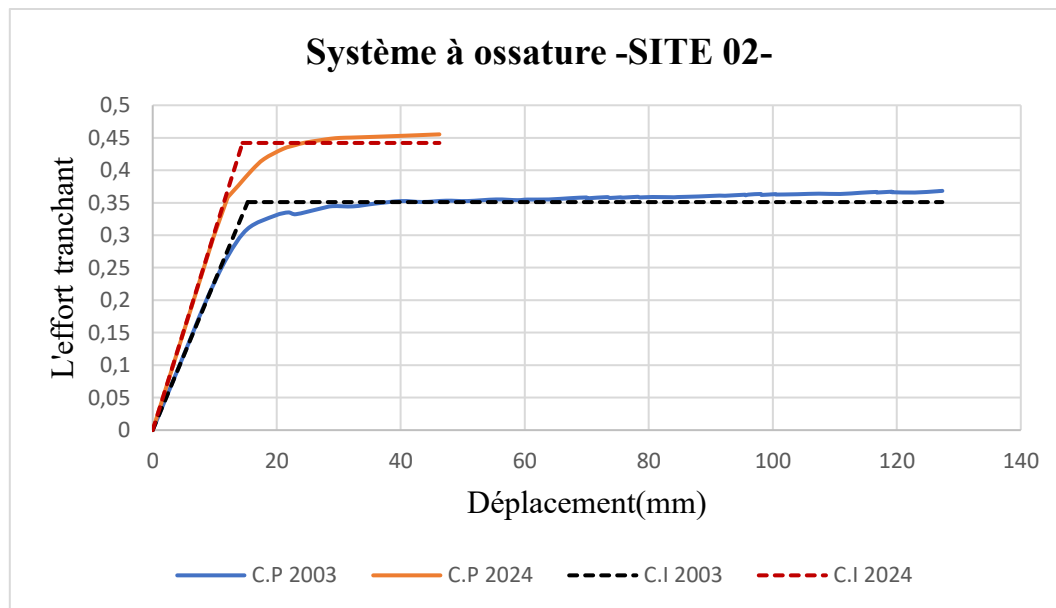


Figure III-5 : Courbe pushover réelle (C.P) et courbe pushover idéalisée (C.I) du système à ossature sur le site S2 selon les RPA 2003 et RPA 2024

❖ Système mixte équivalent à une ossature :

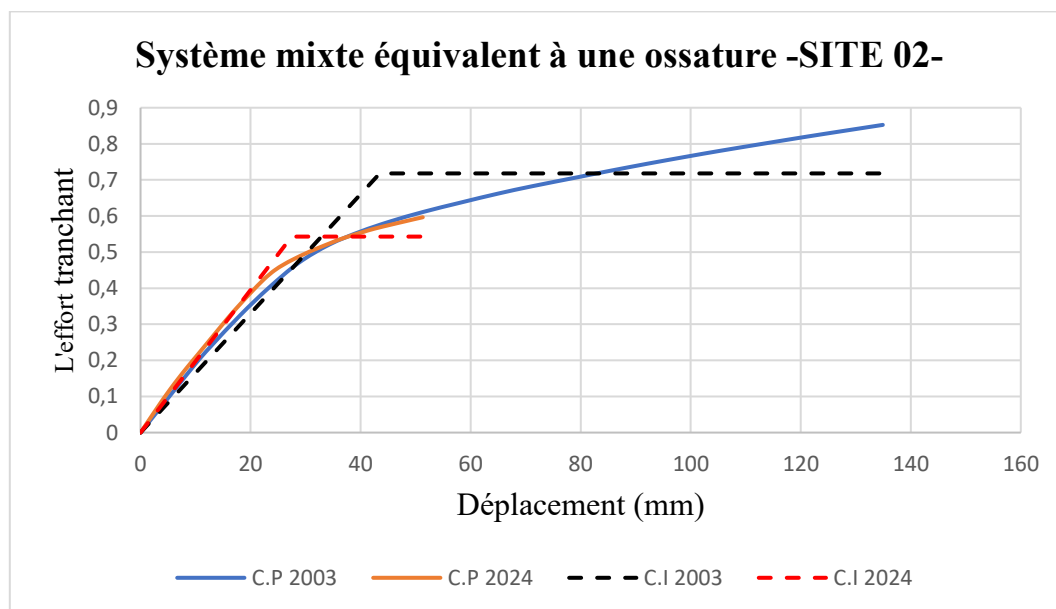


Figure III-6 : Courbe pushover réelle (C.P) et courbe pushover idéalisée (C.I) du système mixte équivalent à une ossature sur le site S2 selon les RPA 2003 et RPA 2024

❖ Système mixte équivalent à des voiles :

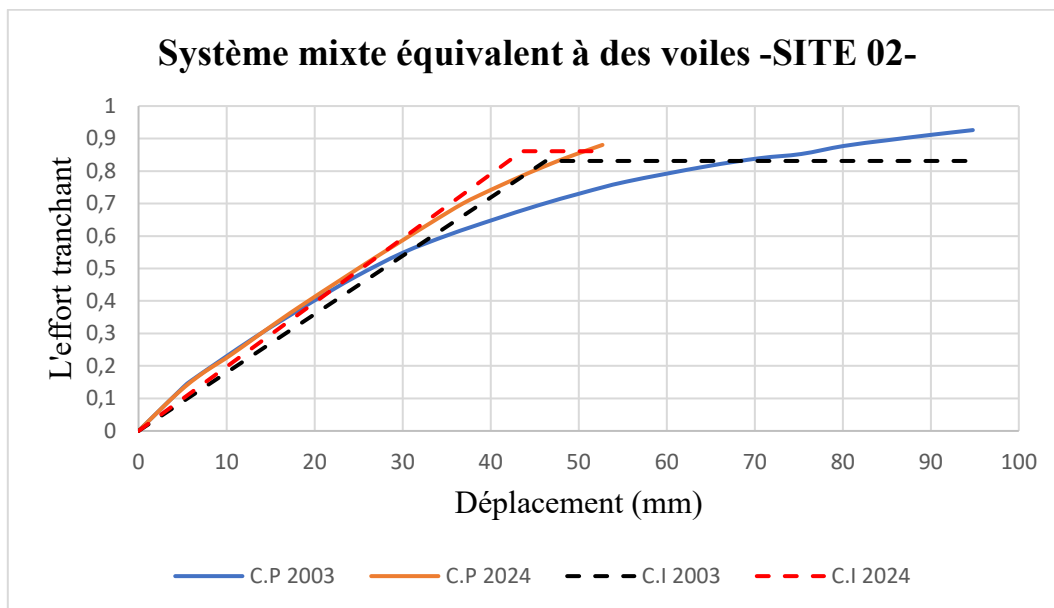


Figure III-7 : Courbe pushover réelle (C.P) et courbe pushover idéalisée (C.I) du système mixte équivalent à des voiles sur le site S2 selon les RPA 2003 et RPA 2024

❖ Système contreventé par des voiles :

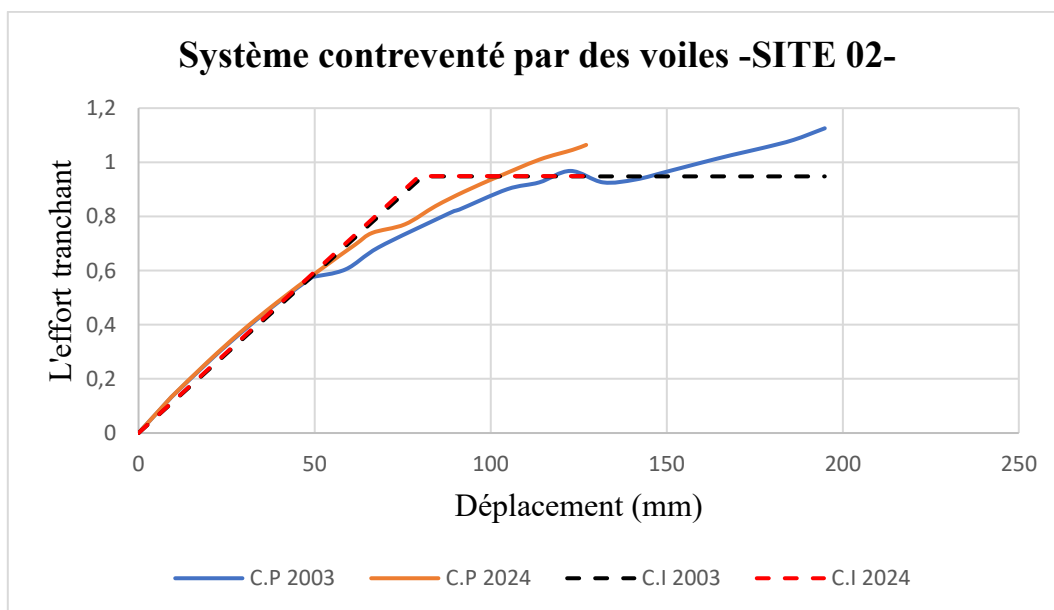


Figure III-8 : Courbe pushover réelle (C.P) et courbe pushover idéalisée (C.I) du Système contreventé par des voiles sur le site S2 selon les RPA 2003 et RPA 2024

III.5. INTERPRETATION DES COURBES PUSHOVER IDEALISEES -SITE 02-

❖ Système à ossature

Selon le RPA 2003, le point de performance est atteint à un déplacement spectral de $S_d = 0,034$ m. En RPA 2024, le point se déplace à $S_d = 0,0477$ m. La ductilité chute cependant de $\mu = 8,31$ à $\mu = 3,19$, traduisant une forte réduction de la capacité de déformation plastique. Le point de performance reste situé dans le palier plastique dans les deux cas.

❖ Système mixte équivalent à une ossature

Pour le RPA 2003, le point de performance se trouve à $S_d = 0,0398$ m. Sous RPA 2024, il se situe à $S_d = 0,0518$ m. Cette augmentation traduit une sollicitation dynamique légèrement plus importante et une plus grande exigence en termes de déplacement. Le rapport de ductilité est réduit de $\mu = 3,11$ à $\mu = 1,87$, ce qui indique une perte notable de la capacité dissipative. Le point de performance dans le cas du RPA 2003 se situe dans le palier élastique contrairement à celui du RPA 2024 qui se situe dans le palier plastique.

❖ Système mixte équivalent à des voiles

Le point de performance en RPA 2003 est localisé à $S_d = 0,0500$ m. En RPA 2024, cette valeur s'élève à $S_d = 0,0599$ m. Cette évolution traduit une légère augmentation des sollicitations spectrales. En revanche, la ductilité diminue de $\mu = 2,05$ à $\mu = 1,20$, ce qui révèle une nette réduction de la capacité de déformation post-élastique. Le point de performance dans le cas du RPA 2003 se situe dans le palier élastique contrairement à celui du RPA 2024 qui se situe dans le palier plastique.

Système contreventé par des voiles

Sous le RPA 2003, le point de performance est identifié à $S_d = 0,0551$ m. En RPA 2024, cette valeur augmente à $S_d = 0,0773$ m. le déplacement augmente également de manière significative. Le rapport de ductilité diminue de $\mu = 2,45$ à $\mu = 1,60$, ce qui reste néanmoins satisfaisant pour ce type de système. Le point de performance reste situé dans le palier élastique dans les deux cas.

III.6. RESULTATS DES COURBES PUSHOVER IDEALISEE – SITE 03-

❖ Système à ossature :

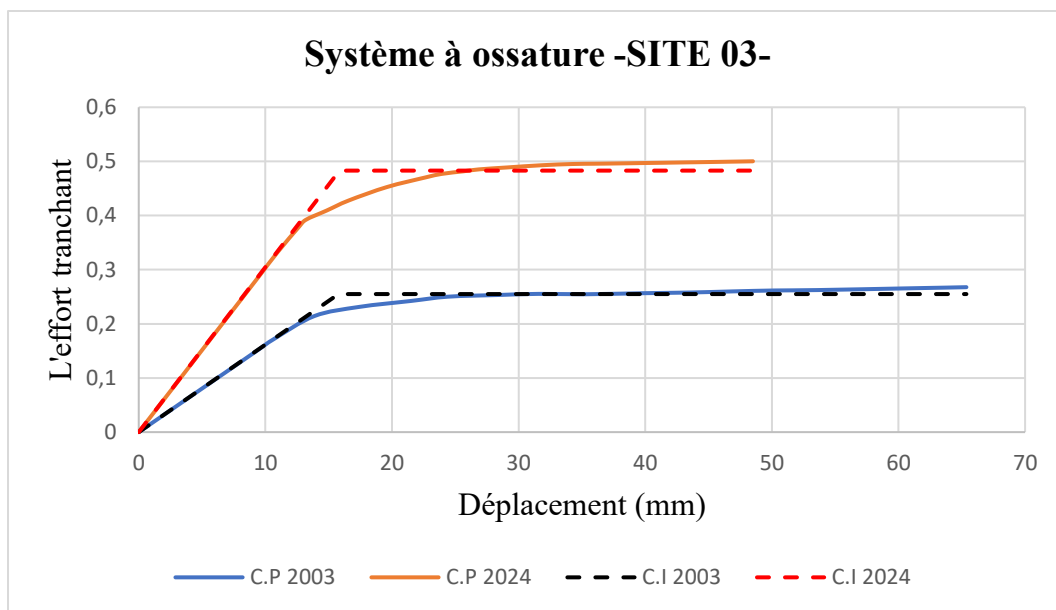


Figure III-9 : Courbe pushover réelle (C.P) et courbe pushover idéalisée (C.I) du système à ossature sur le site S3 selon les RPA 2003 et RPA 2024

❖ Système mixte équivalent à une ossature :

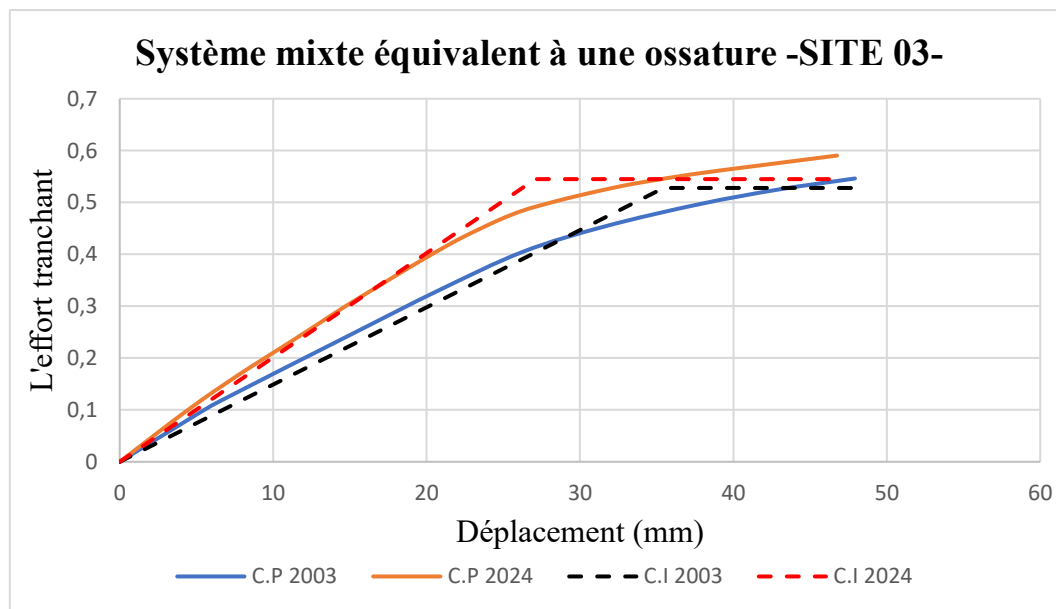


Figure III-10 : Courbe pushover réelle (C.P) et courbe pushover idéalisée (C.I) du système mixte équivalent à une ossature sur le site S3 selon les RPA 2003 et RPA 2024

❖ Système mixte équivalent à des voiles :

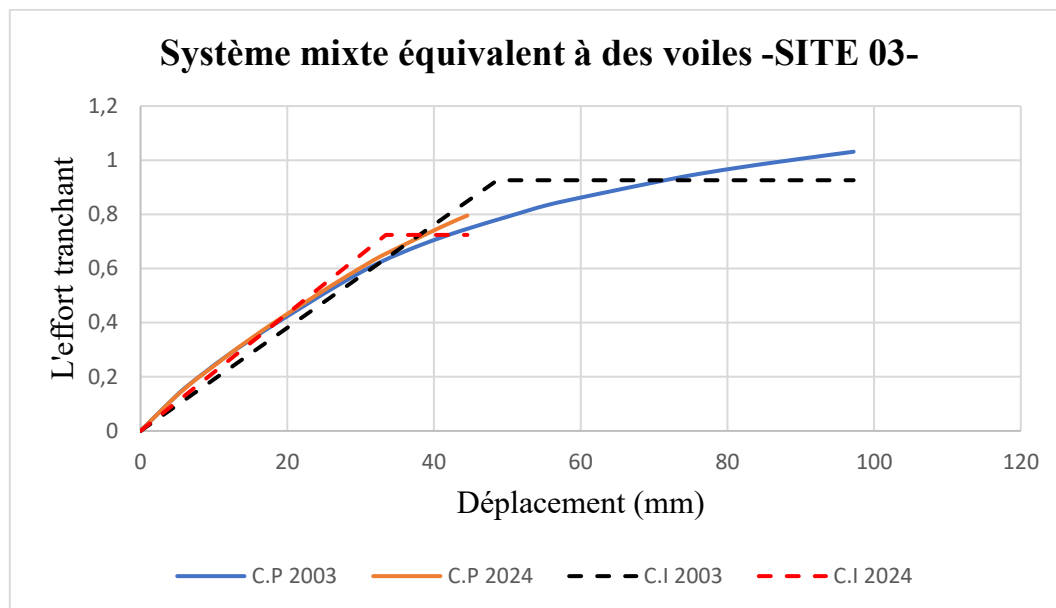


Figure III-11 : Courbe pushover réelle (C.P) et courbe pushover idéalisée (C.I) du système mixte équivalent à des voiles sur le site S3 selon les RPA 2003 et RPA 2024

❖ Système contreventé par des voiles :

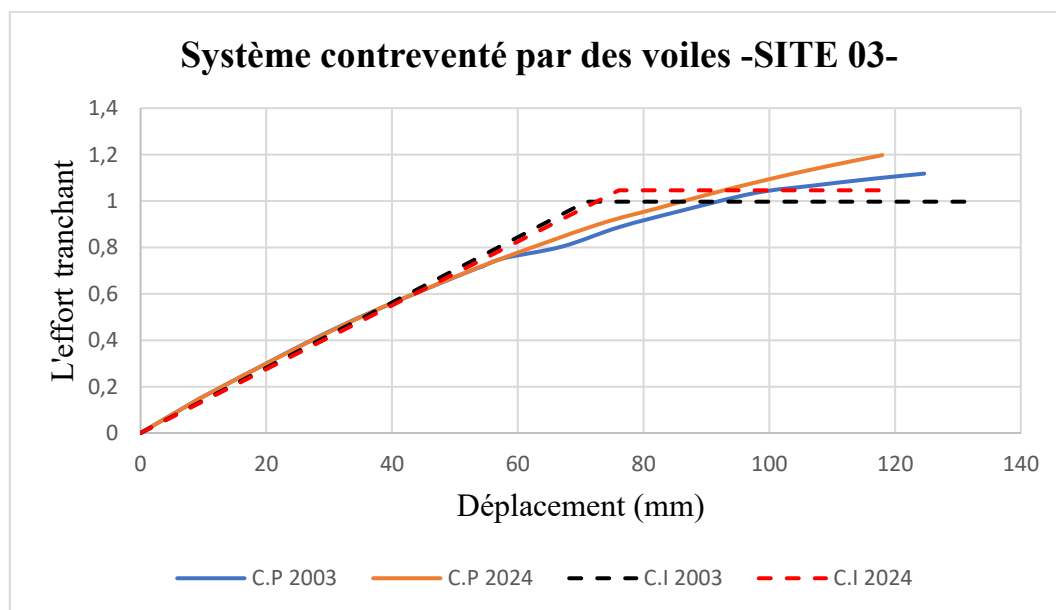


Figure III-12 : Courbe pushover réelle (C.P) et courbe pushover idéalisée (C.I) du Système contreventé par des voiles sur le site S3 selon les RPA 2003 et RPA 2024

III.7. INTERPRETATION DES COURBES PUSHOVER IDEALISEES -SITE 03-

❖ Système à ossature

Le point de performance selon le RPA 2003 est localisé à un S_d de 58,696 mm. En RPA 2024, le point se situe à un S_d légèrement plus faible de 55,301 mm. Le rapport de ductilité chute de $\mu = 4,14$ à $\mu = 3,06$, indiquant une réduction de la capacité de déformation plastique.

Le point de performance se situe dans le palier plastique pour les deux règlements, traduisant un comportement post-linéaire du système malgré une certaine rigidification.

❖ Système mixte équivalent à une ossature

Pour ce système, les déplacements spectraux aux points de performance sont très proches : 56,799 mm (RPA 2003) et 55,248 mm (RPA 2024), ce qui reflète une stabilité de la demande en déplacement. Le rapport de ductilité passe de $\mu = 1,35$ à $\mu = 1,73$. Cette évolution peut s'expliquer par une meilleure efficacité de la répartition des efforts dans le système selon RPA 2024. Les deux points de performance sont localisés dans le palier plastique.

❖ Système mixte équivalent à des voiles

Le point de performance sous RPA 2003 se trouve à un S_d de 54,455 mm. En RPA 2024, le déplacement augmente à 75,063 mm. Malgré cette sollicitation plus élevée, le rapport de ductilité diminue de $\mu = 2,00$ à $\mu = 1,73$. Cela témoigne d'un comportement plus contraint sous le nouveau règlement.

Dans les deux cas, les points de performance sont clairement situés dans le palier plastique.

❖ Système contreventé par des voiles

Ce système montre une bonne robustesse. Une augmentation modérée du déplacement spectral : 62,084 mm en 2003 à 92,3 mm en 2024.

Cependant, la ductilité diminue légèrement, passant de $\mu = 1,87$ à $\mu = 1,55$. Ce comportement traduit une structure plus rigide mais stable face aux exigences plus sévères du RPA 2024. Le point de performance dans le cas du RPA 2003 se situe dans le palier élastique contrairement à celui du RPA 2024 qui se situe dans le palier plastique.

III.8. RESULTATS DES COURBES PUSHOVER IDEALISEE –SITE 04-

❖ Système à ossature :

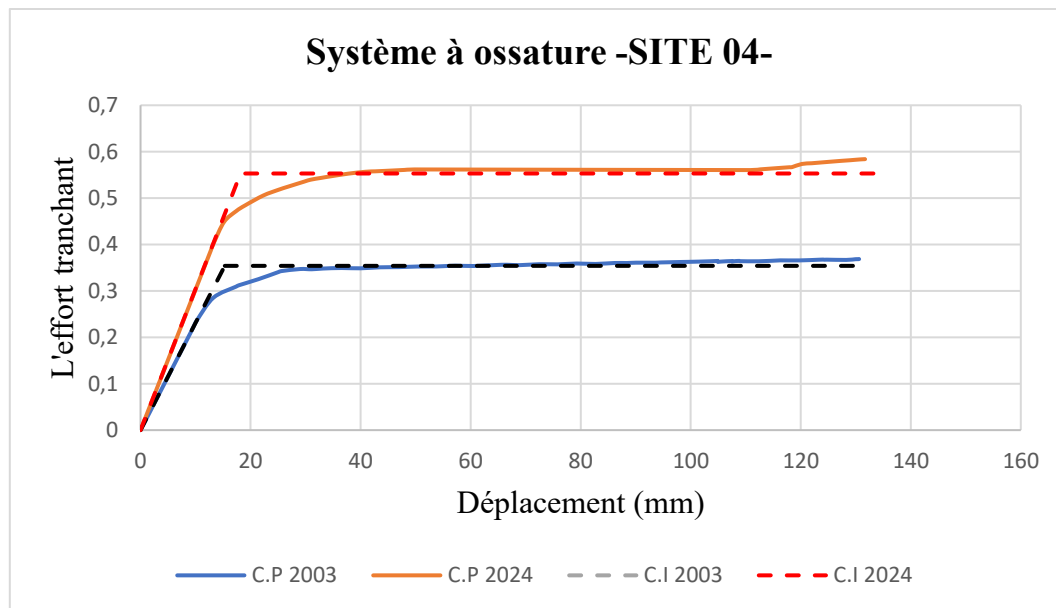


Figure III-13 : Courbe pushover réelle (C.P) et courbe pushover idéalisée (C.I) du système à ossature sur le site S4 selon les RPA 2003 et RPA 2024

❖ Système mixte équivalent à une ossature :

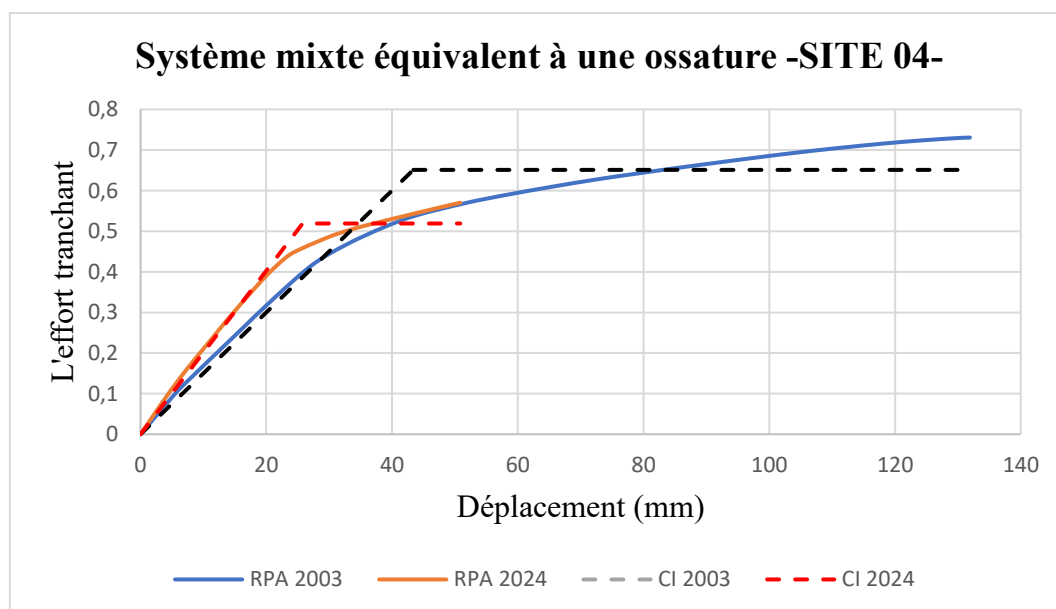


Figure III-14 : Courbe pushover réelle (C.P) et courbe pushover idéalisée (C.I) du système mixte équivalent à une ossature sur le site S4 selon les RPA 2003 et RPA 2024

❖ Système mixte équivalent à des voiles :

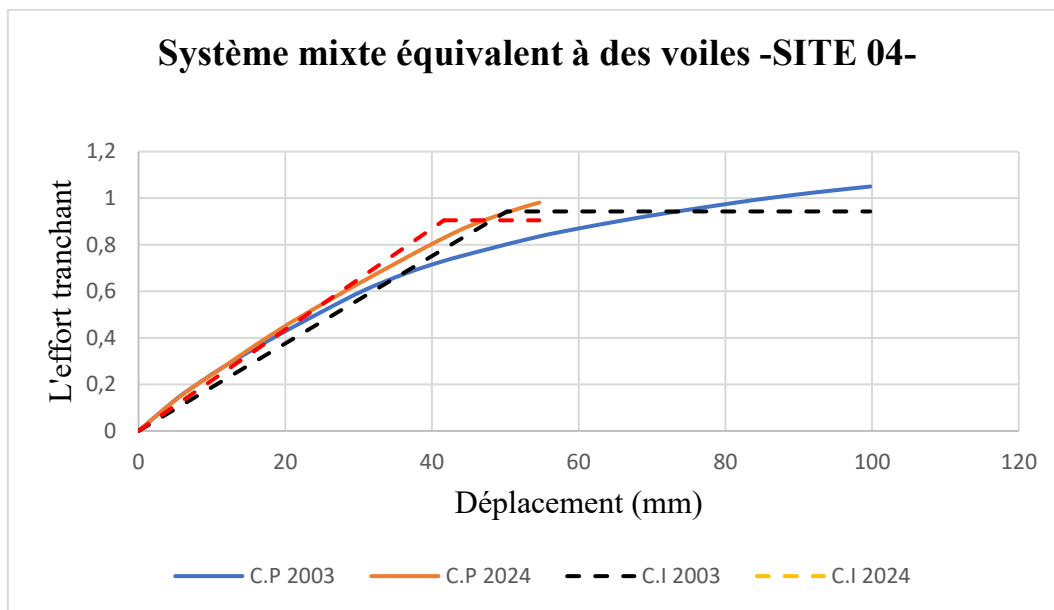


Figure III-15 : Courbe pushover réelle (C.P) et courbe pushover idéalisée (C.I) du système mixte équivalent à des voiles sur le site S4 selon les RPA 2003 et RPA 2024

❖ Système contreventé par des voiles :

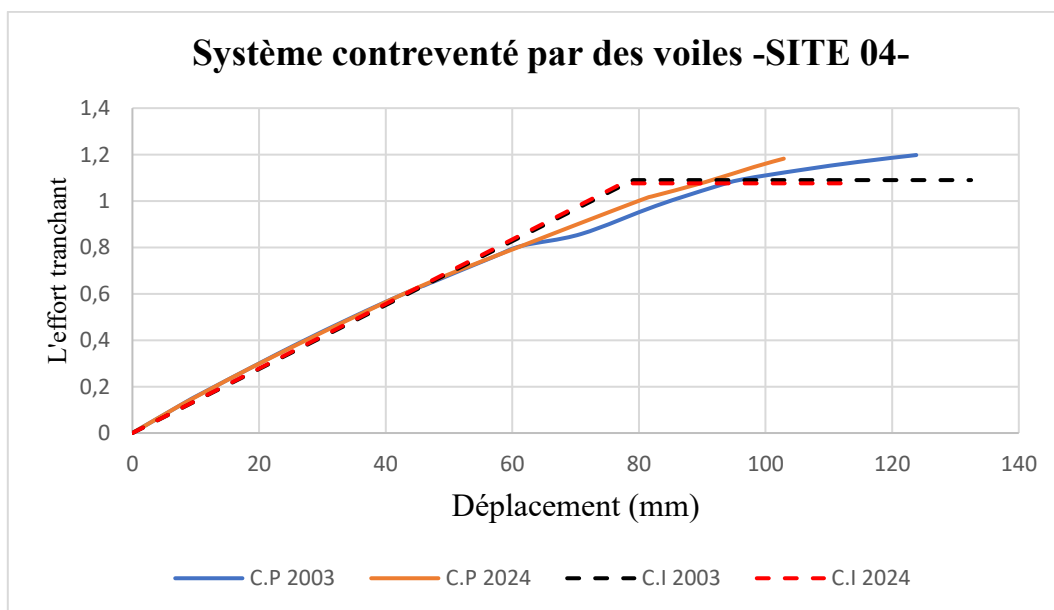


Figure III-16 : Courbe pushover réelle (C.P) et courbe pushover idéalisée (C.I) du Système contreventé par des voiles sur le site S4 selon les RPA 2003 et RPA 2024

III.9. INTERPRETATION DES COURBES PUSHOVER IDEALISEES -SITE 04-

❖ Système à ossature

Le point de performance se situe sous le RPA 2003 à un $S_d = 57.03$ mm. Avec le RPA 2024, le déplacement augmente à $S_d = 72.23$ mm. On observe une hausse de 26.6 % en déplacement, traduisant une exigence accrue de déformabilité. Le rapport de ductilité μ diminue légèrement, passant de 8.53 à 7.47, ce qui reflète une réduction modérée de la capacité dissipative. Sur les courbes, le point de performance se situe dans le palier plastique pour les deux règlements, indiquant une mobilisation importante de la réserve ductile du système.

❖ Système mixte équivalent à une ossature

Le RPA 2003 fixe le point de performance à $S_d = 68.47$ mm, tandis que le RPA 2024 l'élève à $S_d = 99.87$ mm. Le déplacement augmente ainsi de 46 %. La ductilité diminue significativement, passant de $\mu = 3.04$ à $\mu = 1.97$, révélant une réduction importante de la déformabilité post-élastique. Le point de performance reste dans le palier plastique dans les deux cas, signalant que la structure continue de fonctionner en régime non linéaire sous sollicitations accrues.

❖ Système mixte équivalent à des voiles

Pour le RPA 2003, le point de performance est à $S_d = 53.87$ mm. Sous RPA 2024, le déplacement passe à $S_d = 77.10$ mm. Le système subit une augmentation de 43 % du déplacement spectral, traduisant une exigence plus forte en énergie sismique. Le rapport de ductilité chute de $\mu = 2.00$ à $\mu = 1.31$, ce qui illustre un affaiblissement significatif de la capacité de dissipation d'énergie. Le point de performance est clairement localisé dans le palier plastique, attestant d'une sollicitation intense mais absorbée par le système.

❖ Système contreventé par des voiles

Le point de performance sous RPA 2003 se situe à $S_d = 67.51$ mm, tandis que sous RPA 2024, ces valeurs augmentent à $S_d = 101.27$ mm. Cela équivaut à une augmentation de 50 % du déplacement spectral. La ductilité diminue de $\mu = 1.67$ à $\mu = 1.48$, ce qui reste acceptable au regard des sollicitations accrues. Le point de performance dans le cas du RPA 2003 se situe dans le palier élastique contrairement à celui du RPA 2024 qui se situe dans le palier plastique.

III.10. EFFETS DES SPECTRES RPA SUR LES DEPLACEMENTS SPECTRAUX SELON LE TYPE DE CONCEPTION ET LE SITE

Chaque système a été conçu une première fois selon les prescriptions du RPA 2003, puis une seconde fois selon celles du RPA 2024. Pour chaque cas de conception, deux analyses ont été menées : la première en appliquant le spectre de réponse du RPA 2003, et la seconde avec celui du RPA 2024. Cette double application permet de mettre en lumière les différences de comportement de la structure face aux exigences de chaque règlement, en distinguant les effets induits par la conception initiale et ceux dus à la sollicitation sismique imposée.

III.10.1. Résultats des points de performance pour les structures conçues par le RPA 2003 :

Les données obtenues représentent les résultats d'une analyse spectrale dans laquelle les spectres de réponse du RPA 2003 et du RPA 2024 ont été appliqués à des systèmes structurels préalablement conçus selon les prescriptions du RPA 2003. Cette approche permet d'évaluer, de manière comparative, la rigueur du RPA 2024 vis-à-vis du comportement dynamique des structures existantes.

Le déplacement spectral (Sd), exprimé en millimètres, représente l'un des indicateurs clés du comportement sismique des structures. Il traduit l'ampleur des déformations que subirait une structure sous l'effet d'une sollicitation sismique correspondant à un spectre donné. Une valeur élevée de Sd implique des exigences accrues en termes de capacité de déformation et de ductilité des structures.

Tableau III-1 : Les points de performance pour les structures conçues par le RPA 2003

Sites	Systèmes	Spectre de réponse 2003		Spectre de réponse 2024	
		Sa(g)	Sd(mm)	Sa(g)	Sd(mm)
S1	Oss	0,254494	37,46	0,253302	34,376
	M.oss	0,419257	35,99	0,421634	36,712
	M.voile	0,633596	39,09	0,652904	41,60
	Voile	0,610197	53,99	0,621952	55,34

S2	Oss	0,346667	34,21	0,353073	47,66
	M.oss	0,555975	39,81	0,612931	51,82
	M.voile	0,729695	49,99	0,790328	59,85
	Voile	0,593461	55,08	0,743153	77,26
S3	Oss	0,264674	58,69	0,778689	60,52
	M.oss	0,595470	56,79	0,593661	55,24
	M.voile	0,826272	54,45	0,943829	75,06
	Voile	0,776669	62,08	0,99905	92,3
S4	Oss	0,354253	57,02	0,35744	72,23
	M.oss	0,617231	68,46	0,685071	99,87
	M.voile	0,830052	53,86	0,960268	77,09
	Voile	0,839434	67,514	1,114667	101,274

➤ **Synthèse des tendances observées :**

Sous le spectre RPA 2003 :

- Les valeurs les plus élevées de Sd sont observées pour les structures sur sols meubles à très meubles (S3, S4).
- Les systèmes à voiles et systèmes mixtes à ossature montrent les Sd les plus importants (jusqu'à 68,46 mm sur S4).

Sous le spectre RPA 2024 :

- On constate une augmentation significative des Sd pour tous les systèmes, en particulier sur S3 et S4.
- Les valeurs culminent à plus de 100 mm, notamment pour le système à voiles sur S4 (101,27 mm) et le système mixte ossature sur S4 (99,87 mm).

- Les systèmes en voile sont systématiquement les plus sollicités en termes de déplacement.

L'analyse met en évidence que le RPA 2024 introduit une sollicitation dynamique plus importante sur les structures conçues selon le RPA 2003. Cela est dû à la considération des effets d'amplification sur les sols meubles et des périodes prolongées de vibration des structures. Ainsi, l'application du spectre RPA 2024 à des structures conçues selon le RPA 2003 pourrait révéler une sous-estimation des déplacements attendus, exposant ces structures à des risques accrus de défaillance.

III.11. CONCLUSION

Ce chapitre a présenté l'analyse Pushover appliquée aux quatre systèmes de contreventement considérés, en comparant les résultats obtenus selon les règlements RPA 2003 et RPA 2024. L'approche adoptée a permis d'évaluer la réponse non linéaire des structures, ainsi que les effets de la variation du spectre de réponse sur leur comportement global.

L'analyse a mis en évidence des différences entre les deux règlements, notamment sur les points de performance, la position du seuil élastique, la transition vers le domaine plastique, et la capacité en déplacement. Le RPA 2024 entraîne des courbes de capacité modifiées, avec des déplacements de performance distincts, traduisant un comportement structurel influencé par les exigences spécifiques du règlement.

La variation des spectres selon la nature du sol a également été observée à travers les courbes obtenues sur différents sites. Cette variation se reflète dans le décalage des points de performance et dans l'évolution des capacités maximales des structures.

Enfin, les résultats ont montré que les systèmes contreventés par des voiles présentent des courbes de capacité avec des points de performance localisés majoritairement dans la zone élastique, traduisant une influence notable de la configuration structurelle sur la réponse globale.

Ces résultats peuvent être utilisés pour apprécier l'impact des choix réglementaires sur les performances structurelles, notamment dans le cadre d'une réévaluation ou d'une mise à jour des conceptions initiales. L'analyse a permis de relier la forme des spectres aux mécanismes de rupture potentiels, et de comparer les effets de la réglementation sur différents types de systèmes et de sites.

CHAPITRE IV :
VULNERABILITE SISMIQUE –
COURBE DE FRAGILITE – DPM –
CALCUL DE COUT

IV.1. INTRODUCTION

L'évaluation de la vulnérabilité sismique constitue un enjeu majeur dans la conception et la vérification des structures, en particulier dans les zones à forte sismicité. Pour cela, l'approche probabiliste offre des outils performants permettant de quantifier, avec une certaine incertitude maîtrisée, le comportement attendu des structures sous différents scénarios de séismes. Parmi ces outils, les courbes de fragilité et les matrices de probabilité de dommage – RISK UE.

Dans le cadre de cette étude, une analyse a été conduite afin de comparer la réponse sismique de structures modélisées conformément au RPA 2003 et au RPA 2024. La démarche repose sur l'utilisation d'un logiciel spécialisé dans la simulation dynamique des structures soumises à des sollicitations sismiques. Un ensemble de séries d'accélération sismiques réelles, provenant de différentes stations d'enregistrement, a été utilisé comme base de chargement. Ces signaux sismiques ont été introduits dans le modèle numérique afin de générer un large spectre de réponses structurelles représentatives de divers scénarios.

À partir de ces résultats dynamiques, le logiciel a permis de construire les courbes de fragilité associées à chaque système étudié. Ces courbes traduisent, pour chaque intensité sismique, la probabilité qu'un bâtiment atteigne ou dépasse un certain état de dommage (léger, modéré, étendu ou complet).

L'ensemble des courbes a été généré pour différents types de systèmes un système à ossature, un système mixte équivalent à une ossature, un système mixte équivalent à des voiles, et un système contreventé par des voiles, implantés sur quatre classes de sols (S1 : rocheux, S2 : ferme, S3 : meuble, S4 : très meuble). Ainsi, pour chaque combinaison (type de sol, version du RPA, type de dommage), une courbe de fragilité a été obtenue. Ces courbes ont ensuite été utilisées pour dériver la matrice de probabilité de dommage (DPM), qui regroupe, pour chaque niveau d'intensité, les probabilités d'occurrence de chacun des états de dommage.

L'objectif de ce chapitre est de présenter et interpréter ces courbes de fragilité et matrices de dommage, en mettant en lumière les différences entre les deux versions du RPA et l'impact de la nature du sol sur la vulnérabilité des structures. Cette analyse permettra de tirer des conclusions quant aux performances structurelles attendues et à la sévérité relative des prescriptions du RPA 2024 par rapport à celles du RPA 2003

IV.2. VISUALISATION COMPARATIVE DES COURBES DE FRAGILITE POUR LES SYSTEMES STRUCTURELS SELON LES NORMES RPA

‘Les figures présentées dans cette section illustrent les courbes de fragilité pour quatre types de systèmes structuraux implantés sur les quatre sites (S1, S2, S3, S4), comparant les versions RPA 2003 (lignes pleines) et RPA 2024 (lignes pointillées). L'axe horizontal représente le déplacement spectral (S_d en mètres), tandis que l'axe vertical indique la probabilité de dépassement d'un état de dommage donné.’

IV.2.1. SITE 01

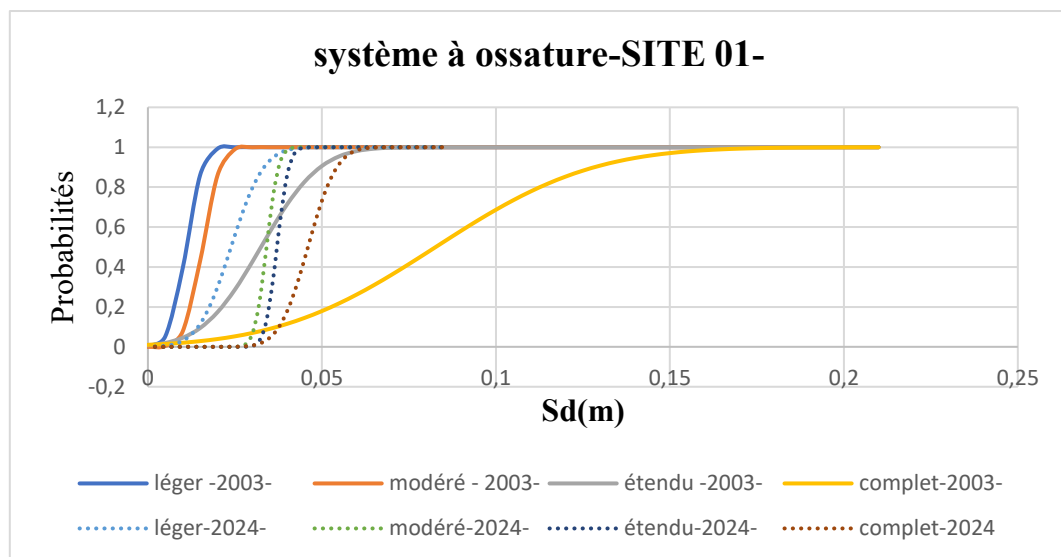


Figure IV-1 : Les courbes de fragilité pour le système à ossature -S1-

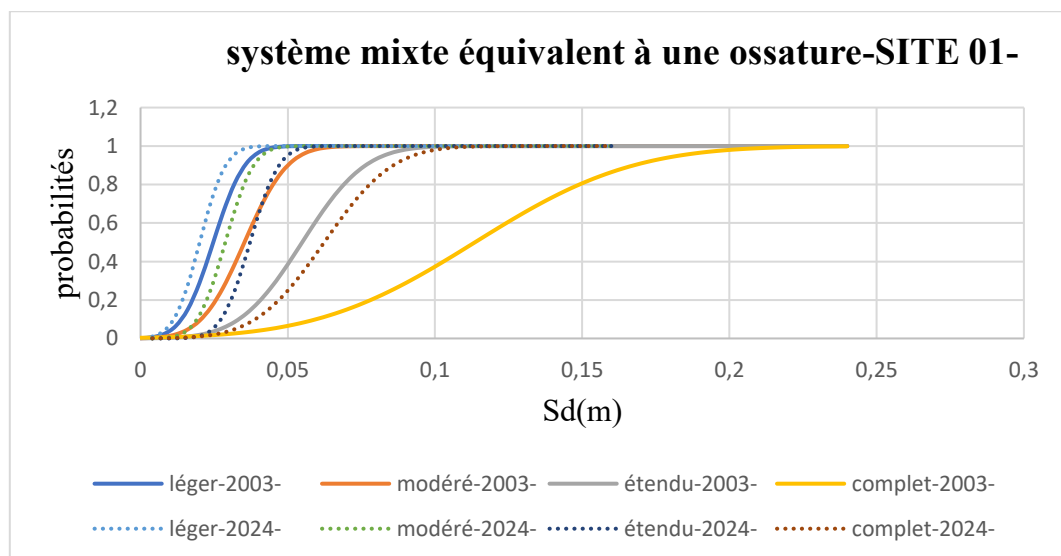


Figure IV-2 : Les courbes de fragilité pour le système mixte équivalent à une ossature -S1-

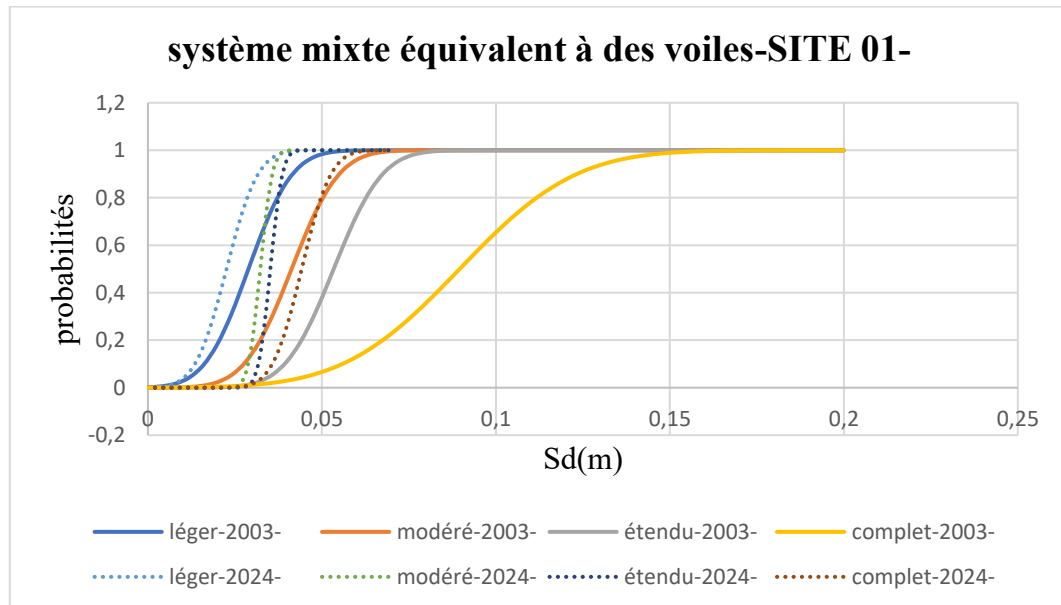


Figure IV-3 : Les courbes de fragilité pour le système mixte équivalent à des voiles -S1-

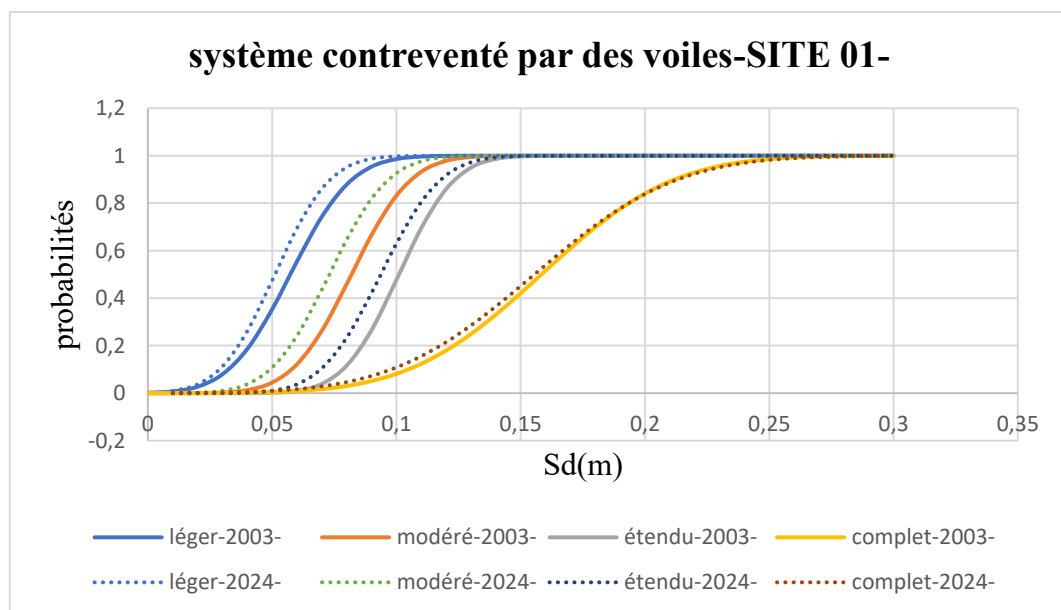


Figure IV-4 : Les courbes de fragilité pour le système contreventé par des voiles -S1-

IV.2.2. SITE 02

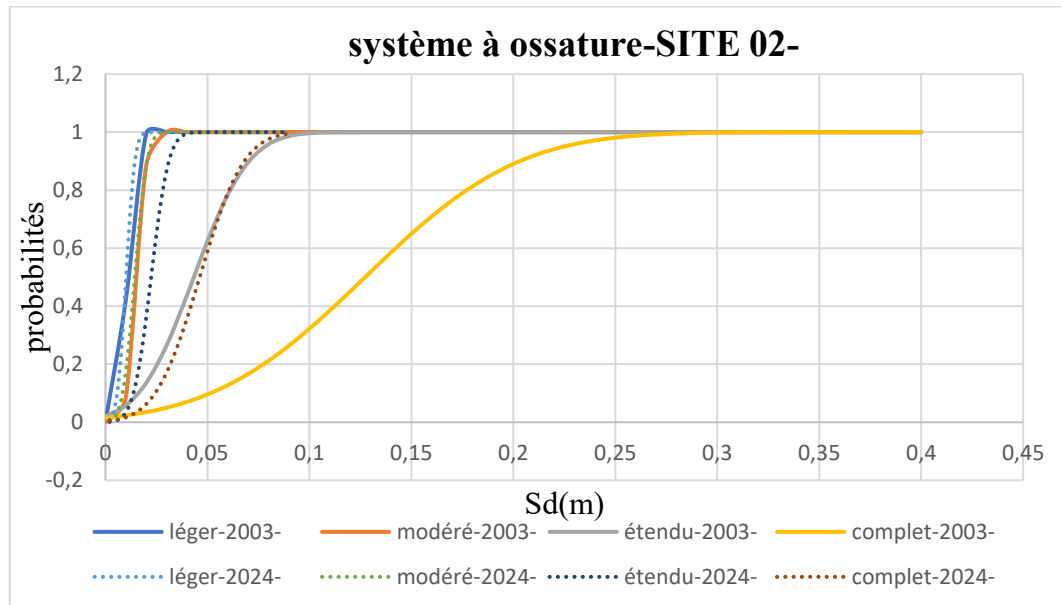


Figure IV-5 : Les courbe de fragilité pour le système à ossature -S2-

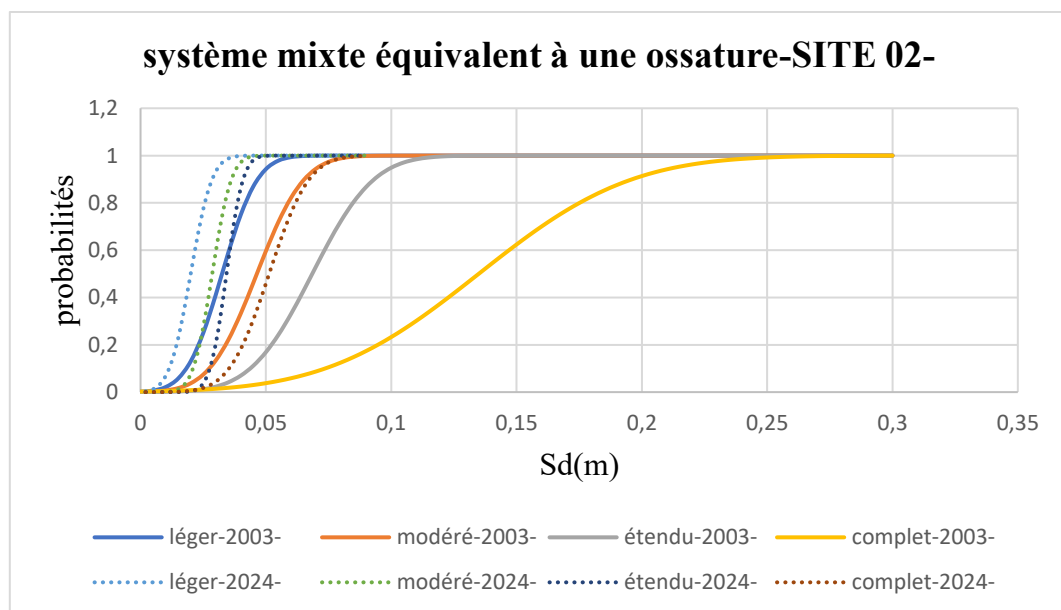


Figure IV-6 : Les courbes de fragilité pour le système mixte équivalent à une ossature -S2-

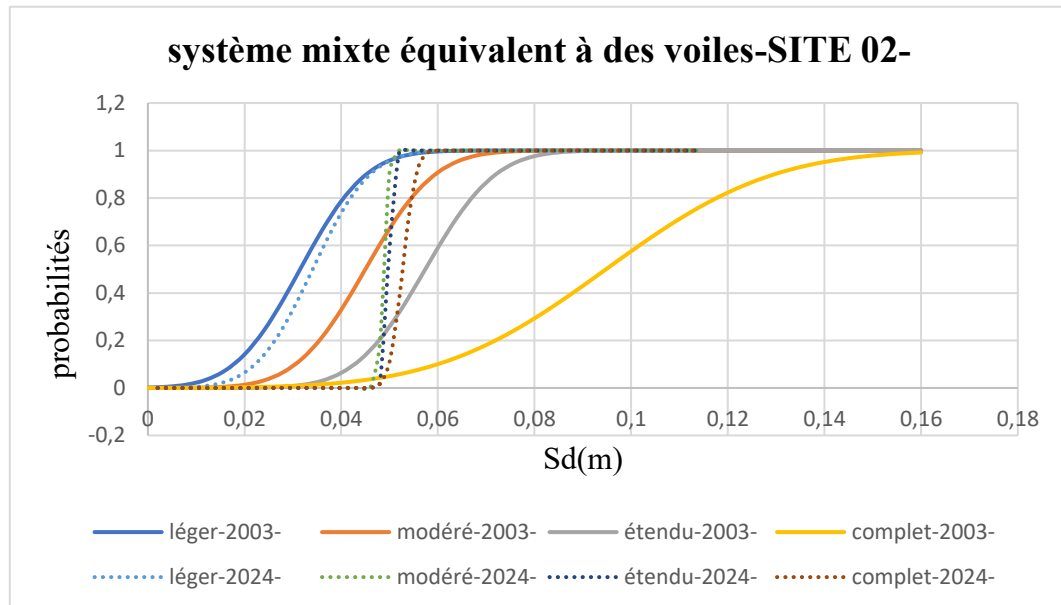


Figure IV-7 : Les courbes de fragilité pour le système mixte équivalent à des voiles -S2-

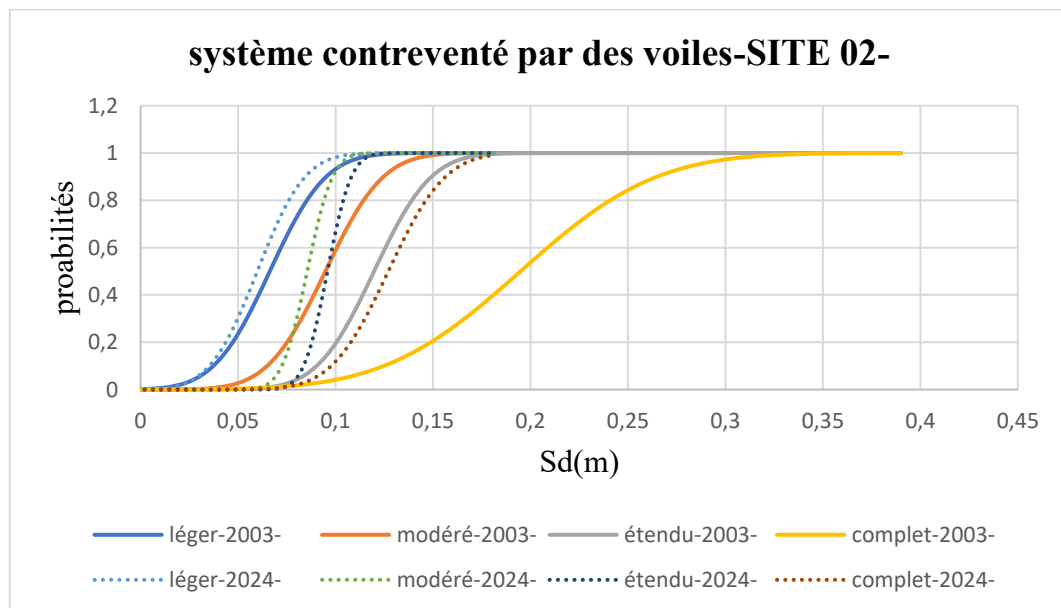


Figure IV-8 : Les courbes de fragilité pour le système contreventé par des voiles -S2-

IV.2.3. SITE 03

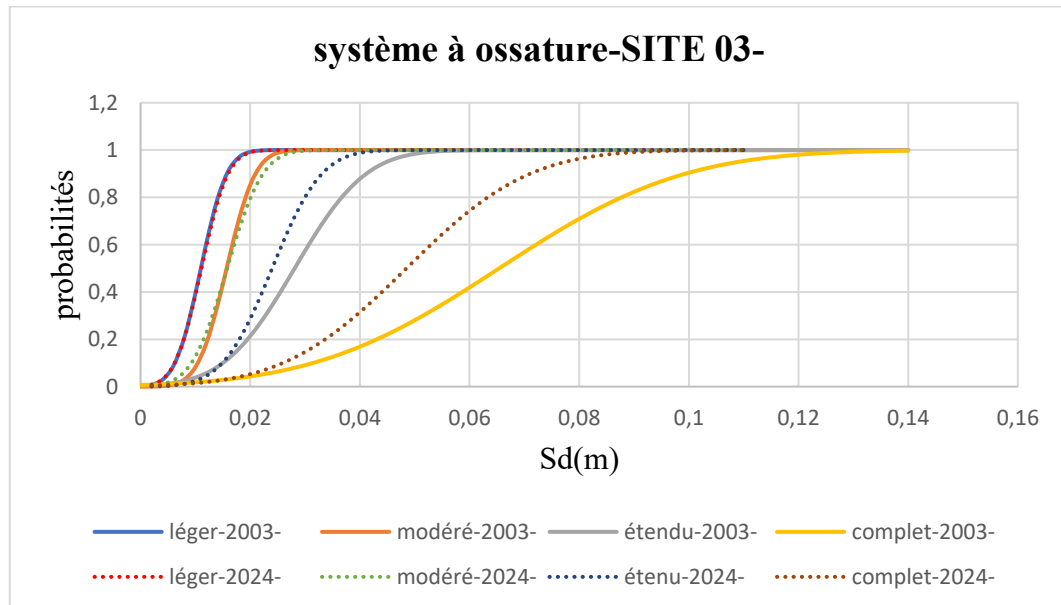


Figure IV-9 : Les courbe de fragilité pour le système à ossature -S3-

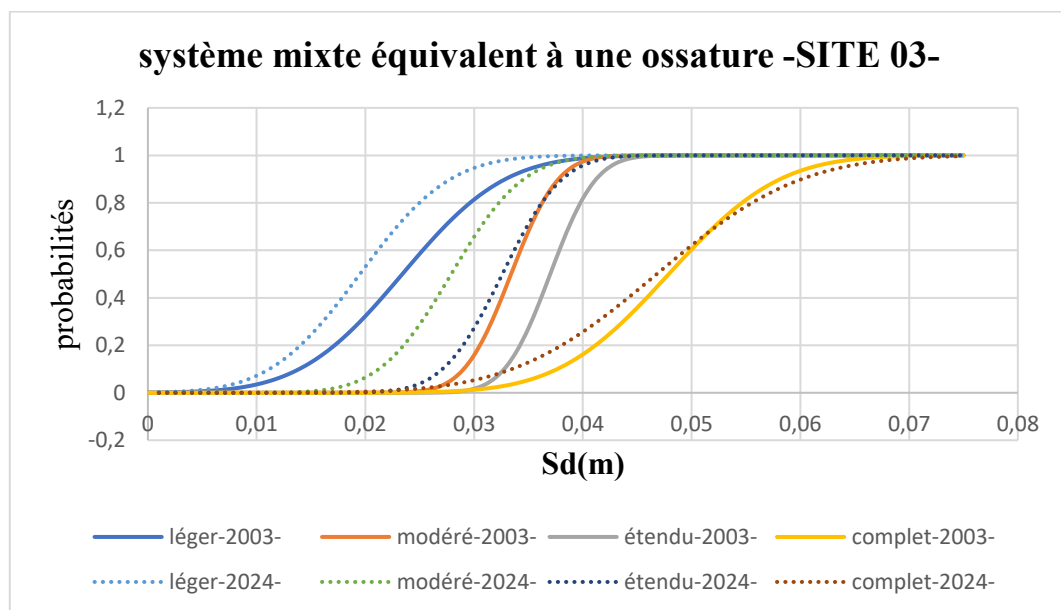


Figure IV-10 : Les courbes de fragilité pour le système mixte équivalent à une ossature -S3-

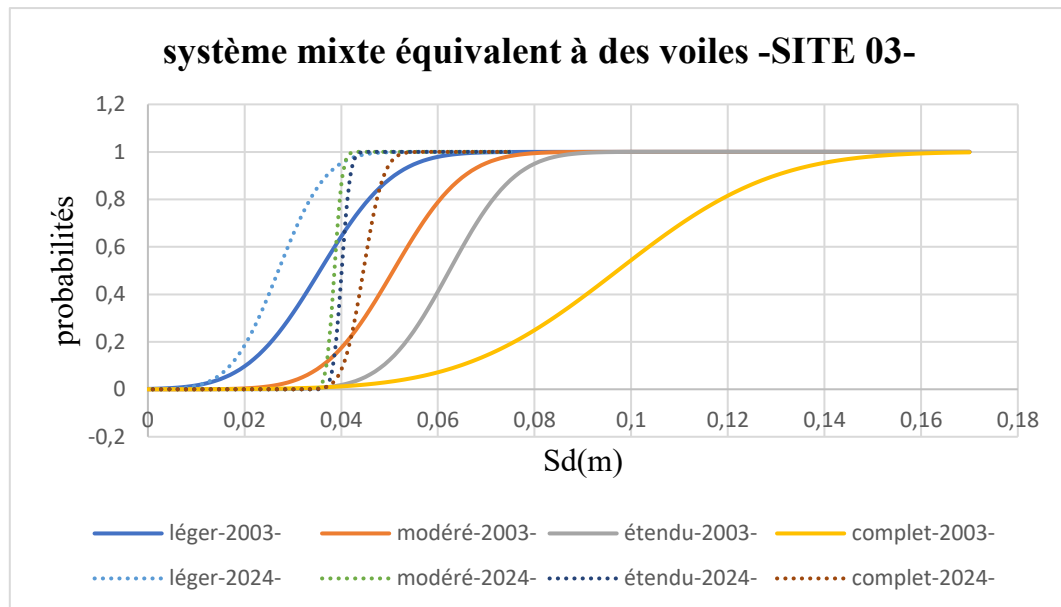


Figure IV-11 : Les courbes de fragilité pour le système mixte équivalent à des voiles -S3-

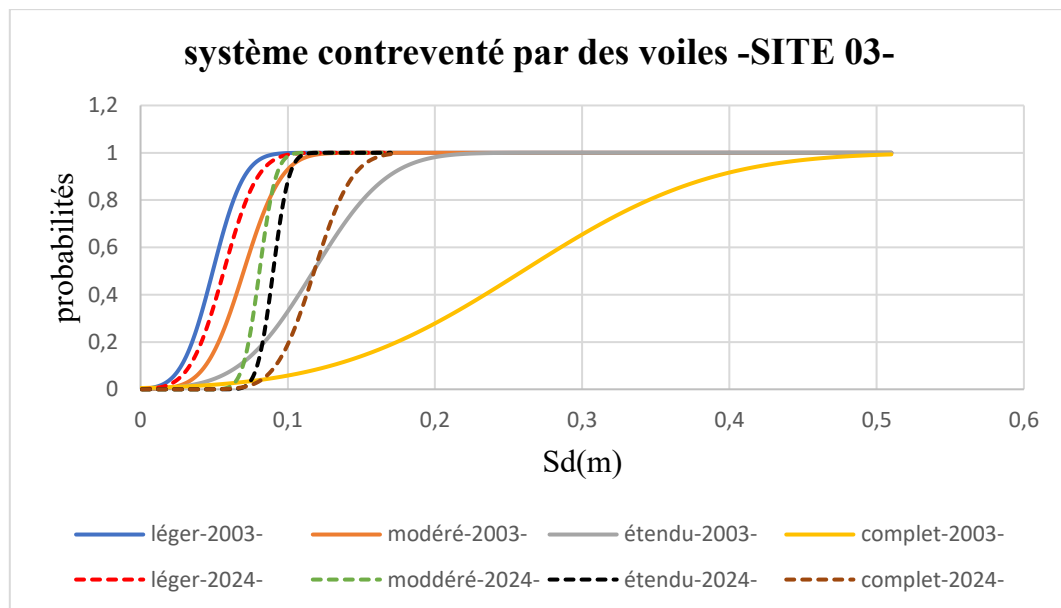


Figure IV-12 : Les courbes de fragilité pour le système contreventé par des voiles -S3-

IV.2.4. SITE 04

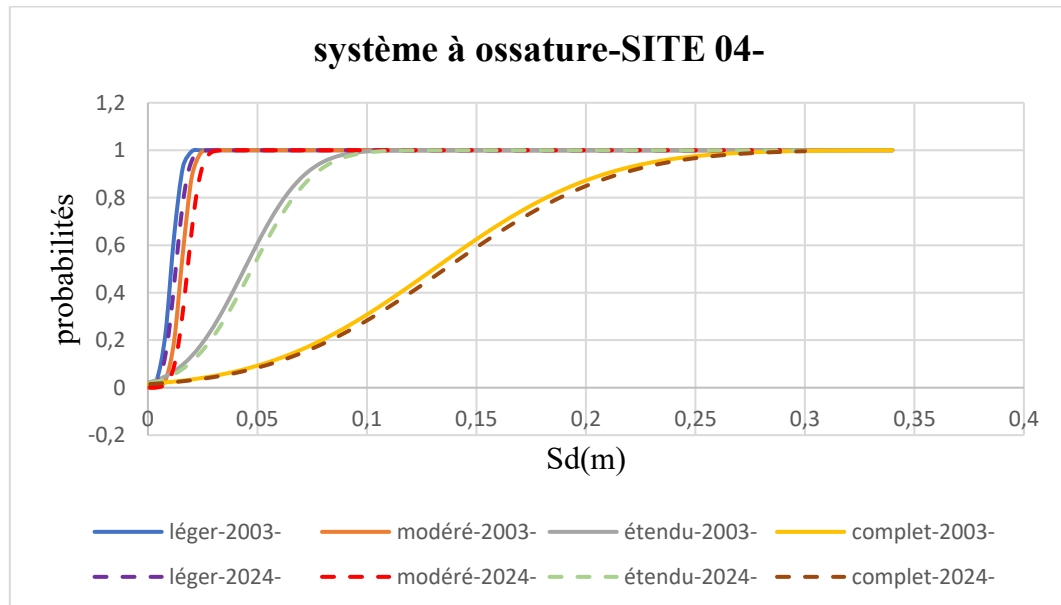


Figure IV-13 : Les courbe de fragilité pour le système à ossature -S4-

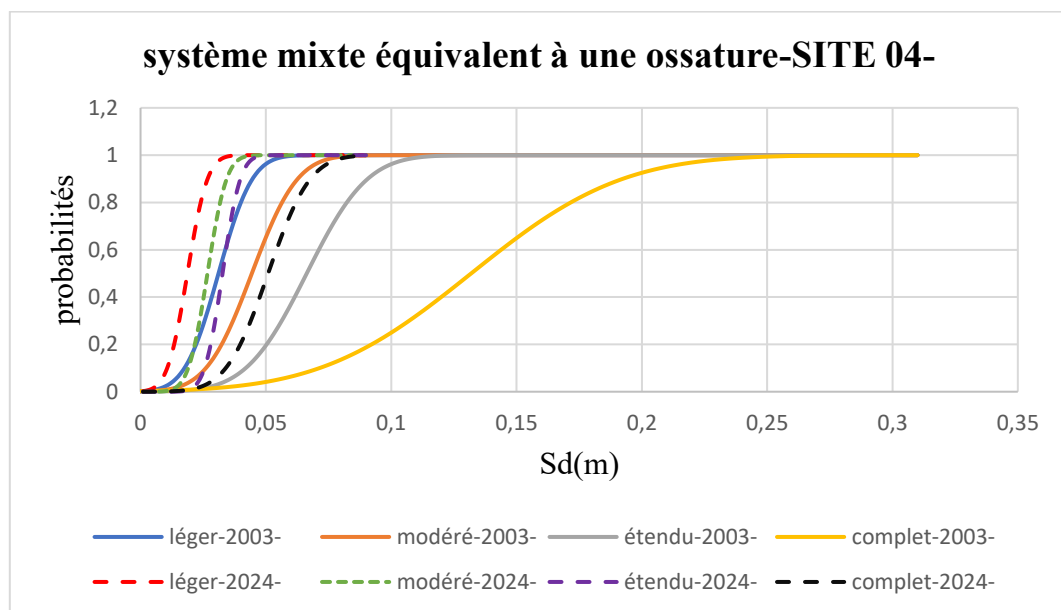


Figure IV-14 : Les courbes de fragilité pour le système mixte équivalent à une ossature -S4-

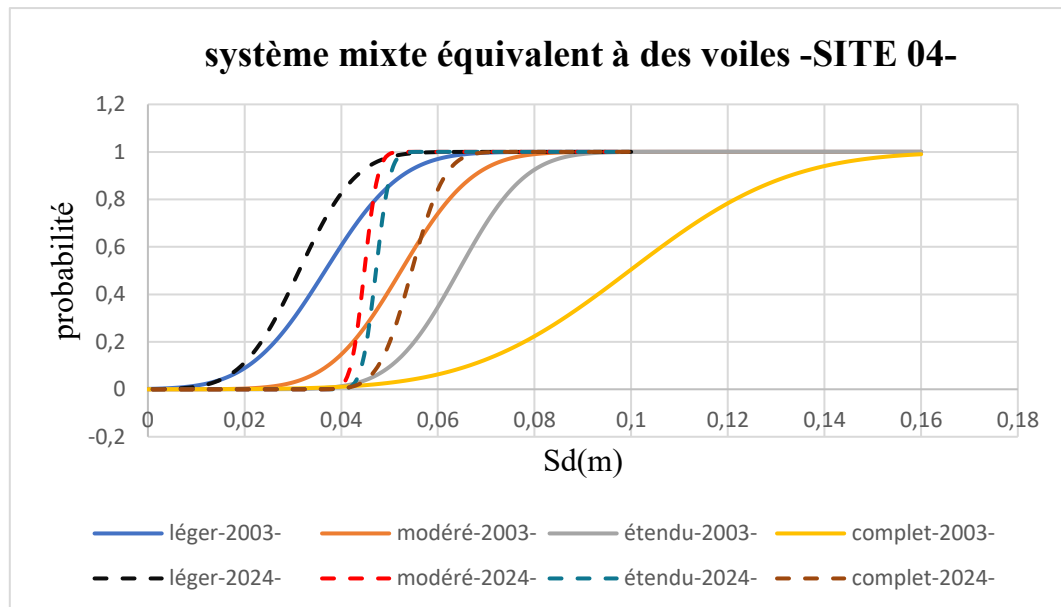


Figure IV-15 : Les courbes de fragilité pour le système mixte équivalent à des voiles -S4-

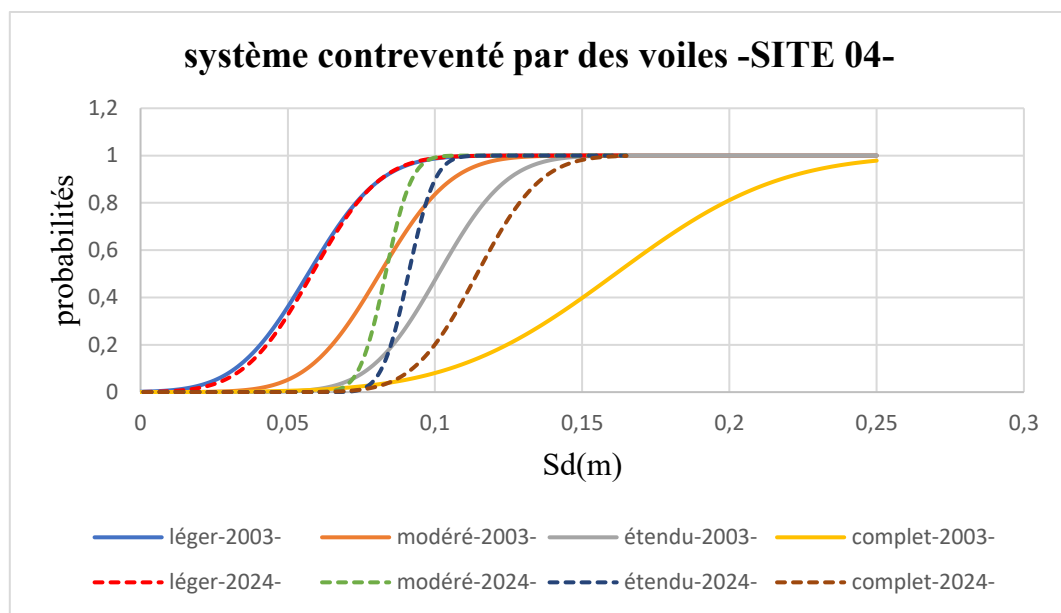


Figure IV-16 : Les courbes de fragilité pour le système contreventé par des voiles -S4-

IV.3. INTERPRETATION COMPARATIVE DES COURBES DE FRAGILITE : INFLUENCE DU TYPE DE SYSTEME ET DU REGLEMENT PARASISMIQUE

IV.3.1. SITE 01

➤ Système à ossature

RPA 2003 :

La courbe de fragilité pour le système à ossature montre que la probabilité de dépassement des niveaux de dommage légers, modérés, et étendus est relativement faible pour un déplacement spectral (SD) inférieur à 0.08 m. La probabilité de dommages complets commence à augmenter à partir de 0.09 m et continue de croître régulièrement jusqu'à atteindre un maximum pour des SD proches de 0.18 m.

RPA 2024 :

Comparativement, les courbes pour RPA 2024 montrent une probabilité plus élevée de dommage dès des déplacements spectraux plus faibles. Dès 0.05 m, la probabilité de dommage léger commence à augmenter, et la courbe continue de croître plus rapidement qu'en RPA 2003. La probabilité de dommages complets atteint des valeurs significativement plus élevées autour de 0.10 m.

➤ Système mixte équivalent à une ossature

RPA 2003 :

La courbe de fragilité indique que la probabilité de dépasser l'état de dommage léger atteint 50 % pour un déplacement spectral de 0.027 m. Pour le dommage modéré, la probabilité médiane est atteinte à 0.038 m, tandis que pour le dommage étendu, elle est observée à 0.052 m. La probabilité de dommages complets augmente de manière progressive à partir de 0.10 m et atteint environ 80 % autour de 0.15 m.

RPA 2024 :

Les courbes montrent une évolution plus rapide des probabilités de dommage dès des déplacements spectraux plus faibles. La probabilité de 50 % pour le dommage léger est atteinte dès 0.018 m, contre 0.030 m pour le dommage modéré et 0.042 m pour le dommage étendu. La probabilité de dommages complets augmente plus rapidement et atteint 80 % autour de 0.08 m.

➤ **Système mixte équivalent à des voiles**

RPA 2003 :

La probabilité de dommage léger atteint 50 % pour un déplacement spectral de 0.023 m, celle du dommage modéré à 0.040 m, et celle du dommage étendu à 0.050 m. La probabilité de dommages complets commence à augmenter à partir de 0.07 m et atteint environ 80 % vers 0.11 m.

RPA 2024 :

Les courbes de fragilité montrent un décalage vers la gauche. La probabilité de 50 % est atteinte pour le dommage léger à 0.020 m, pour le dommage modéré à 0.026 m, et pour le dommage étendu à 0.038 m. Concernant les dommages complets, la probabilité croît plus rapidement et atteint 80 % autour de 0.05 m.

➤ **Système contreventé par des voiles**

RPA 2003 :

Ce système montre une réponse stable et plus lente aux déplacements spectraux. Les dommages deviennent significatifs à partir de 0.08 m, avec des dommages légers et modérés augmentant progressivement jusqu'à atteindre des dommages complets à environ 0.22 m.

RPA 2024 :

Les courbes présentent une légère translation vers la gauche. La probabilité de 50 % est atteinte à 0.051 m pour le dommage léger, 0.073 m pour le dommage modéré, et 0.090 m pour le dommage étendu. Pour les dommages complets, la courbe évolue plus rapidement et atteint 80 % dès 0.18 m.

IV.3.2. SITE 02

➤ **Système à ossature**

RPA 2003 :

Les courbes de fragilité montrent que la probabilité de dépasser l'état de dommage léger atteint 50 % pour un déplacement spectral de 0.015 m, celle du dommage modéré à 0.020 m, et celle du dommage étendu à 0.046 m. La probabilité de dommage complet atteint environ 80 % vers 0.180 m.

RPA 2024 :

On observe un déplacement global des courbes vers la gauche. La probabilité de 50 % est atteinte pour le dommage léger à 0.015 m, pour le dommage modéré à 0.020 m, et pour le

dommage étendu à 0.023 m. Pour les dommages complets, la courbe présente une montée plus rapide, atteignant 80 % dès 0.060 m.

➤ **Système mixte équivalent à une ossature**

RPA 2003 :

La probabilité de dépassement de l'état de dommage léger atteint 50 % à un déplacement spectral de 0.036 m, celle du dommage modéré à 0.049 m, et celle du dommage étendu à 0.070 m. La probabilité de dommages complets atteint environ 80 % vers 0.180 m.

RPA 2024 :

Les courbes présentent un décalage vers la gauche. La probabilité de 50 % est atteinte à 0.018 m pour le dommage léger, 0.029 m pour le dommage modéré, et 0.038 m pour le dommage étendu. Pour les dommages complets, la courbe croît plus rapidement et atteint 80 % autour de 0.062 m.

➤ **Système mixte équivalent à des voiles**

RPA 2003 :

La probabilité de dépassement de l'état de dommage léger atteint 50 % à un déplacement spectral de 0.031 m, celle du dommage modéré à 0.043 m, et celle du dommage étendu à 0.054 m. La probabilité de dommages complets atteint environ 80 % vers 0.13 m.

RPA 2024 :

Les courbes montrent un glissement global vers les faibles déplacements. La probabilité de 50 % est atteinte à 0.034 m pour le dommage léger, 0.050 m pour le dommage modéré, et 0.051 m pour le dommage étendu. Pour les dommages complets, la courbe atteint 80 % autour de 0.056 m.

➤ **Système contreventé par des voiles**

RPA 2003 :

La probabilité de dépassement de l'état de dommage léger atteint 50 % à un déplacement spectral de 0.060 m, celle du dommage modéré à 0.095 m, et celle du dommage étendu à 0.120 m. La probabilité de dommages complets atteint environ 80 % vers 0.24 m.

RPA 2024 :

Les courbes présentent une légère translation vers la gauche. La probabilité de 50 % est atteinte à 0.060 m pour le dommage léger, 0.083 m pour le dommage modéré, et 0.100 m pour le dommage étendu. Pour les dommages complets atteint 80 % autour de 0.150 m.

IV.3.3. SITE 03

➤ **Système à ossature**

RPA 2003 :

La probabilité de dépassement de l'état de dommage léger atteint 50 % à un déplacement spectral de 0.012 m, celle du dommage modéré à 0.016 m, et celle du dommage étendu à 0.030 m. La probabilité de dommages complets augmente progressivement à partir de 0.035 m et atteint environ 80 % vers 0.088 m.

RPA 2024 :

Les courbes sont globalement décalées vers les faibles déplacements spectraux. La probabilité de 50 % est atteinte à 0.012 m pour le dommage léger, 0.016 m pour le dommage modéré, et 0.024 m pour le dommage étendu. Pour les dommages complets 80 % atteints autour de 0.064 m,

➤ **Système mixte équivalent à une ossature**

RPA 2003 :

La probabilité de dépassement de l'état de dommage léger atteint 50 % à un déplacement spectral de 0.024 m, celle du dommage modéré à 0.033 m, et celle du dommage étendu à 0.038 m. La courbe de dommage complet atteint environ 80 % vers 0.055 m.

RPA 2024 :

Les courbes sont légèrement décalées vers la gauche. La probabilité de 50 % est atteinte à 0.019 m pour le dommage léger, 0.027 m pour le dommage modéré, et 0.034 m pour le dommage étendu. La probabilité de dommage complet augmente plus rapidement, atteignant 80 % autour de 0.055 m.

➤ **Système mixte équivalent à des voiles**

RPA 2003 :

La probabilité de dépasser l'état de dommage léger atteint 50 % à un déplacement spectral de 0.036 m, celle du dommage modéré à 0.050 m, et celle du dommage étendu à 0.061 m. La probabilité de dommage complet atteint environ 80 % vers 0.12 m.

RPA 2024 :

Les courbes montrent un déplacement vers les faibles valeurs de S_d . La probabilité de 50 % est atteinte à 0.025 m pour le dommage léger, 0.040 m pour le dommage modéré, et 0.041 m pour le dommage étendu. Pour les dommages complets, la courbe croît plus rapidement et atteint 80 % autour de 0.047 m.

➤ **Système contreventé par des voiles**

RPA 2003 :

La probabilité de dépassement de l'état de dommage léger atteint 50 % à un déplacement spectral de 0.056 m, celle du dommage modéré à 0.070 m, et celle du dommage étendu à 0.118 m. La probabilité de dommages complets atteint environ 80 % vers 0.340 m.

RPA 2024 :

Les courbes sont globalement décalées vers la gauche. La probabilité de 50 % est atteinte à 0.060 m pour le dommage léger, 0.088 m pour le dommage modéré, et 0.095 m pour le dommage étendu. Pour les dommages complets, la courbe croît plus rapidement et atteint 80 % autour de 0.134 m.

IV.3.4. SITE 04

➤ **Système à ossature**

RPA 2003 :

La probabilité de dépasser l'état de dommage léger atteint 50 % pour un déplacement spectral de 0.013 m, celle du dommage modéré à 0.018 m, et celle du dommage étendu à 0.047 m. La probabilité de dommages complets atteint environ 80 % vers 0.180 m.

RPA 2024 :

Les courbes sont proches de celles de RPA 2003 mais légèrement décalées vers la droite. La probabilité de 50 % est atteinte à 0.015 m pour le dommage léger, 0.020 m pour le dommage modéré, et 0.050 m pour le dommage étendu. La courbe des dommages complets suit une croissance similaire, avec 80 % atteints autour de 0.190 m.

➤ **Système mixte équivalent à une ossature**

RPA 2003 :

La probabilité de dépasser l'état de dommage léger atteint 50 % à un déplacement spectral de 0.032 m, celle du dommage modéré à 0.045 m, et celle du dommage étendu à 0.065 m. La courbe de dommage complet atteint environ 80 % vers 0.17 m,

RPA 2024 :

Les courbes sont globalement décalées vers la gauche. La probabilité de 50 % est atteinte à 0.019 m pour le dommage léger, 0.028 m pour le dommage modéré, et 0.033 m pour le dommage étendu. Pour les dommages complets, la courbe augmente plus rapidement, avec 80 % atteints autour de 0.062 m.

➤ Système mixte équivalent à des voiles

RPA 2003 :

La probabilité de dépasser l'état de dommage léger atteint 50 % à un déplacement spectral de 0.037 m, celle du dommage modéré à 0.053 m, et celle du dommage étendu à 0.065 m. La probabilité de dommages complets commence à croître à partir de 0.070 m et atteint environ 80 % vers 0.12 m.

RPA 2024 :

Les courbes sont légèrement décalées vers la gauche. La probabilité de 50 % est atteinte à 0.032 m pour le dommage léger, 0.045 m pour le dommage modéré, et 0.049 m pour le dommage étendu. Pour les dommages complets, la courbe croît plus rapidement et atteint 80 % autour de 0.060 m.

➤ Système contreventé par des voiles

RPA 2003 :

La probabilité de dépasser l'état de dommage léger atteint 50 % pour un déplacement spectral de 0.058 m, celle du dommage modéré à 0.081 m, et celle du dommage étendu à 0.110 m. La courbe de dommage complet atteint environ 80 % vers 0.200 m

RPA 2024 :

Les courbes sont légèrement déplacées vers la gauche. La probabilité de 50 % est atteinte à 0.058 m pour le dommage léger, 0.084 m pour le dommage modéré, et 0.091 m pour le dommage étendu. La courbe des dommages complets croît plus rapidement, atteignant 80 % autour de 0.130 m.

IV.4. COMPARAISON DES PERFORMANCES SISMIQUES SELON LE TYPE DE SOL : INFLUENCE DES CONDITIONS DE SITE SUR LA FRAGILITE DES STRUCTURES

'Les figures présentées dans cette section comparent les matrices de probabilité de dommage (DPM) obtenues pour les quatre types de sols (S1 à S4), à travers les différents niveaux de dommage (léger, modéré, étendu, complet) et selon les deux versions réglementaires (RPA 2003 et RPA 2024).'

CHAPITRE IV : VULNERABILITE SISMIQUE - COURBE DE FRAGILITE-DPM- CALCUL DE COUT

IV.4.1. Système à ossature

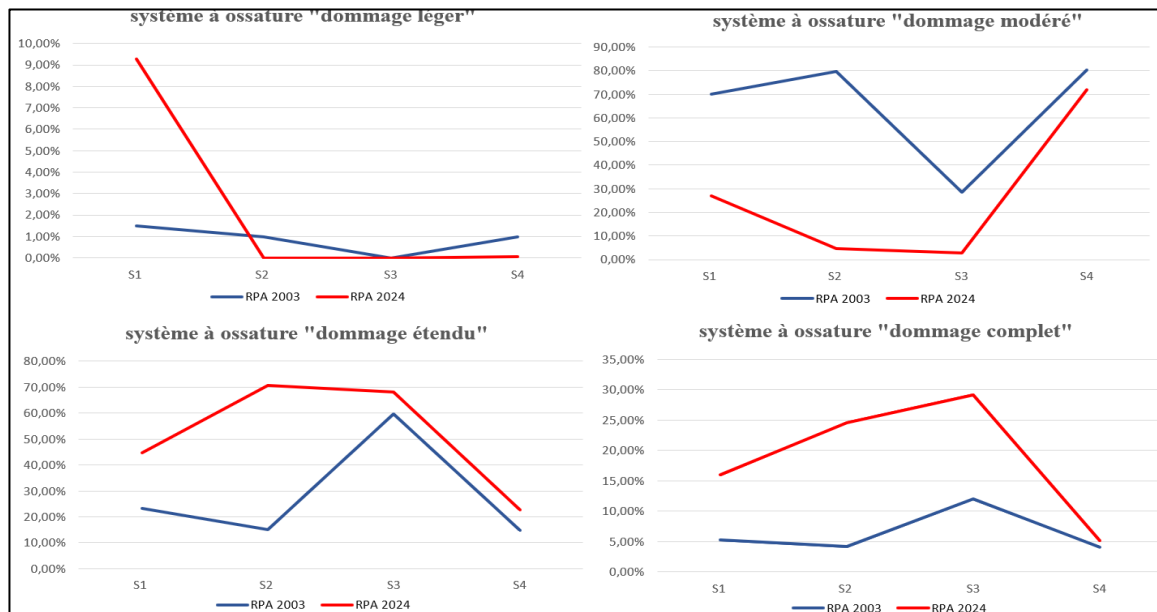


Figure IV-17 : Probabilités de dépassement des états de dommage du système à ossature pour les sites S1 à S4 selon les versions RPA 2003 et RPA 2024

IV.4.2. Système mixte équivalent à une ossature

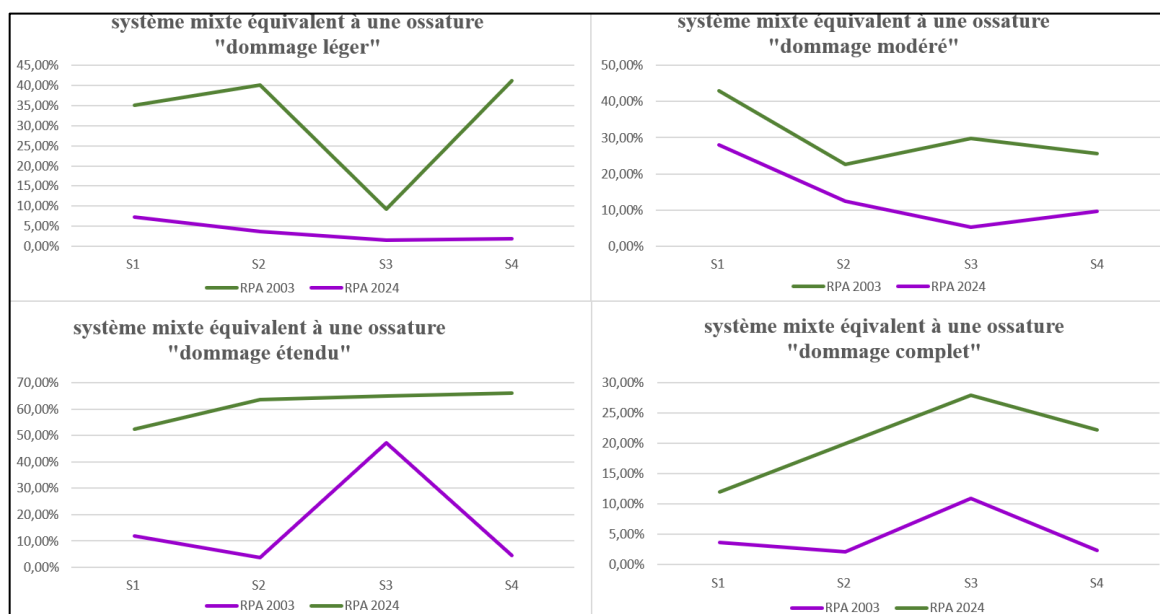


Figure IV-18 : Probabilités de dépassement des états de dommage du système mixte équivalent à une ossature pour les sites S1 à S4 selon les versions RPA 2003 et RPA 2024

IV.4.3. Système mixte équivalent à des voiles

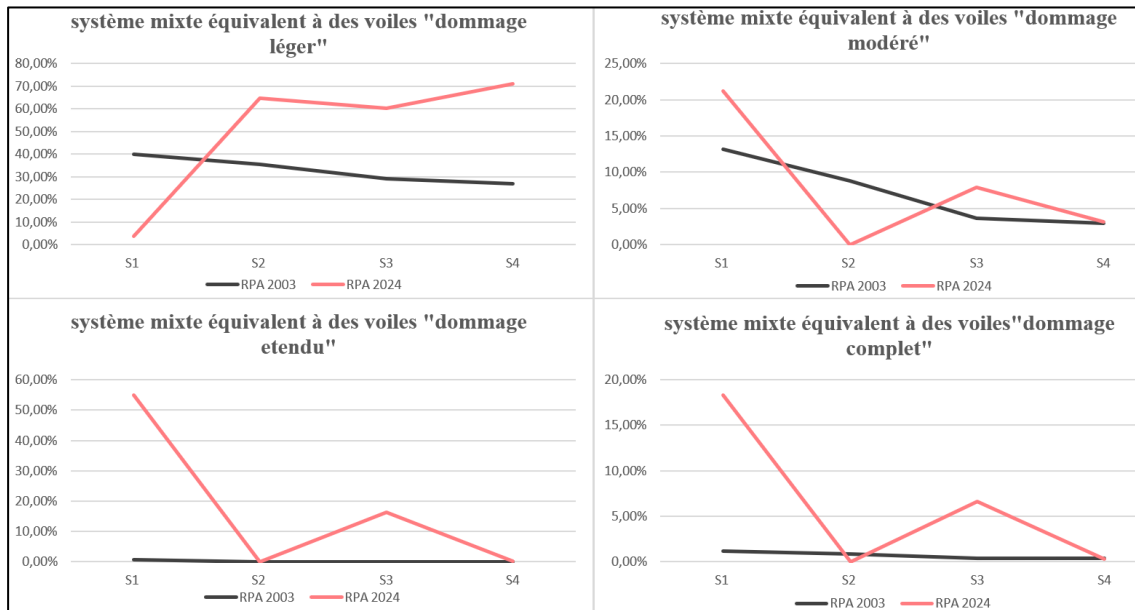


Figure IV-19 : : Probabilités de dépassement des états de dommage du système mixte équivalent à des voiles pour les sites S1 à S4 selon les versions RPA 2003 et RPA 2024

IV.4.4. Système contreventé par des voiles

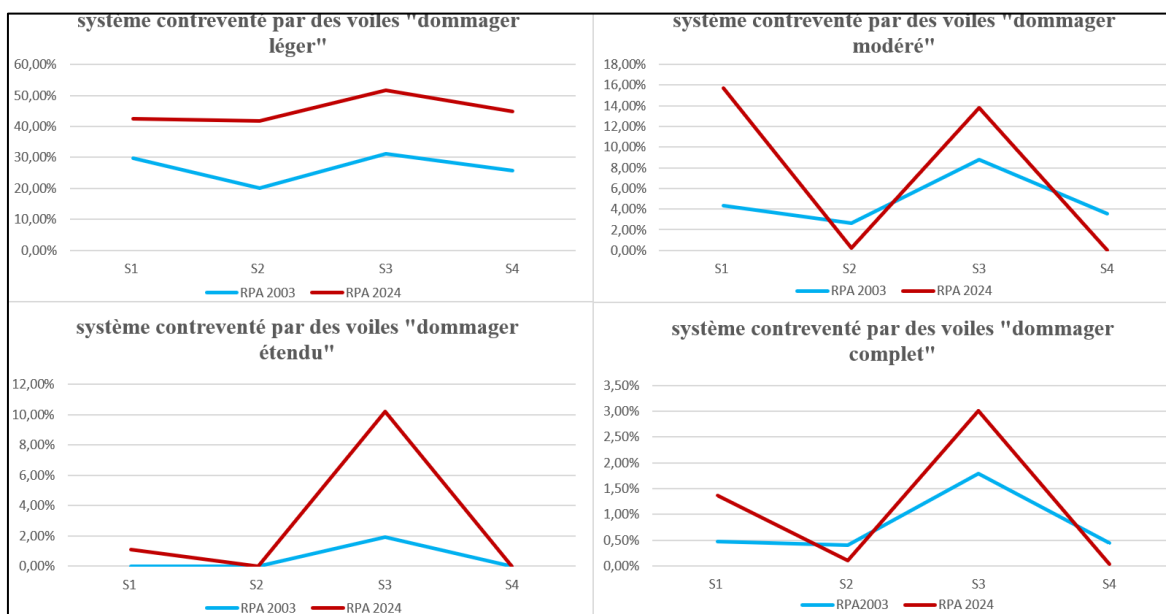


Figure IV-20 : : Probabilités de dépassement des états de dommage du système contreventé par des voiles pour les sites S1 à S4 selon les versions RPA 2003 et RPA 2024

IV.5. ÉVALUATION DES EFFETS DE SITE SUR LES DOMMAGES STRUCTURELS ATTENDUS

IV.5.1. Système à ossature:

- **Domage léger :**

Pour le spectre RPA 2003, la probabilité de dommage léger varie légèrement selon le site : elle est plus élevée sur sol rocheux (S1), puis diminue progressivement sur les autres types de sol (S2, S3), avant de légèrement remonter sur sol très meuble (S4). La variation reste modérée (entre 0 % et 1,49 %).

En revanche, la courbe du RPA 2024 montre une réponse structurelle beaucoup plus sensible au type de sol. La probabilité de dommage léger atteint un pic significatif sur sol rocheux (S1), avec une valeur d'environ 9,26 %, avant de chuter brutalement à zéro pour les sols S2, S3 et 0,05% pour le sol S4. Cela signifie que le même système structurel se comporte de manière radicalement différente en fonction du sol, subissant des dommages sur un site rocheux, mais pratiquement aucun sur des sols plus déformables.

- **Domage modéré :**

Pour le RPA 2003, les probabilités sont globalement plus élevées. On observe un pic de dommage sur S2 79,81%, une chute sur S3 28,42%, puis une forte reprise sur S4 80,21%.

Selon le RPA 2024. Sur sol rocheux (S1), la probabilité atteint environ 27,02 %. Cette valeur chute brusquement pour les sites S2 et S3 (site ferme et meuble), où la probabilité de dommage modéré devienne entre 2 et 5%. Cependant, une remontée significative est observée sur sol très meuble (S4), avec un niveau de dommage de 70 %, mettant en évidence l'amplification des effets sismiques induite par les sols souples dans la nouvelle version du règlement.

- **Domage étendu :**

Dans le cadre du RPA 2003, la probabilité de dommages est faible sur les sites rocheux (S1) et fermes (S2) (23,17 - 15,02) %, mais commence à croître notablement sur les sites meubles (S3) 59,56% Cette valeur chute pour le site très meubles (S4) 14,68%. Cette tendance indique que les effets du sol deviennent plus significatifs à mesure que la déformabilité du sol augmente, amplifiant ainsi les mouvements horizontaux dans les structures rigides. Cependant, la variation

CHAPITRE IV : VULNERABILITE SISMIQUE - COURBE DE FRAGILITE-DPM- CALCUL DE COUT

reste plus modérée, avec des niveaux de probabilité de dommage étendu oscillant entre 10% et 60%.

Sous le RPA 2024, la probabilité de dommages étendus est plus marquée sur tous les sites, avec des valeurs plus élevées pour les sites S2 et S3 (70,69- 68,16) %. La courbe de RPA 2024 montre une probabilité significativement plus élevée de dommages étendus sur ces types de sols.

- **Dommage complet :**

Pour le spectre RPA 2003, la probabilité de dommage complet est (S1) 23,17% sur site rocheux signalant que le système à ossature n'est pas idéal même sur sol dur. Et reste stable à faible niveau sur le site fermes (S2) 15,02%. Cependant, la probabilité de dommage complet connaît une augmentation marquée sur le site très meuble (S3), où elle atteint environ 59,56%. Une diminution remarquable sur le site (S4) 14,68%

Sous le RPA 2024, la courbe pour le dommage complet présente un décalage notable par rapport à RPA 2003, avec une probabilité plus élevée sur tous les types de sols, 44,73% pour le site (S1), l'augmentation est marquée par rapport à celle du RPA 2003. Cependant, une remontée significative est observée sur sol ferme (S2) 70,69%, pour le site (S3) on remarque une variation faible 68,16% et en fin une chute pour le sol (S4) 22,77%.

IV.5.2. Système mixte équivalent à une ossature :

- **Dommage léger :**

Sous le RPA 2003, la probabilité de dommage léger est relativement élevée même sur les sols les plus durs. Elle atteint environ 35,06% sur site rocheux (S1). Cette probabilité augmente légèrement sur site ferme (S2) pour atteindre 40,14%. Cependant, une chute marquée est observée sur site meuble (S3), avec une probabilité qui descend à seulement 9,26%. Finalement, sur site très meuble (S4), on observe une remontée importante à 41,16%, ce qui confirme l'influence négative des sols très souples, connus pour amplifier les ondes sismiques, et exposer davantage les structures à des sollicitations importantes.

Sous le RPA 2024, la probabilité de dommage léger est nettement plus faible et mieux maîtrisée sur l'ensemble des sites. Sur site rocheux (S1), la probabilité est de 7,32%, soit une réduction de près de 83% par rapport à RPA 2003.

CHAPITRE IV : VULNERABILITE SISMIQUE - COURBE DE FRAGILITE-DPM- CALCUL DE COUT

La probabilité diminue légèrement sur site ferme (S2) pour atteindre 3,66%, puis atteint un minimum sur site meuble (S3) avec 1,59%, traduisant un contrôle renforcé des effets dynamiques sur sols souples. Sur site très meuble (S4), une légère remontée à 1,96% est observée, mais reste très inférieure aux valeurs de 2003, indiquant que le RPA 2024 parvient à mieux absorber les effets d'amplification liés aux sols très meubles.

▪ **Domage modéré :**

Sous le RPA 2003, la probabilité de dommage modéré est globalement élevée, avec une valeur notable sur site rocheux (S1) atteignant 42,96%. Une diminution sensible est observée sur site ferme (S2) à 22,59%.

Cependant, une remontée est enregistrée sur site meuble (S3) avec une probabilité de 29,80%, ce qui reflète l'effet amplificateur des sols meubles sur les sollicitations sismiques. Enfin, sur site très meuble (S4), la courbe redescend légèrement à 25,52%, mais la valeur reste élevée.

Sous le RPA 2024, on note une réduction importante de la probabilité de dommage modéré. Sur site rocheux (S1), elle est de 27,99%, représentant une baisse de près de 15% par rapport au RPA 2003.

La baisse est plus marquée sur site ferme (S2), avec une valeur de 12,47%, soit une réduction de 46% par rapport à la version précédente. Sur site meuble (S3), la probabilité atteint un minimum de 5,39%. Enfin, sur site très meuble (S4), la courbe remonte légèrement à 9,74%, tout en restant en dessous des niveaux de 2003.

▪ **Domage étendu :**

Sous le RPA 2003, la probabilité de dommage étendu est relativement faible sur l'ensemble des types de sol. Elle est de 12,02 sur site rocheux (S1). Une baisse est observée sur site ferme (S2), avec seulement 3,60%, mais une remontée importante se produit sur site meuble (S3), où la probabilité atteint 47,14%, traduisant une sensibilité importante du système aux effets d'amplification des sols meubles. Enfin, sur site très meuble (S4), la probabilité chute à 4,53%.

Sous le RPA 2024, on observe une hausse significative de la probabilité de dommage étendu. Sur site rocheux (S1), elle atteint 52,44%, soit une augmentation de plus de 40% par rapport à 2003. Sur site ferme (S2), la probabilité passe à 63,67%, et culmine à 64,97% sur site meuble (S3). Sur site très meuble (S4), elle atteint 65,98%, valeur la plus élevée.

▪ Dommages complets :

Sous le RPA 2003, la probabilité de dommages complets est relativement faible. Elle est de 3,62% sur site rocheux (S1), puis descend légèrement à 2,12% sur site ferme (S2). Toutefois, une hausse apparaît sur site meuble (S3) avec 10,93%, reflétant une vulnérabilité structurelle accrue dans des conditions sismiques amplifiées. Finalement, sur site très meuble (S4), la probabilité retombe à 2,32%.

Sous le RPA 2024, on constate une augmentation de la probabilité de dommages complets sur tous les types de sol. Sur site rocheux (S1), elle atteint 11,94%, soit plus de trois fois la valeur précédente. Sur site ferme (S2), elle passe à 19,95%, et culmine à 27,91% sur site meuble (S3). Enfin, sur site très meuble (S4), la probabilité baisse légèrement à 22,24%, tout en restant très élevée comparée aux données du RPA 2003.

IV.5.3. Système mixte équivalent à des voiles :

• Dommages légers :

Sous le RPA 2003, la probabilité de dommages légers suit une tendance décroissante en fonction du sol. Elle est relativement modérée sur sol rocheux (S1) avec 39,95%. Cette probabilité diminue légèrement sur sol ferme (S2) à 35,44%, puis continue à décroître sur sol meuble (S3) avec 28,99%, et atteint sa valeur minimale sur sol très meuble (S4) à 26,97%.

Sous le RPA 2024, une évolution marquante est observée. La probabilité de dommages légers explose sur sol ferme (S2) avec 64,60%, soit presque le double de la valeur sous RPA 2003. Sur sol rocheux (S1), la probabilité passe de 3,57% à 64,60%. Sur sol meuble (S3), on observe une légère baisse à 60,29%, suivie d'une remontée à 70,99% sur sol très meuble (S4).

• Dommages modérés :

Sous le RPA 2003, la probabilité de dommages modérés décroît graduellement avec le sol. Elle est de 13,18% sur sol rocheux (S1), puis passe à 8,82% sur sol ferme (S2), chute à 3,63% sur sol meuble (S3), et atteint un minimum de 2,98% sur sol très meuble (S4).

Sous le RPA 2024, le comportement est moins linéaire. On observe une forte probabilité de dommages modérés sur sol rocheux (S1) à 21,18%, nettement supérieure à celle du RPA 2003. Cette valeur chute brusquement à 0% sur sol ferme (S2), indiquant que les dommages modérés

CHAPITRE IV : VULNERABILITE SISMIQUE - COURBE DE FRAGILITE-DPM- CALCUL DE COUT

sont moins probables, au profit de dommages légers plus nombreux. Une remontée est constatée sur sol meuble (S3) à 7,91%, avant de redescendre à 3,15% sur sol très meuble (S4).

- **Domage étendu :**

Sous le RPA 2003, la probabilité de dommage étendu reste extrêmement faible sur l'ensemble des sites, avec 0,64% sur S1, 0,07% sur S2, et 0% pour S3 et S4.

Sous le RPA 2024, un contraste important est à noter. Sur sol rocheux (S1), la probabilité de dommage étendu atteint 54,93%. En revanche, cette probabilité tombe à 0% sur sol ferme (S2), puis remonte à 16,23% sur sol meuble (S3), avant de redescendre à 0,21% sur sol très meuble (S4).

- **Domage complet :**

Sous le RPA 2003, le dommage complet reste très marginal, avec des probabilités inférieures à 2% sur tous les sites : 1,21% sur S1, 0,88% sur S2, 0,42% sur S3 et 0,37% sur S4. Ces valeurs indiquent que, selon l'ancien code, le système mixte équivalent à voile offre une très bonne sécurité contre les effondrements totaux, même sur des sols moins rigides.

Sous le RPA 2024, une rupture claire est visible. La probabilité de dommage complet grimpe à 18,35% sur sol rocheux (S1), chute à 0,00% sur sol ferme (S2), puis remonte à 6,64% sur sol meuble (S3) avant de redescendre à 0,33% sur sol très meuble (S4).

IV.5.4. Système contreventé par des voiles :

- **Domage léger :**

Sous le RPA 2003, la probabilité de dommage léger varie de manière modérée selon le sol : elle atteint 29,70% sur sol rocheux (S1), diminue à 20,11% sur sol ferme (S2), remonte à 31,10% sur sol meuble (S3) puis baisse légèrement à 25,77% sur sol très meuble (S4).

Sous le RPA 2024, les probabilités augmentent globalement avec un pic sur le sol meuble : 42,56% sur S1, 41,69% sur S2, 51,74% sur S3, puis 44,94% sur S4.

- **Domage modéré :**

CHAPITRE IV : VULNERABILITE SISMIQUE - COURBE DE FRAGILITE-DPM- CALCUL DE COUT

Sous le RPA 2003, la courbe reste relativement stable et faible, avec des probabilités comprises entre 2,60% (S2) et 8,75% (S3).

Sous le RPA 2024, une augmentation est notable sur le sol rocheux (S1) à 15,70%, ainsi que sur sol meuble (S3) avec 13,82%. La valeur chute à 0,25% sur sol ferme (S2) et à 0,01% sur sol très meuble (S4).

- **Domage étendu :**

Sous le RPA 2003, la probabilité reste très faible : 0% sur sol rocheux (S1), 0% sur sol ferme (S2), 1,89% sur sol meuble (S3), et 0% sur sol très meuble (S4).

Sous le RPA 2024, on note une hausse significative sur sol meuble (S3) à 10,22%, tandis que les autres types de sol conservent des probabilités proches de zéro (1,07% sur S1 et 0% sur S2 et S4).

- **Domage complet :**

Sous le RPA 2003, les probabilités sont faibles sur tous les sites : 0,47% sur S1, 0,40% sur S2, 1,79% sur S3 et 0,44% sur S4.

Sous le RPA 2024, on observe une légère hausse sur sol rocheux (1,36%) et surtout sur sol meuble (3,00%), tandis que les valeurs restent très faibles sur S2 (0,10%) et S4 (0,04%).

IV.6. ÉVALUATION ECONOMIQUE DES DOMMAGES SISMQUES : CALCUL DU COUT DE REPARATION SELON LES REGLEMENTS RPA 2003 ET RPA 2024

L'estimation des coûts de réparation permet d'apprécier concrètement l'impact économique des dommages potentiels. Cette étude ne se limite pas à une analyse technique, mais cherche également à établir une comparaison entre les exigences du Règlement Parasismique Algérien (RPA) version 2003 et celles de la version 2024, en mettant en évidence les écarts en termes de conséquences financières selon les niveaux de dommage.

IV.6.1. Méthodologie de calcul

Les réparations sont exprimées en volumes de béton à reprendre (en m³) et en quantités d'acier à remplacer (en tonnes). Les prix retenus dans cette analyse – hors coûts de main-d'œuvre et de

CHAPITRE IV : VULNERABILITE SISMIQUE - COURBE DE FRAGILITE-DPM- CALCUL DE COUT

mise en œuvre – sont de 9000 DA/m³ pour le béton et de 12000 DA/tonne pour l'acier, sur la base des prix moyens actuels du marché algérien. Ces montants n'incluent pas les frais complémentaires tels que le coffrage, le transport ou la manutention. L'objectif est de quantifier les coûts directs de réparation associés à chaque règlement, en fonction des degrés de dommage, afin de mettre en lumière les écarts économiques entre les deux versions du RPA. Cette approche permet ainsi d'apporter un regard complémentaire sur les performances structurelles et les implications financières des nouvelles prescriptions introduites par le RPA 2024.

Le ratio de dommages global (GDr) a été utilisé comme indicateur principal. Ce ratio exprime le coût des réparations nécessaires par rapport au coût initial de la structure, offrant ainsi une mesure normalisée permettant de comparer objectivement les impacts économiques entre différentes configurations sismiques et réglementaires. Le calcul du GDr s'appuie sur les courbes de fragilité, qui fournissent les probabilités de dépassement (PE) des différents états de dommage (léger, modéré, étendu, complet). Chaque intervalle entre deux états successifs est pondéré par un ratio de dommage partiel Dr, représentant la part estimée du coût de réparation associé à cet intervalle de gravité. L'équation **(I-24)** formalise ce calcul en agrégeant les contributions de tous les niveaux de dommages,

IV.6.2. Répartition détaillée des volumes de béton, d'acier et des coûts de réparation selon les sites, les systèmes structurels et les versions RPA (2003 vs 2024)

Table IV-1 : Les couts de réparation selon les sites, les systèmes et les versions RPA (2003vs 2024)

	Sites	Systèmes	V _{béton} (m ³)	Quantité d'acier (tonne)	Prix totale (DA)	GDr (%)	Coût de réparation
RPA 2003	S1	Oss	106.7	7,9285	1 055 442	23.85	251 763
		M.oss	274.56	25,6695	2 779 074	14.63	406 501
		M.voile	284.16	28,574	2 900 328	3.65	105 775
		Voile	762.48	88,9405	7 929 606	1.49	118 468
	S2	Oss	117.94	12,246	1 208 412	19.68	237 823
		M.oss	274.56	32,342	2 859 144	6.98	199 620
		M.voile	284.16	34,1475	2 967 210	2.51	74 352
		Voile	762.48	102,835	8 096 340	1.06	85 999
		Oss	106.7	8,635	1 063 920	44.64	474 955

CHAPITRE IV : VULNERABILITE SISMIQUE - COURBE DE FRAGILITE-DPM- CALCUL DE COUT

	S3	M.oss	274.56	37,052	2 915 664	37.67	1 098 191
		M.voile	284.16	38,936	3 024 672	1.36	41 220
		Voile	878.83	111,47	9 247 110	4.23	391 338
	S4	Oss	117.94	10,205	1 183 920	19.50	230 872
		M.oss	274.56	39,25	2 942 040	7.96	234 192
		M.voile	284.16	40,035	3 037 860	1.21	36 679
		Voile	878.83	128,897	9 456 234	1.31	123 631
RPA 2024	S1	Oss	130.90	10.68	1 306 212	41.20	311 581
		M.oss	284.64	31.64	2 941 386	41.11	430 242
		M.voile	305.16	32.19	3 132 660	48.00	114 248
		Voile	1079.28	94.99	10853340	4.32	162 149
	S2	Oss	130.90	9.58	1 293 024	60.39	254 475
		M.oss	284.64	33.83	2 967 762	53.11	207 203
		M.voile	305.16	33.91	3 153 384	1.29	79 017
		Voile	1079.28	107.39	11002176	0.96	116 865
	S3	Oss	130.90	13.97	1 345 776	63.49	600 781
		M.oss	284.64	34.70	2 978 124	60.97	1 121 716
		M.voile	305.16	36.11	3 179 760	16.75	43 334
		Voile	1195.63	116.73	12161424	10.53	514 671
	S4	Oss	130.90	14.92	1 357 080	23.76	264 639
		M.oss	284.64	42.39	3 070 440	56.24	244 413
		M.voile	305.16	43.96	3 273 960	2.17	39 530
		Voile	1195.63	135.26	12383736	0.94	161 905

IV.6.3. Interprétation technique et économique des résultats – Comparaison RPA 2003 vs RPA 2024

L'analyse du tableau révèle plusieurs tendances importantes que nous détaillons ci-dessous.

➤ Site S1 – Sol rocheux :

Sous RPA 2003, le système à ossature présente le coût de dommage le plus élevé (215 763 DA) avec un GDr de 23,85 %. À l'inverse, le système mixte, équivalent à des voiles est nettement plus performant avec un coût de 105 775 DA et GDr de 3.65 %.

CHAPITRE IV : VULNERABILITE SISMIQUE - COURBE DE FRAGILITE-DPM- CALCUL DE COUT

Sous RPA 2024, les coûts de dommage augmentent globalement. Le système ossature dépasse 311 581 DA (GDr = 41.20 %). Le système voile reste le plus performant (162 149 DA – GDr = 4.32 %).

➤ Site S2 – Sol ferme :

RPA 2003 montre à nouveau des résultats plus favorables pour le système mixte équivalent à des voiles (74 352 DA – GDr = 2.51 %) alors que le système ossature atteint 237 823 DA (GDr = 19.68 %).

Avec le RPA 2024, le système ossature est fortement pénalisé (254 475 DA – GDr = 60.39%) alors que les systèmes voiles/mixte voiles présentent des coûts plus contenus, témoignant d'une adaptation au comportement dynamique de ce sol.

➤ Site S3 – Sol meuble :

Sous RPA 2003, le système mixte équivalent à des voiles affiche un coût de dommage minimal (41 220 DA – GDr = 1.36 %), tandis que le système mixte, équivalent à une ossature (1 098 191 DA – GDr = 37.67 %) et ossature (474 955 DA – GDr = 44.64 %) sont les plus vulnérables.

En RPA 2024, l'écart est encore plus marqué : le système mixte, équivalent à une ossature atteint un coût de dommage de 1 121 716 DA avec un GDr alarmant de 60.97 %. Le système mixte, équivalent à des voiles conservent leur efficacité (43 334 DA – GDr = 16.75 %).

➤ Site S4 – Sol très meuble :

Le RPA 2003 reflète la sévérité du site : le système ossature atteint 230 872 DA (GDr = 19.50 %) tandis que le système mixte, équivalent à des voiles est plus résilient (36 679 DA – GDr = 1.21 %).

- Avec le RPA 2024, les coûts explosent pour l'ossature (264 639 DA – GDr = 56.24 %). À nouveau, les systèmes voiles conservent leur supériorité en termes de coût (161 905 DA – GDr = 0.94 %).

IV.7. CONCLUSION :

Ce chapitre a permis d'évaluer la vulnérabilité sismique de différents systèmes structuraux à travers l'exploitation des courbes de fragilité et des matrices de probabilité de dommage (DPM), en appliquant successivement les spectres de réponse issus du RPA 2003 et du RPA 2024. Les résultats obtenus révèlent que l'actualisation des spectres dans le RPA 2024, intégrant un aléa sismique réévalué à la hausse, entraîne une probabilité plus élevée de dépasser les états de dommage modéré, sévère et d'effondrement, notamment pour les structures initialement conçues selon les exigences du RPA 2003.

Les systèmes en ossature seuls se sont révélés plus vulnérables, affichant des courbes de fragilité plus raides et un dépassement précoce des seuils critiques de dommage. À l'inverse, les structures mixtes à voiles ou entièrement en voiles présentent un comportement plus robuste, illustré par des courbes plus progressives et un glissement retardé vers les états critiques, traduisant une meilleure capacité dissipative et une rigidité accrue.

Par ailleurs, l'introduction du paramètre économique à travers le calcul du coût sismique moyen (EC) a permis d'objectiver les conséquences financières potentielles des dommages structurels. Il en ressort que les systèmes à ossature seuls, bien que potentiellement moins coûteux à construire, engendrent des coûts sismiques plus élevés en raison de leur faible performance sous séisme. À l'inverse, les structures mixtes et à voiles, bénéficiant d'une meilleure rigidité et d'une dissipation d'énergie plus efficace, offrent un compromis plus favorable entre performance sismique et coût économique global, en minimisant les pertes économiques attendues après séisme.

Bien que le RPA 2024 impose des exigences plus strictes en termes de dimensionnement et de performance structurelle, entraînant une augmentation du coût initial de construction, il convient de nuancer cette appréciation à l'échelle du cycle de vie du bâtiment. Les résultats obtenus révèlent le RPA 2024 ne garantit une performance économique à long terme que s'il est couplé à un système structurel performant. Dans ce cas, le surcoût initial est compensé par une réduction significative des pertes futures.

CHAPITRE V : ANALYSE INCREMENTALE

V.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, une analyse incrémentale dynamique (Incremental Dynamic Analysis – IDA) a été menée afin d'évaluer le comportement non linéaire de quatre types de systèmes structuraux : un système à ossature, un système mixte équivalent à une ossature, un système mixte équivalent à des voiles et un système contreventé par des voiles. L'objectif principal est de comparer les performances sismiques de ces structures selon les prescriptions des deux versions du Règlement Parasismique Algérien (RPA 2003 et RPA 2024), en tenant compte de différents scénarios d'accélération et de conditions de sol (sites 1 à 4).

L'analyse a été réalisée à l'aide du logiciel NONLIN32, spécialisé dans l'étude de la réponse non linéaire de systèmes à un degré de liberté équivalent (SDOF). Les données d'entrée utilisées dans le logiciel comprennent le poids du système, la rigidité initiale, la ductilité ultime et l'effort tranchant élastique. Ces paramètres permettent de modéliser fidèlement la réponse sismique de chaque structure.

Il convient de souligner que la validité de cette approche repose sur une condition essentielle : la participation massique du mode fondamental doit être supérieure à 70 %. Cette exigence garantit que le modèle SDOF utilisé dans l'IDA représente de manière réaliste la dynamique dominante du système multi-degrés. Les systèmes ne respectant pas ce critère ne sont pas considérés comme adaptés à cette modélisation simplifiée, et leurs résultats doivent être interprétés avec prudence.

Chaque système a été soumis à une série d'accélérogrammes artificiels dont l'intensité a été progressivement amplifiée. Pour chaque niveau d'amplification, le logiciel fournit les résultats suivants :

- **Demande en ductilité** : indicateur de la capacité de déformation plastique de la structure.
- **Déplacement maximal** : mesure directe du mouvement du système sous sollicitation sismique.
- **Indice de dommage** : paramètre synthétique représentant le degré de dégradation subi par la structure.

Les résultats sont présentés sous forme de courbes IDA montrant l'évolution de ces paramètres en fonction de l'accélération. Ces courbes permettent d'identifier les phases critiques de

CHAPITRE V : ANALYSE INCREMENTALE

réponse (comportement élastique, endommagement progressif, instabilité dynamique) et de comparer de manière approfondie les performances entre les deux versions du RPA et entre les différents sites.

V.2. PARAMETRES DYNAMIQUES ISSUS DE L'ANALYSE INCREMENTALE POUR LES STRUCTURES ETUDIEES SUR LES SITES S1 A S4 SELON LE RPA (2003-2024)

Table V-1 : paramètres extraits des analyses dynamiques incrémentales

	Sites	Systèmes	Fy (KN)	Ke (KN/m)	Participation massique	μ	W(KN)
RPA 2003	S1	OSS	1660	81987	86	4,62	7872
		M.OSS	6200	139495	79	3,14	13964
		M.VOILE	9400	168733	76	2,09	13616
		VOILE	14000	204969	70	1,27	28651
	S2	OSS	2400	121047	83	7,0	7831
		M.OSS	7400	156398	79	2,24	13964
		M.VOILE	9300	164479	76	1,60	13616
		VOILE	22000	195454	70	2,45	28651
	S3	OSS	1700	82472	86	3,58	7872
		M.OSS	6400	142469	79	1,39	13964
		M.VOILE	11000	171869	76	1,95	13616
		VOILE	25600	260583	70	1,79	30688
	S4	OSS	2300	119866	86	3,42	8114
		M.OSS	8000	139372	79	2,77	13964
		M.VOILE	11000	166437	76	1,93	13616
		VOILE	28000	253726	70	1,57	30688
RPA 2024	S1	OSS	7500	182149	77	1,44	7514
		M.OSS	7000	188562	78	2,10	14302
		M.VOILE	7500	185643	76	1,38	13616
		VOILE	16000	197775	72	1,31	29469
	S2	OSS	3100	154336	77	5,29	7514
		M.OSS	7200	183720	78	1,99	14302

CHAPITRE V : ANALYSE INCREMENTALE

		M.VOILE	10000	175432	76	1,23	13616
		VOILE	23000	206654	71	1,61	29060
	S3	OSS	3400	153637	76	5,38	7417
		M.OSS	7400	183150	79	2,17	14495
		M.VOILE	8500	190160	76	1,32	13616
		VOILE	27000	255323	70	1,58	30688
	S4	OSS	3600	155413	76	2,37	7417
		M.OSS	6800	185736	79	2,12	14495
		M.VOILE	10700	191478	76	1,30	13616
		VOILE	28500	267975	70	1,36	30688

V.3. RESULTATS D'IDA COMPARATIFS -SYSTEME A OSSATURE-

‘Dans cette section les figures illustrent l’évolution de trois paramètres structuraux essentiels — la demande en ductilité, le déplacement et l’indice de dommage — en fonction de l’accélération sismique (g), pour un système à ossature. Les résultats sont comparés entre le RPA 2003 (à gauche) et le RPA 2024 (à droite), pour quatre types de sol représentatifs (S1 à S4).’

V.3.1. Demande en ductilité

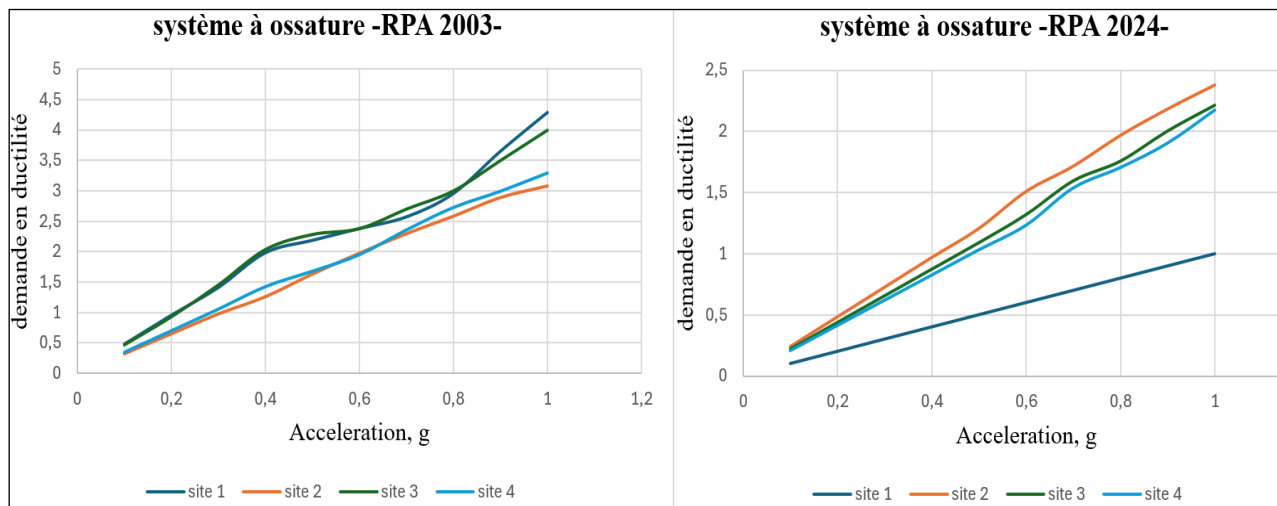


Figure V-1 : La demande en ductilité pour le système à ossature

- **Évaluation comparative :**

RPA 2003 :

- On observe une progression relativement irrégulière de la demande en ductilité avec l'augmentation de l'accélération (pga).
- Au-delà de 0.8 g, une augmentation marquée est observée, notamment pour les sites 3 et 4, indiquant une entrée dans le domaine fortement non linéaire, donc un niveau avancé de plastification.
- La ductilité atteint des valeurs supérieures à 4 sur certains sites, signe que la structure conçue selon RPA 2003 est plus sollicitée en post-élastique.

RPA 2024 :

- Les courbes montrent une progression plus linéaire et contrôlée.
- Les valeurs maximales de la demande en ductilité sont inférieures à celles observées dans le cas du RPA 2003, ce qui traduit une meilleure gestion de la dissipation d'énergie.
- L'augmentation est plus uniforme entre les sites, suggérant une plus grande robustesse et régularité du système conçu selon le nouveau règlement.

V.3.2. Déplacement

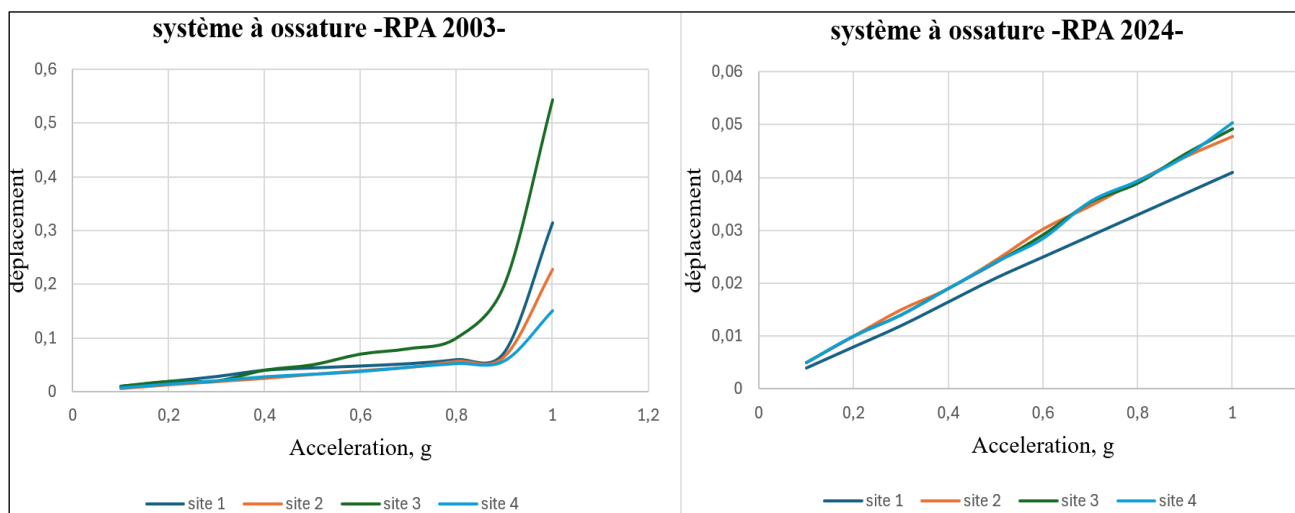


Figure V-2 : Déplacement pour le système à ossature

- **Évaluation comparative :**

RPA 2003 :

- La courbe présente une forte croissance non linéaire à partir de 0.8 g.
- Cela traduit un comportement instable en phase post-élastique, pouvant indiquer une proximité de l'effondrement.
- Les déplacements maximaux atteignent environ 0.5 m, ce qui est significatif et potentiellement dangereux.

RPA 2024 :

- La progression des déplacements est quasi linéaire et modérée dans toute la gamme d'accélération.
- Les valeurs maximales restent nettement plus faibles, autour de 0.05 m, ce qui dénote un meilleur contrôle des déplacements et donc une plus grande sécurité structurale.

V.3.3. Indice de dommage

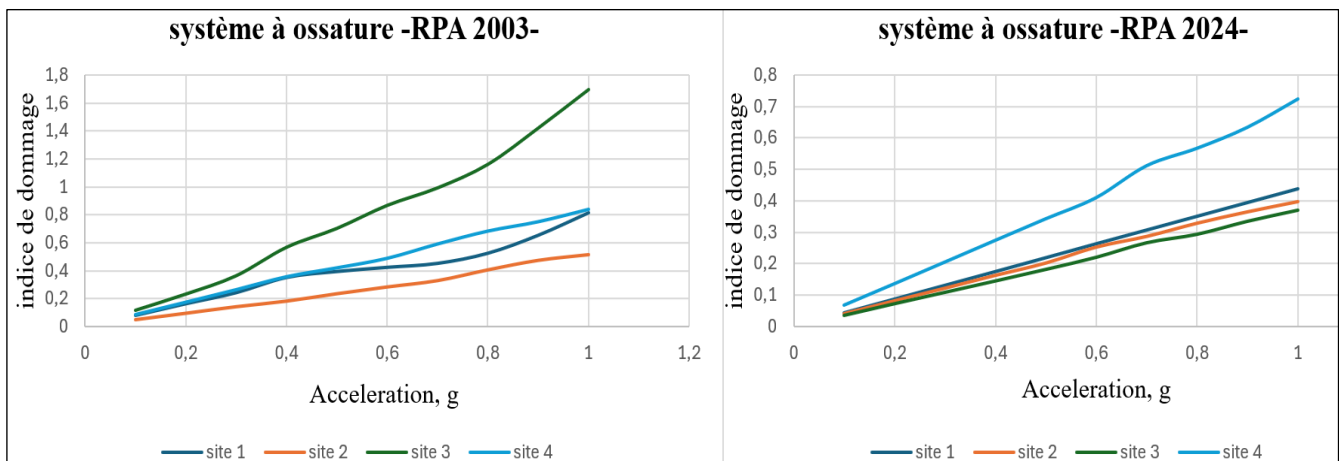


Figure V-3 : indice de dommage pour le système à ossature

- **Évaluation comparative :**

RPA 2003 :

- L'indice de dommage augmente rapidement au-delà de 0.6 g, particulièrement pour le site 3.

- On atteint des valeurs élevées (1.7), indiquant des dommages sévères, voire la perte de la capacité portante.

RPA 2024 :

- Les indices de dommage sont globalement inférieurs à 0.7, avec une croissance plus linéaire.
- La progression entre les sites est plus homogène, et aucun site ne franchit des seuils critiques.

V.4. RESULTATS COMPARATIFS -SYSTEME MIXTE EQUIVALENT A UNE OSSATURE –

‘Dans cette section les figures illustrent l’évolution de trois paramètres structuraux essentiels — la demande en ductilité, le déplacement et l’indice de dommage — en fonction de l’accélération sismique (g), pour un système mixte équivalent à ossature. Les résultats sont comparés entre le RPA 2003 (à gauche) et le RPA 2024 (à droite), pour quatre types de sol représentatifs (S1 à S4).’

V.4.1. Demande en ductilité

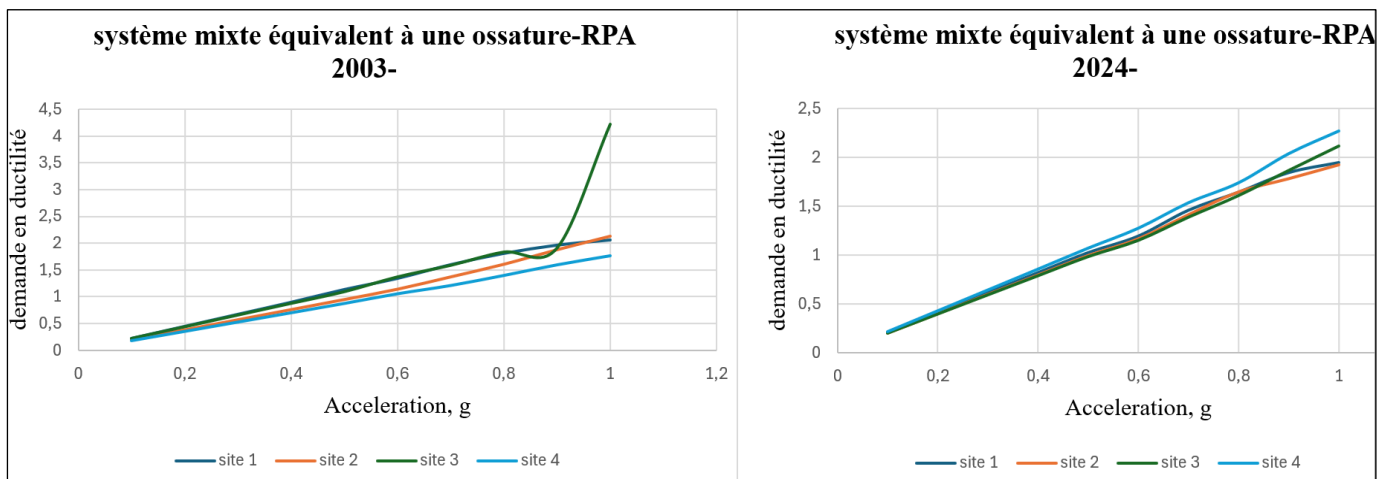


Figure V-4 : La demande en ductilité pour système mixte équivalent à une ossature

• Évaluation comparative :

RPA 2003 :

- Jusqu’à environ 0.6 g, la progression reste modérée et similaire entre les sites.

- À partir de 0.8 g, le site 3 enregistre une forte augmentation de la demande en ductilité, dépassant les valeurs de 4, signe de graves non-linéarités plastiques.
- Cela indique que le système mixte conçu selon RPA 2003 peut perdre rapidement sa capacité de dissipation au-delà d'un certain seuil sismique.

RPA 2024 :

- Les courbes montrent une progression linéaire maîtrisée, atteignant des valeurs inférieures à 2.5 même à 1.0 g.
- L'écart entre les sites est réduit, illustrant une homogénéité de comportement plus marquée.
- La conception selon RPA 2024 permet donc une limitation claire des sollicitations plastiques.

V.4.2. Déplacement

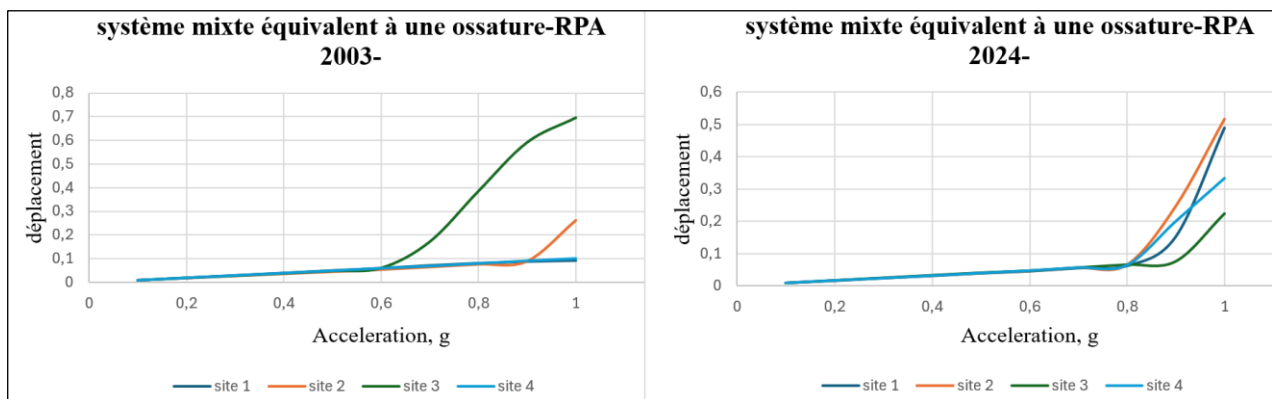


Figure V-5: Déplacement pour le système mixte équivalent à une ossature

- **Évaluation comparative :**

RPA 2003 :

- Les déplacements sont relativement faibles jusqu'à 0.8 g, mais augmentent brutalement après ce seuil, surtout pour les sites 2 et 3.
- Le déplacement atteint près de 0.7 m pour le site 3, ce qui suggère un niveau de dommage structurel critique.

RPA 2024 :

- Bien que les déplacements augmentent au-delà de 0.8 g, leur évolution est plus progressive et contrôlée.
- Aucun site ne dépasse 0.5 m, ce qui démontre la limitation des dérives structurales.

V.4.3. Indice de dommage

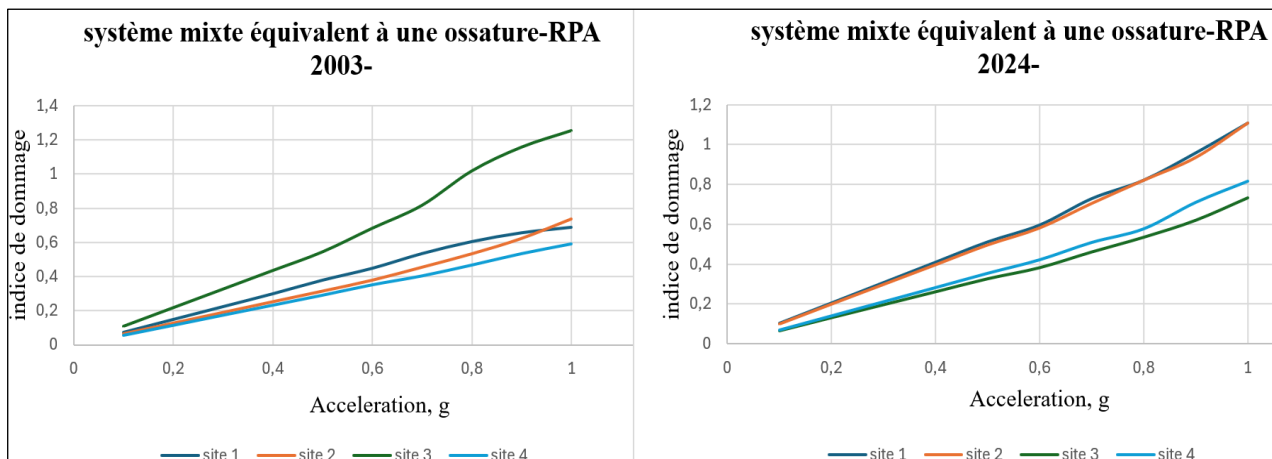


Figure V-6 : indice de dommage pour le système mixte équivalent à une ossature

• Évaluation comparative :

RPA 2003 :

- Une progression relativement irrégulière, avec une accélération notable à partir de 0.6 g, particulièrement pour le site 3 (valeurs > 1.2).
- Cela suggère une forte vulnérabilité structurale dans certaines conditions de sol.

RPA 2024 :

- Les indices de dommage restent plus linéaires et modérés, avec des valeurs maximales inférieures à 1.2 pour tous les sites.
- Les courbes montrent une certaine cohérence inter-sites, soulignant un comportement plus prévisible.

V.5. RESULTATS COMPARATIFS -SYSTEME MIXTE EQUIVALENT A DES VOILES-

‘Dans cette section les figures illustrent l’évolution de trois paramètres structuraux essentiels — la demande en ductilité, le déplacement et l’indice de dommage — en fonction de l’accélération sismique (g), pour un système mixte équivalent à des voiles. Les résultats sont comparés entre le RPA 2003 (à gauche) et le RPA 2024 (à droite), pour quatre types de sol représentatifs (S1 à S4).’

V.5.1. Demande en ductilité

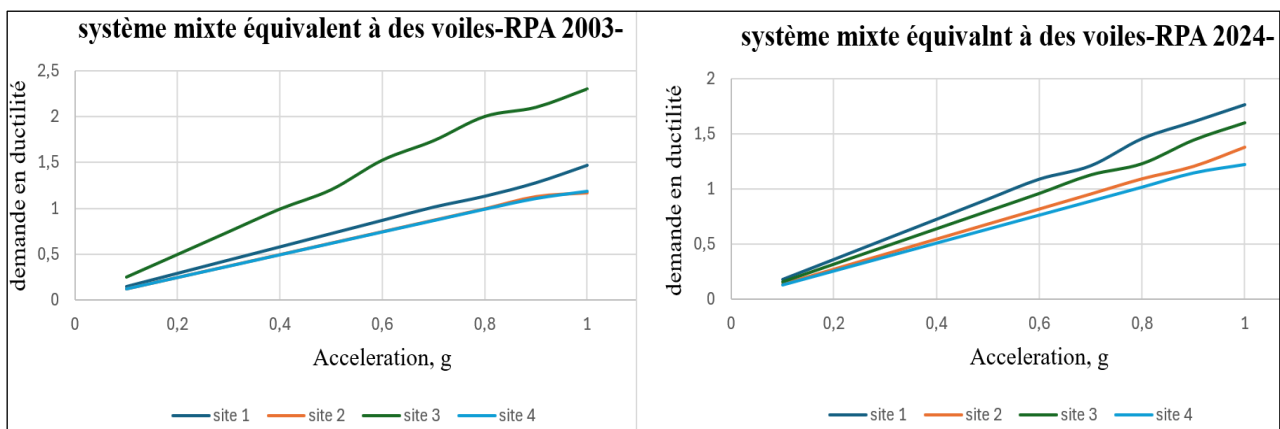


Figure V-7 : La demande en ductilité pour système mixte équivalent à des voiles

- **Évaluation comparative :**

RPA 2003 :

- Une nette montée de la ductilité au-delà de 0.6 g, particulièrement prononcée pour le site 3 (sols meubles).
- La courbe du site 3 dépasse les 2.2, ce qui indique un niveau avancé de plastification.
- Cela suggère que ce système est fortement sollicité sur sols déformables lorsqu’il est conçu selon l’ancien règlement.

RPA 2024 :

- Les courbes sont plus homogènes entre les sites, traduisant un comportement plus équilibré.
- La demande en ductilité progresse de façon linéaire et reste globalement inférieure à 2.
- Le système est donc mieux dimensionné pour contenir la réponse plastique.

V.5.2. Déplacement

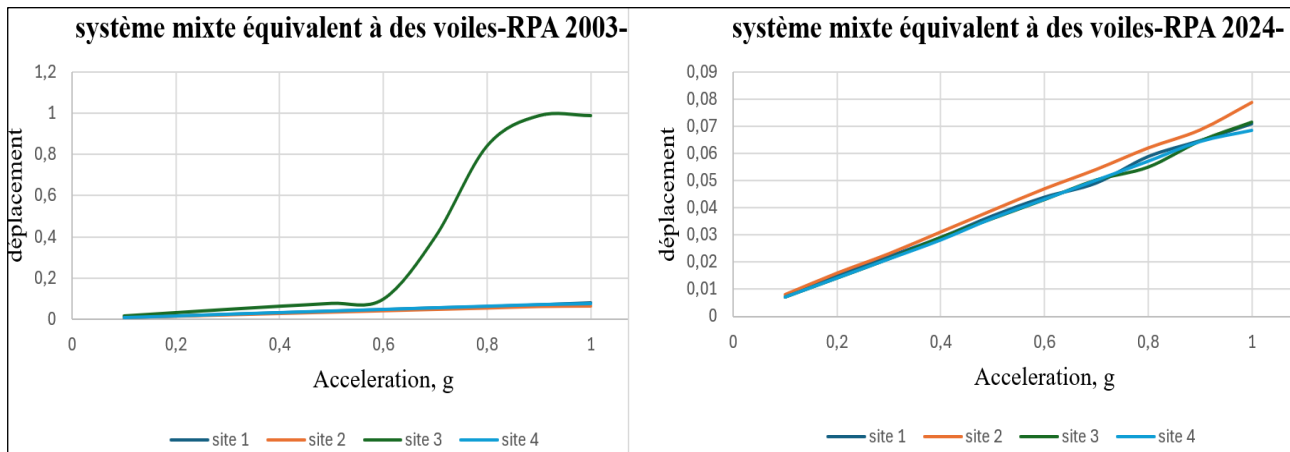


Figure V-8 : Déplacement pour le système mixte équivalent à des voiles

- *Évaluation comparative :*

RPA 2003 :

- Le site 3 montre une envolée brutale du déplacement à partir de 0.8 g, atteignant près de 1m, ce qui est un seuil critique en termes de stabilité.
- Les autres sites présentent une montée plus douce, mais restent significativement plus élevés que dans le RPA 2024.

RPA 2024 :

- Tous les sites présentent des déplacements progressifs et contrôlés, plafonnant autour de 0.08m.
- Cette cohérence indique un bon contrôle des dérives, même à haut niveau d'intensité sismique.

V.5.3. Indice de dommage

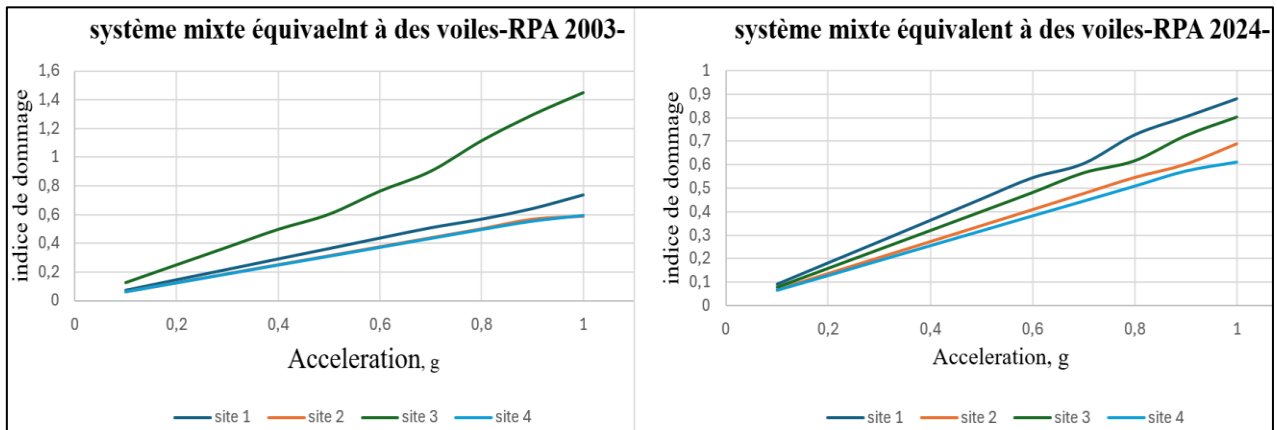


Figure V-9 : indice de dommage pour le système mixte équivalent à des voiles

- **Évaluation comparative :**

RPA 2003 :

- L'indice de dommage monte rapidement avec l'accélération, atteignant des niveaux critiques (>1.4) sur site 3.
- Ce comportement suggère une forte vulnérabilité en cas de séisme, avec une capacité limitée à dissiper l'énergie sans défaillance.

RPA 2024 :

- Bien que l'indice de dommage progresse, il reste contenu entre 0.6 et 0.9.
- Les sites 1 à 4 montrent une réponse parallèle, ce qui reflète une structure plus stable face à l'aléa sismique.

V.6. RESULTATS COMPARATIFS -SYSTEME CONTREVENTE PAR DES VOILES

'Dans cette section les figures illustrent l'évolution de trois paramètres structuraux essentiels — la demande en ductilité, le déplacement et l'indice de dommage — en fonction de l'accélération sismique (g), pour un système contreventé par des voiles. Les résultats sont comparés entre le RPA 2003 (à gauche) et le RPA 2024 (à droite), pour quatre types de sol représentatifs (S1 à S4).'

V.6.1. Demande en ductilité

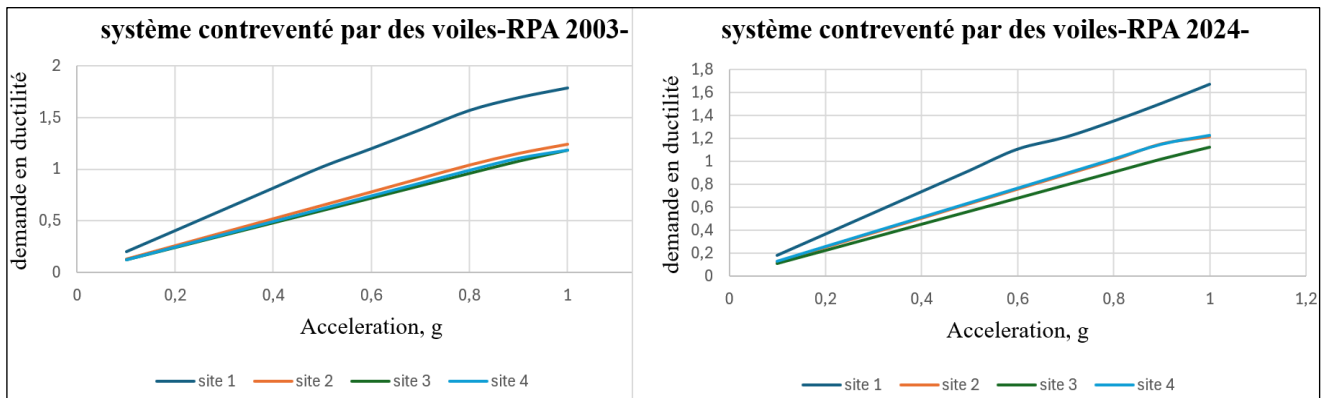


Figure V-10 : La demande en ductilité pour système contreventé par des voiles

- **Évaluation comparative :**

RPA 2003 :

- La demande en ductilité augmente de façon régulière pour les quatre sites, mais devient significative au-delà de 0.6 g, surtout pour le site S4.
- Les valeurs maximales atteignent 1.8, ce qui reste relativement modéré comparé à d'autres systèmes, indiquant un bon comportement en termes de dissipation.

RPA 2024 :

- Les courbes sont plus homogènes et restent inférieures à 1.8, même pour les sites les plus défavorables.
- La progression reste linéaire jusqu'à environ 0.8 g, puis devient légèrement plus raide, particulièrement sur S4.

V.6.2. Déplacement

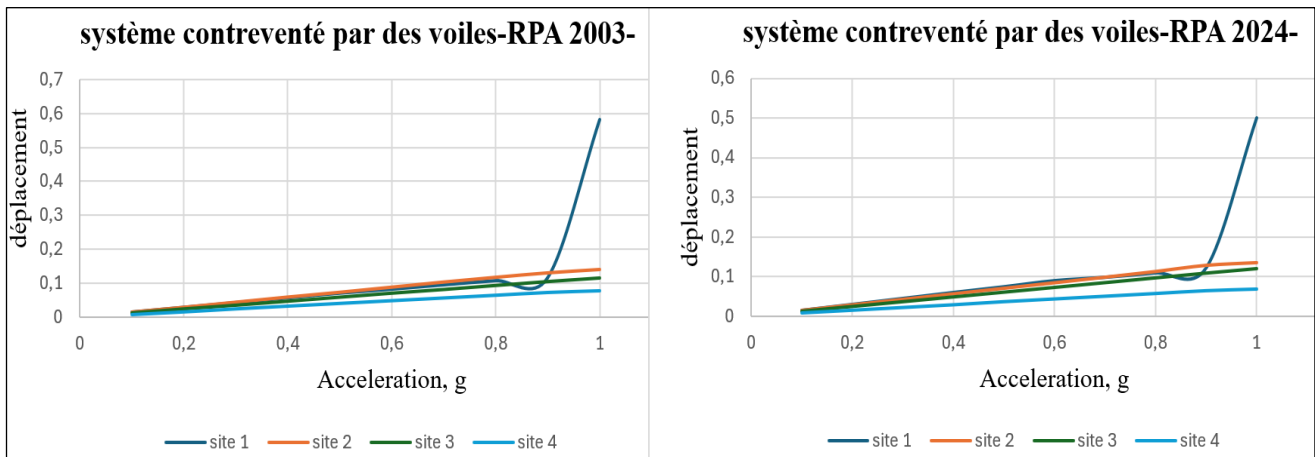


Figure V-11 : Déplacement pour le système contreventé par des voiles

- **Évaluation comparative :**

RPA 2003 :

- Jusqu'à 0.8 g, les déplacements restent limités (< 0.2 m), mais le site S1 présente une augmentation brusque jusqu'à environ 0.6 m, traduisant une instabilité soudaine ou un dépassement de la capacité de résistance.
- Les autres sites restent modérés.

RPA 2024 :

- Les déplacements atteignent un maximum de 0.5 m, avec un comportement globalement similaire à celui du RPA 2003 pour les sites S2 à S4.
- Le site S1 montre également une élévation rapide du déplacement à partir de 0.9 g, mais avec une transition légèrement plus lissée, suggérant une capacité à dissiper partiellement l'énergie avant l'atteinte d'un seuil critique.

V.6.3. Indice de dommage

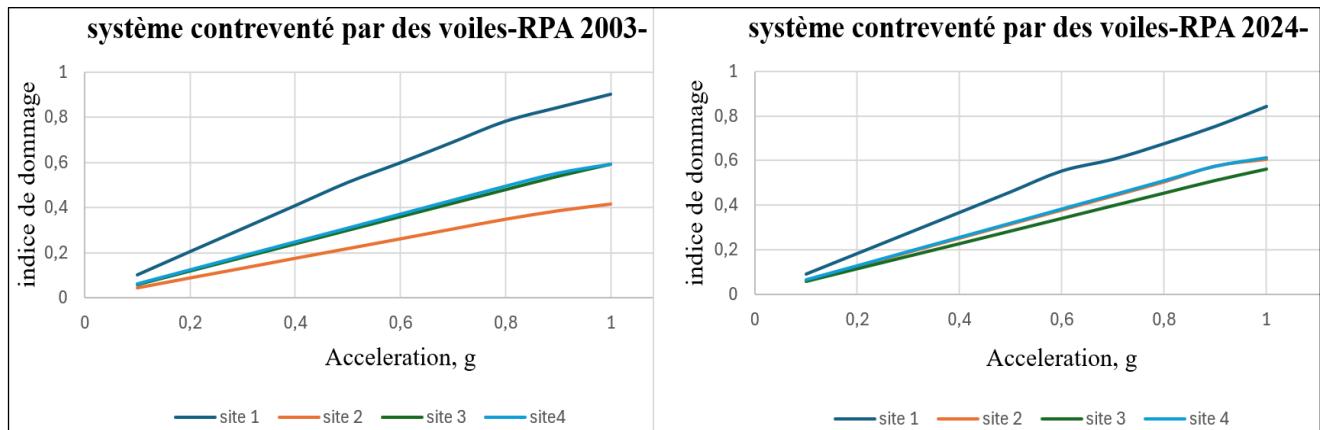


Figure V-12 : Indice de dommage pour le système contreventé par des voiles

- **Évaluation comparative :**

RPA 2003 :

- L'indice de dommage augmente progressivement avec l'accélération, atteignant des niveaux élevés (≈ 0.9) pour le site S1 à 1 g, ce qui indique une vulnérabilité plus marquée de la structure implantée sur sol dur à haute sollicitation.
- Les autres sites (S2, S3, S4) présentent une évolution plus modérée, avec des indices variants entre 0.4 et 0.6, traduisant un endommagement progressif mais contenu.

RPA 2024 :

- La tendance reste globalement similaire, avec une croissance régulière de l'indice de dommage pour l'ensemble des sites.
- Le site S1 présente à nouveau l'indice le plus élevé, avoisinant 0.85 à 1 g, alors que les autres sites convergent autour de 0.6, ce qui traduit une meilleure répartition des dommages et une réponse plus homogène face à l'accélération sismique.

V.7. CONCLUSION :

À l'issue de l'analyse incrémentale dynamique menée sur les différents systèmes structuraux étudiés, et à travers l'exploitation des résultats générés par le logiciel NONLIN V.32, il apparaît clairement que le passage du RPA 2003 au RPA 2024 induit une amélioration notable des performances sismiques. Cette amélioration est particulièrement significative dans les

domaines de la ductilité, du contrôle des déplacements et de la limitation de l'indice de dommage.

Les courbes issues des analyses montrent que les systèmes soumis aux prescriptions du RPA 2024 présentent une évolution plus régulière et maîtrisée de la demande en ductilité. Cela traduit une meilleure capacité dissipative des structures, grâce à une distribution plus homogène des plastifications et une réduction des concentrations de déformations inélastiques. Ce comportement est essentiel pour prévenir les mécanismes d'effondrement localisé ou prématuré.

Par ailleurs, les déplacements maximaux enregistrés dans les simulations sont globalement inférieurs pour les structures conçues selon le spectre du RPA 2024. Ce constat reflète l'efficacité des nouvelles exigences en matière de rigidité initiale, de limitation des dérives inter-étages et de contrôle des déplacements globaux. L'optimisation de la période fondamentale de vibration et l'adoption de coefficients de comportement (R) plus adaptés aux typologies structurales permettent ainsi un meilleur équilibre entre la sécurité et la performance.

Concernant l'indice de dommage, les valeurs obtenues restent généralement contenues dans des seuils modérés, traduisant un comportement ductile maîtrisé. Cette évolution est attribuable à l'actualisation des spectres de réponse et à l'intégration d'un aléa sismique accru dans le RPA 2024, reflétant une vision plus réaliste et prudente des sollicitations attendues dans les différentes zones sismiques algériennes.

En résumé, les résultats obtenus valident la pertinence des évolutions apportées par le RPA 2024. Ce dernier se positionne comme un référentiel de conception plus exigeant, mais aussi plus cohérent avec les enjeux de résilience structurelle. Il renforce la sécurité des bâtiments face aux séismes majeurs, en garantissant une meilleure protection des vies humaines, une réduction des pertes économiques et une meilleure continuité d'usage des structures post-séisme.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

La question de la vulnérabilité sismique des structures revêt une importance stratégique dans le contexte algérien, où l'activité tectonique demeure significative et où la croissance urbaine impose des exigences de sécurité de plus en plus élevées. Ce travail a permis de confronter deux générations de réglementation parasismique — le RPA 99/2003 et le RPA 2024 — à travers une analyse comparative rigoureuse appliquée à divers systèmes de contreventement sur plusieurs types de sol.

Les résultats obtenus confirment que le RPA 2024 marque une rupture méthodologique notable par rapport à son prédécesseur. L'introduction de nouvelles classifications géotechniques, de coefficients d'importance explicites, de spectres de réponse révisés et d'une modélisation tridimensionnelle plus réaliste de l'action sismique contribue à une meilleure représentation des sollicitations dynamiques. Ces changements ont un impact mesurable sur le comportement structural, notamment en termes de ductilité, de déplacement, de probabilité de dommage et de coût de réparation post-sismique.

À travers l'analyse pushover, les courbes de fragilité et l'IDA, il a été observé que les structures conçues selon le RPA 2024 offrent globalement une meilleure maîtrise des déplacements spectraux et une réduction des états de dommage sévères, particulièrement sur les sols meubles ou très meubles. Toutefois, ces améliorations s'accompagnent parfois d'une augmentation des contraintes dimensionnelles et d'un coût structurel potentiellement plus élevé, notamment pour les systèmes souples ou hybrides.

L'évaluation économique, quant à elle, met en lumière le compromis entre sécurité et coût. Si le RPA 2024 tend à renforcer la résilience des bâtiments, il peut engendrer des surcoûts initiaux qu'il convient d'anticiper dès la phase de conception. Cela souligne la nécessité d'une ingénierie intégrée, dans laquelle les choix réglementaires, techniques et économiques sont évalués de manière conjointe.

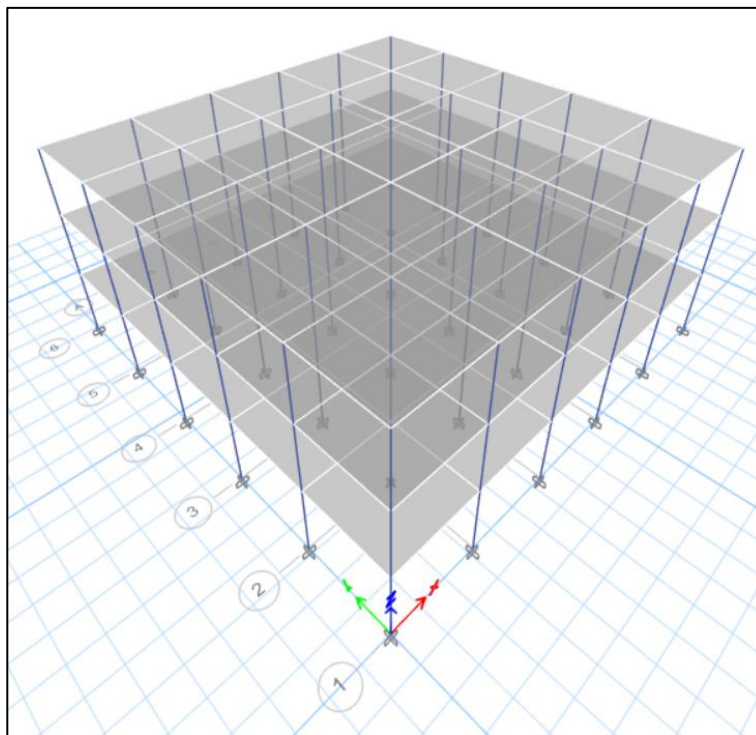
En définitive, il est important de souligner que l'aléa sismique a été revu à la hausse dans les nouvelles prescriptions réglementaires, ce qui se traduit par des sollicitations plus intenses. La méthode statique équivalente, bien qu'elle garantisse une résistance structurelle suffisante, ne permet cependant ni d'évaluer avec précision la performance globale, ni d'anticiper la fragilité réelle des structures face à des séismes sévères. C'est pourquoi il est désormais plus pertinent de s'orienter vers une conception basée sur la performance, qui intègre des objectifs de comportement précis, adaptés au niveau de risque, et permet une maîtrise plus fine des états limites de dommage.

CONCLUSION GENERALE

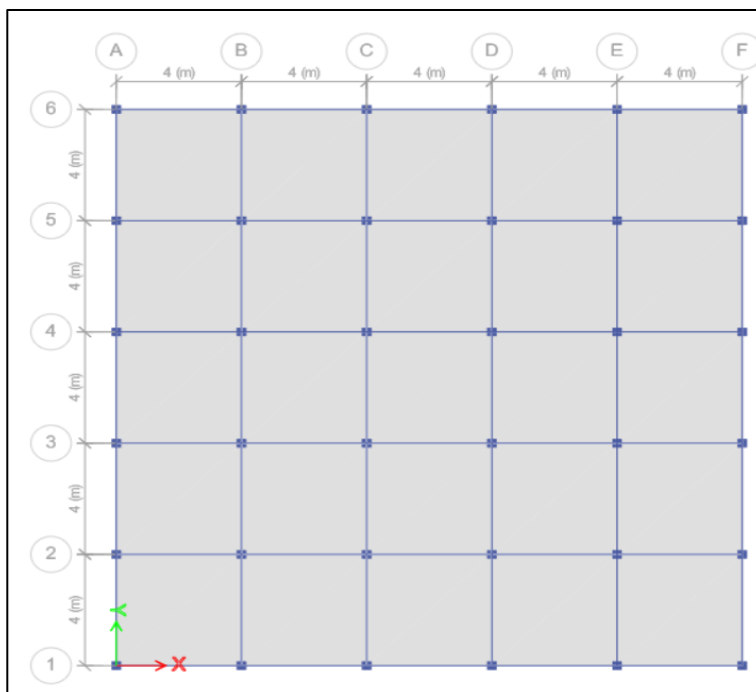
Dans la continuité de cette étude, il serait pertinent d'élargir l'analyse à d'autres typologies structurelles non abordées ici, telles que les structures de grande hauteur, dont la dynamique propre pose des défis particuliers en termes de dérive, d'amortissement et de mode de vibration, ainsi que les structures en charpente (acier ou mixtes), dont le comportement non linéaire et la dissipation d'énergie diffèrent sensiblement des structures en béton. L'intégration de ces variantes permettrait d'affiner la compréhension globale de l'impact du RPA 2024 sur la diversité du parc bâti national et de proposer des recommandations plus ciblées aux professionnels du secteur.

ANNEXES

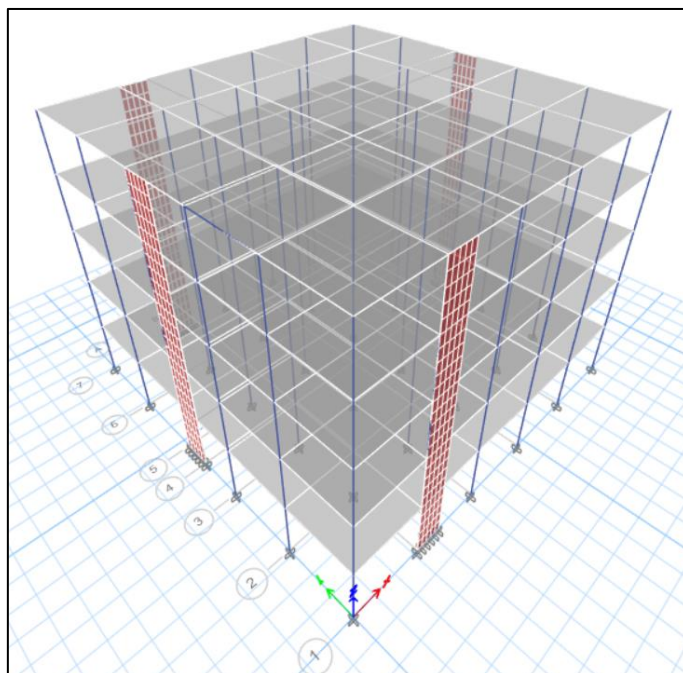
ANNEXE A : MODELISATIONS DES SYSTEMES DE CONTREVENTEMENT ETUDIÉS



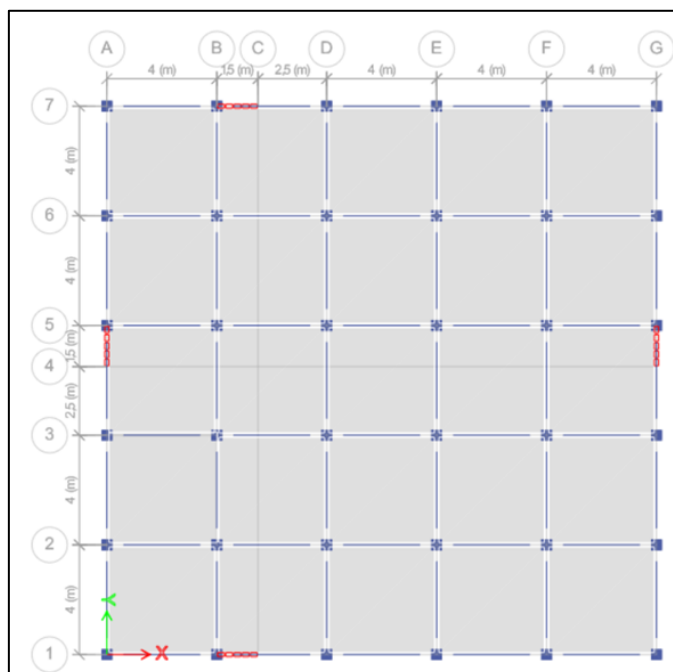
Annexe A-2 : Vue tridimensionnelle – Ossature simple.



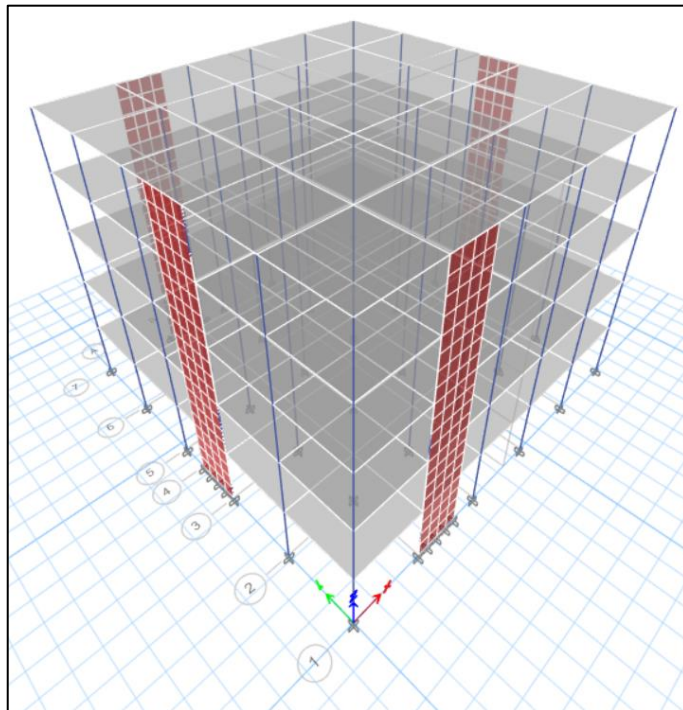
Annexe A-1 : Vue en plan – Ossature simple.



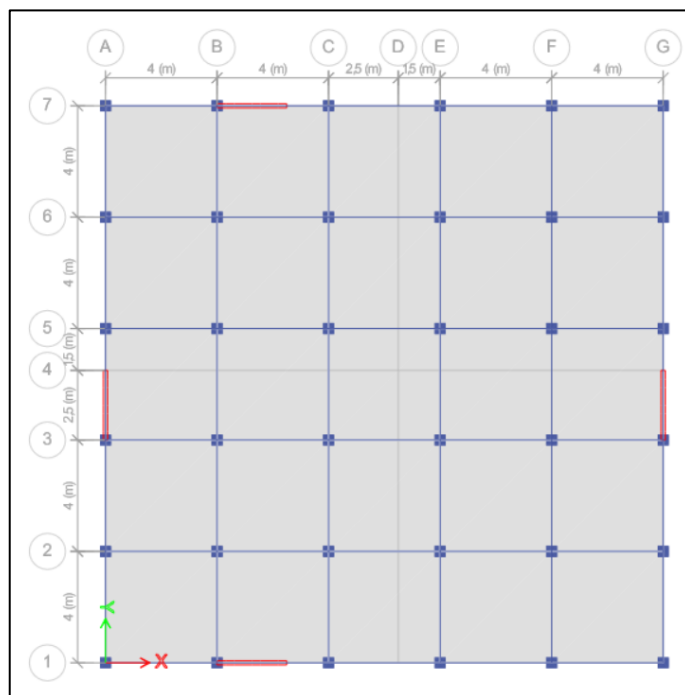
Annexe A-3 : Vue tridimensionnelle – Système mixte équivalent à une ossature.



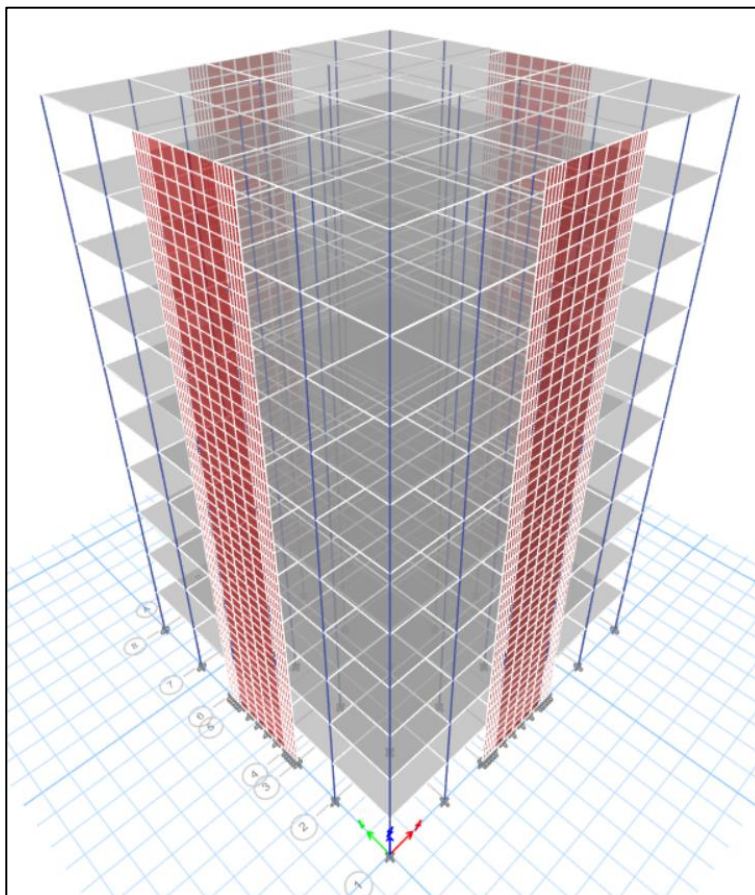
Annexe A-4 : Vue en plan – Système mixte équivalent à une ossature.



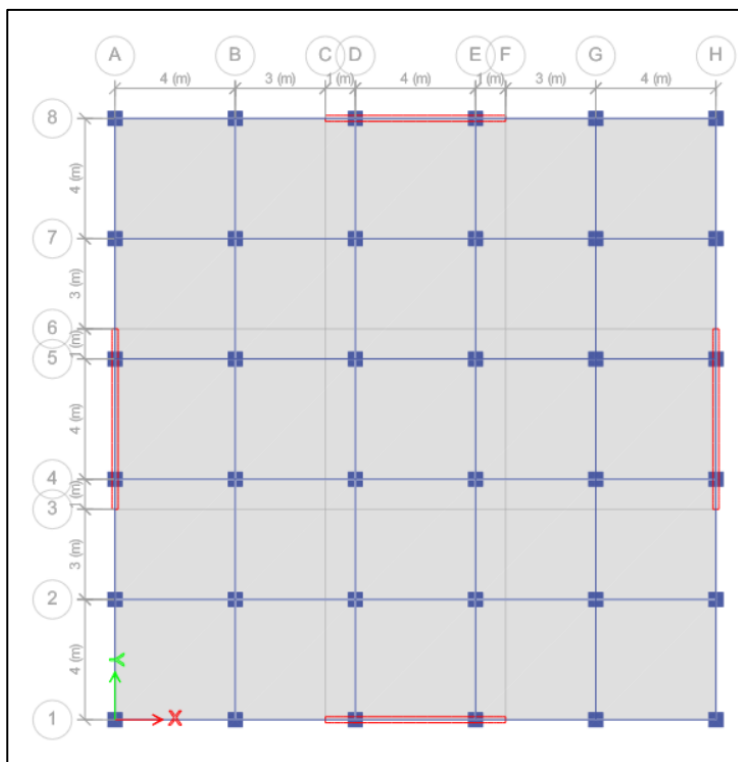
Annexe A-5 : Vue tridimensionnelle – Système mixte équivalent à des voiles.



Annexe A-6 : Vue en plan – Système mixte équivalent à des voiles.



Annexe A- 7 : Vue tridimensionnelle – Système contreventé par des voiles.



Annexe A-8 : Vue en plan – Système contreventé par des voiles.

ANNEXE B : JUSTIFICATION DE SECURITE

Annexe B-1 : Répartition de l'effort tranchant entre éléments porteurs

	Site	Système	F _{poteaux} (kN)	F _{voiles} (kN)	Pourcentage (%)
RPA 2003	Site 1	Ossature	907,73	00,00	100,00
		M. ossature	1096,18	740,04	59,60
		M. voile	786,36	1245,99	61,30
		Voile	1207,94	3663,87	75,00
	Site 2	Ossature	1093,14	00,00	100,00
		M. ossature	1316,59	884,79	59,81
		M. voile	943,24	1484,66	61,15
		Voile	1427,73	4292,93	75,00
	Site 3	Ossature	1119,45	00,00	100,00
		M. ossature	1521,69	1020,89	59,9
		M. voile	1059,23	1661,93	61,1
		Voile	2515,81	4742,94	66,00
	Site 4	Ossature	1254,46	00 00	100,00
		M. ossature	1654,89	1107,88	59,90
		M. voile	1059,23	1661,93	61,10
		Voile	2933,98	5514,75	66 ,00
RPA 2024	Site 1	Ossature	1529,98	00,00	100,00
		M. ossature	1200,23	750,67	61,52
		M. voile	917,74	1145,5	55,52
		Voile	752,55	2280,35	75,19
	Site 2	Ossature	2008,78	00,00	100,00

		M. ossature	1688,38	1100,54	60,54
		M. voile	1308,58	2052,78	61,07
		Voile	1200,87	3789,98	75,94
	Site 3	Ossature	2171,87	00,00	100,00
		M. ossature	1564,51	1019,76	60,54
		M. voile	1421,13	2229,3	61,07
		Voile	4195,67	1405,45	74,91
	Site 4	Ossature	2257,56	00,00	100,00
		M. ossature	1626,87	1060,07	60,55
		M. voile	1421,13	2229,3	61,07
		Voile	1405,4	4195,07	74,91

Annexe B-2 : Vérification de la stabilité au renversement

	Site	Système	Mr	Ms	Ms/Mr	Stabilité
RPA 2003	Site 1	Ossature	5909,088	91544,5	15,49	Vérifiée
		Mixte ossature	21512,64	176760	8,22	Vérifiée
		Mixte voile	24053,152	179168,6	7,45	Vérifiée
		Voile	129745,79	409303,9	3,15	Vérifiée
	Site 2	Ossature	8070,1	94354	11,70	Vérifiée
		Mixte ossature	25789,504	176767,3	6,84	Vérifiée
		Mixte voile	28805,056	179168,6	6,22	Vérifiée
		Voile	129745,792	409303,9	3,15	Vérifiée
	Site 3	Ossature	8203,84	91544,5	11,16	Vérifiée
		Mixte ossature	29781,024	176760	5,94	Vérifiée
		Mixte voile	32321,472	179168,6	5,54	Vérifiée

ANNEXES

		Voile	164946,88	438409	2,66	Vérifiée
	Site 4	Ossature	9252,8	94354	10,20	Vérifiée
		Mixte ossature	32364,288	176760	5,46	Vérifiée
		Mixte voile	32321,5	179168,6	5,54	Vérifiée
		Voile	192763,648	438409	2,27	Vérifiée
RPA 2024	Site 1	Ossature	11356,96	97595,804	8,59	Vérifiée
		Mixte ossature	27294,304	183370,966	6,72	Vérifiée
		Mixte voile	27970,784	179168,674	6,401	Vérifiée
		Voile	67923,584	409305,139	6,03	Vérifiée
	Site 2	Ossature	14907,168	97595,804	6,55	Vérifiée
		Mixte ossature	27261,792	183491,031	6,73	Vérifiée
		Mixte voile	39865,504	179168,674	4,49	Vérifiée
		Voile	99520,704	409305,139	4,11	Vérifiée
	Site 3	Ossature	16117,984	97595,804	6,06	Vérifiée
		Mixte ossature	30314,176	183491,031	6,05	Vérifiée
		Mixte voile	43285,536	179168,674	4,14	Vérifiée
		Voile	127732,96	409305,139	3,20	Vérifiée
	Site 4	Ossature	16756,64	97595,804	5,82	Vérifiée
		Mixte ossature	31512,736	183491,031	5,82	Vérifiée
		Mixte voile	44882,752	179168,674	3,99	Vérifiée
		Voile	149245,376	409305,139	2,74	Vérifiée

Annexe B-3 : Vérification de l'effet P-Δ – Système à ossature

	Etage	Site 1		Site 2		Site 3		Site 4	
		θ	Vérification	θ	Vérification	θ	Vérification	θ	Vérification
RPA 2003	1	0,0695	Vérifiée	0,0466	Vérifiée	0,0697	Vérifiée	0,0467	Vérifiée
	2	0,0601	Vérifiée	0,0447	Vérifiée	0,0605	Vérifiée	0,0448	Vérifiée
	3	0,0290	Vérifiée	0,0230	Vérifiée	0,0301	Vérifiée	0,0232	Vérifiée
RPA 2024	1	0,0418	Vérifiée	0,0779	Vérifiée	0,0379	Vérifiée	0,0364	Vérifiée
	2	0,0404	Vérifiée	0,0731	Vérifiée	0,0409	Vérifiée	0,0394	Vérifiée
	3	0,0201	Vérifiée	0,0397	Vérifiée	0,0241	Vérifiée	0,0232	Vérifiée

Annexe B-4 : Vérification de l'effet P-Δ – Système à contreventement mixte équivalent à une ossature

	Etage	Site 1		Site 2		Site 3		Site 4	
		θ	Vérification	θ	Vérification	θ	Vérification	θ	Vérification
RPA 2003	1	0,0342	Vérifiée	0,0344	Vérifiée	0,0344	Vérifiée	0,0345	Vérifiée
	2	0,0474	Vérifiée	0,0475	Vérifiée	0,0475	Vérifiée	0,0476	Vérifiée
	3	0,0398	Vérifiée	0,0400	Vérifiée	0,0402	Vérifiée	0,0402	Vérifiée
	4	0,0276	Vérifiée	0,0280	Vérifiée	0,0282	Vérifiée	0,0284	Vérifiée
	5	0,0155	Vérifiée	0,0162	Vérifiée	0,0165	Vérifiée	0,0168	Vérifiée
RPA 2024	1	0,0283	Vérifiée	0,0235	Vérifiée	0,0274	Vérifiée	0,0274	Vérifiée
	2	0,0403	Vérifiée	0,0333	Vérifiée	0,0392	Vérifiée	0,0392	Vérifiée
	3	0,0349	Vérifiée	0,0287	Vérifiée	0,0341	Vérifiée	0,0340	Vérifiée
	4	0,0248	Vérifiée	0,0206	Vérifiée	0,0247	Vérifiée	0,0247	Vérifiée
	5	0,0148	Vérifiée	0,0126	Vérifiée	0,0151	Vérifiée	0,0151	Vérifiée

Annexe B-5 : Vérification de l'effet P- Δ – Système à contreventement mixte équivalent à des voiles

	Etage	Site 1		Site 2		Site 3		Site 4	
		θ	Vérification	θ	Vérification	θ	Vérification	θ	Vérification
RPA 2003	1	0,0083	Vérifiée	0,0084	Vérifiée	0,0215	Vérifiée	0,0215	Vérifiée
	2	0,0121	Vérifiée	0,0122	Vérifiée	0,0313	Vérifiée	0,0313	Vérifiée
	3	0,0112	Vérifiée	0,0113	Vérifiée	0,0290	Vérifiée	0,0290	Vérifiée
	4	0,0087	Vérifiée	0,0089	Vérifiée	0,0228	Vérifiée	0,0228	Vérifiée
	5	0,0057	Vérifiée	0,0059	Vérifiée	0,0155	Vérifiée	0,0155	Vérifiée
RPA 2024	1	0,0181	Vérifiée	0,0182	Vérifiée	0,0181	Vérifiée	0,0181	Vérifiée
	2	0,0262	Vérifiée	0,0263	Vérifiée	0,0264	Vérifiée	0,0264	Vérifiée
	3	0,0244	Vérifiée	0,0245	Vérifiée	0,0244	Vérifiée	0,0245	Vérifiée
	4	0,0191	Vérifiée	0,0192	Vérifiée	0,0192	Vérifiée	0,0193	Vérifiée
	5	0,0129	Vérifiée	0,0133	Vérifiée	0,0132	Vérifiée	0,0133	Vérifiée

Annexe B-6 : Vérification de l'effet P- Δ – Système de contreventement constitué par des voiles

	Etage	Site 1		Site 2		Site 3		Site 4	
		θ	Vérification	θ	Vérification	θ	Vérification	θ	Vérification
RPA 2003	1	0,0123	Vérifiée	0,0123	Vérifiée	0,0116	Vérifiée	0,0117	Vérifiée
	2	0,0213	Vérifiée	0,0213	Vérifiée	0,0201	Vérifiée	0,0202	Vérifiée
	3	0,0257	Vérifiée	0,0257	Vérifiée	0,0237	Vérifiée	0,0239	Vérifiée
	4	0,0273	Vérifiée	0,0273	Vérifiée	0,0249	Vérifiée	0,0249	Vérifiée
	5	0,0275	Vérifiée	0,0275	Vérifiée	0,0247	Vérifiée	0,0247	Vérifiée
	6	0,0259	Vérifiée	0,0259	Vérifiée	0,0231	Vérifiée	0,0231	Vérifiée
	7	0,0234	Vérifiée	0,0234	Vérifiée	0,0206	Vérifiée	0,0207	Vérifiée
	8	0,0206	Vérifiée	0,0206	Vérifiée	0,0181	Vérifiée	0,0183	Vérifiée
	9	0,0171	Vérifiée	0,0171	Vérifiée	0,0151	Vérifiée	0,0155	Vérifiée

ANNEXES

	10	0,0137	Vérifiée	0,0137	Vérifiée	0,0121	Vérifiée	0,0125	Vérifiée
RPA 2024	1	0,0117	Vérifiée	0,0118	Vérifiée	0,0120	Vérifiée	0,0120	Vérifiée
	2	0,0202	Vérifiée	0,0205	Vérifiée	0,0208	Vérifiée	0,0208	Vérifiée
	3	0,0244	Vérifiée	0,0247	Vérifiée	0,0249	Vérifiée	0,0251	Vérifiée
	4	0,0260	Vérifiée	0,0263	Vérifiée	0,0264	Vérifiée	0,0265	Vérifiée
	5	0,0263	Vérifiée	0,0265	Vérifiée	0,0266	Vérifiée	0,0267	Vérifiée
	6	0,0249	Vérifiée	0,0250	Vérifiée	0,0252	Vérifiée	0,0252	Vérifiée
	7	0,0222	Vérifiée	0,0226	Vérifiée	0,0228	Vérifiée	0,0229	Vérifiée
	8	0,0194	Vérifiée	0,0200	Vérifiée	0,0203	Vérifiée	0,0206	Vérifiée
	9	0,0159	Vérifiée	0,0168	Vérifiée	0,0174	Vérifiée	0,0177	Vérifiée
	10	0,0126	Vérifiée	0,0137	Vérifiée	0,0143	Vérifiée	0,0147	Vérifiée

Annexe B-7 : Vérification des déplacements inter-étages – Système à ossature

	Etagé	Site 1		Site 2		Site 3		Site 4	
		Va*Δ	Vérification	Va*Δ	Vérification	Va*Δ	Vérification	Va*Δ	Vérification
RPA 2003	1	1,991	Vérifiée	1,764	Vérifiée	2,783	Vérifiée	2,027	Vérifiée
	2	2,148	Vérifiée	2,157	Vérifiée	3,032	Vérifiée	2,485	Vérifiée
	3	1,262	Vérifiée	1,329	Vérifiée	1,775	Vérifiée	1,53	Vérifiée
RPA 2024	1	1,1	Vérifiée	1,375	Vérifiée	1,375	Vérifiée	1,375	Vérifiée
	2	1,375	Vérifiée	1,65	Vérifiée	1,925	Vérifiée	1,925	Vérifiée
	3	0,825	Vérifiée	1,1	Vérifiée	1,375	Vérifiée	1,375	Vérifiée

Annexe B-8 : Vérification des déplacements inter-étages – Système à contreventement mixte équivalent à une ossature

	Etage	Site 1		Site 2		Site 3		Site 4	
		Va*Δ	Vérification	Va*Δ	Vérification	Va*Δ	Vérification	Va*Δ	Vérification
RPA 2003	1	0,868	Vérifiée	1,046	Vérifiée	1,21	Vérifiée	1,318	Vérifiée
	2	1,414	Vérifiée	1,711	Vérifiée	1,985	Vérifiée	2,165	Vérifiée
	3	1,362	Vérifiée	1,655	Vérifiée	1,923	Vérifiée	2,099	Vérifiée
	4	1,08	Vérifiée	1,311	Vérifiée	1,523	Vérifiée	1,662	Vérifiée
	5	0,729	Vérifiée	0,881	Vérifiée	1,021	Vérifiée	1,113	Vérifiée
RPA 2024	1	0,586	Vérifiée	0,487	Vérifiée	0,630	Vérifiée	0,657	Vérifiée
	2	0,993	Vérifiée	0,825	Vérifiée	1,078	Vérifiée	1,122	Vérifiée
	3	0,985	Vérifiée	0,817	Vérifiée	1,078	Vérifiée	1,122	Vérifiée
	4	0,798	Vérifiée	0,663	Vérifiée	0,880	Vérifiée	0,916	Vérifiée
	5	0,553	Vérifiée	0,459	Vérifiée	0,613	Vérifiée	0,638	Vérifiée

Annexe B-9 : Vérification des déplacements inter-étages – Système à contreventement mixte équivalent à des voiles

	Etage	Site 1		Site 2		Site 3		Site 4	
		Va*Δ	Vérification	Va*Δ	Vérification	Va*Δ	Vérification	Va*Δ	Vérification
RPA 2003	1	0,23	Vérifiée	0,277	Vérifiée	0,799	Vérifiée	0,799	Vérifiée
	2	0,396	Vérifiée	0,48	Vérifiée	1,386	Vérifiée	1,386	Vérifiée
	3	0,424	Vérifiée	0,515	Vérifiée	1,49	Vérifiée	1,49	Vérifiée
	4	0,382	Vérifiée	0,464	Vérifiée	1,342	Vérifiée	1,342	Vérifiée
	5	0,306	Vérifiée	0,371	Vérifiée	1,072	Vérifiée	1,072	Vérifiée
RPA 2024	1	0,671	Vérifiée	0,963	Vérifiée	1,046	Vérifiée	1,087	Vérifiée
	2	0,720	Vérifiée	1,035	Vérifiée	1,123	Vérifiée	1,168	Vérifiée
	3	0,648	Vérifiée	0,932	Vérifiée	1,010	Vérifiée	1,051	Vérifiée

ANNEXES

	4	0,518	Vérifiée	0,743	Vérifiée	0,806	Vérifiée	0,839	Vérifiée
	5	0,518	Vérifiée	0,743	Vérifiée	0,806	Vérifiée	0,839	Vérifiée

Annexe B- 10 : Vérification des déplacements inter-étages – Système de contreventement constitué par des voiles

	Etage	Site 1		Site 2		Site 3		Site 4	
		Va*Δ	Vérification	Va*Δ	Vérification	Va*Δ	Vérification	Va*Δ	Vérification
RPA 2003	1	0,42	Vérifiée	0,42	Vérifiée	0,468	Vérifiée	0,549	Vérifiée
	2	0,799	Vérifiée	0,799	Vérifiée	0,901	Vérifiée	1,059	Vérifiée
	3	1,043	Vérifiée	1,043	Vérifiée	1,159	Vérifiée	1,366	Vérifiée
	4	1,197	Vérifiée	1,197	Vérifiée	1,318	Vérifiée	1,555	Vérifiée
	5	1,306	Vérifiée	1,306	Vérifiée	1,418	Vérifiée	1,675	Vérifiée
	6	1,336	Vérifiée	1,336	Vérifiée	1,435	Vérifiée	1,695	Vérifiée
	7	1,32	Vérifiée	1,32	Vérifiée	1,398	Vérifiée	1,65	Vérifiée
	8	1,294	Vérifiée	1,294	Vérifiée	1,343	Vérifiée	1,584	Vérifiée
	9	1,223	Vérifiée	1,223	Vérifiée	1,247	Vérifiée	1,47	Vérifiée
	10	1,134	Vérifiée	1,134	Vérifiée	1,123	Vérifiée	1,323	Vérifiée
RPA 2024	1	0,268	Vérifiée	0,396	Vérifiée	0,513	Vérifiée	0,601	Vérifiée
	2	0,347	Vérifiée	0,518	Vérifiée	0,671	Vérifiée	0,790	Vérifiée
	3	0,396	Vérifiée	0,594	Vérifiée	0,772	Vérifiée	0,909	Vérifiée
	4	0,430	Vérifiée	0,648	Vérifiée	0,844	Vérifiée	0,992	Vérifiée
	5	0,430	Vérifiée	0,648	Vérifiée	0,844	Vérifiée	0,992	Vérifiée
	6	0,441	Vérifiée	0,662	Vérifiée	0,864	Vérifiée	1,017	Vérifiée
	7	0,434	Vérifiée	0,655	Vérifiée	0,851	Vérifiée	1,004	Vérifiée
	8	0,428	Vérifiée	0,641	Vérifiée	0,833	Vérifiée	0,981	Vérifiée
	9	0,405	Vérifiée	0,605	Vérifiée	0,788	Vérifiée	0,925	Vérifiée

	10	0,376	Vérifiée	0,560	Vérifiée	0,727	Vérifiée	0,855	Vérifiée
--	----	-------	----------	-------	----------	-------	----------	-------	----------

Annexe B-11 : Vérification de l'effort normal réduit

	Site	Système	ν	Nd
RPA 2003	Site 1	Ossature	0,18	Vérifiée
		Mixte ossature	0,25	Vérifiée
		Mixte voile	0,25	Vérifiée
		Voile	0,15	Vérifiée
	Site 2	Ossature	0,18	Vérifiée
		Mixte ossature	0,25	Vérifiée
		Mixte voile	0,25	Vérifiée
		Voile	0,3	Vérifiée
	Site 3	Ossature	0,18	Vérifiée
		Mixte ossature	0,25	Vérifiée
		Mixte voile	0,26	Vérifiée
		Voile	0,17	Vérifiée
	Site 4	Ossature	0,18	Vérifiée
		Mixte ossature	0,25	Vérifiée
		Mixte voile	0,26	Vérifiée
		Voile	0,20	Vérifiée
RPA 2024	Site 1	Ossature	0,14	Vérifiée
		Mixte ossature	0,20	Vérifiée
		Mixte voile	0,32	Vérifiée
		Voile	0,33	Vérifiée
	Site 2	Ossature	0,14	Vérifiée
		Mixte ossature	0,20	Vérifiée

		Mixte voile	0,30	Vérifiée
		Voile	0,33	Vérifiée
	Site 3	Ossature	0,14	Vérifiée
		Mixte ossature	0,20	Vérifiée
		Mixte voile	0,32	Vérifiée
		Voile	0,33	Vérifiée
	Site 4	Ossature	0,14	Vérifiée
		Mixte ossature	0,20	Vérifiée
		Mixte voile	0,32	Vérifiée
		Voile	0,33	Vérifiée

Annexe B-12 : Vérification de l'effort tranchant à la base

	Site	Système	80% $V_{calculé}$	V_{dyn} (kN)	$V_{dyn} > 0.8V_{calc}$
RPA 2003	Site 1	Ossature	776,9	907,73	OK
		Mixte ossature	1463,63	1836,22	OK
		Mixte voile	1658,65	2032,35	OK
		Voile		4871,8	OK
	Site 2	Ossature	957,03	1066,10	OK
		Mixte ossature	1768,00	2201,39	OK
		Mixte voile	2008,93	2427,91	OK
		Voile		576,00	OK
	Site 3	Ossature	635,87	1119,45	OK
		Mixte ossature	1463,63	2542,58	OK
		Mixte voile	2277,00	2721,17	OK
		Voile		7258,77	OK
	Site 4	Ossature	957,00	1254,46	OK

ANNEXES

RPA 2024		Mixte ossature	2241,18	2762,78	OK
		Mixte voile	2277.00	2721,17	OK
		Voile		8448,74	OK
	Site 1	Ossature	822.93	1529.88	OK
		Mixte ossature	1309.27	2327.76	OK
		Mixte voile	1693.50	2363.24	OK
		Voile	2727.61	3032.91	OK
	Site 2	Ossature	1088.39	2008.78	OK
		Mixte ossature	1958.95	2324.09	OK
		Mixte voile	2436.69	3361.32	OK
		Voile	4091.41	4392.07	OK
	Site 3	Ossature	1174.66	2171.37	OK
		Mixte ossature	2208.50	2584.27	OK
		Mixte voile	2643.81	3650.43	OK
		Voile	5316.06	5600.67	OK
	Site 4	Ossature	1221.12	2257.39	OK
		Mixte ossature	2295.84	2686.44	OK
		Mixte voile	2741.28	3785.16	OK
		Voile	6262.37	6519.18	OK

ANNEXE C : PARAMETRES DE CALCUL DE L'EFFORT SISMIQUE

Annexe C-1 : coefficient d'accélération de zone A -RPA 2003-

	ZONE			
Groupe	I	IIa	IIb	III
1 A	0,15	0,25	0,30	0,40
1 B	0,12	0,20	0,25	0,30
2	0,10	0,15	0,20	0,25
3	0,07	0,10	0,14	0,18

$$D = \begin{cases} 2.5\eta & \text{si } 0 \leq T < T_2 \\ (2.5\eta) \cdot \left(\frac{T_2}{T}\right)^{\frac{2}{3}} & \text{si } T_2 \leq T < 3.0s \\ (2.5\eta) \cdot \left(\frac{T_2}{3.0}\right)^{\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{3.0}{T}\right)^{\frac{5}{3}} & \text{si } T > 3.0s \end{cases} \quad (C-1)$$

Annexe C-2 : Valeurs du coefficient de comportement, R, pour les structures en béton armé - RPA2003

Catégorie	Description du système de contreventement	Valeur de R
A	Béton armé	
1a	Portiques autostables sans remplissages en maçonnerie rigide	5
1 b	Portiques autostables avec remplissages en maçonnerie rigide	3,5
2	Voiles porteurs	3,5
3	Noyau	3,5
4a	Mixte portiques/voiles avec interaction	5
4 b	Portiques contreventés par des voiles	4
5	Console verticale à masses réparties	2
6	Pendule inverse	2

Annexe C-3 : Valeurs de ξ (%) -RPA 2003-

Remplissage	Portiques		Voiles ou murs
	Béton armé	Acier	Béton armé/maçonnerie
Léger	6	4	10
Dense	7	5	

Annexe C-4 : Valeurs des Pondérations P_q -RPA 2003-

Critère q	P_q	
	Observé	N.observé
1. Conditions minimales sur les files de contreventement	0	0,05
2. Redondance en plan	0	0,05
3. Régularité en plan	0	0,05
4. Régularité en élévation	0	0,05
5. Contrôle de la qualité des matériaux	0	0,05
6. Contrôle de la qualité de l'exécution	0	0,10

Annexe C-5 : Valeurs de T_1 et T_2

Site	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄
T₁(sec)	0,15	0,15	0,15	0,15
T₂(sec)	0,30	0,40	0,50	0,70

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

Annexe C-6 : Valeurs du coefficient de comportement, R , pour les structures en béton armé - RPA2024

Cat	Description du système de contreventement	Valeur de R
1	Système à ossature	5.5 ^(a)
2	Système à contreventement mixte, équivalent à une ossature	5.5 ^(a)
3	Système à ossature ou mixte équivalent à ossature avec remplissage en maçonnerie rigide	3.5 ^(a)
4	Système à contreventement mixte, équivalent à des voiles	4.5 ^(b)
5	Système de contreventement constitué par des voiles	4.5 ^(b)
6	Système à ossature à noyau ou à effet noyau	3 ^(b)
7	Système fonctionnant en console verticale à masses réparties prédominantes	3 ^(b)
8	Système en pendule inversé	2 ^(c)
9	Système de voiles de grandes dimensions en béton peu armé	1.5 ^(c)

Annexe C-7 : Valeurs des Pondérations P_q -RPA 2024-

Catégorie	Critère, q	Observé	N/observé
(a)	1. Régularité en plan	0	0.05
	2. Régularité en élévation	0	0.20
	3. Conditions minimales sur le nombre d'étages	0	0.20
	4. Conditions minimales sur les travées	0	0.10
(b)	1. Régularité en plan	0	0.05
	2. Régularité en élévation	0	0.20
	3. Redondance en plan	0	0.05

Annexe C-8 : Valeurs des paramètres décrivant les spectres de réponse élastique de type 1 (Zones IV, V et VI)

Spectre T1	S	T ₁ (s)	T ₂ (s)	T ₃ (s)
Site S ₁	1.00	0.10	0.40	2.0
Site S ₂	1.20	0.10	0.50	2.0
Site S ₃	1.30	0.15	0.60	2.0
Site S ₄	1.35	0.15	0.70	2.0

Annexe C-9 : Valeurs des paramètres décrivant les spectres de réponse élastique de type 2 (Zones I, II et III)

Spectre T2	S	T ₁ (s)	T ₂ (s)	T ₃ (s)
Site S ₁	1.00	0.05	0.25	1.2
Site S ₂	1.30	0.05	0.30	1.2
Site S ₃	1.55	0.10	0.40	1.2
Site S ₄	1.80	0.10	0.50	1.2

$$\lambda = \begin{cases} 0.85 & \text{si : } T_1 \leq 2.T_2 \text{ et si le bâtiment a plus de 2 niveaux} \\ 1, & \text{autrement} \end{cases} \quad (C-3)$$

Annexe C-10 : Valeurs de ξ (%) -RPA 2024-

Remplissage	Portiques(*)		Voiles (**)
	Béton armé	Acier	Béton armé/maçonnerie
Léger	6	4	10
Dense	7	5	

(*) : Sans présence de voiles ou de noyaux en béton armé

(**) : Valeurs valables même si les voiles sont associés à des portiques

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Ministère de l'Habitat, de l'Urbanisme et de la Ville, « Règles Parasismiques Algériennes – RPA 99 / Version 2003 », Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique (CGS), Alger, 2004.
- [2] Ministère de l'Habitat, de l'Urbanisme et de la Ville, « Règles Parasismiques Algériennes – RPA 2024 », Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique (CGS), 2024.
- [3] A. BENBOKHARI, « Performance and vulnerability based seismic design using artificial intelligence: case of frames structures », 2025.
- [4] Federal Emergency Management Agency, *NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings*, vol. 1. Federal Emergency Management Agency, 1997.
- [5] H. Krawinkler et G. Seneviratna, « Pros and cons of a pushover analysis of seismic performance evaluation », *Eng. Struct.*, vol. 20, n° 4-6, p. 452-464, 1998.
- [6] « (PDF) Pushover analysis A Review », ResearchGate.
- [7] F. E. FEMA 356, « Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings », *Fed. Emerg. Manag. Agency Wash. DC USA*, 2000.
- [8] N. FEMA, « NEHRP, Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings », Report, 2000.
- [9] A. Ghobarah, « Performance-based design in earthquake engineering: state of development », *Eng. Struct.*, vol. 23, n° 8, p. 878-884, 2001.
- [10] S. E. Ashraf Habibullah et S. E. Stephen Pyle, « Practical three dimensional nonlinear static pushover analysis », *Struct. Mag. Winter*, 1998.
- [11] F. Naeim et R. Lobo, « Ten commandments on pushover analysis », *John Martin Assoc. Publ. Los Angel.*, 1999.
- [12] M. A. L. Menjivar, « 3D pushover of irregular reinforced concrete building », *Rose Sch. Italy*, 2003.
- [13] H. Moghaddam et I. Hajirasouliha, « Toward more rational criteria for determination of design earthquake forces », *Int. J. Solids Struct.*, vol. 43, n° 9, p. 2631-2645, 2006.
- [14] R. V. Whitman, T. Anagnos, C. A. Kircher, H. J. Lagorio, R. S. Lawson, et P. Schneider, « Development of a national earthquake loss estimation methodology », *Earthq. Spectra*, vol. 13, n° 4, p. 643-661, 1997.
- [15] A. T. Council, « Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures », *FEMA Reg. II*, 2005.
- [16] C. D. Comartin, R. W. Niewiarowski, S. A. Freeman, et F. M. Turner, « Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings: A Practical Overview of the ATC 40 Document », *Earthq. Spectra*, vol. 16, n° 1, p. 241-261, févr. 2000, doi: 10.1193/1.1586093.
- [17] C. A. Kircher, A. A. Nassar, O. Kustu, et W. T. Holmes, « Development of Building Damage Functions for Earthquake Loss Estimation », *Earthq. Spectra*, vol. 13, n° 4, p. 663-682, nov. 1997, doi: 10.1193/1.1585974.
- [18] P. and Bazzurro et N. Luco, « Accounting for uncertainty and correlation in earthquake loss estimation », in *Proceedings of the ninth international conference on structural safety and reliability, Rome, Italy*, 2005, p. 2687-2694.

- [19] J. Bommer Julian, R. J. SILVA MOURA PINHO, et C. H. Marie, « Using displacement-based earthquake loss assessment in the selection of seismic code design levels », in *Proceedings of 9th International Conference on Structural Safety and Reliability'05*, 2005.
- [20] S. Molina, « [No title found] », *J. Earthq. Eng.*, vol. 9, n° 6, p. 877, 2005, doi: 10.1142/S1363246905002201.
- [21] C.-H. Yeh, W.-Y. Jean, et C.-H. Loh, « Building damage assessment for earthquake loss estimation in Taiwan », in *Twelfth World Conference on Earthquake Engineering*, 2000.
- [22] A. Singhal et A. S. Kiremidjian, « Method for Probabilistic Evaluation of Seismic Structural Damage », *J. Struct. Eng.*, vol. 122, n° 12, p. 1459-1467, déc. 1996, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1996)122:12(1459).
- [23] N. Yamaguchi et F. Yamazaki, « Fragility curves for buildings in Japan based on damage surveys after the 1995 Kobe earthquake », in *Proceedings of the 12th world conference on earthquake engineering, Auckland, New Zealand*, 2000, p. 2451.
- [24] M. S. Kirçil et Z. Polat, « Fragility analysis of mid-rise R/C frame buildings », *Eng. Struct.*, vol. 28, n° 9, p. 1335-1345, 2006.
- [25] Y. E. Ibrahim et M. M. El-Shami, « Seismic fragility curves for mid-rise reinforced concrete frames in Kingdom of Saudi Arabia », *IES J. Part Civ. Struct. Eng.*, vol. 4, n° 4, p. 213-223, nov. 2011, doi: 10.1080/19373260.2011.609325.
- [26] J. S. Jeon, R. DesRoches, I. Brilakis, et L. N. Lowes, « Aftershock fragility curves for damaged non-ductile reinforced concrete buildings », in *15th world conference on earthquake engineering*, 2012.
- [27] Milutinovic, Zoran V.; Trendafiloski, Goran S., « WP4: Vulnerability of current buildings », 2003.
- [28] S. Giovinazzi et S. Lagomarsino, « A macroseismic method for the vulnerability assessment of buildings », in *13th world conference on earthquake engineering*, 2004, p. 1-6.
- [29] P. Mouroux et B. L. Brun, « Presentation of RISK-UE Project », *Bull. Earthq. Eng.*, vol. 4, n° 4, p. 323-339, nov. 2006, doi: 10.1007/s10518-006-9020-3.
- [30] « Nonlinear Time History Analysis of Reinforced Concrete Buildings | Request PDF », ResearchGate.
- [31] « Non-linear Time History Analysis of Piloti-Type High-rise RC Buildings », *ResearchGate*, doi: 10.5000/EESK.2009.13.1.035.
- [32] « NONLINEAR TIME-HISTORY ANALYSIS OF A BASE-ISOLATED RC BUILDING IN SHANGHAI FOUNDED ON SOFT SOIL », in *ResearchGate*,
- [33] Thomson, W. T. (1966)., « Theory of Vibration with Applications. Prentice-Hall. »
- [34] Hashemi, M. J., & Ahmadi, M. T. (2016)., « Nonlinear Dynamics and Chaos in Engineering Systems. Springer. »
- [35] Hashemi, G. (2023)., « Advanced Nonlinear Oscillations in Engineering. Wiley. »
- [36] Gavrea, B., Popa, C., & Suci, N. (2005)., « “Numerical Integration Techniques for Nonlinear Oscillatory Systems.” *Journal of Computational Mechanics*, 35(4), 567–578. »
- [37] Wilson, E. L. (2002)., « Three-Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures. Computers and Structures, Inc. »

- [38] Akar, P., & Willner, K. (2019)., « “Application of the Fast Nonlinear Analysis Method on a Clamped Beam with Nonlinear Support.” Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics, 19(1), e201900022. »
- [39] Li, B., Chuang, W.-C., & Spence, S. M. J. (2021)., « “An Adaptive Fast Nonlinear Analysis (AFNA) Algorithm for Rapid Time History Analysis.” Proceedings of the 12th International Conference on Structural Safety & Reliability (ICOSSAR 2021). »
- [40] Puthanpurayil, A. M., & Sharpe, R. D. (2022)., « “Seismic Ratings for Degrading Structural Systems.” Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, 55(3), 1625. »
- [41] Newmark, N. M. (1959)., « “A Method of Computation for Structural Dynamics.” Journal of the Engineering Mechanics Division, 85(EM3), 67–94. »
- [42] Málaga-Chuquitaype, C., Bommer, J., Pinho, R., & Stafford, P. (2008)., « Selection and scaling of ground-motion records for nonlinear response-history analyses based on equivalent SDOF systems. »
- [43] Qin, X. (2005)., « Fiber beam–column element for nonlinear analysis of reinforced concrete frames. »
- [44] Spacone, E., Filippou, F. C., & Taucer, F. F. (1996)., « A fiber beam–column element for seismic response analysis of reinforced concrete structures. »
- [45] D’Ambrisi, A., & Filippou, F. C. (1999)., « Modeling of bond-slip behavior in reinforced concrete structures. »
- [46] Petrini, L., Magliulo, G., & Manfredi, G. (2008)., « Modelling of elastic damping in nonlinear time-history analyses of cantilever RC walls. »
- [47] Adhikari, S. (2000 & 2006)., « Damping modelling using generalized proportional damping. »
- [48] Lee, C. L. (2019)., « A novel damping model for earthquake induced structural response simulation. »
- [49] « Guidelines for Analytical Vulnerability Assessment - Low_Mid-Rise.pdf ». Consulté le : 5 juin 2025. [En ligne]. Disponible sur : https://cloud-storage.globalquakemodel.org/public/wix-new-website/pdf-collections-wix/publications/Guidelines%20for%20Analytical%20Vulnerability%20Assessment%20-%20Low_Mid-Rise.pdf