

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة سعيدة – د. مولاي الطاهر
UNIVERSITÉ DE SAÏDA - Dr MOULAY TAHAR



Faculté de technologie

Département de génie civil et de l'hydraulique

PROJET DE FIN DE CYCLE

Présenté pour l'obtention du diplôme de master en génie civil

Spécialité: structure

Using Several Ground-Motion Models to Enhance Seismic Study of Structures

Présenté par :

Houmani Rania Ikram
Hadj kacem Linda

Soutenu le 22/06/2026, devant le jury composé de :

M. Sekkel Abdelkrim		Président
M. DERRAS Boumédiène		Encadreur
M. Touil Brahim		Examineur

Année universitaire 2025/2026

Remerciements

Avant tout, nous rendons grâce à Dieu, le Tout-Puissant, qui nous a accordé la santé, la patience et la détermination nécessaires pour mener ce travail à son terme.

Ce mémoire n'aurait jamais vu le jour sans le concours de personnes remarquables, auxquelles nous tenons à exprimer notre profonde gratitude.

Nous adressons nos plus sincères remerciements au **Professeur DERRAS Boumédiène**, qui a bien voulu encadrer ce travail avec bienveillance et exigence. Sa disponibilité, ses orientations éclairées et la confiance qu'il nous a témoignée tout au long de ce parcours ont été pour nous une source inestimable de motivation.

Nos remerciements vont également aux membres du jury, qui ont accepté de consacrer de leur temps précieux à l'évaluation de ce modeste travail. Leur regard critique et leurs commentaires constructifs sont pour nous un honneur.

À nos familles, qui ont été à nos côtés dans les moments de doute comme dans les moments de fierté, qui nous ont soutenus sans relâche et encouragés à persévérer nous leur devons bien plus que ces quelques mots ne sauraient exprimer.

Enfin, à nos amis et à l'ensemble de nos camarades de la promotion **2021–2026**, avec qui nous avons partagé cette belle aventure universitaire : courage et réussite à vous tous.

Dédicaces

Je dédie ce travail qui représente l'aboutissement de mes efforts...

À la mémoire de mon regretté père Abdel Kader

Qui m'a quittée, mais dont l'esprit, les valeurs et l'amour m'ont accompagnée à chaque étape de ce parcours. J'aurais tant souhaité que tu sois là pour partager l'aboutissement de ce travail. Que Dieu t'accorde Sa sainte miséricorde et que ton âme repose en paix.

À ma mère bien-aimée, Fatima

La source de ma lumière et de ma force. Aucun mot, aucune dédicace ne saurait exprimer ma profonde gratitude pour ton amour inconditionnel, tes prières bienveillantes et tous les sacrifices que tu as consentis pour ma réussite. Que Dieu te préserve et t'accorde santé et longue vie.

À mon cher mari, Oussama

Mon compagnon de vie et mon soutien indéfectible. Merci pour ta patience infinie, ton écoute et tes encouragements constants qui m'ont donné l'énergie et la détermination d'aller jusqu'au bout de mes objectifs.

À ma chère sœur Djamila et mes chers frères Anis et Ilyan

En témoignage de l'affection fraternelle profonde qui nous unit. Merci pour votre présence précieuse, vos sourires et votre soutien de tous les jours. Je vous souhaite tout le bonheur et la réussite du monde.

À tous ceux qui me sont chers et qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Houmani Rania Ikram

Dédicace

Je dédie ce travail à ceux qui ont été le socle de ma vie, mon inspiration Constante et ma force dans les moments les plus exigeants.

À ma mère et à mon père :

Vous êtes mon port attache, là où je puise toute mon énergie. Merci pour Vos sacrifices, votre soutien inconditionnel et cet amour qui, jour après jour, M'a permis de surmonter chaque obstacle pour arriver jusqu'ici. Ce diplôme Est autant le vôtre que le mien.

À ma sœur et à mon frère :

Merci d'avoir été mes complices et mes piliers. Votre présence rassurante et vos encouragements ont rendu ce parcours beaucoup plus lumineux.

À la personne chère et proche de mon cœur :

À la personne chère et proche de mon cœur qui a partagé avec moi tous les détails de ce rêve. Merci d'avoir toujours été à mes côtés ; je suis tellement reconnaissante pour la sincérité de ton affection et ton soutien inestimable.

À mon grand-père :

Parti trop tôt, tu as laissé un vide immense, mais ta mémoire m'accompagne à chaque instant. Je sais que tu aurais tant aimé être présent pour voir ce jour de réussite. Cette étape est dédiée à ton souvenir ; je porte en moi la fierté que tu aurais eue pour moi. Veille sur nous de là où tu es.

Hadj Kacem Linda

Résumé

Ce mémoire de Master II en Génie Civil, option Structures, porte sur l'utilisation de plusieurs modèles de prédiction du mouvement du sol (Ground Motion Models GMMs) pour améliorer l'évaluation sismique des structures. L'objectif principal est de quantifier l'influence du choix du GMM sur l'estimation de la réponse structurale et de confronter ces prédictions aux prescriptions du Règlement Parasismique Algérien RPA 2024.

La première partie du mémoire constitue une synthèse bibliographique approfondie organisée en quatre chapitres couvrant les fondements de la sismologie, les paramètres physiques du mouvement du sol, les mesures d'intensité sismique et les fondements théoriques des GMMs. La seconde partie, à caractère applicatif, comprend deux chapitres : le Chapitre V présente le bâtiment de référence R+10 modélisé sous Robot Structural Analysis avec les vérifications RPA 2024, et le Chapitre VI développe l'étude paramétrique comparative de neuf GMMs par méthode modale spectrale.

Les résultats montrent que les modèles NGA-West2 prédisent des accélérations spectrales supérieures d'environ 15 % à celles des modèles RESORCE, que le spectre RPA 2024 enveloppe la totalité des prédictions avec une marge de 39 % par rapport à la médiane, et que les modèles intégrant le plus grand nombre de paramètres physiques (ASK14, CY14) produisent les estimations les plus stables.

Mots-clés : GMM, spectre de réponse, RPA 2024, analyse modale spectrale, NGA-West2, RESORCE, aléa sismique, coefficient de comportement.

Abstract

This Master II thesis in Civil Engineering, Structures option, focuses on the use of several Ground Motion Models (GMMs) to improve the seismic assessment of structures. The main objective is to quantify the influence of the choice of GMM on the estimation of the structural response and to compare these predictions with the requirements of the Algerian Seismic Code RPA 2024.

The first part of the thesis constitutes a comprehensive literature review organized into four chapters covering the fundamentals of seismology, the physical parameters of ground motion, seismic intensity measures, and the theoretical foundations of GMMs. The second part, which is applicative in nature, includes two chapters: Chapter V presents the R+10 reference building modeled in Robot Structural Analysis with the RPA 2024 verifications, and Chapter VI develops the comparative parametric study of nine GMMs using the modal spectral method.

The results show that the NGA-West2 models predict spectral accelerations approximately 15% higher than those of the RESORCE models, that the RPA 2024 spectrum envelopes all predictions with a 39% margin relative to the median, and that the models incorporating the largest number of physical parameters (ASK14, CY14) produce the most stable estimates.

Keywords: GMM, response spectrum, RPA 2024, modal spectral analysis, NGA-West2, RESORCE, seismic hazard, behavior factor.

ملخص

تركز هذه الرسالة لنيل شهادة الماستر على استخدام نماذج متعددة لحركة الأرض لتحسين التقييم الزلزالي للمنشآت. والهدف الرئيسي هو تحديد تأثير اختيار نموذج حركة الأرض على تقدير استجابة المنشأة، ومقارنة هذه التنبؤات بمتطلبات اللوائح الزلزالية الجزائرية. (RPA 2024)

يتضمن الجزء الأول من الرسالة مراجعةً شاملةً للأدبيات، منظمةً في أربعة فصول، تغطي أساسيات علم الزلازل، والمعاملات الفيزيائية لحركة الأرض، ومقاييس شدة الزلازل، والأسس النظرية لنماذج حركة الأرض. أما الجزء الثاني، ذو الطابع التطبيقي، فيتألف من فصلين: يعرض الفصل الخامس نموذجًا لمبنى مرجعي مكون من عشرة طوابق فوق الأرض، تم تصميمه باستخدام برنامج Robot Structural Analysis مع التحقق من مطابقته لمتطلبات RPA 2024 ، بينما يُجري الفصل السادس دراسةً بارامتريةً مقارنةً لتسعة نماذج لحركة الأرض باستخدام طريقة التحليل الطيفي المودالي.

تُظهر النتائج أن نماذج NGA-West2 تتنبأ بتسارعات طيفية أعلى بنحو 15% مقارنةً بنماذج RESORCE ، وأن طيف RPA 2024 يغلف جميع التنبؤات بهامش يبلغ 39% فوق القيمة الوسيطة، وأن النماذج التي تتضمن أكبر عدد من المعاملات الفيزيائية (ASK14) ، (CY14) تُنتج تقديرات أكثر استقرارًا.

الكلمات المفتاحية: نموذج حركة الأرض (GMM) ، طيف الاستجابة، RPA 2024 ، التحليل الطيفي المودالي، -NGA West2 ، RESORCE ، الخطر الزلزالي، معامل السلوك.

Table Des Matières

REMERCIEMENTS

DÉDICACES

DÉDICACE

RÉSUMÉ

ABSTRACT

ملخص

INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
CHAPITRE I : APERÇU SUR LE PHÉNOMÈNE SISMIQUE ET LES ÉVÈNEMENTS SISMIQUES REMARQUABLES	4
INTRODUCTION.....	5
I.1 FONDEMENTS DE LA SISMOLOGIE	5
I.2 RÉSEAUX DE SURVEILLANCE SISMIQUE.....	6
I.3 SÉISME DE KOBE — 17 JANVIER 1995.....	7
I.4 SÉISME DE BOUMERDÈS 21 MAI 2003	8
I.5 SÉISMES DE KAHRAMANMARAS 6 FÉVRIER 2023.....	10
I.6 APPAREILS D'ENREGISTREMENT SISMIQUE	12
I.6.1 LE SISMOGRAPHE (OU SISMOMÈTRE MODERNE)	12
I.6.2 L'ACCÉLÉROGRAPHE (OU CAPTEUR DE MOUVEMENT FORT).....	13
I.7 BASES DE DONNÉES DE MOUVEMENTS FORTS	14
I.7.1 RESORCE ET ESM (ENGINEERING STRONG-MOTION DATABASE).....	14
I.7.2 NGA-WEST2 (NEXT GENERATION ATTENUATION FOR WESTERN US)	15
I.7.3 KIK-NET (KIBAN KYOSHIN NETWORK).....	15
CONCLUSION	16
CHAPITRE II : PARAMÈTRES PHYSIQUES DU MOUVEMENT DU SOL	17
INTRODUCTION.....	18
II.1 EFFETS DE SOURCE	18
II.1.1 CHUTE DE CONTRAINTES ($\Delta\sigma$)	18
II.1.2 MAGNITUDE DE MOMENT (M_w)	19
II.1.3 PROFONDEUR FOCALE, COORDONNÉES ÉPICENTRALES ET MÉCANISME AU FOYER.....	19
II.2 EFFETS DE PROPAGATION D'ONDE	20
II.2.1 DISTANCES DE SOURCE ÉTENDUE : RRUP ET RJB	20
II.2.2 DISTANCES DE SOURCE PONCTUELLE : REPI ET RHYP0.....	20
II.2.3 PARAMÈTRES GÉOMÉTRIQUES AVANCÉS : RX, RY0, AZIMUT ET RCDPP	21
II.3 EFFETS DE SITE.....	21
II.3.1 Vs30 : VITESSE MOYENNE DES ONDES DE CISAILLEMENT	22

II.3.2 PROFONDEURS D'ISOVITESSE : Z1.0, Z1.4 ET Z2.5	22
II.3.3 PARAMÈTRE D'ATTÉNUATION HAUTE FRÉQUENCE K_0 ET FRÉQUENCE DE RÉSONANCE F_0	23
II.3.4 CLASSIFICATION DES SITES ET PARAMÈTRES COMPLÉMENTAIRES	23
CONCLUSION	25
CHAPITRE III : PARAMÈTRES D'INTENSITÉS SISMIQUES	26
INTRODUCTION	27
III.1 PARAMÈTRES DE PIC DU MOUVEMENT DU SOL	27
III.1.1 ACCÉLÉRATION MAXIMALE DU SOL (PGA).....	27
III.1.2 VITESSE MAXIMALE DU SOL (PGV)	28
III.1.3 DÉPLACEMENT MAXIMAL DU SOL (PGD).....	29
III.2 PARAMÈTRES SPECTRAUX	30
III.2.1 ACCÉLÉRATION SPECTRALE (SA).....	30
III.2.2 ACCÉLÉRATION SPECTRALE MOYENNE (AVGSA).....	31
III.3 PARAMÈTRES D'ÉNERGIE CUMULATIVE.....	31
III.3.1 INTENSITÉ D'ARIAS (IA)	31
III.3.2 VITESSE ABSOLUE CUMULÉE (CAV).....	32
III.4 PARAMÈTRES FRÉQUENTIELS	32
III.4.1 SPECTRE D'AMPLITUDE DE FOURIER (FAS).....	32
III.4.2 SPECTRE D'AMPLITUDE EFFICACE (EAS)	32
III.5 PARAMÈTRES DE DURÉE	32
III.5.1 DURÉES SIGNIFICATIVES RELATIVES (RSD).....	33
III.6 PARAMÈTRES COMBINÉS : RATIOS VERTICAUX/HORIZONTAUX	33
III.6.1 RATIOS V/H POUR L'ACCÉLÉRATION SPECTRALE ET LES PARAMÈTRES DE PIC	33
III.6.2 ÉCHELLE D'INTENSITÉ JMA ET CONCEPTION AUX ÉTATS LIMITES (LSD).....	34
CONCLUSION	35
CHAPITRE IV : MODÈLES DE PRÉDICTION SISMIQUES (GMMS)	36
INTRODUCTION	37
IV.1 QU'EST-CE QU'UN MODÈLE DE MOUVEMENT DU SOL (GMM) ?	37
IV.2 ÉVOLUTION DES FORMES FONCTIONNELLES	38
IV.3 STRUCTURE DE LA VARIABILITÉ ALÉATOIRE	39
IV.4 MODÈLES NGA-WEST2 : MÉDIANE ET FORME FONCTIONNELLE	39
IV.4.1 CONSENSUS ET DIVERGENCES ENTRE LES MODÈLES NGA-WEST2	40
IV.5 MODÉLISATION DE LA VARIABILITÉ ALÉATOIRE DANS LES MODÈLES NGA-WEST2	41
CONCLUSION	49
CHAPITRE V : PRÉSENTATION DU BÂTIMENT ET ANALYSE MODALE	50
INTRODUCTION	51

V.1. PRÉSENTATION DU PROJET	52
V.1.1. DESCRIPTION GÉNÉRALE	52
V.1.1.1. Vue de la structure (3D) :.....	52
V.1.1.2. Plan d'architecture RDC et Etage courant:.....	53
V.2.2 CARACTÉRISTIQUES GÉOMÉTRIQUES	56
V.2.3 PARAMÈTRES DE CONCEPTION	56
V.3.SYSTÈME STRUCTUREL	56
V.3.1 TYPE DE CONTREVENTEMENT.....	56
V.3.2 ÉLÉMENTS STRUCTURAUX.....	57
V.3.2.1 Poutres principales (30 × 40 cm ²).....	57
V.3.2.2 Poutres secondaires Chaînages (30 × 30 cm ²)	57
V.3.2.3 Planchers à corps creux (16 + 4 cm).....	57
V.3.2.4 Voiles en béton armé (e = 15 cm).....	58
V.3.2.5 Poteaux (40 × 40 cm ²).....	58
V.3.3 ÉLÉMENTS NON STRUCTURAUX.....	59
V.3.3.1 Planchers Maçonnerie.....	59
V.3.3.2 Escaliers (dalle pleine e = 15 cm).....	59
V.3.3.3 Balcons (dalle pleine e = 15 cm)	60
V.4 MATÉRIAUX UTILISÉES	60
V.4.1 BÉTON ARMÉ	60
V.5. DESCENTE DES CHARGES	61
V.5.1 PLANCHER TERRASSE INACCESSIBLE	61
V.5.2 PLANCHER ÉTAGE COURANT	62
V.6. ETAT LIMITE ET COMBINAISON D'ACTION	62
V.6.1 ÉTATS LIMITES.....	62
V.6.1.1 États limites ultimes (ELU)	62
V.6.1.2 États limites de service (ELS).....	63
V.6.2 CLASSIFICATION DES ACTIONS	63
V.6.2.1 Actions permanentes (G)	63
V.6.2.2 Actions variables (Q).....	63
V.6.2.3 Actions accidentelles (E)	63
V.6.3 COMBINAISONS D'ACTIONS – RPA 2024.....	64
V.6.3.1 Situation durable – ELU	64
V.6.3.2 Situation durable – ELS.....	64
V.6.3.3 Situation accidentelle – Combinaison sismique.....	64
V.7. MODÉLISATION NUMÉRIQUE SOUS ROBOT STRUCTUREL ANALYSAIS 2017	64
V.7.1 PRÉSENTATION DU LOGICIEL	64

V.7.2 JUSTIFICATION DU CHOIX DE ROBOT STRUCTURAL	65
V.8 ANALYSE MODALE	65
V.8.1 GÉNÉRALITÉS	65
V.8.2 RÉSULTATS DE L'ANALYSE MODALE	65
V.8.3 INTERPRÉTATION DES MODES PROPRES	67
V.8.3.1 Mode 1 — Translation suivant l'axe X	67
V.8.3.2 Mode 2 — Translation suivant l'axe Y	67
V.8.3.3 Mode 3 — Rotation	68
V.9 VÉRIFICATION RÉGLEMENTAIRE – RPA2024	68
V.9.1 PÉRIODE FONDAMENTALE EMPIRIQUE.....	68
V.9.2 FORCE SISMIQUE À LA BASE	68
V.9.3 VÉRIFICATION DES DÉPLACEMENTS INTER-ÉTAGES	69
V.9.4 SPECTRE DE CALCUL RPA 2024	70
V.9.5 EFFET P-Δ (SECOND ORDRE).....	71
CONCLUSION	74
CHAPITRE VI : ÉTUDE PARAMÉTRIQUE DES NEUF GMMS ET COMPARAISON AVEC LE RPA 2024	75
INTRODUCTION.....	76
VI.1 PRÉSENTATION DES NEUF GMMS UTILISÉS.....	76
VI.2 SCÉNARIO SISMIQUE DE RÉFÉRENCE	77
VI.3 RÉSULTATS : COMPARAISON DES SPECTRES DE RÉPONSE	79
VI.3.1 ACCÉLÉRATIONS SPECTRALES PRÉDITES AU PREMIER MODE	79
VI.3.2. SÉLECTION DU GMM LE PLUS ADAPTÉ À LA SISMICITÉ ALGÉRIENNE	84
VI.4 PARAMÈTRES RÉGLEMENTAIRES RPA2024	85
VI.4.1 SPECTRE DE RÉPONSE ÉLASTIQUE RPA2024	85
VI.4.2 ESTIMATION DE LA PÉRIODE FONDAMENTALE SELON RPA2024.....	87
VI.4.3. COMPARAISON GLOBALE : GMMS vs. RPA2024	87
VI.4.4.ANALYSE QUANTITATIVE PAR FAMILLE DE GMMS.....	89
VI.4.5.POSITIONNEMENT DU RPA 2024.....	90
VI.6 ANALYSE ET DISCUSSION	91
CONCLUSION GÉNÉRALE	94
PERSPECTIVES.....	96
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	98
ANNEXE	I
PROCÉDURE D'UTILISATION DU BOT TÉLÉGRAMME OPENGSIM.....	II
1. PRÉSENTATION DE L'OUTIL.....	II
2. ÉTAPES D'UTILISATION DU BOT	II

LISTE DES FIGURES :

FIGURE I-1 LES CONSÉQUENCES DU TREMBLEMENT DE TERRE À KOBE	8
FIGURE I-2 SÉISME DE BOUMERDES HTTPS://WWW.CRAAG.DZ/INDEX.PHP/SEISME-DE-BOUMERDES/	10
FIGURE I-3 SÉISME EN TURQUIE À KAHRAMANMARAS	11
FIGURE I-4 SÉISME EN TURQUIE PLUS DE 2300 MORTS ET PRÈS DE 10000 BLESSÉS.	12
FIGURE I.5 LES SISMOGRAPHES.....	13
FIGURE I-6 ACCÉLÉROMÈTRE CAPACITIF.....	14
FIGURE III.1 PONT HIGASHI-KOBE, SÉISME DE HYOGO-KEN NANBU 1995 VALEURS D'ACCÉLÉRATION MAXIMALE DU SOL (PGA) ENREGISTRÉES	28
FIGURE III.2 VALEURS DE VITESSE MAXIMAL DU SOL (PGV) ENREGISTRÉES SÉISME DE LUSHAN	29
FIGURE III.3 SÉISME DU 2000-10-06, M7.3, STATION BO.EHM004 VALEURS D'ACCÉLÉRATION (PGA) ET DE DÉPLACEMENT MAXIMAL DU SOL (PGD) ENREGISTRÉES.....	30
FIGURE. IV.1 SCHÉMA ILLUSTRATIF DES EFFETS INFLUENÇANT LE MOUVEMENT DU SOL À LA SURFACE (YAMADA, 2013)	42
FIGURE. IV.2. COMPOSANTES INTER-ÉVÉNEMENTS (BETWEEN-EVENTS) ET INTRA-ÉVÉNEMENTS (WITHIN-EVENTS) DE LA VARIABILITÉ ALÉATOIRE DU MOUVEMENT SISMIQUE (STRASSER ET AL. 2009)	44
FIGURE. IV.3. FORME FONCTIONNELLE DONNÉE PAR CHIOU AND YOUNGS (2014)	45
FIGURE. IV.4. SPECTRES DE RÉPONSE DES 5 GMPES POUR UN SCÉNARIO	46
FIGURE. IV.5. COMPARAISON ENTRE LES GMPES ÉLABORÉES POUR LES ÉVÉNEMENTS DE SUBDUCTION AU JAPON ET LES PGA ENREGISTRÉS LORS DU SÉISME DE TOHOKU.....	46
FIGURE. IV.6. COMPARAISON DE L'ÉCART TYPE (σ) POUR M=5 POUR DES SÉISMES À FAILLE DÉCROCHANT À UNE DISTANCE DE RUPTURE $RRUP$ ÉGALE À 30 KM ET POUR $VS_{30} = 760$ M/S (GREGOR ET AL. 2014).	47
FIGURE. IV.7. COMPARAISON ENTRE L'ÉCART TYPE (σ) VS PÉRIODES (S) DE CY2008 ET CY2014 (CHIOU AND YOUNGS 2013).	47
FIGURE. IV.8. IMPACT DE LA VALEUR DE σ SUR L'ALÉA SISMIQUE PROBABILISTE (BOMMER AND ABRAHAMSON, 2006).	48
FIGURE. IV.9. ÉVOLUTION DE σ DURANT LES 30 DERNIÈRES ANNÉES (STRASSER ET AL. 2009) ...	48
FIGURE IV.10. NOMBRE DE PARAMÈTRES UTILISÉS DANS LES GMPES ENTRE 1964-2009 (BOMMER ET AL. 2010).....	48
FIGURE.V.1 VUE DE BÂTIMENT R+10	52
FIGURE.V. 2 VUE DU BÂTIMENT EN PLAN RDC	53
FIGURE.V.3 VUE DU BÂTIMENT EN PLAN ETAGE COURANT	54
FIGURE.V.4. VUE DU BÂTIMENT EN ÉLÉVATION	55
FIGURE V.5. DIMENSIONS D'UNE POUTRE	57
FIGURE V.6. COUPE LONGITUDINALE D'UN PLANCHER À CORPS CREUX TYPE (16+4)	58
FIGURE V.7. VOILE EN ÉLÉVATION.....	58

FIGURE V.8. POTEAUX EN BÉTON ARMÉ D'UNE SECTION RECTANGULAIRE	59
FIGURE V .9. ESCALIER EN BÉTON ARMÉ	60
FIGURE V.10. COUPE SUR BALCON	60
FIGURE V.11. COUPE TRANSVERSALE D'UN PLANCHER TERRASSE INACCESSIBLE.....	61
FIGURE V.12COUPE TRANSVERSALE D'UN PLANCHER ÉTAGE COURANT.	62
FIGURE. V.13. LE PREMIER MODE.....	67
FIGURE. V.14 LE DEUXIÈME MODE	67
FIGURE. V.15. LE TROISIÈME MODE.....	68
FIGURE VI.1 SPECTRES DE RÉPONSE EN ACCÉLÉRATION SA(T) DES 9 GMMS POUR LE SCÉNARIO DE RÉFÉRENCE. LES MODÈLES NGA-WEST2 SONT EN TRAITS PLEINS, LES MODÈLES RESORCE EN POINTILLÉS.	79
FIGURE VI.2A DÉPLACEMENT AU SOMMETD_SRSS EN DIRECTION X (CM).....	81
FIGURE VI.2B DÉPLACEMENT AU SOMMETD_SRSS EN DIRECTION Y (CM)	82
FIGURE VI.3 DISPERSION ALÉATOIRE Σ PAR GMM. LES MODÈLES NGA-WEST2 PRÉSENTENT DES Σ PLUS FAIBLES QUE LES MODÈLES RESORCE.	83
FIGURE VI. — COMPARAISON DU SPECTRE GMMS VS RPA 2024(ZONE VI, SITE S3, I=1.0)	86
FIGURE VI.7 COMPARAISON DU SPECTRE RPA2024 AVEC LES SPECTRES MÉDIANS DES 9 GMMS. LE SPECTRE RPA2024 ENVELOPPE LARGEMENT LES PRÉDICTIONS DES GMMS.	86
FIGURE VI.8 — ACCÉLÉRATION SPECTRALE À T1 PAR GMM, AVEC MÉDIANE GMMS ET RPA2024 ÉLASTIQUE.....	88
FIGURE.VI.9 DISTRIBUTIONS DU DÉPLACEMENT CUMULÉ D'ÉTAGE (STORY SHEAR) SUR LA HAUTEUR DU BÂTIMENT POUR LA DIRECTION X.	88
FIGURE.VI.10 DISTRIBUTION DES FORCES ÉLASTIQUES D'ÉTAGE SUR LA HAUTEUR DU BÂTIMENT POUR LA DIRECTION X.	91

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU II.1 – CLASSIFICATION DES SOLS SELON VS30 — RPA 2024 / EUROCODE 8.....	22
TABLEAU V.1 – CARACTÉRISTIQUES GÉOMÉTRIQUES DU BÂTIMENT	56
TABLEAU V.2 – DESCENTE DES CHARGES : PLANCHER TERRASSE INACCESSIBLE.....	61
TABLEAU V.3 – DESCENTE DES CHARGES : PLANCHER ÉTAGE COURANT	62
TABLEAU V.4 – RÉSULTATS DE L'ANALYSE MODALE (19 MODES CALCULÉS).....	66
TABLEAU V.5 – DÉPLACEMENTS INTER-ÉTAGES (SENS VX – UX) ET VÉRIFICATION RÉGLEMENTAIRE	70
TABLEAU V.6 – PARAMÈTRES DU SPECTRE DE TYPE 1 (ZONES IV, V ET VI)	71
TABLEAU V.7 – PARAMÈTRES DU SPECTRE DE TYPE 2 (ZONES I, II ET III).....	71
TABLEAU V.8 – VALEURS DU COEFFICIENT D'ACCOMPAGNEMENT Ψ POUR LA CHARGE D'EXPLOITATION QI	71
TABLEAU V.9. – VÉRIFICATION DE L'EFFET P- Δ ($\Theta_k \leq 0,10$)	73
TABLEAU VI.1 RÉCAPITULATIF DES NEUF GMMS UTILISÉS DANS L'ÉTUDE PARAMÉTRIQUE.....	77
TABLEAU VI.2 PARAMÈTRES DU SCÉNARIO SISMIQUE DE RÉFÉRENCE	78
TABLEAU VI.3 — ACCÉLÉRATIONS SPECTRALES AU MODE FONDAMENTAL $T_1 = 1,04$ S	79
TABLEAU VI.4. DÉPLACEMENTS CUMULÉS DANS LES DEUX DIRECTIONS X ET Y AU MODE FONDAMENTAL $T_1 = 1,04$ S POUR LES 09 GMMS.	81
TABLEAU VI.5— PARAMÈTRES RÉGLEMENTAIRES RPA2024 POUR LE BÂTIMENT DE RÉFÉRENCE.....	85
TABLEAU VI.6 COMPARAISON DES PRÉDICTIONS GMMS ET RPA2024.....	87
TABLEAU VI.7. ANALYSE DE DÉPLACEMENT DES MODÈLES NGA-WEST2.....	89
TABLEAU VI.8. ANALYSE DE DÉPLACEMENT DES MODÈLES RESORCE.....	90
TABLEAU VI.9. COMPARAISON ENTRE LES DEUX MODÈLES ET RPA 2024.....	90

Notations et symbols:

Mw	Magnitude de moment (échelle de Kanamori).
M0	Moment sismique, exprimé en N·m.
$\Delta\sigma$	Chute de contraintes sur le plan de faille (MPa).
R	Rayon de la rupture sismique (modèle circulaire de Brune).
ML	Magnitude locale (échelle de Richter).
Fc	Fréquence de coin du spectre source.
Rrup	Distance minimale tridimensionnelle entre le site et la surface de rupture.
Rjb	Distance de Joyner-Boore : distance horizontale au plan de rupture projeté en surface.
Rhypo	Distance hypocentrale : distance en 3D entre l'hypocentre et le site.
Repi	Distance épacentrale : distance horizontale entre l'épicentre et le site.
Rx	Distance horizontale signée perpendiculaire à la direction de la faille (hangingwall > 0).
Ry0	Distance horizontale parallèle à la direction de la faille depuis son extrémité.
H	Profondeur focale (hypo-depth), en km.
Ztor	Profondeur au sommet de la surface de rupture (km).
W	Largeur de la surface de rupture (km).
Dip	Pendage de la faille (°).
Rake	Angle de glissement sur le plan de faille (°).
Vs30	Vitesse moyenne des ondes de cisaillement sur les 30 premiers mètres (m/s).
h_i	Épaisseur de la couche i (m).
V_{si}	Vitesse de cisaillement à travers la couche i (m/s).
Z1.0	Profondeur à laquelle Vs atteint 1,0 km/s (m).
Z1.4	Profondeur à laquelle Vs atteint 1,4 km/s (m).
Z2.5	Profondeur à laquelle Vs atteint 2,5 km/s (km).
K0	Paramètre d'atténuation haute fréquence des couches superficielles (kappa).
f0	Fréquence fondamentale de résonance du site (Hz).
H	Épaisseur totale du profil de sol (m).
PGA	Accélération maximale du sol : $PGA = \max a(t) $.
PGV	Vitesse maximale du sol : $PGV = \max v(t) $.
PGD	Déplacement maximal du sol : $PGD = \max d(t) $.
SA(T, ξ)	Accélération spectrale d'un oscillateur SDOF de période T et d'amortissement ξ .

SA1	Accélération spectrale à $T = 1,0$ s.
SDI(T, ξ)	Déplacement spectral : $SDI = (T/2\pi)^2 \times SA(T, \xi)$.
AvgSA	Accélération spectrale moyenne géométrique sur une plage de périodes $[T_{min}, T_{max}]$.
IA	Intensité d'Arias : $IA = (\pi/2g) \int [a(t)]^2 dt$ (m/s).
CAV	Vitesse absolue cumulée : $CAV = \int a(t) dt$ (cm/s).
FAS	Spectre d'amplitude de Fourier du signal d'accélération.
EAS(f)	Spectre d'amplitude efficace : $EAS = \sqrt{(FH1 ^2 + FH2 ^2)/2}$.
RSD	Durée significative relative (D5-75, D5-95, D20-80) basée sur la courbe de Husid.
V/H	Ratio composante verticale sur composante horizontale du mouvement du sol.
THV	Norme maximale du vecteur vitesse horizontal : $THV = \max \sqrt{(vNS^2 + vEW^2)}$.
Y	Amplitude du paramètre d'intérêt (PGA, PGV, SA) prédit par un GMM.
a, b, c, d	Coefficients de régression d'une GMPE.
σ (σ_{LnSA})	Écart-type total de la variabilité aléatoire du GMM en échelle logarithmique.
T	Écart-type inter-événement (between-event) du GMM.
Φ	Écart-type intra-événement (within-event) du GMM.
δ (B_e, W_{es})	Résidus aléatoires du GMM : inter-événement B_e et intra-événement W_{es} .
M(X_{es}, θ)	Médiane du GMM : partie expliquée de la prédiction.
Fsite	Facteur d'amplification de site dans une GMPE (linéaire + non-linéaire).
A	Coefficient d'accélération de zone (RPA 2024).
I	Facteur d'importance du bâtiment (RPA 2024).
S	Coefficient de site (RPA 2024).
H	Facteur de correction d'amortissement (RPA 2024).
R (R_a)	Coefficient de comportement de la structure.
QF	Facteur de qualité de la construction (RPA 2024).
T1, T2, T3	Périodes caractéristiques du spectre associées à la classe de site.
Sa_e/g	Spectre d'accélération élastique normalisé par g (RPA 2024).
Sa_d/g	Spectre de calcul (conception) normalisé par g : Sa_e divisé par R.
CT	Coefficient empirique en fonction du système de contreventement.
T Empirique	Période fondamentale empirique : $T = CT \times H^{(3/4)}$.
T1	Période fondamentale de vibration de la structure (mode 1).
T2	Période du deuxième mode de vibration.

T3	Période du troisième mode de vibration.
Ξ	Taux d'amortissement critique (%).
m_i	Masse par niveau (kg).
M_{tot}	Masse totale de la structure (kg).
W	Poids total de la structure ou poids par niveau (kN).
V	Force sismique totale (effort tranchant à la base) (kN).
λ (Δ)	Coefficient de correction de la force sismique (RPA 2024).
F_i	Force sismique horizontale au niveau i (kN).
V_k	Effort tranchant d'étage au niveau k (kN).
Δ_k	Déplacement horizontal absolu au niveau k (cm).
Δ_k	Déplacement inter-étage au niveau k : $\Delta_k = \delta_k - \delta_{k-1}$ (cm).
Δ_{k_lim}	Déplacement inter-étage limite réglementaire : $0,0075 \times h_k$ (cm).
Θ_k	Coefficient de stabilité inter-étage (effet P- Δ) : $\Theta_k = P_k \cdot \Delta_k / (V_k \cdot h_k)$.
P_k	Poids total au-dessus du niveau k (kN).
H_k	Hauteur du niveau k (m).
d_{SRSS}	Déplacement au sommet calculé par combinaison SRSS (cm).
G	Charge permanente (kN/m ²).
Q	Charge d'exploitation (kN/m ²).
E_x, E_y	Effet sismique selon les directions X et Y.
Ψ	Coefficient de pondération des charges d'exploitation (RPA 2024).
ρ (kN/m³)	Masse volumique du matériau.
E	Épaisseur d'une couche ou d'un élément (m).
f_{c28}	Résistance caractéristique du béton à la compression à 28 jours (MPa).
F_e	Limite élastique de l'acier (MPa).
D_x, L_x	Longueur totale du bâtiment en X (m).
D_y, L_y	Largeur totale du bâtiment en Y (m).
N	Nombre de niveaux au-dessus du sol.
H_k	Hauteur totale du bâtiment (m).

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'évaluation du risque sismique et le dimensionnement parasismique constituent des enjeux majeurs pour la sécurité des populations et la résilience des infrastructures, en particulier dans les régions à sismicité modérée à élevée telles que le nord de l'Algérie. La définition du mouvement sismique de calcul représente une étape déterminante de tout projet de construction parasismique, car elle conditionne directement les niveaux de sollicitation retenus pour le dimensionnement des éléments structuraux. Traditionnellement, les ingénieurs s'appuient sur les spectres de réponse réglementaires tels que ceux prescrits par le Règlement Parasismique Algérien (RPA) pour caractériser la demande sismique de calcul. Ces spectres normatifs, par nature conservateurs, sont calibrés pour envelopper une large gamme de scénarios sismiques possibles dans une zone donnée. Toutefois, ils ne reflètent pas nécessairement les particularités d'un site spécifique ni la diversité des mécanismes de rupture susceptibles de l'affecter. C'est précisément dans cette lacune que réside l'intérêt des modèles de prédiction du mouvement du sol (Ground Motion Models-GMMs), qui permettent d'estimer l'intensité des secousses en intégrant finement les caractéristiques de la source sismique, du trajet de propagation et des conditions géotechniques locales.

La problématique centrale de ce mémoire peut être formulée ainsi : dans quelle mesure le choix d'un GMM influence-t-il l'estimation de la réponse sismique d'une structure courante, et comment les prédictions issues de ces modèles se positionnent-elles par rapport aux prescriptions réglementaires du RPA 2024 ?

La valeur ajoutée de ce travail réside dans la mise en œuvre d'une méthodologie originale combinant neuf GMMs de dernière génération issus des projets NGA-West2 et RESORCE avec une analyse modale spectrale appliquée à un bâtiment réel R+10 en béton armé, modélisé sous Robot Structural Analysis. Cette approche multi-modèles, rarement conduite dans le contexte algérien, permet non seulement de quantifier la variabilité inter-modèles mais aussi de valider la cohérence du spectre RPA 2024 face aux prédictions empiriques les plus récentes.

Le présent mémoire s'articule autour de six chapitres organisés en deux parties. La première partie, consacrée à la recherche bibliographique, comprend quatre chapitres : le Chapitre I offre un aperçu du phénomène sismique à travers trois événements destructeurs majeurs ; le Chapitre II présente les paramètres physiques du mouvement du sol ; le Chapitre III décrit les mesures d'intensité sismique ; le Chapitre IV expose les fondements théoriques des GMMs.

La seconde partie, à caractère applicatif, comprend le Chapitre V (présentation du bâtiment et analyse modale) et le Chapitre VI (étude paramétrique comparative et confrontation au RPA 2024).

CHAPITRE I :

**Aperçu sur le phénomène sismique et
les évènements sismiques
remarquables**

Introduction

La sismologie constitue l'une des branches fondamentales des sciences de la Terre, dédiée à l'étude de la genèse, de la propagation et des effets des ondes élastiques à travers le globe terrestre. Cette discipline revêt une importance capitale pour le génie parasismique, car elle fournit les données et les modèles nécessaires à la compréhension du phénomène sismique, depuis la rupture de la faille jusqu'aux effets destructeurs en surface.

Ce premier chapitre s'articule autour de trois axes complémentaires. Dans un premier temps, les fondements de la sismologie sont présentés, incluant les mécanismes de génération des séismes, les différents types d'ondes sismiques et les paramètres caractéristiques (magnitude, intensité). Dans un second temps, trois événements sismiques majeurs le séisme de Kobe (1995), le séisme de Boumerdès (2003) et les séismes de Kahramanmaraş (2023) sont analysés en détail afin d'illustrer les leçons tirées par la communauté scientifique et leurs répercussions sur l'évolution des pratiques du génie parasismique. Enfin, l'instrumentation sismologique et les bases de données de mouvements forts sont décrites, constituant le socle technique indispensable à toute analyse d'aléa sismique et à tout dimensionnement parasismique moderne.

I.1 Fondements de la sismologie

La sismologie est la science qui étudie la genèse, la propagation et les effets des ondes élastiques à travers le globe terrestre, révélant une planète en perpétuelle activité dynamique. Un séisme, ou tremblement de terre, résulte de la libération brutale d'une énergie élastique immense accumulée le long de failles géologiques par le mouvement des plaques tectoniques. Ce processus, décrit par la théorie du rebond élastique formulée par Reid (1910), se produit lorsque les contraintes mécaniques sur les roches dépassent leur seuil de résistance à la rupture. Chaque année, les instruments détectent environ 500 000 séismes à travers le monde, dont environ 100 000 sont ressentis par l'homme et une centaine causent des dommages significatifs (USGS, 2023). Le foyer du séisme, ou hypocentre, se situe en profondeur là où la rupture débute, tandis que l'épicentre désigne sa projection verticale à la surface, là où les secousses sont généralement les plus violentes.

La mesure de l'énergie libérée s'effectue principalement par la magnitude de moment (M_w), une échelle logarithmique développée par Kanamori (1977) qui a remplacé l'ancienne échelle de Richter pour les séismes de forte puissance. Il est crucial de noter qu'une augmentation d'un degré sur cette échelle représente une libération d'énergie environ 31,6 fois

supérieure ; ainsi, un séisme de magnitude 9 libère près de 1 000 fois plus d'énergie qu'un séisme de magnitude 7. À titre de comparaison, le plus grand séisme jamais enregistré, celui de Valdivia au Chili en 1960 avec une magnitude de 9,5, a libéré une énergie équivalente à plusieurs dizaines de milliers de bombes atomiques de type Hiroshima (Kanamori & Brodsky, 2004). Parallèlement à la magnitude, les sismologues utilisent l'intensité (échelle EMS-98 ou Mercalli modifiée), qui mesure les effets de surface et les dégâts observés, une donnée essentielle pour le génie parasismique car elle dépend de la profondeur du foyer et de la nature du sol local.

La propagation de l'énergie sismique se fait sous forme d'ondes de volume et d'ondes de surface, chacune possédant des caractéristiques distinctes que les stations de surveillance analysent en temps réel. Les ondes P (primaires) sont les plus rapides, se propageant par compression à environ 6 km/s dans la croûte, et sont les premières détectées par les sismomètres. Elles sont suivies par les ondes S (secondaires), plus lentes et transversales, qui ne se propagent pas dans les milieux liquides, ce qui a permis de prouver que le noyau externe de la Terre est fluide (Lay & Wallace, 1995). Enfin, les ondes de surface (Love et Rayleigh) arrivent en dernier mais sont les plus destructrices, car elles transportent l'essentiel de l'énergie le long de la croûte terrestre avec des amplitudes de vibration beaucoup plus élevées, provoquant le cisaillement et le soulèvement des structures bâties.

I.2 Réseaux de surveillance sismique

Pour surveiller l'activité sismique à l'échelle planétaire, la communauté scientifique s'appuie sur des réseaux de stations sismologiques ultra-sensibles, capables de détecter une vibration à l'autre bout du monde. Le réseau de référence est le GSN (Global Seismographic Network), qui déploie plus de 150 stations de pointe réparties uniformément sur tous les continents et dans les fonds océaniques (Butler et al., 2004). Aux États-Unis, le NEIC (National Earthquake Information Center), géré par l'USGS au Colorado, centralise les données mondiales pour fournir des alertes en quelques minutes. En Europe, le réseau GEOSCOPE, piloté par l'Institut de Physique du Globe de Paris, constitue l'un des piliers de la recherche fondamentale, tandis que le Centre Sismologique Euro-Méditerranéen (CSEM) coordonne la surveillance en temps réel pour la région méditerranéenne, zone de forte convergence tectonique entre l'Afrique et l'Eurasie.

En Algérie, pays situé à la limite des plaques tectoniques africaine et eurasiennne, la surveillance est assurée par le CRAAG (Centre de Recherche en Astronomie, Astrophysique

et Géophysique), qui gère le Réseau National de Surveillance Sismologique (ADSN). Ce dispositif est composé de dizaines de stations numériques de nouvelle génération qui transmettent leurs données par satellite, permettant une localisation quasi instantanée des foyers sismiques. Cette infrastructure est complétée par un réseau de forte accélération, géré par le CGS (Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique), dont les accélérographes mesurent les mouvements violents du sol à proximité des grandes infrastructures (Laouami et al., 2006). Ces données sont vitales pour l'ingénieur, car elles permettent de calibrer les spectres de réponse des règlements parasismiques (RPA) et de mieux comprendre comment les sols locaux, comme les sédiments mous de la plaine de la Mitidja, peuvent amplifier les ondes sismiques.

I.3 Séisme de Kobe — 17 janvier 1995

Le séisme de Kobe, officiellement nommé le grand séisme de Hanshin-Awaji, s'est produit le 17 janvier 1995 à 5 h 46 du matin, marquant l'un des tournants les plus critiques de l'histoire de la sismologie moderne. Avec une magnitude de moment (M_w) de 6,9 et une profondeur hypocentrale de seulement 16 kilomètres, la rupture s'est propagée le long de la faille de Nojima, traversant directement des zones urbaines densément peuplées. Ce séisme de type décrochant a généré des accélérations au sol extrêmement violentes, atteignant des pics dépassant 0,8 g, ce qui a soumis les structures à des forces horizontales et verticales dépassant largement les capacités de calcul de l'époque (Nakamura et al., 1996). La proximité de l'épicentre par rapport à la ville de Kobe a transformé cet événement en un cas d'étude unique sur la vulnérabilité des infrastructures métropolitaines modernes face à un choc direct.

Sur le plan du génie civil, les effets ont été catastrophiques et ont révélé des failles technologiques majeures que l'on croyait résolues. L'effondrement spectaculaire de l'autoroute surélevée Hanshin sur plus de 600 mètres a démontré l'insuffisance du confinement du béton armé dans les piles de ponts, provoquant une rupture par cisaillement tragique. Plus surprenant encore pour les experts, le séisme a mis en évidence la vulnérabilité des structures en acier que l'on pensait hautement ductiles. De nombreuses ruptures fragiles ont été observées au niveau des soudures des cadres à nœuds rigides, un phénomène de fatigue prématurée lié à la rapidité et à la violence des cycles de charge (Nakashima et al., 1998). Parallèlement, le phénomène de liquéfaction des sols a ravagé les zones portuaires et les îles artificielles comme Port Island, où le sol saturé d'eau s'est transformé en une masse fluide, provoquant l'enfoncement et le basculement de structures massives pourtant intactes.

L'importance historique de Kobe réside dans le changement total de paradigme qu'il a imposé à l'échelle mondiale. Avant 1995, le dogme du génie parasismique reposait sur la résistance aux forces ; après Kobe, la priorité est devenue le contrôle des déplacements et la ductilité (Priestley, 2000). Cet événement a donné naissance à la conception basée sur la performance (Performance-Based Seismic Design), une approche qui ne se contente plus d'éviter l'effondrement, mais qui définit des niveaux de dommages acceptables pour que les bâtiments puissent rester fonctionnels après la secousse. Le Japon a réagi en investissant massivement dans la recherche, créant les réseaux de surveillance K-NET et KiK-net, qui constituent aujourd'hui la base de données de mouvements forts la plus précise au monde (Aoi et al., 2004), et en généralisant les technologies d'isolation sismique à la base pour les infrastructures critiques.



Figure I-1 Les conséquences du tremblement de terre à kobe

1995https://www.reddit.com/r/CatastrophicFailure/comments/8fhaq9/the_aftermath_of_an_earthquake_in_kobe_japan_1995/?tl=fr

I.4 Séisme de Boumerdès 21 mai 2003

Le séisme de Boumerdès s'est déclenché le 21 mai 2003 à 19 h 44 min 19 s (heure locale), avec un épicentre localisé à $36,91^\circ$ Nord et $3,58^\circ$ Est, soit à environ 7 kilomètres au large de Zemmouri. Sur le plan sismologique, il s'agissait d'une rupture de type faille inverse (compression) avec une direction Nord-Est/Sud-Ouest et un pendage vers le Sud-Est d'environ 45 degrés. La magnitude de moment (M_w) de 6,8 a libéré une énergie équivalente à une rupture de faille d'environ 50 kilomètres de long sur 15 kilomètres de large, provoquant

un soulèvement tectonique du rivage observé entre 0,50 et 0,75 mètre le long de la côte (Meghraoui et al., 2004).

Sur le plan du génie parasismique, les enregistrements des réseaux de forte accélération du CGS ont fourni des données cruciales pour la réingénierie du pays. La station de Keddara a enregistré une accélération horizontale maximale (PGA) de 0,34 g, tandis que celle de Dar El Beïda a atteint 0,52 g, avec des spectres de réponse montrant des pics d'énergie très élevés dans les basses périodes (entre 0,1 s et 0,5 s), ce qui correspond précisément aux fréquences propres de vibration des bâtiments de faible et moyenne hauteur (2 à 5 étages) qui ont été les plus touchés (Laouami et al., 2006). L'analyse post-sismique a mis en évidence une pathologie structurelle majeure : le non-respect du principe « poteaux forts – poutres faibles ». La rupture s'est produite quasi systématiquement dans les nœuds de calcul et les têtes de poteaux à cause d'un espacement excessif des cadres (armatures transversales) et d'une longueur de recouvrement des aciers longitudinaux insuffisante, empêchant la formation de rotules plastiques et menant à l'effondrement brutal par instabilité globale.

L'importance de ce séisme réside dans le basculement législatif opéré par le décret ministériel du 30 juillet 2003, modifiant le Document Technique Réglementaire DTR BC 2-48. Cette révision, devenue le RPA 99 (version 2003), a reclassé les zones de sismicité, faisant passer les wilayas d'Alger et de Boumerdès de la Zone II (sismicité moyenne) à la Zone III (haute sismicité). Ce changement a imposé une augmentation directe des coefficients de force sismique de calcul et a introduit des dispositions constructives strictes sur le confinement du béton et la qualité des agrégats (CGS, 2003).

Les conséquences ont été massives et multidimensionnelles. Le bilan officiel fait état de 2 266 décès et de plus de 10 000 blessés, laissant environ 200 000 personnes sans abri. Les dommages matériels ont été évalués à environ 5 milliards de dollars, avec plus de 19 000 bâtiments totalement détruits. Sur le plan géologique, le séisme a également généré un tsunami modéré qui s'est propagé à travers la Méditerranée, endommageant plus de 200 embarcations dans les ports des îles Baléares (Alasset et al., 2006).



Figure I-2 Séisme de Boumerdes
<https://www.craag.dz/index.php/seisme-de-boumerdes/>

I.5 Séismes de Kahramanmaras 6 février 2023

Les séismes de Kahramanmaras, survenus le 6 février 2023 en Turquie et en Syrie, représentent l'une des séquences sismologiques les plus violentes et les plus instructives du XXI^e siècle. La tragédie a débuté à 04 h 17 (heure locale) par une première secousse de magnitude de moment (M_w) 7,8, suivie seulement neuf heures plus tard par un second séisme indépendant de magnitude 7,5. Ces événements se sont produits le long du système de la faille est-anatolienne, une frontière de plaques majeure où la plaque arabique pousse la plaque anatolienne vers l'ouest. La rupture a été d'une ampleur exceptionnelle, s'étendant sur plus de 300 kilomètres avec des déplacements horizontaux (décrochements sénestres) ayant atteint par endroits 6 à 9 mètres, provoquant une signature sismologique d'une puissance rare enregistrée par toutes les stations du globe (AFAD, 2023).

Sur le plan du génie parasismique, les effets ont été d'une brutalité extrême, révélant des accélérations au sol dépassant parfois 1 g, ce qui dépasse largement les seuils de calcul de la plupart des règlements internationaux. L'analyse des défaillances a mis en lumière le phénomène d'étage souple (soft storey), où les rez-de-chaussée commerciaux dépourvus de murs de contreventement se sont littéralement effondrés, entraînant l'effondrement total des étages supérieurs en « pancake collapse ». Malgré l'existence d'un code de construction turc très moderne datant de 2018, la catastrophe a révélé un problème systémique de non-

conformité, exacerbé par des « amnisties immobilières » ayant régularisé des milliers de bâtiments non sécurisés (Erdik et al., 2023).

L'importance de cet événement réside toutefois dans un contraste technologique saisissant qui valide les solutions de pointe du génie parasismique moderne. Alors que des milliers d'immeubles classiques s'effondraient, plusieurs hôpitaux de la région, équipés de systèmes d'isolation sismique à la base, sont restés non seulement debout mais totalement opérationnels durant et après les secousses.

Ces dispositifs, qui séparent la structure du mouvement du sol grâce à des appuis en élastomère ou des isolateurs à friction, ont permis d'absorber l'énergie tellurique et de protéger les équipements médicaux ultra-sensibles. Le bilan humain, dépassant les 59 000 décès en Turquie et en Syrie, a forcé une prise de conscience mondiale sur la nécessité d'un contrôle rigoureux de l'application des normes, au-delà de la simple existence de règlements théoriques (EERI, 2023).



Figure I-3 Séisme en Turquie à Kahramanmaraş

<https://www.lesoir.be/493521/article/2023-02-06/seisme-en-turquie-kahramanmaras-une-course-contre-la-montre-pour-extirper-les>



Figure I-4séisme en Turquie plus de 2300 morts et près de 10000 blessés.

<https://www.rtl.fr/actu/international/turquie-un-seisme-de-magnitude-7-8-fait-de-nombreux-morts-7900232862>

I.6 Appareils d'enregistrement sismique

L'instrumentation sismologique représente le fondement technique indispensable à la compréhension des phénomènes telluriques et à la sécurisation des infrastructures humaines. Ces appareils, bien que reposant sur le principe physique universel de l'inertie d'une masse suspendue, se déclinent en deux familles d'instruments aux objectifs distincts : le sismographe et l'accélérographe (Havskov & Alguacil, 2016).

I.6.1 Le sismographe (ou sismomètre moderne)

Le sismographe est l'instrument de base du sismologue chercheur. Son rôle est de détecter les vibrations les plus infimes du sol, qu'elles proviennent d'un séisme à l'autre bout du monde ou d'une activité tectonique locale mineure. C'est un instrument de haute précision qui mesure et enregistre les variations de la vitesse ou du déplacement du sol en fonction du temps. Il se compose d'un capteur (le sismomètre) qui transforme le mouvement mécanique en signal électrique, et d'un système d'acquisition qui numérise ce signal. Il utilise un pendule à large bande (broadband) capable de capter une immense gamme de fréquences. Le système est conçu pour être extrêmement sensible afin de détecter des mouvements de l'ordre du nanomètre. Parmi ses utilisations principales figurent la localisation des séismes (détermination de l'épicentre et de la profondeur hypocentrales), l'étude de la structure interne du globe (croûte, manteau, noyau) grâce à la vitesse de propagation des ondes, ainsi que la

surveillance globale de l'activité des plaques tectoniques à l'échelle planétaire (réseaux GSN ou GEOSCOPE).

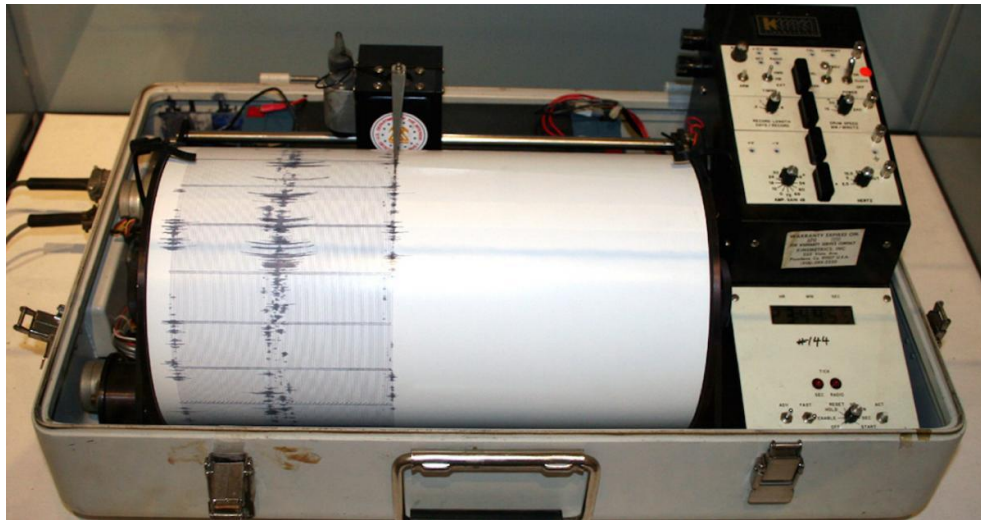


Figure I.5 Les sismographes

https://www.sciencepresse.qc.ca/sites/default/files/styles/og_image/public/2020-04/sismographe.jpg?itok=h-UsXhV7

I.6.2 L'accélérographe (ou capteur de mouvement fort)

L'accélérographe est l'outil indispensable de l'ingénieur en génie parasismique. Contrairement au sismographe, il ne cherche pas la sensibilité, mais la robustesse face à la violence d'un choc proche. C'est un appareil robuste conçu pour mesurer l'accélération du sol (exprimée en g ou en cm/s^2) lors d'une secousse importante. Il enregistre ce qu'on appelle le « mouvement fort » (strong motion). Il utilise des accéléromètres (souvent de type MEMS ou à équilibre de force) qui sont beaucoup plus rigides que les sismomètres. Ils ne sont généralement pas en enregistrement continu, mais se déclenchent uniquement lorsqu'un seuil d'accélération est dépassé (trigger). Son avantage principal est sa capacité de non-saturation : contrairement au sismographe qui sature lors d'un gros séisme proche, l'accélérographe enregistre la totalité de la secousse sans distorsion. Comme la force est égale à la masse multipliée par l'accélération ($F = m \cdot a$), les données de cet appareil permettent de calculer directement les charges sismiques sur un édifice (Boore, 2003).

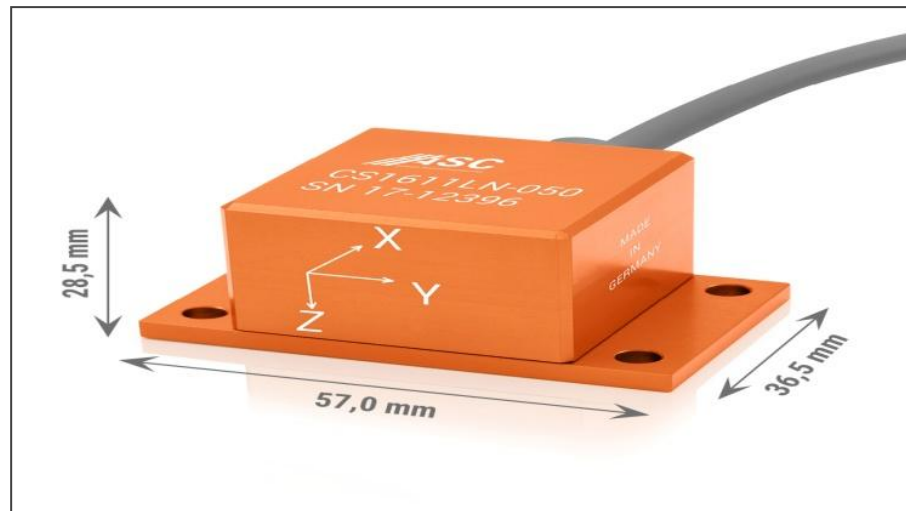


Figure I-6 Accéléromètre capacitif

<https://www.pm-instrumentation.com/cs-1511-ln-accelerometre-biaxial-capacitif-2-a-50g-sortie-4-20ma>

I.7 Bases de données de mouvements forts

L'infrastructure numérique de la sismologie moderne repose sur des systèmes de gestion de données massives qui permettent de transformer des signaux électriques bruts en outils de calcul pour l'ingénierie. Une base de données de mouvements forts ne se contente pas de stocker des enregistrements ; elle fournit un ensemble de métadonnées critiques incluant la caractérisation géotechnique des sites, les paramètres de la source sismique et des accélérogrammes rigoureusement traités, c'est-à-dire corrigés de la ligne de base et filtrés pour éliminer le bruit instrumental (Douglas, 2003).

I.7.1 RESORCE et ESM (Engineering Strong-Motion Database)

La base de données ESM s'est imposée comme le pilier central de la sismologie appliquée pour la région euro-méditerranéenne, incluant des données vitales pour les pays d'Afrique du Nord comme l'Algérie. Gérée par l'Institut National de Géophysique et de Volcanologie (INGV) en Italie sous l'égide du consortium ORFEUS, l'ESM regroupe des enregistrements provenant de plus de 3 000 stations réparties sur tout le bassin méditerranéen et au-delà. Sa précision réside dans la fourniture systématique du paramètre Vs30 (vitesse moyenne des ondes de cisaillement dans les 30 premiers mètres), ce qui permet aux experts de classer les sites selon les catégories des Eurocodes ou du RPA (Lanzano et al., 2019). L'avantage majeur de l'ESM est sa capacité à proposer des spectres de réponse élastiques calculés de manière homogène, facilitant ainsi la sélection de signaux compatibles avec les spectres réglementaires régionaux.

I.7.2 NGA-West2 (Next Generation Attenuation for Western US)

Le projet NGA-West2 représente l'effort de recherche le plus abouti au niveau mondial pour la caractérisation des secousses en champ proche et moyen. Piloté par le centre PEER de l'Université de Berkeley, ce programme a compilé plus de 21 000 enregistrements provenant de séismes survenus sur des failles superficielles à travers le monde, créant ainsi une « flatfile » d'une précision inégalée. La force de NGA-West2 réside dans l'intégration de paramètres complexes tels que la distance de Joyner-Boore (R_{jb}), la distance de rupture (R_{rup}), et les effets de directivité de la rupture, qui influencent considérablement l'intensité des secousses. Cette base de données est le moteur principal pour le développement des GMM (Ground Motion Models), les équations mathématiques qui prédisent l'accélération du sol en fonction de la magnitude et de la distance (Ancheta et al., 2014).

I.7.3 KiK-net (Kiban Kyoshin Network)

Le réseau KiK-net au Japon constitue le laboratoire géotechnique le plus sophistiqué de la planète, offrant une dimension verticale unique à l'enregistrement sismique. Ce réseau, géré par le NIED (National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience), est composé de près de 700 stations équipées de paires d'accélérographes : un instrument est placé en surface tandis que l'autre est installé au fond d'un forage, directement sur le substratum rocheux (bedrock). Cette configuration permet aux sismologues d'effectuer des analyses de déconvolution pour isoler l'effet propre des couches de sol meuble sur l'amplification des ondes. KiK-net fournit des profils de vitesse de propagation des ondes (V_p et V_s) extrêmement détaillés pour chaque station grâce à des carottages et des essais in situ (Aoi et al., 2004). L'avantage scientifique est immense car il permet de valider les modèles d'interaction sol-structure et de comprendre comment les ondes sismiques se transforment physiquement lors de leur remontée vers la surface.

Conclusion

Ce premier chapitre a permis de poser les fondements scientifiques de la sismologie et du génie parasismique qui sous-tendent l'ensemble de ce mémoire. L'analyse des mécanismes de génération des séismes, de la propagation des ondes élastiques et des paramètres caractéristiques (magnitude, intensité) constitue le socle théorique indispensable à la compréhension de l'aléa sismique.

L'étude détaillée des trois séismes majeurs Kobe (1995), Boumerdès (2003) et Kahramanmaraş (2023) a mis en lumière des enseignements déterminants pour la discipline. Le séisme de Kobe a imposé le passage d'une conception basée sur la résistance à une conception fondée sur la performance et le contrôle des déplacements. Le séisme de Boumerdès a conduit à une révision majeure de la réglementation parasismique algérienne, soulignant l'importance cruciale du respect des dispositions constructives. Les séismes de Kahramanmaraş ont démontré que l'existence de normes modernes reste insuffisante sans un contrôle rigoureux de leur application, tout en validant de manière éclatante l'efficacité de l'isolation sismique à la base.

Enfin, la présentation de l'instrumentation sismique (sismographes et accélérographes) et des principales bases de données de mouvements forts (ESM, NGA-West2, KiK-net) a établi le lien entre l'observation sismologique et l'ingénierie. Ces ressources constituent les outils indispensables au développement des modèles de prédiction du mouvement du sol, qui feront l'objet des chapitres suivants.

CHAPITRE II :

Paramètres physiques du mouvement du sol

Introduction

Le génie parasismique se situe à la confluence de la géophysique, de la géotechnique et de la mécanique des structures. Sa mission fondamentale est de concevoir des ouvrages capables de résister à des sollicitations dynamiques imprévisibles tout en garantissant la sécurité des occupants. Pour passer du phénomène naturel chaotique qu'est le séisme à un calcul d'ingénierie rigoureux, il est impératif de traduire la réalité physique en paramètres quantifiables.

Ce deuxième chapitre présente de manière exhaustive les paramètres physiques qui constituent le langage commun entre le sismologue et l'ingénieur. Ces paramètres sont organisés selon les trois effets fondamentaux de la chaîne sismique : les effets de source, qui décrivent les caractéristiques de la rupture (chute de contraintes, magnitude, profondeur focale, mécanisme au foyer) ; les effets de propagation d'onde, qui quantifient l'atténuation de l'énergie entre la source et le site à travers différentes métriques de distance (R_{rup} , R_{jb} , R_{hypo} , R_{epi}) ; et les effets de site, qui caractérisent l'influence des conditions géologiques locales sur l'amplification du mouvement du sol (V_{s30} , $Z_{1.0}$, $Z_{2.5}$, κ_0 , f_0). Pour chaque paramètre, la définition physique, le domaine d'application, les méthodes de détermination, les limites d'utilisation et les incertitudes associées sont systématiquement présentés.

II.1 Effets de source

Les paramètres de source décrivent les caractéristiques intrinsèques de la rupture sismique qui déterminent la quantité et la nature de l'énergie libérée. Ils constituent les variables d'entrée primaires des équations de prédiction du mouvement du sol (GMPE/GMM) et des analyses d'aléa sismique (Aki & Richards, 2002).

II.1.1 Chute de contraintes ($\Delta\sigma$)

La chute de contraintes ($\Delta\sigma$) représente la différence entre la contrainte moyenne sur un plan de faille avant la rupture sismique et la contrainte moyenne après la rupture. Pour un modèle de source circulaire (modèle de Brune, 1970), elle est reliée au moment sismique (M_0) et au rayon de la rupture (r). C'est une mesure de l'efficacité avec laquelle une faille libère l'énergie élastique accumulée. Une chute de contrainte élevée indique un séisme « énergétique » qui libère beaucoup d'énergie sur une surface de rupture relativement petite.

En termes d'application, le $\Delta\sigma$ est un paramètre pivot dans la modélisation stochastique du mouvement du sol (contrôlant principalement l'amplitude des hautes fréquences), dans les

équations de prédiction du mouvement du sol (GMPE), dans les lois d'échelle (scaling laws) et dans le dimensionnement d'ouvrages critiques (génie nucléaire et barrages). Sa détermination est indirecte et se fait généralement via l'analyse spectrale de Fourier, l'inversion de modèles de faille finie, ou des méthodes empiriques (Atkinson & Beresnev, 1997).

L'incertitude sur le $\Delta\sigma$ est l'une des plus élevées en sismologie en raison de la sensibilité cubique (une petite erreur de mesure sur la dimension de la faille se traduit par une erreur massive sur la chute de contrainte), de l'incertitude épistémique (les valeurs peuvent varier de 1 à 100 MPa pour des séismes de même magnitude), et du compromis numérique (trade-off) entre le stress drop et l'atténuation de site κ_0 (Cotton et al., 2013).

$$\Delta\sigma = (7/16) \times (M_0 / r^3) \quad (\text{II.1})$$

II.1.2 Magnitude de moment (M_w)

La magnitude de moment (M_w) est une mesure logarithmique de l'énergie libérée au foyer d'un séisme, basée sur le moment sismique (M_0) qui dépend de la rigidité de la roche, de la surface de la faille rompue et du glissement moyen. Contrairement aux échelles historiques (Richter ML ou ondes de volume mb), la M_w ne « sature » pas pour les séismes géants (Kanamori, 1977). Elle constitue la variable d'entrée principale des GMPE pour estimer les accélérations (PGA), vitesses (PGV) et spectres de réponse (SA) attendus sur un site, et permet de définir la fréquence d'occurrence des séismes via la loi de Gutenberg-Richter dans les analyses PSHA.

L'incertitude sur la magnitude provient de la couverture du réseau (GAP), du modèle de vitesse utilisé et de la variabilité inter-agences (différentes agences peuvent publier des magnitudes variant de $\pm 0,2$ à $\pm 0,3$ unités pour un même événement, correspondant à une différence d'énergie d'un facteur 2 à 3).

II.1.3 Profondeur focale, coordonnées épicentrales et mécanisme au foyer

La profondeur focale (hypo depth) est la distance verticale entre la surface de la Terre et l'hypocentre. Les séismes sont classés en superficiels (0–70 km), intermédiaires (70–300 km) et profonds (300–700+ km). Ce paramètre détermine l'atténuation de l'énergie et influence directement le calcul des distances source-site dans les GMPE (Bozorgnia et al., 2014). Les coordonnées épicentrales (latitude et longitude) constituent le couple de coordonnées

nécessaire à la localisation spatiale de la source et au calcul des distances, paramètres d'entrée cruciaux des lois d'atténuation.

Le mécanisme au foyer est décrit par trois angles : le dip (pendage), le rake (angle de glissement) et le strike (direction). Le dip varie de 0° (faille horizontale) à 90° (faille verticale) et est crucial pour modéliser l'effet de paroi (hangingwall effect). Le rake indique le type de glissement : 0° ou 180° pour un décrochement pur, 90° pour une faille inverse et -90° pour une faille normale (Aki & Richards, 2002). Ces paramètres sont utilisés comme variables « Style of Faulting » dans les GMPE modernes.

Le Ztor (depth to the top of rupture) définit la limite supérieure de la surface totale de la faille qui a glissé. C'est une variable d'entrée majeure des modèles NGA. La width (largeur de rupture) est la dimension du plan de faille mesurée selon la direction du pendage, directement proportionnelle à l'énergie totale libérée via le moment sismique. Ces paramètres géométriques sont déterminés par inversion de modèles de faille finie, distribution spatiale des répliques, données géodésiques (InSAR et GPS) et relations d'échelle empiriques de Wells et Coppersmith (1994).

II.2 Effets de propagation d'onde

Les paramètres de propagation quantifient l'atténuation de l'énergie sismique entre la source et le site d'intérêt. La précision de la métrique de distance utilisée a un impact direct sur la qualité des prédictions du mouvement du sol (Abrahamson et al., 2014).

$$M_0 = \mu \times A \times D \quad (\text{II.2})$$

II.2.1 Distances de source étendue : Rrup et Rjb

La distance de rupture (Rrup) est la distance minimale tridimensionnelle entre un site et la surface de rupture de la faille, considérant la faille comme une surface étendue. C'est le paramètre de distance privilégié dans les modèles NGA-West2 et il est crucial pour les études de champ proche (Abrahamson et al., 2014). La distance de Joyner-Boore (Rjb) est la plus courte distance horizontale entre le site et la projection verticale de la surface de rupture sur la surface de la Terre. Un point crucial la distingue : elle ne tient pas compte de la profondeur de la rupture, et si un site se trouve directement au-dessus de la surface de rupture, $Rjb = 0$. Sa principale limite est qu'elle est indifférente à la profondeur : deux séismes peuvent avoir le même $Rjb = 0$, mais avec des profondeurs et des dommages radicalement différents.

II.2.2 Distances de source ponctuelle : Repi et Rhypo

La distance épacentrale (R_{epi}) est la distance horizontale mesurée à la surface entre l'épicentre et un point d'intérêt. La distance hypocentrale (R_{hypo}) est la distance en ligne droite dans l'espace tridimensionnel entre l'hypocentre et un point d'observation. R_{hypo} intègre la profondeur focale via la relation $R_{hypo} = \sqrt{(R_{epi}^2 + h^2)}$. Ces métriques sont essentielles pour les séismes de magnitude faible à modérée, les systèmes d'alerte précoce et les lois d'atténuation géométrique (proportionnelle à $1/R_{hypo}$). Leurs limites résident dans l'hypothèse de source ponctuelle, inadéquate pour les grands séismes ($M_w > 6$) où la rupture s'étend sur des dizaines de kilomètres (Boore et al., 2014).

II.2.3 Paramètres géométriques avancés : R_x , R_{y0} , azimuth et R_{cdpp}

Le paramètre R_x est la distance horizontale signée par rapport au sommet de la rupture, mesurée perpendiculairement à la direction de la faille. $R_x > 0$ indique un site du côté hangingwall, $R_x < 0$ un site du côté footwall. Ce paramètre est utilisé dans les modèles NGA-West2 pour quantifier l'effet de paroi. R_{y0} mesure la distance horizontale parallèle à la direction de la faille entre un site et l'extrémité la plus proche de la rupture ; il affine les modèles d'atténuation à proximité des extrémités des failles et aide à quantifier les effets de directivité (Chiou & Youngs, 2014).

L'azimut (Az) est l'angle horizontal entre le Nord géographique et la ligne reliant l'épicentre au site, crucial pour l'étude de la directivité. Le R_{cdpp} (distance to the closest point on the deep projection of the rupture plane) complète les mesures comme R_x ou R_{jb} pour décrire la position d'un site par rapport à la largeur totale de la faille.

Le R_{volc} (distance au front volcanique) et le paramètre backarc sont des indicateurs spécifiques aux zones de subduction qui quantifient l'atténuation accrue des ondes sismiques due à la présence de croûte terrestre à haute température associée au volcanisme (Abrahamson et al., 2016).

II.3 Effets de site

Les paramètres d'effets de site caractérisent l'influence des conditions géologiques et géotechniques locales sur la modification (généralement l'amplification) du mouvement sismique en surface. Ces paramètres sont essentiels car ils déterminent la sévérité réelle de la secousse subie par les structures (Borcherdt, 1994).

$$M_w = (2/3) \times \log_{10}(M_0) - 10.7 \quad (II.3)$$

II.3.1 Vs30 : vitesse moyenne des ondes de cisaillement

Le Vs30 représente la vitesse moyenne pondérée harmonique des ondes de cisaillement dans les 30 premiers mètres du sol. C'est le paramètre pivot de la sismologie de l'ingénieur moderne, servant de base à la classification des sols dans les codes de construction (Eurocode 8, ASCE 7, RPA), à l'estimation de l'amplification du signal sismique dans les GMPE/GMM, au microzonage sismique et à l'analyse de liquéfaction (Borcherdt, 1994). La distinction entre Vs30 mesuré (par des méthodes invasives comme le cross-hole ou non invasives comme le MASW) et Vs30 estimé (par des proxies comme la pente topographique selon Wald & Allen, 2007) est fondamentale, le premier constituant le « Gold Standard » pour les ouvrages critiques.

Les limites du Vs30 incluent son caractère arbitraire (la profondeur de 30 m est historique et administrative), l'impossibilité de déterminer à lui seul la fréquence fondamentale de résonance d'un site profond, et sa non-pertinence lors de séismes majeurs où le sol devient non-linéaire. L'incertitude varie de 10–20 % pour les méthodes directes à un facteur 2 pour les estimations par proxies (Stewart et al., 2014).

Tableau II.1 – Classification des sols selon Vs30 — RPA 2024 / Eurocode 8

Type de sol	Description lithologique	Vs30 (m/s)	Classe RPA 2024	N-SPT / Su
Rocher dur	Rocher sain, non altéré, fractures très rares	> 1 500	S1	N/A
Rocher	Rocher altéré ou fragmenté, gravier très dense	800 – 1 500	S1	> 50
Sol raide	Sable dense, gravier dense ou argile très raide	360 – 800	S2	15 – 50 / Su > 100 kPa
Sol meuble	Sable moyennement dense, limon ou argile moyennement raide	180 – 360	S3	10 – 30 / 70 < Su ≤ 100 kPa
Sol très meuble	Argile molle, limon organique, remblay non contrôlé	< 180	S4	< 10 / Su < 70 kPa

II.3.2 Profondeurs d'isovitesse : Z1.0, Z1.4 et Z2.5

Les paramètres Z1.0, Z1.4 et Z2.5 désignent respectivement les profondeurs auxquelles la vitesse des ondes de cisaillement atteint 1,0 km/s, 1,4 km/s et 2,5 km/s. Ces paramètres quantifient l'épaisseur de la couverture sédimentaire et sont essentiels pour caractériser les effets de bassin. Le Z1.0 correspond à la transition entre sédiments raides et rocher de base (bedrock sismologique), tandis que le Z2.5 définit la limite du bedrock sismologique dur. Ces paramètres sont utilisés dans les modèles NGA-West2 pour ajuster l'amplitude des secousses,

notamment l'amplification des ondes à basse fréquence (longues périodes), cruciale pour les structures hautes (Campbell & Bozorgnia, 2014).

L'incertitude sur ces paramètres est généralement élevée, souvent supérieure à celle du V_{s30} , en raison des problèmes de non-unicité des inversions géophysiques et de la variabilité latérale des bassins sédimentaires.

II.3.3 Paramètre d'atténuation haute fréquence κ_0 et fréquence de résonance f_0

Le paramètre κ_0 (kappa) mesure l'atténuation des ondes sismiques de haute fréquence ($f > 5\text{--}10$ Hz) dans les couches superficielles situées sous le site. Il se manifeste par une décroissance exponentielle de l'amplitude sur le spectre de Fourier et est une donnée d'entrée cruciale pour les simulations stochastiques et l'ajustement host-to-target des GMPE (Anderson & Hough, 1984). L'incertitude sur κ_0 est élevée, pouvant varier de 50 % à 100 % selon la méthode d'extraction, en raison du compromis numérique (trade-off) entre κ_0 et la chute de contrainte $\Delta\sigma$.

La fréquence fondamentale de résonance f_0 est la plus petite fréquence à laquelle un site entre en résonance, liée à l'épaisseur de la couche sédimentaire (H) et à la vitesse moyenne des ondes de cisaillement (V_s) par la relation $f_0 = V_s/4H$. Sa détermination par la méthode H/V de Nakamura (1989) est la plus répandue. L'évitement de la résonance sol-structure, où la fréquence propre du bâtiment coïncide avec f_0 , est un objectif fondamental de l'ingénierie parasismique.

II.3.4 Classification des sites et paramètres complémentaires

La classification des sites (siteclass) est une nomenclature (souvent alphabétique, de A à F selon le NEHRP) qui regroupe des profils de sols possédant des propriétés mécaniques et dynamiques similaires. Le système le plus répandu est basé sur le V_{s30} : Classe A (rocher dur, $V_{s30} > 1\,500$ m/s) à Classe E (sols mous, $V_{s30} < 180$ m/s). Cette classification est utilisée dans tous les codes parasismiques (Eurocode 8, RPA, ASCE 7) pour définir la forme du spectre de réponse élastique de calcul (BSSC, 2015).

Parmi les paramètres complémentaires, le slope (pente topographique) sert de proxy indirect du V_{s30} pour la cartographie à grande échelle selon la méthode de Wald et Allen (2007). Le free face ratio quantifie la proximité d'une discontinuité topographique favorisant l'étalement latéral lors de la liquéfaction (Youd et al., 2002). La géologie de surface et le type de sol (soiltype) sont des indicateurs catégoriels qui complètent les mesures quantitatives lorsque ces dernières ne sont pas disponibles.

$$R_{hypo} = \sqrt{(R_{epi}^2 + h^2)} \quad (II.4)$$

$$V_{s30} = 30 / \sum_i (h_i / V_{s_i}) \quad (II.5)$$

$$f_0 = V_s / (4H) \quad (II.6)$$

$$A(f) \propto \exp(-\pi \times \kappa_0 \times f) \quad (II.7)$$

$$\Delta\sigma = \frac{7}{16} \cdot \frac{M_0}{r^3}$$

1. **Sensibilité cubique :** Dans la formule de calcul, $\Delta\sigma$ dépend du rayon au cube (r^3). Une petite erreur de mesure sur la dimension de la faille ou sur la fréquence de coin (f_c) se traduit par une erreur massive (multipliée par 3 en log) sur la chute de contrainte.

$$M_w = \frac{2}{3} \log_{10}(M_0) - 6$$

$$R_{hypo} = \sqrt{R_{epi}^2 + Depth^2}$$

$$V_{s30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^n \frac{dt}{v_i}}$$

$$V_{s30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^n \frac{dt}{v_i}}$$

Le **THV** est la valeur maximale de la norme du vecteur vitesse dans le plan horizontal au cours du temps. Il combine les deux composantes horizontales (v_1 et v_2) selon la formule :

$$THV = t_{max} \sqrt{v_{NS}(t)^2 + v_{EW}(t)^2}$$

$$W(\%) = \frac{H}{L} \cdot 100$$

$$A(f) \propto e^{-\pi \kappa f}$$

Conclusion

Ce deuxième chapitre a présenté de manière systématique l'ensemble des paramètres physiques qui régissent la chaîne sismique, depuis la source jusqu'au site. L'organisation selon les trois effets fondamentaux source, propagation et site reflète la structure logique des équations de prédiction du mouvement du sol (GMPE/GMM).

Les paramètres de source ($\Delta\sigma$, M_w , profondeur focale, mécanisme au foyer, géométrie de rupture) déterminent la quantité et la nature de l'énergie libérée. Les paramètres de propagation (R_{rup} , R_{jb} , R_{hypo} , R_{epi} , R_x , R_{y0}) quantifient l'atténuation de cette énergie avec la distance selon différentes métriques adaptées aux contextes d'analyse. Les paramètres de site (V_{s30} , $Z_{1.0}$, $Z_{2.5}$, κ_0 , f_0 , classification des sols) caractérisent les conditions locales qui modifient le signal sismique avant qu'il ne sollicite les structures.

L'analyse détaillée des incertitudes associées à chaque paramètre constitue un apport majeur de ce chapitre. Il en ressort que l'incertitude est inhérente à chaque étape de la chaîne sismique, et que sa gestion rigoureuse via la distinction entre variabilité aléatoire et incertitude épistémique est indispensable pour une évaluation fiable de l'aléa sismique dans le cadre du dimensionnement parasismique.

CHAPITRE III :

Paramètres d'intensités sismiques

Introduction

L'évaluation de l'action sismique sur les structures repose sur la compréhension fine des paramètres qui caractérisent l'intensité du mouvement du sol. Alors que le chapitre précédent a présenté les paramètres physiques décrivant la source, le trajet et le site, ce troisième chapitre se concentre sur les mesures d'intensité du mouvement du sol (IntensityMeasure Types, IMTs), qui constituent le lien quantitatif entre le phénomène géophysique et la réponse des ouvrages.

Les IMTs sont des indicateurs quantitatifs qui permettent de décrire la sévérité, la durée et le contenu fréquentiel des secousses sismiques. Ils sont essentiels pour relier les caractéristiques du mouvement du sol aux dommages potentiels sur les structures et au ressenti humain (Kramer, 1996). Ce chapitre les organise en six familles : les paramètres de pic (PGA, PGV, PGD), les paramètres spectraux (SA, SA1, SDI, AvgSA), les paramètres d'énergie cumulative (intensité d'Arias, CAV), les paramètres fréquentiels (FAS, EAS), les paramètres de durée (RSD 5-75, RSD 5-95, RSD 20-80) et les paramètres combinés (ratios V/H). Pour chaque paramètre, la définition, le domaine d'application, la méthode de détermination, les limites d'utilisation et les incertitudes associées sont systématiquement présentées, établissant le lien fondamental entre l'intensité du mouvement du sol et la réponse dynamique des structures.

III.1 Paramètres de pic du mouvement du sol

Les paramètres de pic représentent les valeurs maximales instantanées du mouvement du sol en termes d'accélération, de vitesse et de déplacement. Bien que simples dans leur définition, ils constituent les grandeurs les plus couramment utilisées dans la pratique du génie parasismique réglementaire (Bommer & Acevedo, 2004).

$$\text{PGA} = \max|a(t)| \quad (\text{III.1})$$

III.1.1 Accélération maximale du sol (PGA)

Le PGA (Peak Ground Acceleration) représente la valeur maximale de l'accélération mesurée en un point donné de la surface du sol lors d'un tremblement de terre, exprimée en m/s^2 ou en fraction de l'accélération de la pesanteur ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$). Mathématiquement, $\text{PGA} = \max|a(t)|$, où $a(t)$ est la fonction d'accélération en fonction du temps. Bien qu'un séisme agisse dans les trois dimensions, on utilise le plus souvent le PGA horizontal car les structures sont généralement plus vulnérables aux forces de cisaillement latérales qu'aux forces

verticales. Dans le domaine spectral, le PGA correspond à l'accélération d'une structure infiniment rigide (période $T = 0$ s), souvent désignée ZPA (Zero Period Acceleration) sur un spectre de réponse (Kramer, 1996).

Le PGA est utilisé pour le dimensionnement réglementaire (la valeur de calcul a_g de l'Eurocode 8 est dérivée du PGA de référence pour une période de retour de 475 ans), l'évaluation du potentiel de liquéfaction (paramètre d'entrée fondamental du CSR Cyclic Stress Ratio), l'analyse pseudo-statique des talus et barrages (coefficient sismique $K_h \approx 0,5 \times \text{PGA}/g$), et la définition du séisme maximal de sécurité en génie nucléaire (Seed & Idriss, 1971).

Sa détermination repose sur le traitement du signal (correction de ligne de base et filtrage passe-bande entre 0,1 Hz et 25–40 Hz) et les modèles de prédiction GMPE : $\ln(\text{PGA}) = f(M, R, S, \text{style de faille}) + \sigma$. L'incertitude sur le PGA est considérable : l'écart-type σ dans les modèles logarithmiques est souvent de l'ordre de 0,6, signifiant que la valeur réelle peut être le double de la médiane estimée (Douglas, 2003).

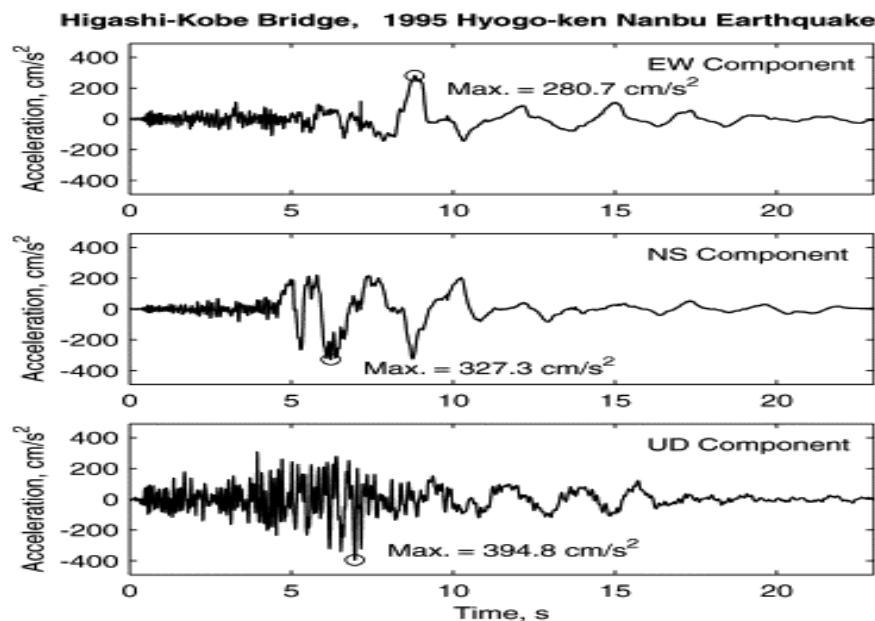


Figure III.1 Pont Higashi-Kobe, Séisme de Hyogo-ken Nanbu 1995 Valeurs d'accélération maximale du sol (PGA) enregistrées

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0267726102000180>

III.1.2 Vitesse maximale du sol (PGV)

Le PGV (Peak Ground Vélocité) est la valeur maximale instantanée de la vitesse du sol atteinte lors du passage des ondes sismiques. Contrairement au PGA, le PGV est directement lié au flux d'énergie cinétique et à la déformation intermédiaire du sol ($\varepsilon \approx v/C_s$, où C_s est la

vitesse de phase de l'onde). Il caractérise mieux le mouvement du sol dans la gamme de fréquences intermédiaires (0,5 Hz à 2 Hz) et est souvent préféré au PGA pour le calcul des déformations imposées aux réseaux enterrés (pipelines, tunnels), l'évaluation de la sévérité sismique (ShakeMaps), les structures de moyenne période et l'évaluation de la liquéfaction (Wald et al., 1999).

Sa détermination nécessite un protocole d'intégration strict : correction instrumentale, correction de la ligne de base, filtrage acausal (filtre de Butterworth avec fréquence de coupure basse critique), intégration numérique de l'accélérogramme corrigé, puis extraction du pic $PGV = \max|v(t)|$. L'incertitude sur le PGV est intrinsèquement plus élevée que sur le PGA, car la vitesse est très sensible à la complexité de la rupture et à la structure 3D de la croûte. En champ proche, les effets de directivité peuvent concentrer le PGV en une « impulsion de vitesse » (velocity pulse) extrêmement destructrice (Bray & Rodriguez-Marek, 2004).

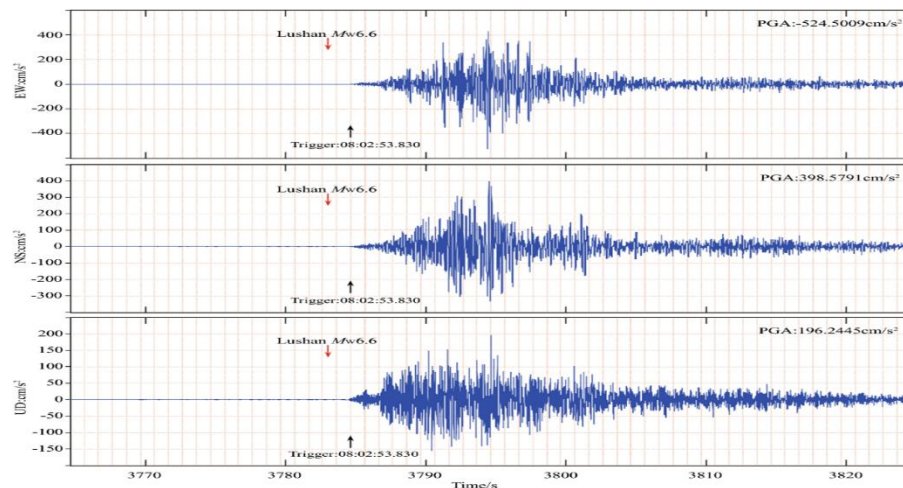


Figure III.2 Valeurs de vitesse maximal du sol (PGV) enregistrées lors du séisme de Lushan

<https://encrypted->

[tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcRwAFcW0NG1VPbXpsY08DuDunaS_2PhlG_h_BbMM_i8gjJ_aR6T](https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcRwAFcW0NG1VPbXpsY08DuDunaS_2PhlG_h_BbMM_i8gjJ_aR6T)

III.1.3 Déplacement maximal du sol (PGD)

Le PGD (Peak Ground Displacement) représente le déplacement maximal du sol par rapport à sa position de repos, reflétant principalement le contenu en basses fréquences du signal sismique. Il est fondamental pour le dimensionnement des ouvrages de grande portée (ponts suspendus, gratte-ciel), la conception basée sur le déplacement (Displacement-Based Design), l'estimation rapide de la magnitude dans les systèmes d'alerte précoce, et l'étude des ruptures de surface (Priestley et al., 2007).

Sa détermination par double intégration des accélérogrammes est extrêmement sensible au bruit et aux erreurs numériques, nécessitant des filtres passe-haut stricts. Les mesures GNSS (GPS haute fréquence) offrent une alternative directe pour les séismes de forte magnitude. Le PGD est considéré comme le paramètre de mouvement du sol le plus incertain, avec des variations de 20 à 50 % entre analystes selon les choix de filtrage (Boore & Bommer, 2005).

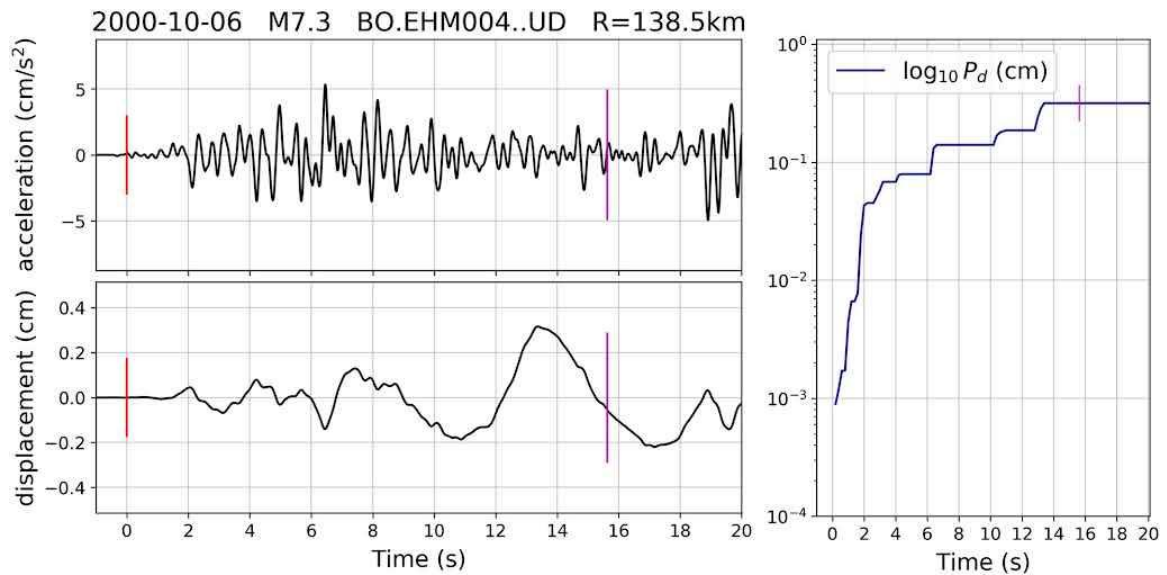


Figure III.3 Séisme du 2000-10-06, M7.3, Station BO.EHM004 Valeurs d'accélération (PGA) et de déplacement maximal du sol (PGD) enregistrées

https://encryptedtbn3.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQR1KBpmNR3qABQMfISAA16ac_lcxBcBko10hhrRmv5cdAaRF8i

III.2 Paramètres spectraux

Les paramètres spectraux décrivent la réponse maximale d'oscillateurs simples soumis au mouvement du sol et constituent les outils les plus utilisés en génie parasismique moderne pour le dimensionnement des structures (Chopra, 2012).

$$PGV = \max|v(t)| = \max\left|\int a(t) dt\right| \quad (III.2)$$

III.2.1 Accélération spectrale (SA)

La SA (Spectral Accélération) représente l'accélération maximale subie par un système à un seul degré de liberté (SDOF) possédant une période de vibration naturelle T et un taux d'amortissement critique ξ (généralement fixé à 5 %). Contrairement au PGA qui mesure le mouvement du sol, la SA mesure la réponse maximale d'une structure soumise à ce mouvement. Un « spectre de réponse » est une courbe représentant la SA pour une large gamme de périodes T (Chopra, 2012).

La SA est le paramètre le plus utilisé en génie parasismique moderne : conception réglementaire (Eurocode 8, RPA, ASCE 7), estimation de l'effort tranchant à la base, cartes d'aléa sismique nationales (souvent à $T = 0,2$ s et $T = 1,0$ s), et construction des courbes de fragilité. Sa détermination se fait par résolution de l'équation du mouvement (intégrale de Duhamel, méthode de Newmark) ou via les GMPE.

La SA1 (accélération spectrale à $T = 1,0$ s) est un paramètre particulièrement important, ciblant les bâtiments d'environ 10 étages et servant de pivot pour évaluer l'amplification du sol dans les basses fréquences. Le SDI (Spectral Déplacement) est le déplacement maximal d'un oscillateur, lié à la SA par $SDI(T, \xi) = (T/2\pi)^2 \times SA(T, \xi)$, devenu central dans la conception basée sur le déplacement et l'analyse pushover (FEMA, 2005).

III.2.2 Accélération spectrale moyenne (AvgSA)

L'AvgSA est la moyenne géométrique des accélérations spectrales calculées sur une plage de périodes prédéfinie $[T_{min}, T_{max}]$. Contrairement à la SA classique qui ne considère qu'une seule période, l'AvgSA intègre la demande sismique sur un intervalle, typiquement $T_{min} = 0,2 \cdot T_1$ et $T_{max} = 1,5$ à $2,0 \cdot T_1$. Son application principale est la sélection et mise à l'échelle d'accélérogrammes pour les analyses dynamiques non-linéaires (NLTHA), où il réduit considérablement la dispersion record-to-record tout en capturant l'allongement de la période de la structure lors de sa dégradation (Eads et al., 2015).

III.3 Paramètres d'énergie cumulative

Les paramètres d'énergie cumulative tiennent compte de l'effet cumulatif de la secousse sur la durée totale de l'enregistrement, ce qui les rend particulièrement pertinents pour les phénomènes dépendants du nombre de cycles comme la liquéfaction et la fatigue structurelle (Travasarou et al., 2003).

$$PGD = \max|d(t)| = \max|\iint a(t) dt^2| \quad (III.3)$$

III.3.1 Intensité d'Arias (IA)

L'intensité d'Arias est définie par $IA = (\pi/2g) \int_0^{t_{tot}} [a(t)]^2 dt$, exprimée en m/s. Elle représente l'énergie totale qui serait absorbée par une population infinie d'oscillateurs. L'IA est le paramètre de choix pour l'évaluation de la liquéfaction (mieux corrélée au déclenchement que le PGA), la stabilité des pentes (méthode de Newmark), la définition de la durée significative (D5-95), et l'évaluation des dommages cumulatifs sur les structures fragiles (Arias, 1970). Sa sensibilité aux hautes fréquences et l'absence d'information sur la distribution temporelle constituent ses limitations principales.

III.3.2 Vitesse absolue cumulée (CAV)

Le CAV (Cumulative Absolute Velocity) est défini par $CAV = \int_0^{t_{tot}} |a(t)| dt$, exprimé en cm/s. Moins sensible aux pics isolés de haute fréquence que l'IA, il est utilisé comme critère d'arrêt des centrales nucléaires (EPRI/NRC), indicateur de dommages et excellent prédicteur de la liquéfaction. La version standardisée CAV_s ne conserve que les segments de 1 seconde où l'accélération dépasse 0,025 g, filtrant ainsi les bruits de fond non dommageables (EPRI, 1988). Le CAV est considéré comme l'un des paramètres les plus stables, avec une dispersion souvent plus faible que celle du PGA.

III.4 Paramètres fréquentiels

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{u}_g(t) \quad (III.4)$$

III.4.1 Spectre d'amplitude de Fourier (FAS)

Le FAS (Fourier Amplitude Spectrum) est la représentation du mouvement du sol dans le domaine fréquentiel, obtenu par la norme de la transformée de Fourier du signal d'accélération. Contrairement au spectre de réponse (SA), le FAS décrit le contenu énergétique intrinsèque du mouvement du sol. Il est indispensable pour la caractérisation de la source sismique (estimation de M_w , f_c et $\Delta\sigma$ via le modèle de Brune), l'étude des effets de site (rapport H/V de Nakamura), et la simulation stochastique du mouvement du sol (méthode de Boore, 2003). Le lissage de Konno-Ohmachi est systématiquement appliqué pour stabiliser le signal.

III.4.2 Spectre d'amplitude efficace (EAS)

L'EAS (Effective Amplitude Spectrum) combine les deux composantes horizontales en une seule valeur représentative et indépendante de l'orientation des capteurs : $EAS(f) = \sqrt{(|AH1(f)|^2 + |AH2(f)|^2)/2}$. De plus en plus utilisé dans les projets NGA comme paramètre cible pour les GMM (à la place de la SA), il est privilégié pour les analyses de réponse de site et l'inversion des propriétés crustales. Sa procédure de calcul suit un protocole strict défini par les standards NGA-East (Goulet et al., 2018).

III.5 Paramètres de durée

Les paramètres de durée quantifient l'étendue temporelle de la phase destructrice du mouvement du sol, un aspect fondamental pour les phénomènes cumulatifs comme la liquéfaction et la fatigue structurelle (Bommer & Martinez-Pereira, 1999).

$$SA(T, \xi) = \max |\ddot{u}(t) + \ddot{u}_g(t)| \quad (III.5)$$

III.5.1 Durées significatives relatives (RSD)

Les durées significatives sont définies par l'intervalle de temps entre deux seuils d'énergie sur la courbe de Husid (accumulation normalisée de l'intensité d'Arias). Trois variantes principales sont utilisées : le RSD 5-95 ($D_{5-95} = t_{95} - t_5$), qui capture 90 % de l'énergie et constitue la mesure la plus complète ; le RSD 5-75 ($D_{5-75} = t_{75} - t_5$), qui caractérise la partie active avant la décroissance ; et le RSD 20-80 ($D_{20-80} = t_{80} - t_{20}$), qui isole le cœur de la secousse en excluant les phases de début et de fin (Trifunac & Brady, 1975).

Ces paramètres sont fondamentaux pour l'évaluation de la liquéfaction (proxy du nombre de cycles effectifs), l'analyse non-linéaire des structures (dégradation de la rigidité), la stabilité des pentes (déplacements permanents cumulés de Newmark) et la sélection d'accélérogrammes avec des durées réalistes. L'incertitude sur la durée est très élevée (σ supérieur à celui du PGA), principalement en raison de la variabilité de la source et des effets de piégeage des ondes dans les bassins sédimentaires (Kempton & Stewart, 2006).

III.6 Paramètres combinés : ratios verticaux/horizontaux

$$SDI(T, \xi) = (T/2\pi)^2 \times SA(T, \xi) \quad (\text{III.6})$$

III.6.1 Ratios V/H pour l'accélération spectrale et les paramètres de pic

Les ratios V/H (VHR-SA, VHR-PGA, VHR-PGV) expriment le rapport entre les composantes verticale et horizontale du mouvement du sol. La pratique historique d'utiliser un ratio constant de 2/3 s'est révélée inadéquate, les études modernes montrant que ce ratio dépend fortement de la fréquence (élevé pour les courtes périodes, faible pour les longues), de la distance à la faille (supérieur à 1,0 en champ proche) et des conditions de site (Bozorgnia & Campbell, 2004).

Ces ratios sont cruciaux pour la conception des structures à longue portée (ponts, hangars), les éléments en porte-à-faux, les installations stratégiques (centrales nucléaires, barrages), les appuis parasismiques (risque de décollement), et les réseaux enterrés. L'incertitude est particulièrement élevée car la composante verticale est plus sensible aux variations locales de la croûte terrestre et aux mécanismes de rupture, et les bases de données verticales sont historiquement moins fournies que les horizontales.

III.6.2 Échelle d'intensité JMA et conception aux états limites (LSD)

L'échelle JMA (Japan Meteorological Agency) est un paramètre instrumental calculé directement à partir des enregistrements accélérométriques, allant de 0 à 7 avec subdivision des niveaux 5 et 6. Son calcul rigoureux intègre un filtrage spécifique pondérant les fréquences intermédiaires (0,5 à 2 Hz) et un seuil de durée de 0,3 seconde, aboutissant à la formule $IJMA = 2,0 \times \log_{10}(a_0) + 0,94$. Elle est au cœur du système d'alerte précoce japonais (JMA, 1996).

La conception aux états limites (LSD Limit State Design) est le cadre méthodologique qui relie les paramètres d'intensité sismique à la performance structurelle, distinguant l'état limite de service (SLS), l'état limite de sécurité (ULS) et l'état limite de prévention de l'effondrement (CP). Ce cadre est implémenté dans tous les codes modernes (Eurocode 8, ASCE 7, RPA) et permet la conception basée sur la performance (Priestley, 2000).

$$AvgSA = \exp[(1/n) \times \sum \ln(SA(T_i))] \quad (III.7)$$

$$IA = (\pi/2g) \int_0^t [a(t)]^2 dt \quad (III.8)$$

$$CAV = \int_0^t |a(t)| dt \quad (III.9)$$

$$EAS(f) = \sqrt{(|FH1(f)|^2 + |FH2(f)|^2) / 2} \quad (III.10)$$

Conclusion

Ce troisième chapitre a présenté de manière exhaustive les paramètres d'intensité du mouvement du sol (IMTs) qui constituent l'interface quantitative entre la sismologie et l'ingénierie des structures. L'organisation en six familles paramètres de pic (PGA, PGV, PGD), paramètres spectraux (SA, SA1, SDI, AvgSA), paramètres d'énergie cumulative (IA, CAV), paramètres fréquentiels (FAS, EAS), paramètres de durée (RSD) et ratios V/H reflète la diversité des aspects du mouvement du sol que l'ingénieur doit appréhender.

Il ressort de cette analyse que le choix du paramètre d'intensité approprié dépend fondamentalement du type de structure et du phénomène étudié. Le PGA reste pertinent pour les structures rigides et l'évaluation de la liquéfaction, mais la SA à la période fondamentale du bâtiment est plus adaptée au dimensionnement des structures souples. Les paramètres d'énergie cumulative (IA, CAV) sont indispensables pour les phénomènes dépendants de la durée de la secousse, tandis que les paramètres fréquentiels (FAS, EAS) fournissent des informations uniques sur le contenu énergétique intrinsèque du mouvement du sol.

L'analyse systématique des incertitudes a révélé que celles-ci sont inhérentes à tous les niveaux : incertitudes de mesure et de traitement du signal, variabilité aléatoire liée à la complexité naturelle des séismes, et incertitude épistémique liée à notre connaissance imparfaite des phénomènes. La maîtrise de ces incertitudes est au cœur des modèles de prédiction du mouvement du sol (GMM), qui feront l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE IV :Modèles de prédiction sismiques (GMMs)

Introduction

Les modèles de prédiction du mouvement du sol (GMM Ground Motion Models), historiquement connus sous le nom de GMPE (Ground Motion Prediction Equations), constituent l'outil fondamental de l'ingénierie parasismique pour estimer statistiquement l'intensité des secousses en un site spécifique suite à une rupture sismique. Ces modèles mathématiques traduisent physiquement l'interaction entre la source (magnitude, type de faille), le trajet des ondes (atténuation avec la distance) et les conditions de site locales (amplification par les sols mous, V_{s30}), en s'appuyant sur de vastes bases de données d'enregistrements historiques (Douglas, 2003).

Ce quatrième et dernier chapitre de la revue documentaire présente les fondements théoriques, les formes fonctionnelles et les enjeux métrologiques des GMM. Dans un premier temps, la structure générale d'une GMPE est décrite, depuis le modèle physique de base (source ponctuelle et atténuation géométrique) jusqu'aux formes fonctionnelles les plus avancées intégrant la saturation en magnitude, l'atténuation anélastique, les effets de site non-linéaires et les ajustements régionaux. Dans un second temps, les cinq modèles NGA-West2 ASK, BSSA, CB, CY et IM (Abrahamson et al., 2014 ; Boore et al., 2014 ; Campbell & Bozorgnia, 2014 ; Chiou & Youngs, 2014 ; Idriss, 2014) sont analysés en détail, illustrant l'état de l'art en matière de prédiction du mouvement du sol. Enfin, la modélisation de la variabilité aléatoire, qui constitue le défi majeur de la discipline, est présentée, soulignant que la réduction de l'incertitude dans les GMM demeure un enjeu central pour l'amélioration de l'évaluation de l'aléa sismique.

IV.1 Qu'est-ce qu'un modèle de mouvement du sol (GMM) ?

L'équation de prédiction du mouvement sismique (GMPE) permet de rendre compte de la combinaison entre le mécanisme de rupture de la source sismique, la propagation des ondes sismiques entre la source et le site, et l'effet de site (Kramer, 1996). De manière fondamentale, la source est assimilée, dans le modèle physique de base, à un point source situé à l'hypocentre du séisme. Le modèle suppose que toute l'énergie du séisme est libérée à partir de ce point et que la propagation de cette énergie se fait sous forme d'ondes sphériques, accompagnées d'une décroissance géométrique de leur amplitude inversement proportionnelle à la distance entre la source et le site.

Si le milieu de propagation est élastique, seule l'atténuation géométrique est prise en compte. En notant Y l'amplitude du paramètre d'intérêt (PGA, PGV, SA), M la magnitude et

R la distance, on obtient $Y \propto f(M)/R$ (Lussou, 2001). En revanche, si le milieu est anélastique, la décroissance de l'amplitude est également fonction d'un paramètre c qui décrit le caractère dissipatif du milieu de propagation (Boore et al., 1982). Les coefficients a , b , c et d de la GMPE sont déterminés par régression statistique sur les bases de données de mouvements forts.

Dans la pratique, l'effet de site est pris en compte soit par un coefficient discret (classe de site) soit par un proxy continu des conditions de site tel que le V_{s30} . Par exemple, une relation prédictive du PGA peut s'écrire : $\ln(\text{PGA}_{ij}) = a \cdot M + b \cdot \ln(R) + c \cdot R + d \cdot S + \varepsilon$, où a est relié à la magnitude, b correspond à l'atténuation géométrique, c rend compte de l'atténuation anélastique, d est un coefficient lié au site, et ε représente la variabilité résiduelle (Douglas, 2003).

$$Y \propto f(M) / R \quad (\text{milieu élastique}) \quad (\text{IV.1})$$

IV.2 Évolution des formes fonctionnelles

Les formes fonctionnelles des GMM ont considérablement évolué au fil des décennies pour intégrer un nombre croissant de phénomènes physiques. Pousse (2005) propose une forme qui intègre l'effet de saturation avec la magnitude (Anderson, 2000 ; Douglas, 2003) : à mesure que la magnitude augmente, l'amplitude du mouvement du sol augmente d'autant moins vite, surtout à haute fréquence (effet d'échelle). Un autre type de saturation exprime le fait que l'amplitude du mouvement en champ proche de la source ne tient compte que partiellement du rayonnement total du phénomène de rupture d'une zone d'étendue finie (Campbell, 1981 ; Abrahamson & Silva, 1997).

L'effet de site est présent dans les GMPE par des coefficients qui définissent la nature géologique, le comportement rhéologique et dynamique du site. Généralement, la vitesse de propagation des ondes de cisaillement sur les 30 premiers mètres (V_{s30}) est utilisée comme indicateur de la rigidité du site. Cependant, ce proxy s'avère insuffisant (Derras et al., 2012), ce qui a motivé la recherche de paramètres complémentaires tels que la fréquence de résonance du site f_0 , la profondeur à $V_s = 800$ m/s (H800) et la pente topographique.

Les GMPE récentes proposent de remplacer le coefficient d'amplification simple par une fonction donnant l'amplification sismique d'un site en tenant compte du comportement linéaire et non-linéaire du sol. Choi et Stewart (2005) ont établi empiriquement un facteur d'amplification basé sur le V_{s30} et le PGA au rocher (PGA_{rock}), tandis que Boore et al. (2014) ont ajouté un terme modélisant l'effet des bassins par région.

$$Y \propto f(M) \times \exp(-cR) / R \text{ (milieu anélastique)} \quad (\text{IV.2})$$

IV.3 Structure de la variabilité aléatoire

Les paramètres caractérisant le mouvement du sol (M , R , V_{s30}) restent des indicateurs qui représentent partiellement les différents effets sur le mouvement sismique. Les effets non pris en compte engendrent la variabilité aléatoire du mouvement sismique. Le paramètre Y peut être écrit sous la forme : $\ln(Y) = \mu(X_{es}, \theta) + \delta$, où μ représente la médiane (partie expliquée), X_{es} le vecteur des variables indépendantes, θ le vecteur des coefficients de régression, et δ la partie inexpliquée de l'équation, c'est-à-dire la variabilité aléatoire (Al Atik et al., 2010).

La variabilité δ est usuellement décomposée en une variabilité inter-événement (between-event) B et une variabilité intra-événement (within-event) W . Les résidus inter-événements B_e représentent la variabilité liée à la source et reflètent l'influence de facteurs tels que la chute de contraintes et la variation du glissement de la faille qui ne sont pas pris en compte par la magnitude et le style de faille. Les résidus intra-événements W_{es} représentent les variations dues à la source, à la propagation d'onde et à l'effet de site non captés par les paramètres explicites du modèle (Strasser et al., 2009).

L'écart-type total σ est défini par : $\sigma^2 = \tau^2 + \varphi^2$, où τ est l'écart-type inter-événement et φ l'écart-type intra-événement. Boore et al. (2014) proposent une forme plus complexe de l'écart-type qui dépend de la magnitude et de la distance, nécessaire pour gérer l'expansion des données (NGA-West2 contient 6 fois plus d'enregistrements que NGA-West1) couvrant un large éventail de régions, de magnitudes et de distances. L'utilisation d'une forme simple avec une grande quantité de données, riche en faibles magnitudes, engendrerait des valeurs d'écart-type plus grandes, avec un impact important sur les résultats de l'aléa à longues périodes de retour (Bommer & Abrahamson, 2006).

$$\ln(Y_{ij}) = a \cdot M + b \cdot \ln(R) + c \cdot R + d \cdot S + \varepsilon_{ij} \quad (\text{IV.3})$$

IV.4 Modèles NGA-West2 : médiane et forme fonctionnelle

Les GMPE les plus récentes et les plus développées pour les séismes crustaux sont celles issues du projet NGA-West2 (Ancheta et al., 2014). En profitant de l'expansion phénoménale des données accélérométriques, ces cinq GMPE estiment le mouvement du sol et la variabilité aléatoire associée. Elles sont désignées par les abréviations : Abrahamson et al. (ASK 2014), Boore et al. (BSSA 2014), Campbell et Bozorgnia (CB 2014), Chiou et Youngs (CY 2014) et Idriss (IM 2014).

Les cinq modèles prennent en compte l'effet de saturation lié à la magnitude et contiennent un facteur de style du mécanisme au foyer. Cette dépendance diminue avec la magnitude : les modèles ASK, CB et CY réduisent ce facteur à zéro pour $M \leq 4,0-4,5$, tandis que BSSA et IM utilisent un style indépendant de la magnitude. Les modèles ASK, CB et CY présentent des formes fonctionnelles explicites pour la prise en compte de l'effet de hangingwall et un terme pour la profondeur de rupture. Le modèle BSSA évoque implicitement la prise en compte du hangingwall grâce à l'utilisation de la distance Joyner-Boore et ne contient pas de terme pour la profondeur de rupture, les auteurs ayant constaté que cet effet n'est pas significatif pour $M > 5$ (Gregor et al., 2014).

Les cinq GMPE utilisent le V_{s30} comme proxy des conditions de site. Le facteur d'amplification non-linéaire de site est fonction soit du PGA (pour BSSA et CB) soit du PSA au rocher (pour ASK et CY). Les modèles ASK, BSSA et CY intègrent également un facteur dépendant de la profondeur $Z1.0$, et le modèle CB un facteur dépendant de $Z2.5$. Sur la base de l'augmentation significative des données non californiennes, les modèles proposent des ajustements régionaux pour la réponse de site et l'atténuation anélastique à longue distance entre diverses régions géographiques.

$$\ln(Y) = \mu(Xes, \theta) + \delta \quad (IV.4)$$

IV.4.1 Consensus et divergences entre les modèles NGA-West2

Les cinq GMPE utilisent plus ou moins le même jeu de données avec différentes formes fonctionnelles et paramètres. La comparaison de leurs ordonnées spectrales, réalisée via l'outil distribué par le PEER (<http://ngawest2.berkeley.edu>), révèle l'absence de consensus en termes de forme, de valeurs spectrales et de contenu fréquentiel. À titre d'exemple, pour un scénario donné, le modèle ASK peut donner $PSA_{max} = 0,09$ g pour $T = 0,2$ s, tandis que le modèle CB présente $PSA_{max} = 0,13$ g pour $T = 0,1$ s (Gregor et al., 2014).

Pour illustrer les limites des GMPE face aux données réelles, la comparaison entre les modèles établis pour les zones de subduction japonaises et les PGA enregistrés lors du mégaséisme de Tohoku (11 mars 2011, Mw 9,0) montre que l'ensemble des modèles sous-estiment le mouvement sismique en champ proche et le surestiment en champ lointain. Ce résultat souligne que même les modèles les plus avancés ne peuvent pas prédire parfaitement la complexité des phénomènes sismiques réels.

IV.5 Modélisation de la variabilité aléatoire dans les modèles NGA-West2

Les quatre modèles ASK, BSSA, CB et CY supposent que la variabilité aléatoire du mouvement sismique dépend de la magnitude (la variabilité apparente diminue avec la magnitude) et de la distance (la variabilité apparente augmente avec la distance). De plus, les modèles dépendent tous de la période. La comparaison des écarts-types totaux des cinq modèles montre des différences significatives, illustrant que les choix méthodologiques (forme fonctionnelle, données utilisées, traitement des résidus) influencent directement la quantification de l'incertitude (Gregor et al., 2014).

La comparaison entre CY2014 et CY2008 est particulièrement instructive. Malgré l'utilisation d'un modèle de variabilité plus complexe et d'une base de données plus vaste (NGA-West2 vs NGA-West1), on observe que $\sigma(\text{CY2008}) < \sigma(\text{CY2014})$ pour $T < 3$ s. Cette observation démontre qu'on n'obtient pas forcément une réduction de la variabilité aléatoire en augmentant la taille de la base de données : l'ajout de données de différents sites et régions engendre plus de disparités qui ne sont pas captées par la forme fonctionnelle, même en ajoutant des coefficients de régression (Chiou & Youngs, 2014).

L'enjeu principal reste donc de diminuer l'incertitude de ces équations. Bommer et Abrahamson (2006) ont montré qu'une légère modification de la variabilité aléatoire a un grand impact sur l'estimation de l'aléa sismique. Strasser et al. (2009) ont documenté l'évolution de σ sur les trente dernières années, montrant que la réduction n'a pas été significative malgré des investissements lourds en réseaux accélérométriques, formes fonctionnelles et algorithmes de prédiction. Bommer et al. (2010) ont montré que le nombre de coefficients utilisés pour l'obtention des PGA est en nette croissance, une croissance qui n'a pourtant pas pu réduire significativement l'écart-type. Le défi de la réduction de l'incertitude dans les GMM pour une meilleure évaluation de l'aléa sismique demeure central dans la recherche sismologique contemporaine.

$$\delta = B_e + W_{es} \quad (\text{IV.5})$$

$$\sigma^2 = \tau^2 + \varphi^2 \quad (\text{IV.6})$$

$$Y \propto 10^{a.M} \cdot \frac{1}{R^b} \quad (\text{IV.6})$$

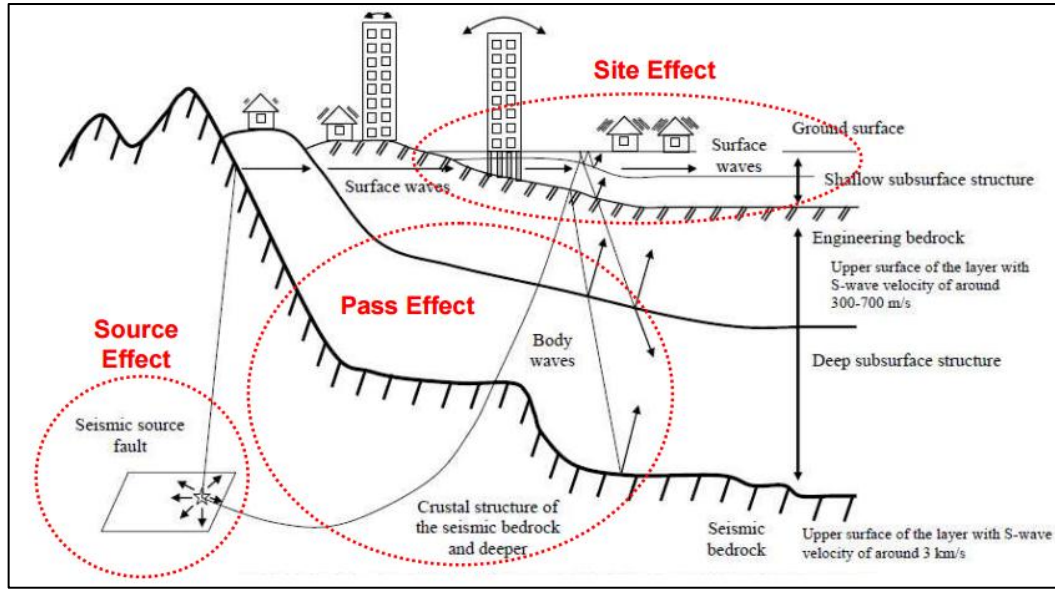


Figure. IV.1 Schéma illustratif des effets influençant le mouvement du sol à la surface (Yamada, 2013)

$$Y \propto 10^{a.M} \cdot \frac{1}{R^b} \cdot 10^{-c.R} \quad (\text{IV.7})$$

$$\log_{10}(Y) = a.M - b.\log_{10}(R) + d \quad (\text{IV.8})$$

$$\log_{10}(Y) = a.M - b.\log_{10}(R) - c.R + d \quad (\text{IV.9})$$

$$\log_{10}(PGA_{ij}) = a.M_i - b.\log_{10}(R_{ij}) - c.R_{ij} + d_j \quad j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (\text{IV.10})$$

PGA_{ij} est l'accélération maximale pour le $i^{\text{ème}}$ séisme, enregistré à la $j^{\text{ème}}$ station. Le coefficient « a » est relié à la magnitude, « c » dépend de la distance et rend compte de l'atténuation anélastique, $-b.\log_{10}(R)$ Corresponds à l'atténuation géométrique. Dans un milieu homogène, l'atténuation égale à $\frac{1}{R}$ et est égale à $\frac{1}{R^b}$ dans un milieu stratifié d'où le coefficient $b.d_j$ Est un coefficient lié au site sur lequel se trouve la station d'enregistrement. Et n est le nombre de sites étudiés. Les coefficients a , b , c et d sont déterminés souvent par régression. D'autres phénomènes physiques ont une influence sur le mouvement du sol et n'ont pas été pris en considération dans l'équation (I.13).

$$\log(Y) = A_1 + A_2.M + A_3.(M_{max} - M)^{A_4} + A_5.\log(R + A_6.e^{A_7.M}) + A_8.R + F^{source} + F^{site} \quad (\text{IV.11})$$

Dans l'équation (I.14) nous remarquons que $\log(Y)$ est proportionnel à la magnitude, mais des études récentes suggèrent un effet de saturation avec la magnitude (Anderson, 2000, Douglas, 2003). À mesure que la magnitude augmente, l'amplitude du mouvement du sol augmente d'autant moins vite surtout à haute fréquence. Cet effet s'appelle aussi effet

d'échelle. C'est ce à quoi fait référence le terme $(M_{max} - M)^{A_4}$. Un autre type de saturation a été perçu, qui exprime le fait que l'amplitude du mouvement en champ proche de la source ne tient compte que partiellement du rayonnement total du phénomène de rupture sismique d'une zone d'étendue finie (Campbell, 1981, Abrahamson and Siva 1997). Cet effet de saturation à courte distance se traduit dans l'équation par une pente de l'atténuation géométrique qui diminue en champ proche $A_6 \cdot e^{A_7 \cdot M}$. En outre, le modèle de prédiction rend également compte d'une atténuation anélastique $A_8 \cdot R$ qui traduit l'absorption de l'énergie dans le milieu traversé par les ondes sismiques (Pousse, 2005).

L'effet de site est présent dans les GMPEs par des coefficients F^{site} . Ils définissent la nature géologique, le comportement rhéologique et dynamique du site en question. Généralement la vitesse de propagation des ondes de cisaillement (qui sont les plus destructives : leurs fréquences et modes propres de vibration sont similaires à la plupart des structures courantes) est utilisée comme indicateur de la rigidité du site. En pratique et par convention, cette vitesse est calculée sur les 30 premiers mètres de profondeur (V_{s30}). Cependant, ce proxy de site s'avère insuffisant (Derras et al. 2012), d'autres paramètres de site méritent donc d'être testés, à savoir la fréquence de résonance du site f_0 , la profondeur à une vitesse des ondes de cisaillement égale à 800 m/s H_{800} , la pente topographique et autres proxies de site. L'étude de ces proxies est l'un des objectifs de ce projet de thèse.

Les GMPEs récentes proposent de remplacer le coefficient F^{site} par une fonction donnant l'amplification sismique d'un site en tenant compte du comportement linéaire et non linéaire du sol tel que :

$$F^{site} = F_L^{site} + F_{LN}^{site} \quad (IV.12)$$

$$F^{site} = \log(Amp) = a \cdot \log\left(\frac{V_{s30}}{V_{ref}}\right) + b \cdot \left(\frac{PGA_{rock}}{0.1}\right) \quad (IV.13)$$

$$\log(Y) = f(X_{es}, \theta) + \Delta \quad (IV.14)$$

$f(X_{es}, \theta)$ est la médiane qui représente la partie expliquée de l'équation de prédiction du mouvement sismique. X_{es} représente le vecteur des variables indépendantes (magnitude, distance, style de la faille, conditions de site, etc.). θ est le vecteur qui symbolise les coefficients de régression et Δ représente la partie inexpliquée de l'équation. Il s'agit de la variabilité aléatoire qui décrit l'ensemble des incertitudes. Δ tient compte aussi de la dispersion des données autour de la valeur médiane prédite $\log(Y)$.

$$\delta B_e = \frac{1}{n_e} \sum_{e=1}^{n_e} \Delta \quad (\text{IV.15})$$

$$\Delta = (\log(Y) - f(X_{\text{es}}, \theta)) \quad (\text{IV.16})$$

$$\delta W_{\text{es}} = \Delta - \delta B_e \quad (\text{IV.17})$$

$$\log(Y) = f(X_{\text{es}}, \theta) + \delta B_e + \delta W_{\text{es}} \quad (\text{IV.18})$$

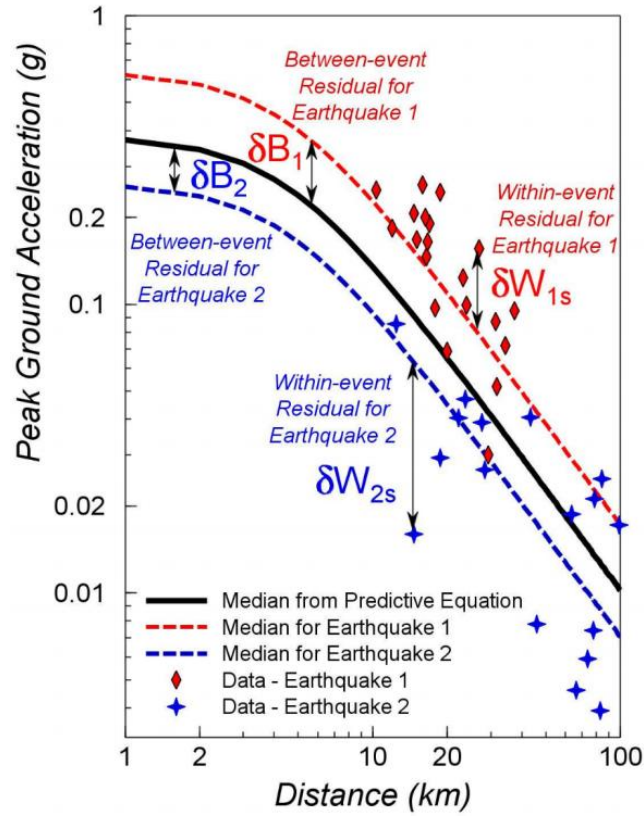


Figure. IV.2. Composantes inter-événements (between-events) et intra-événements (within-events) de la variabilité aléatoire du mouvement sismique (Strasser et al. 2009)

$$\sigma = \sqrt{\tau^2 + \phi^2} \quad (\text{IV.19})$$

$$\sigma(M, R_{JB}, V_{s30}) = \sqrt{\tau^2(M) + \phi^2(M, R_{JB}, V_{s30})} \quad (\text{IV.20})$$

Update of the Chiou and Youngs NGA Model for the Average Horizontal Component of Peak Ground Motion and Response Spectra

Brian S.-J. Chiou^{a)} and Robert R. Youngs^{b)} M.EERI

We present an update to our 2008 NGA model for predicting horizontal ground motion amplitudes caused by shallow crustal earthquakes occurring in active tectonic environments. The update is based on analysis of the greatly expanded NGA-West2 ground motion database and numerical simulations. The updated model contains minor adjustments to our 2008 functional form related to style of faulting effects, hanging wall effects, scaling with the depth to top of rupture, scaling with sediment thickness, and the inclusion of additional terms for the effects of fault dip and rupture directivity. In addition, we incorporate regional differences in far-source distance attenuation and site effects between California and other active tectonic regions. Compared to our 2008 NGA model, the predicted medians by the updated model are similar for $M > 7$ and are lower for $M < 5$. The aleatory variability is larger than that obtained in our 2008 model. [DOI: 10.1193/072813EQS219M]

M	=	Moment magnitude.
R_{RUP}	=	Closest distance (km) to the ruptured plane.
R_B	=	Closest distance (km) to the surface projection of rupture plane.
R_X	=	Site coordinate (km) measured perpendicular to the fault strike from the fault line, with the down-dip direction being positive.
F_{HW}	=	Hanging-wall flag: 1 for $R_X \geq 0$ and 0 for $R_X < 0$.
δ	=	Fault dip angle.
Z_{TOR}	=	Depth (km) to the top of ruptured plane.
ΔZ_{TOR}	=	Z_{TOR} centered on the M -dependent average Z_{TOR} (km).
F_{RF}	=	Reverse-faulting flag: 1 for $30^\circ \leq \lambda \leq 150^\circ$ (combined reverse and reverse-oblique), 0 otherwise; λ is the rake angle.
F_{NM}	=	Normal faulting flag: 1 for $-120^\circ \leq \lambda \leq -60^\circ$ (excludes normal-oblique), 0 otherwise.
V_{510}	=	Travel-time averaged shear-wave velocity (m/s) of the top 30 m of soil.
$Z_{1.0}$	=	Depth (m) to shear-wave velocity of 1.0 km/sec.
$\Delta Z_{1.0}$	=	$Z_{1.0}$ centered on the V_{510} -dependent average $Z_{1.0}$ (m).
DPP	=	Direct point parameter for directivity effect.
ΔDPP	=	DPP centered on the site- and earthquake-specific average DPP .

$$\begin{aligned}
 \ln(y_{ref}) = & c_1 \\
 & + \left\{ c_{1a} + \frac{c_{1b}}{\cosh(2 \cdot \max(M_i - 4.5, 0))} \right\} F_{RF} \\
 & + \left\{ c_{1b} + \frac{c_{1c}}{\cosh(2 \cdot \max(M_i - 4.5, 0))} \right\} F_{NM} \\
 & + \left\{ c_7 + \frac{c_{7b}}{\cosh(2 \cdot \max(M_i - 4.5, 0))} \right\} \Delta Z_{TOR} \\
 & + \left\{ c_{11} + \frac{c_{12}}{\cosh(2 \cdot \max(M_i - 4.5, 0))} \right\} (\cos \delta_i)^2 \\
 & + c_2 (M_i - 6) + \frac{c_3 - c_4}{c_n} \ln(1 + e^{c_n(c_M - M_i)}) \\
 & + c_4 \ln(R_{RUP} + c_5 \cosh(c_6 \cdot \max(M_i - c_{RM}, 0))) \\
 & + (c_{4a} - c_4) \ln(\sqrt{R_{RUP}^2 + c_{4b}^2}) \\
 & + \left\{ c_{11} + \frac{c_{12}}{\cosh(\max(M_i - c_{13}, 0))} \right\} R_{RUP} \\
 & + c_2 \max\left(1 - \frac{\max(R_{RUP} - 40, 0)}{30}, 0\right) \min\left(\frac{\max(M_i - 5.5, 0)}{0.8}, 1\right) e^{-c_{1a}(M_i - c_{1a})^2} \Delta DPP_i \\
 & + c_9 F_{HW} \cos \delta_i \left\{ c_{9a} + (1 - c_{9a}) \tanh\left(\frac{R_{RUP}}{c_{9b}}\right) \right\} \left\{ 1 - \frac{\sqrt{R_{RUP}^2 + Z_{TOR}^2}}{R_{RUP} + 1} \right\} \\
 \ln(y_g) = & \ln(y_{ref}) + \eta_i \\
 & + \phi_1 \cdot \min\left(\ln\left(\frac{V_{510j}}{1130}\right), 0\right) \\
 & + \phi_2 \left(e^{\phi_3(\min(V_{510j} - 360) - 360)} - e^{\phi_3(1130 - 360)} \right) \ln\left(\frac{y_{ref} e^{\eta_i + \phi_4}}{\phi_4}\right) \\
 & + \phi_5 \left(1 - e^{-\Delta Z_{1.0j} / \phi_5} \right) \\
 & + \varepsilon_g
 \end{aligned} \tag{12}$$

Figure. IV.3. Forme fonctionnelle donnée par Chiou and Youngs (2014)

Savoir si avec les 5 GMPEs nous obtenons le même niveau de mouvement sismique, nous comparons leurs ordonnées spectrales. Pour ce faire, nous utilisons l'outil distribué par PEER (<http://ngawest2.berkeley.edu>). La figure. I.24 représente les valeurs des métadonnées choisies pour effectuer ce test et les 5 spectres de réponse en accélération issus des 5 GMPEs. À travers cette comparaison nous pouvons constater l'absence d'un consensus en termes de forme, de valeurs spectrales (PSA) et contenu fréquentiel (1/T). À titre d'exemple, le modèle ASK donne une valeur de $PSA_{max}=0.09$ g pour $T=0.2$ s, tandis que le modèle CB présente un $PSA_{max}=0.13$ g pour une période égale à 0.1 s.

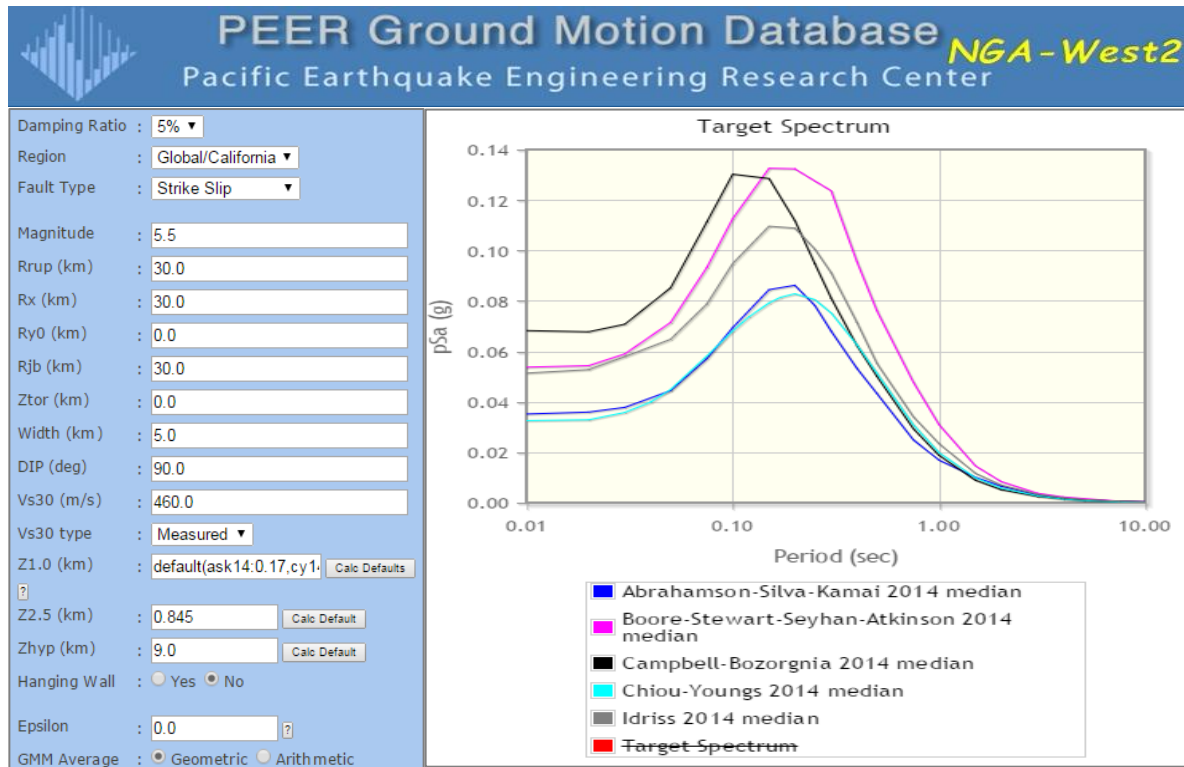


Figure. IV.4. Spectres de réponse des 5 GMPEs pour un scénario

donné (<http://ngawest2.berkeley.edu>).

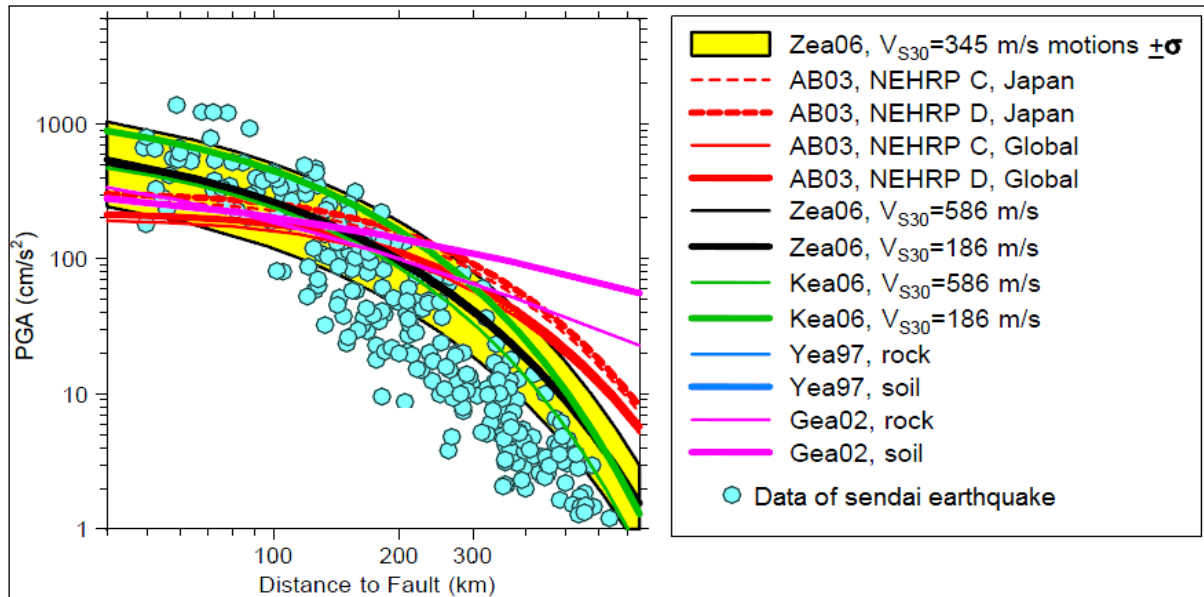


Figure. IV.5. Comparaison entre les GMPEs élaborées pour les événements de subduction au Japon et les PGA enregistrés lors du séisme de Tohoku.

http://daveboore.com/daves_notes/comparisons_of_ground_motions_from_the_m_9_tohoku_earthquake_with_gmpes_w4.pdf

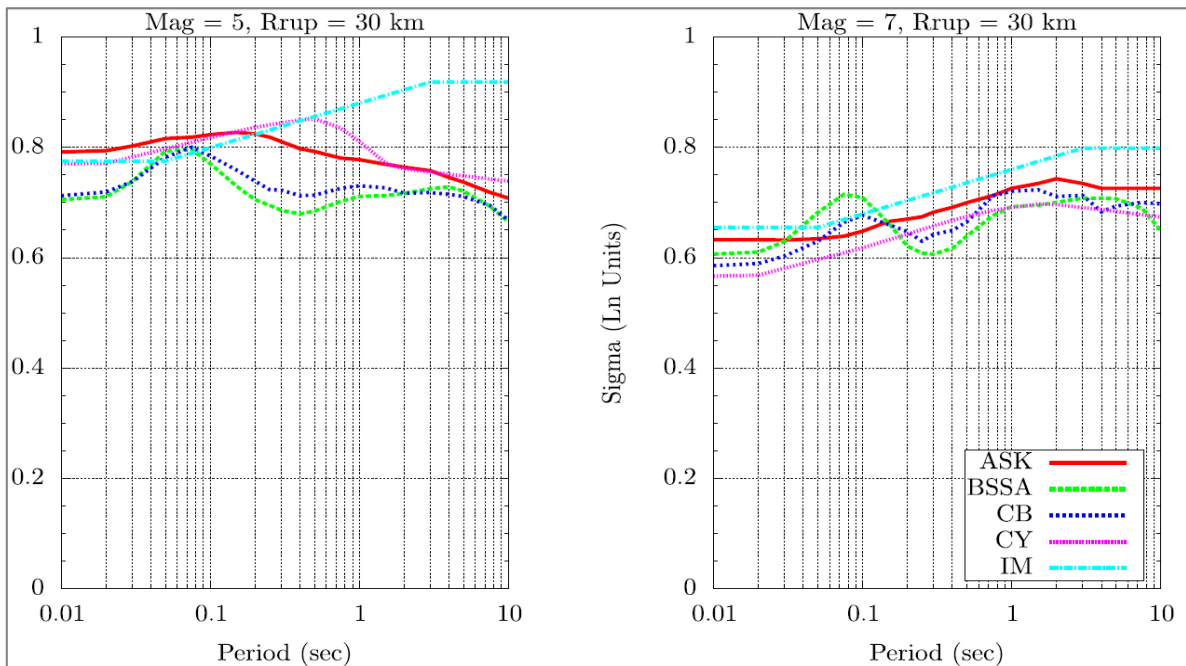


Figure. IV.6. Comparaison de l'écart type (σ) pour $M=5$ pour des séismes à faille décrochant à une distance de rupture R_{rup} égale à 30 km et pour $V_{s30} = 760$ m/s (Gregor et al. 2014).

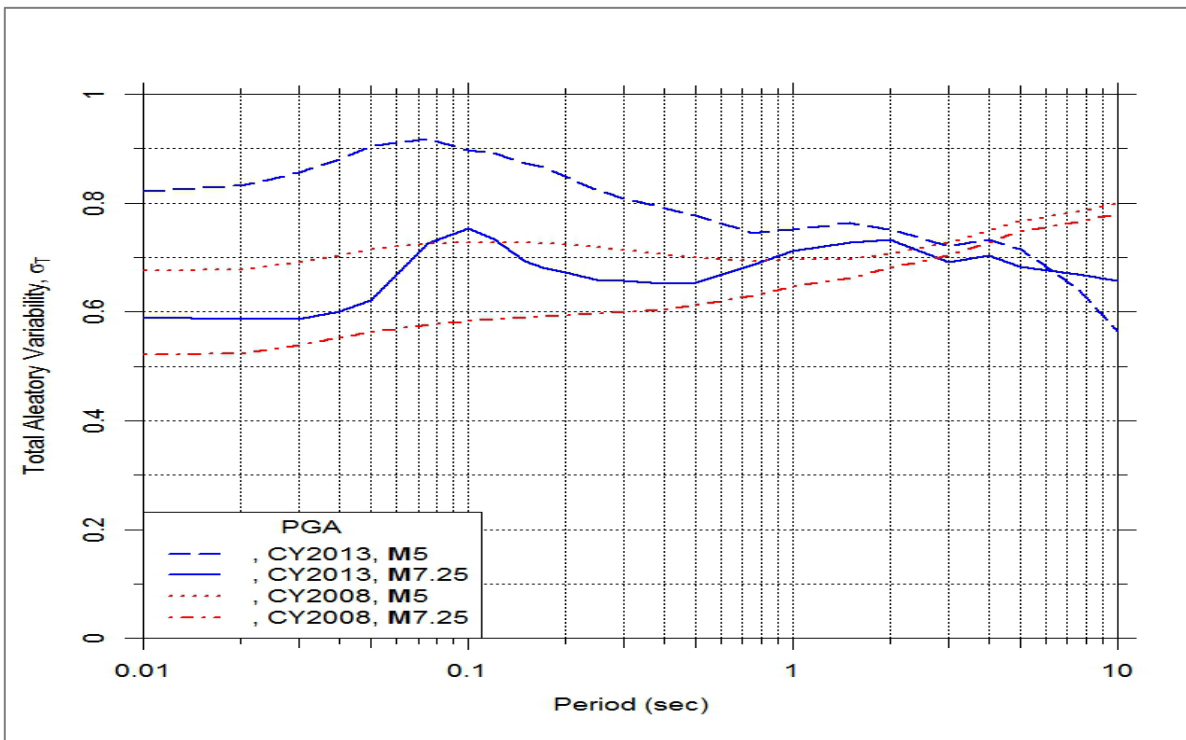


Figure. IV.7. Comparaison entre l'écart type (σ) vs périodes (s) de CY2008 et CY2014 (Chiou and Youngs 2013).

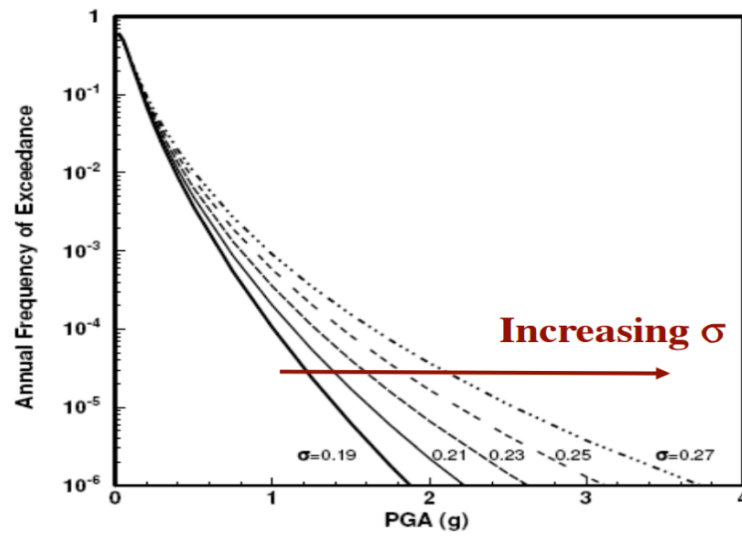


Figure. IV.8. Impact de la valeur de σ sur l'aléa sismique probabiliste (Bommer and Abrahamson, 2006).

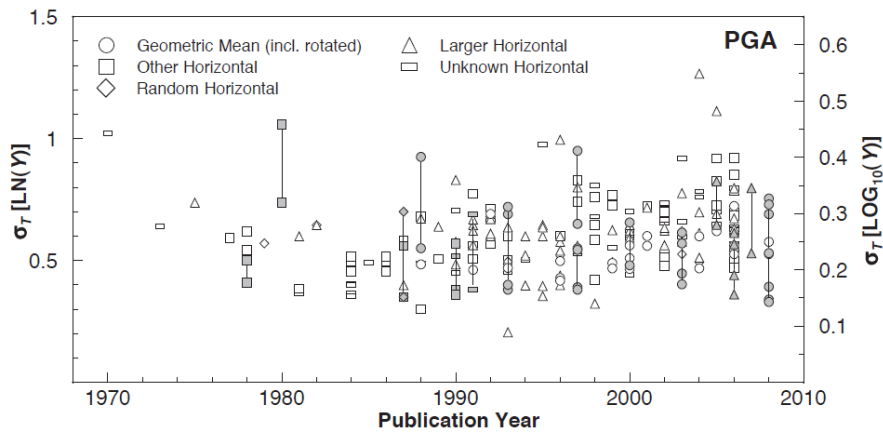


Figure. IV.9.Évolution de σ durant les 30 dernières années (Strasser et al. 2009)

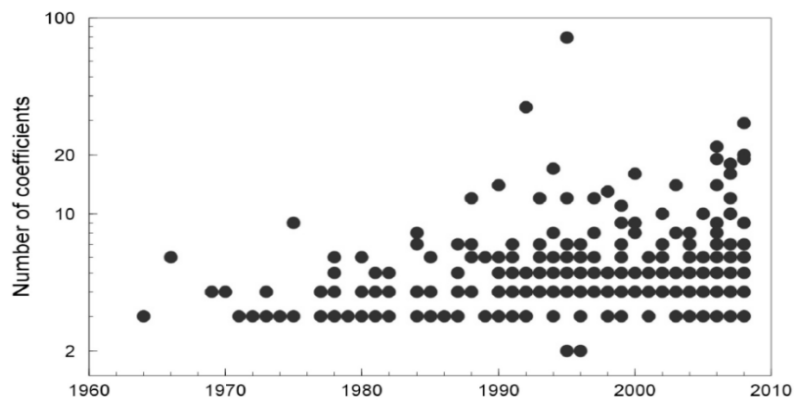


Figure IV.10.Nombre de paramètres utilisés dans les GMPEs entre 1964-2009(Bommer et al. 2010)

Conclusion

Ce quatrième chapitre a présenté les fondements théoriques et les développements récents des modèles de mouvement du sol (GMM/GMPE), qui constituent le moteur de calcul indispensable à l'évaluation de l'aléa sismique et au dimensionnement parasismique des structures.

L'évolution des formes fonctionnelles, depuis le modèle physique de base (source ponctuelle, atténuation géométrique, milieu élastique) jusqu'aux modèles NGA-West2 intégrant la saturation en magnitude, l'atténuation anélastique, les effets de site non-linéaires, le hangingwall, la directivité et les ajustements régionaux, témoigne de la complexité croissante de la modélisation du mouvement sismique. L'analyse détaillée des cinq modèles NGA-West2 (ASK, BSSA, CB, CY et IM) a mis en évidence l'absence de consensus absolu entre les modèles en termes de forme fonctionnelle, de valeurs spectrales prédites et de traitement de l'incertitude, soulignant la nécessité d'utiliser des approches multi-modèles (arbre logique) dans les analyses d'aléa probabilistes.

Le constat fondamental que l'augmentation de la taille des bases de données et de la complexité des formes fonctionnelles n'a pas conduit à une réduction significative de l'écart-type sur les trente dernières années oriente la recherche vers des approches novatrices. C'est dans cette perspective que s'inscrit l'étude paramétrique développée dans les chapitres VI, où nous confronterons les prédictions de neuf GMMs à la réglementation algérienne RPA 2024. Mais avant cela, nous allons, dans le chapitre suivant, présenter le bâtiment avec l'analyse modale et les vérifications associées.

CHAPITRE V :
Présentation du bâtiment
et analyse modale

Introduction

La conception parasismique des structures constitue aujourd'hui l'un des enjeux majeurs du génie civil, particulièrement dans les régions à sismicité modérée à élevée. Face aux risques que représentent les séismes pour la sécurité des personnes et la pérennité des ouvrages, les ingénieurs disposent de plusieurs règlements parasismiques qui encadrent la conception et le dimensionnement des structures.

Dans ce contexte, le présent travail se propose d'effectuer une étude comparative entre le RPA2024 (Règlement Parasismique Algérien 2024) et 9 GMMs (Ground Motion Models), qui représentent différentes lois d'atténuation utilisées pour caractériser l'aléa sismique. L'objectif est d'analyser et de confronter les approches adoptées par le règlement algérien et ces différents modèles, tant sur le plan des principes fondamentaux que sur celui des résultats obtenus.

Pour mener cette étude, un bâtiment R+10 à usage d'habitation, de configuration symétrique, a été choisi comme modèle de référence. Ce choix permet de disposer d'un cas concret et représentatif des constructions résidentielles courantes, tout en facilitant l'interprétation et la comparaison des résultats.

L'ensemble des calculs et des modélisations a été réalisé à l'aide du logiciel Autodesk Robot Structural Analysis, qui offre un cadre numérique fiable et rigoureux pour l'application des différentes méthodes d'analyse sismique.

Ce chapitre s'articule autour de la présentation du bâtiment étudié, de l'analyse modale associée, puis de l'application du RPA2024 et des 9 GMMs, avant de conclure par une synthèse comparative des résultats obtenus.

V.1. Présentation du projet

V.1.1. Description générale

L'ouvrage étudié est un bâtiment à usage d'habitation collectif composé d'un rez-de-chaussée et de dix étages courants (R+10). Il s'inscrit dans le cadre du programme « 160 logements publics locatifs » implanté dans la wilaya d'Alger. Le bâtiment présente un plan irrégulier dans les deux directions principales (X et Y), ce qui conditionne la stratégie de contreventement adoptée.

V.1.1.1. Vue de la structure (3D) :

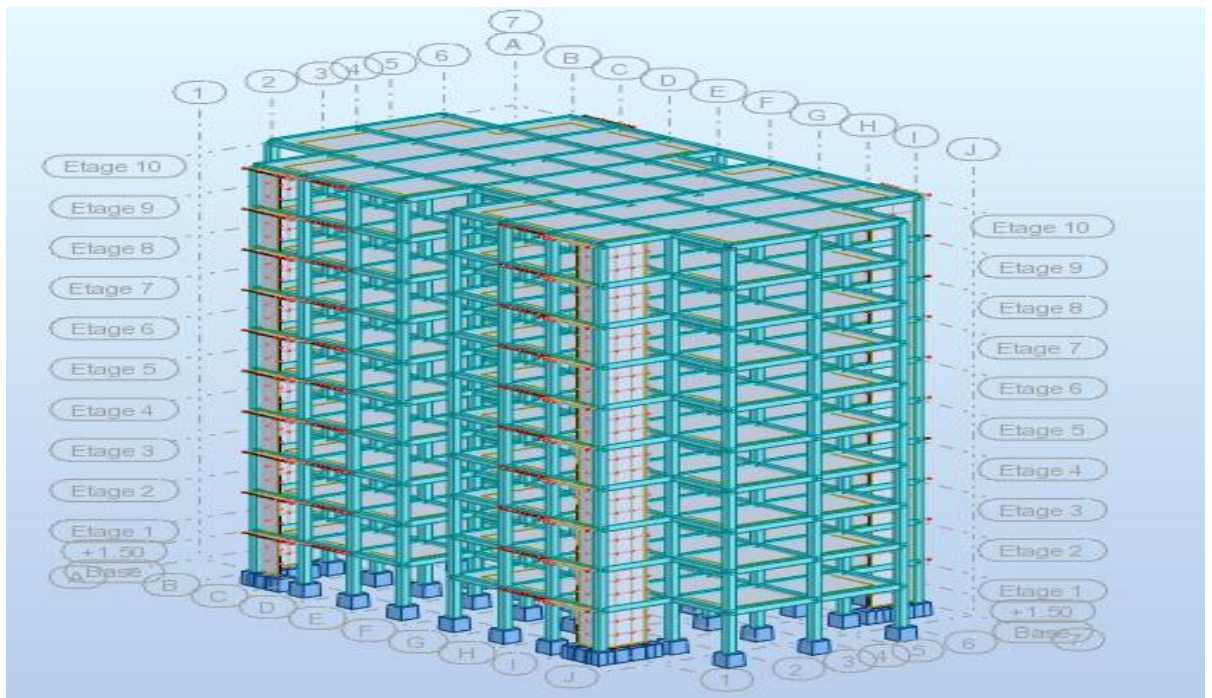


Figure.V.1 vue de bâtiment R+10

V.1.1.2. Plan d'architecture RDC et Etage courant:

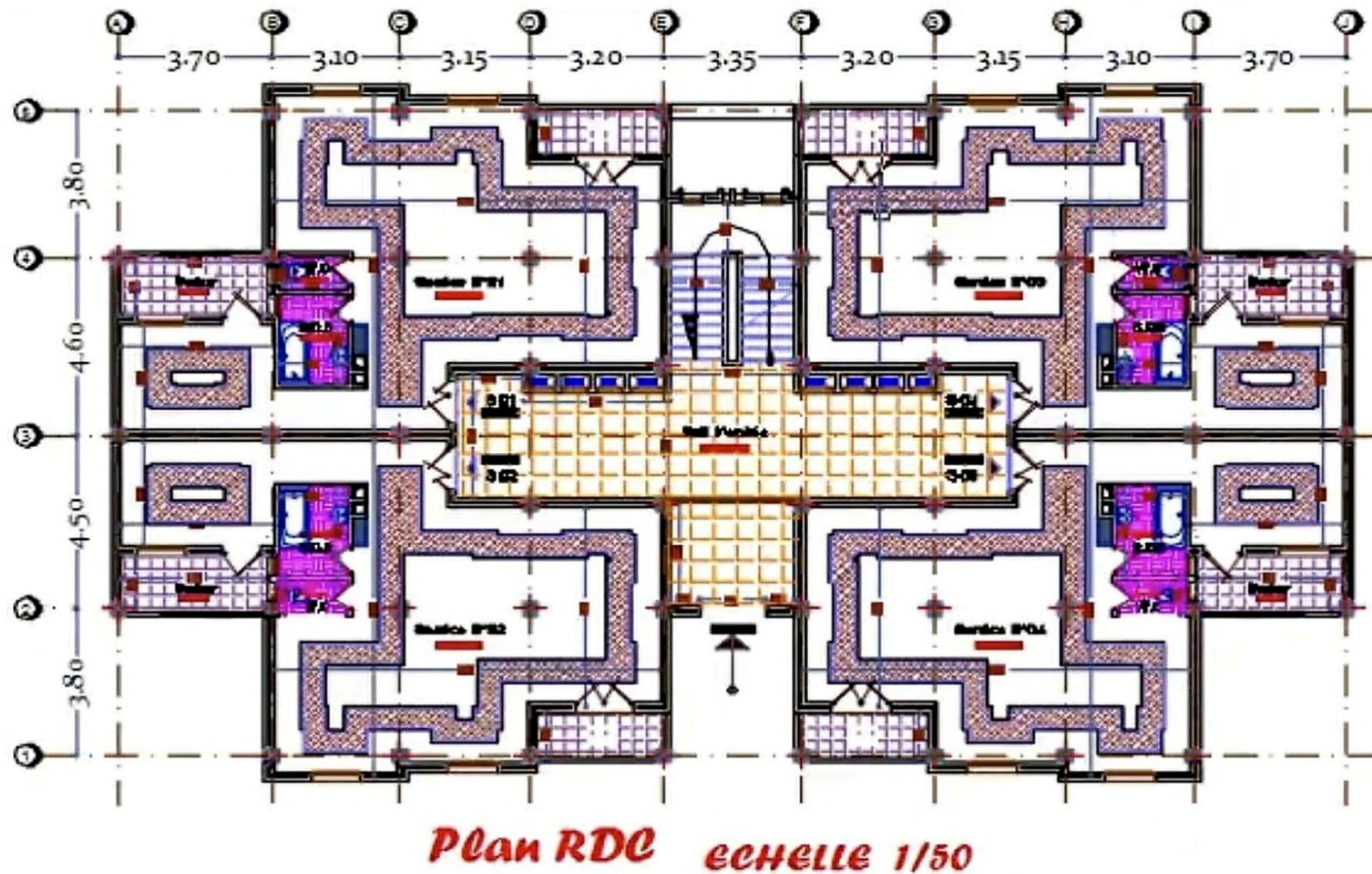


Figure.V. 1Vue du bâtiment en plan RDC

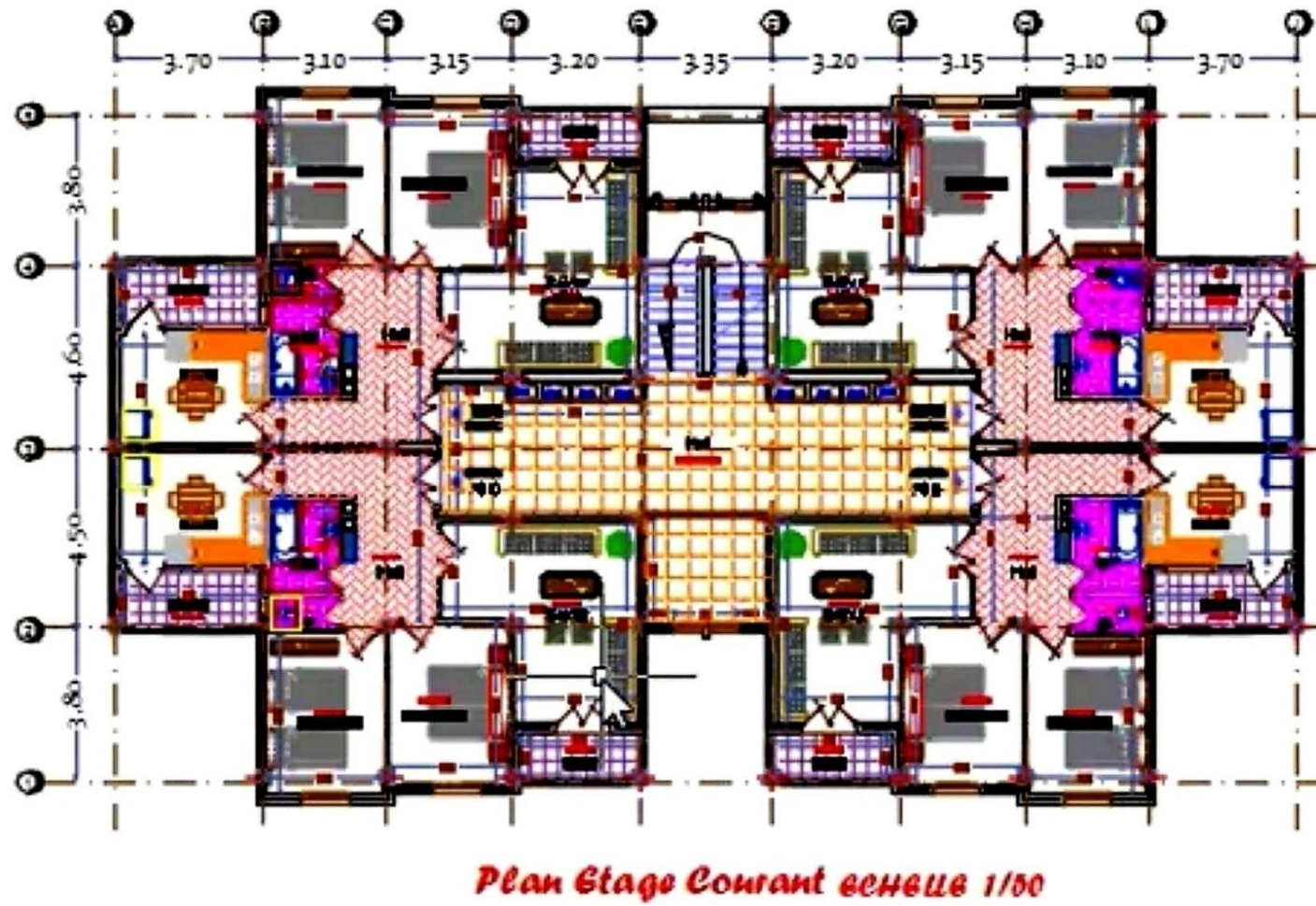


Figure.V.3 Vue du bâtiment en plan Etage courant

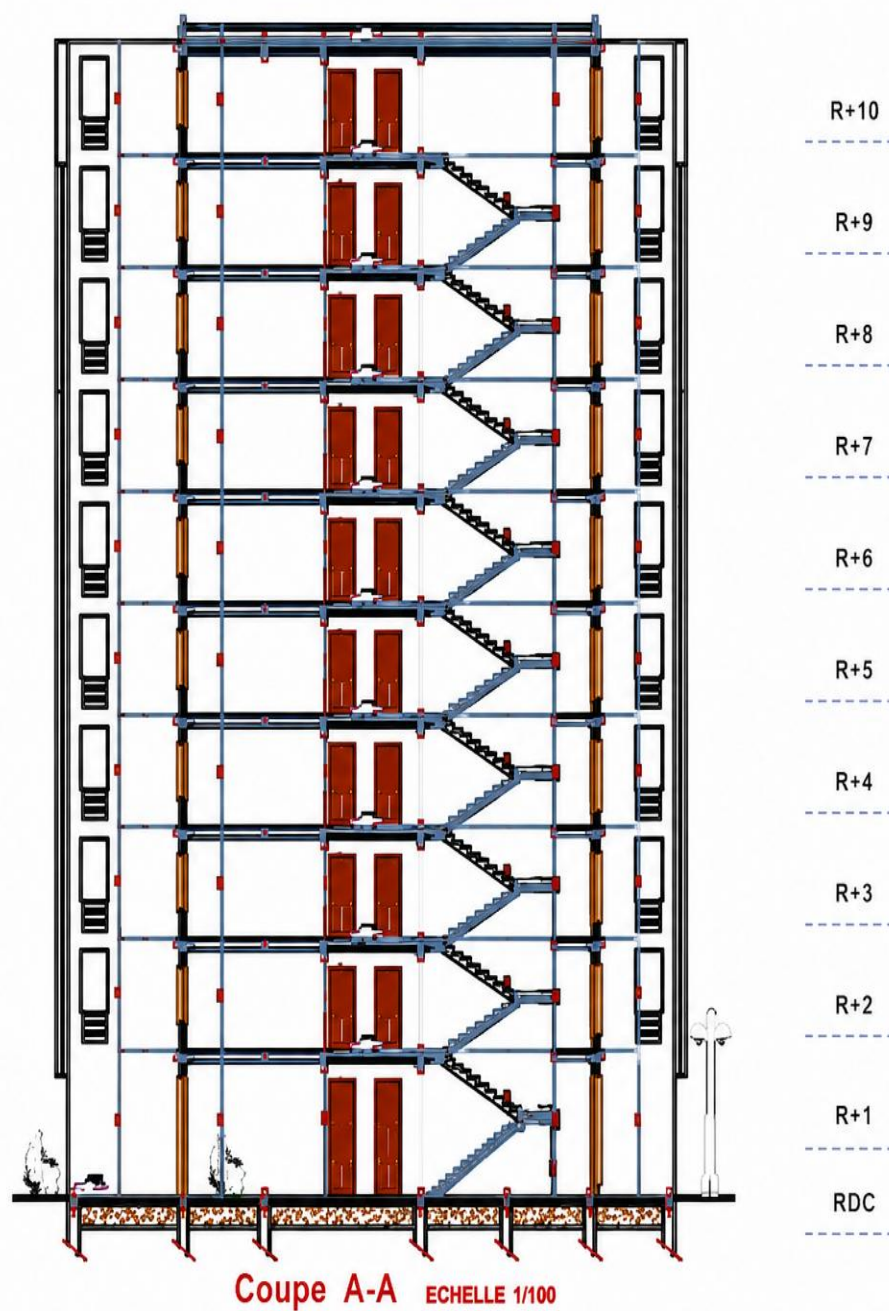


Figure.V.4. Vue du bâtiment en élévation

V.2.2 Caractéristiques géométriques

Les principales dimensions de l'ouvrage sont consignées dans le tableau suivant :

Tableau V.1 – Caractéristiques géométriques du bâtiment

Paramètre	Valeur
Longueur totale	29,65 m
Largeur totale	16,70 m
Hauteur du RDC / Hauteur d'étage courant	3,00 m
Nombre de niveaux	R + 10
Hauteur totale	30,00 m

V.2.3 Paramètres de conception

La conception de l'ouvrage repose sur les paramètres réglementaires suivants :

- Catégorie d'ouvrage : bâtiment d'habitation (groupe d'importance II) ;
- Forme en plan : irrégulière dans les deux directions X et Y ;
- Zone sismique : Alger – Zone III selon le RPA 2024 ;
- Classe de site : S3 (sol meuble de rigidité moyenne) ;
- Coefficient d'accélération de zone : $A = 0,30 \text{ g}$;
- Facteur d'importance : $I = 1,0$;
- Coefficient de comportement : $R = 4,5$ (système mixte portiques-voiles).

V.3.Système structurel

V.3.1 Type de contreventement

Conformément aux dispositions du RPA 2024, le système de contreventement retenu pour ce bâtiment est un contreventement mixte, associant voiles en béton armé et portiques en béton armé, dans les deux directions principales X et Y. Ce système garantit à la fois ductilité et rigidité face aux sollicitations sismiques horizontales.

Les sections des éléments structuraux adoptées sont les suivantes :

- Voiles en béton armé : épaisseur $e = 15 \text{ cm}$;
- Poteaux : section carrée $40 \times 40 \text{ cm}^2$;
- Poutres principales : section rectangulaire $30 \times 40 \text{ cm}^2$;
- Poutres secondaires (chaînages) : section carrée $30 \times 30 \text{ cm}^2$.

V.3.2 Éléments structuraux

V.3.2.1 Poutres principales ($30 \times 40 \text{ cm}^2$)

La poutre principale constitue l'élément horizontal fondamental de la structure. Elle assure la transmission des charges de plancher vers les éléments verticaux porteurs (poteaux et voiles) et garantit la continuité structurale de l'ouvrage. Sa section de $30 \times 40 \text{ cm}^2$ est dimensionnée pour reprendre les moments fléchissants et les efforts tranchants issus des combinaisons ELU et sismiques.



Figure V.5. Dimensions d'une poutre

V.3.2.2 Poutressecondaires Chaînages ($30 \times 30 \text{ cm}^2$)

Les poutres secondaires, ou chaînages, participent à la rigidité d'ensemble de la structure en assurant la liaison entre les éléments verticaux et en limitant les déformations hors plan des planchers. Elles constituent les « liens invisibles » qui maintiennent la cohérence et la stabilité de l'ouvrage.

V.3.2.3 Planchers à corps creux ($16 + 4 \text{ cm}$)

Les planchers de tous les niveaux sont réalisés en corps creux ($16 + 4 \text{ cm}$). Ce choix est justifié par trois avantages principaux :

- Facilité d'exécution sur chantier, grâce à la légèreté des blocs alvéolaires ;

- Réduction de la masse sismique des planchers, ce qui diminue directement les forces inertielles ;
- Économie de matière par rapport aux dalles pleines, pour des portées équivalentes.

La combinaison du béton coulé en place et des blocs alvéolaires forme un plancher performant, léger et adapté aux constructions résidentielles courantes.

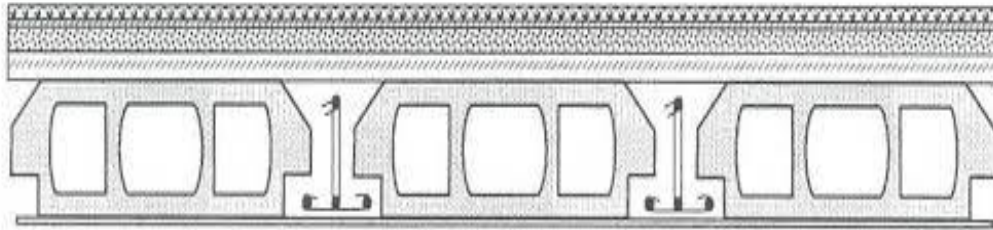


Figure V.6. Coupe longitudinale d'un plancher à corps creux type (16+4)

V.3.2.4 Voiles en béton armé ($e = 15 \text{ cm}$)

Les voiles en béton armé sont des panneaux verticaux coulés sur place qui remplissent deux fonctions essentielles. D'une part, ils reprennent les charges verticales transmises par les planchers et les acheminent vers les fondations. D'autre part, ils constituent le principal système de résistance aux forces horizontales (séisme, vent), empêchant la structure de se déformer ou de basculer. Leur rôle est analogue à celui d'une colonne vertébrale : rigides et indispensables à la stabilité globale de la construction dans toutes les directions.

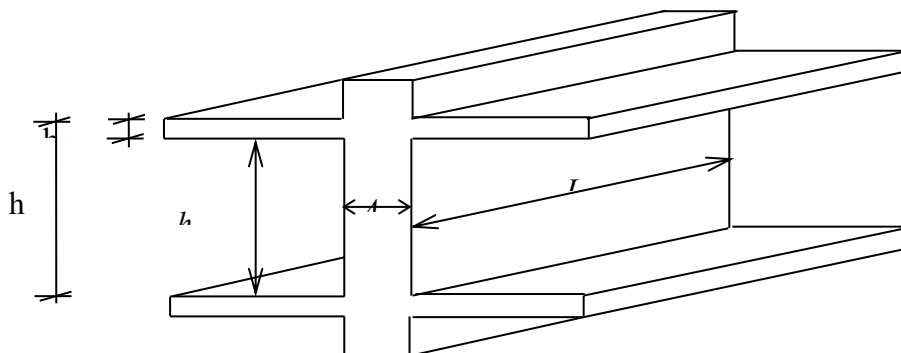


Figure V.7. Voile en élévation

V.3.2.5 Poteaux ($40 \times 40 \text{ cm}^2$)

Les poteaux sont des éléments verticaux en béton armé dont le rôle est de recueillir les charges provenant des planchers et des poutres, puis de les transmettre vers le bas jusqu'aux

fondations. Ils assurent la continuité verticale des efforts dans la structure. En combinaison avec les voiles, ils forment le squelette porteur de l'ouvrage.



Figure V.8. Poteaux en béton armé d'une section rectangulaire

V.3.3 Éléments non structuraux

V.3.3.1 Planchers Maçonnerie

Pour les cloisons et les façades, le bâtiment utilise la brique creuse en terre cuite, matériau le plus répandu en Algérie :

- Murs intérieurs : briques creuses de 10 cm d'épaisseur ;
- Murs extérieurs : double paroi composée d'une brique de 15 cm, d'une lame d'air de 5 cm et d'une brique de 10 cm.

Cette composition assure une bonne isolation thermique, conforme aux exigences du DTR C3-2/C3-31, tout en limitant le poids de la structure.

V.3.3.2 Escaliers (dalle pleine $e = 15$ cm)

La cage d'escalier comprend un escalier à deux volées séparées par un palier de repos intermédiaire. Les volées sont calculées comme des dalles pleines de 15 cm d'épaisseur. L'escalier assure la communication verticale entre tous les niveaux du bâtiment.

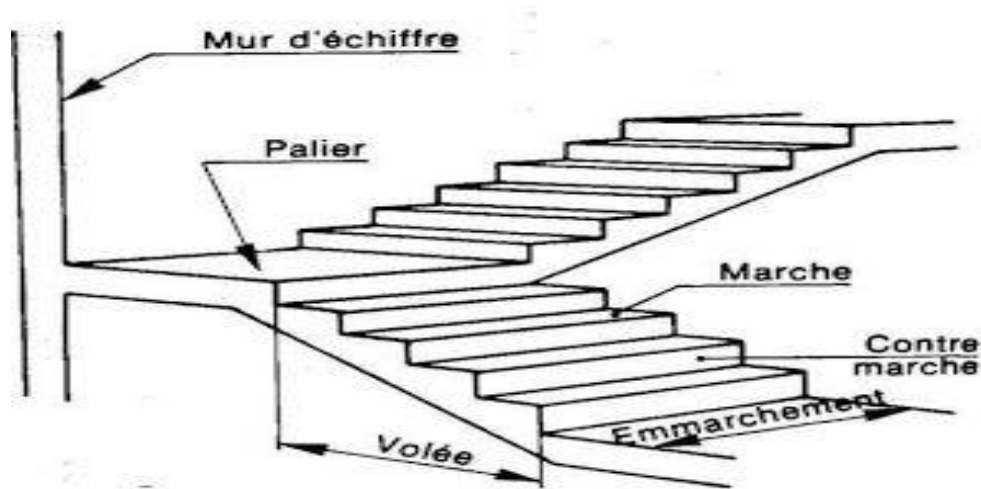


Figure V.9. Escalier en béton armé

V.3.3.3 Balcons (dalle pleine $e = 15\text{ cm}$)

Les balcons sont des dalles en béton armé en porte-à-faux, solidement encastrées dans les dalles de plancher. Ils sont calculés par bande d'un mètre de largeur, sous les charges permanentes de finition et les surcharges d'exploitation réglementaires.

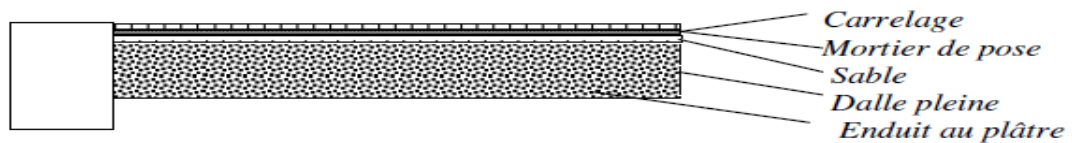


Figure V.10. Coupe sur balcon

V.4 Matériaux utilisés

V.4.1 Béton armé

Le béton armé est le matériau de construction composite utilisé pour tous les éléments structuraux du bâtiment. Il associe deux constituants complémentaires :

- Le béton (mélange de ciment, sable, granulats et eau) : très résistant à la compression, mais fragile en traction. La résistance caractéristique à la compression adoptée est $f_{c28} = 25\text{ MPa}$;

- L'acier (sous forme de barres HA et treillis soudés) : excellent en traction et en flexion, mais sensible à la corrosion seul. La limite élastique de calcul est $f_e = 400\text{ MPa}$ (acier FeE400).

Ensemble, ils forment un matériau qui résiste efficacement aux efforts de compression, de traction et de flexion, ce qui le rend idéal pour les structures parasismiques soumises à des sollicitations complexes.

V.5. Descente des charges

V.5.1 Plancher Terrasse inaccessible

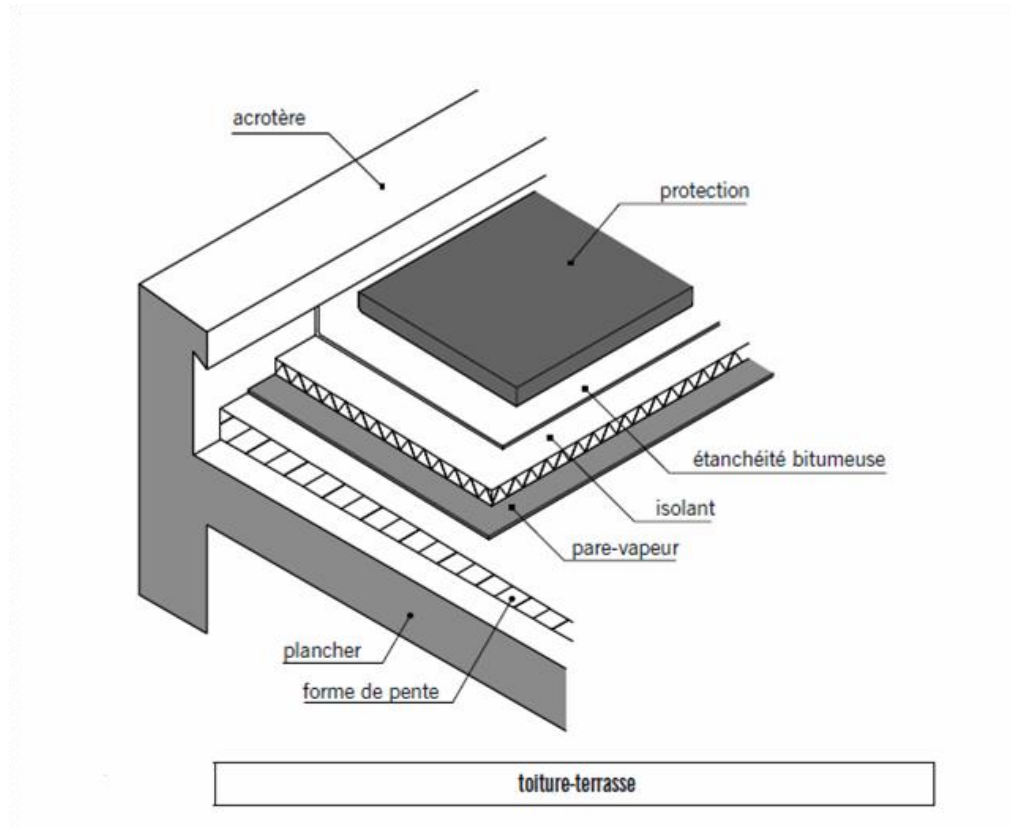


Figure V.11. Coupe transversale d'un plancher terrasse inaccessible.

La composition de la toiture-terrasse inaccessible est détaillée dans le tableau suivant :

Tableau V.2 – Descente des charges : plancher terrasse inaccessible

Désignation	ρ (kN/m ³)	e (m)	G (kN/m ²)
Protection gravillons	17	0.10	1.70
Étanchéité multicouche	6	0.02	0.12
Forme de pente	22	0.10	1.50
Isolation thermique	4	0.04	0.16
Dalle corps creux (16+4)	—	0.20	2.80
Enduit en plâtre	10	0.02	0.20
G total (kN/m ²)	6.5		
Q (kN/m ²)	1.00		

V.5.2 Plancher étage courant

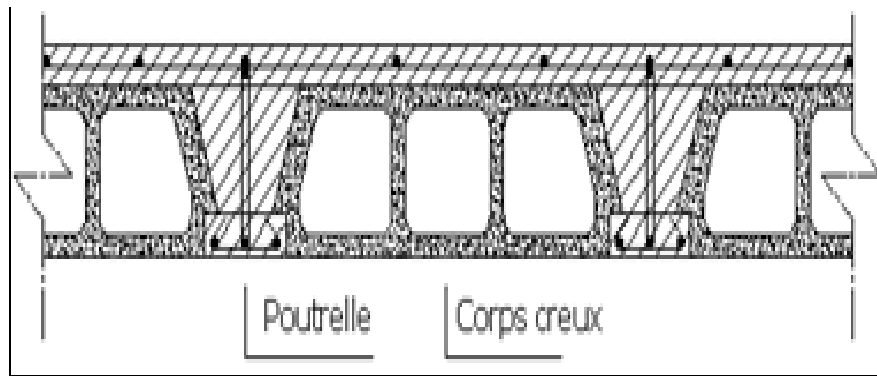


Figure V.12 Coupe transversale d'un plancher étage courant.

La composition du plancher d'étage courant est détaillée dans le tableau suivant :

Tableau V.3 – Descente des charges : plancher étage courant

Désignation	ρ (kN/m ³)	e (m)	G (kN/m ²)
Cloison en brique	9	0.10	0.90
Revêtement en carrelage	20	0.02	0.40
Mortier de pose	20	0.02	0.40
Lit de sable	17	0.02	0.34
Dalle corps creux (16+4)	—	0.20	2.80
Enduit en plâtre	10	0.02	0.20
G total (kN/m ²)	5.00		
Q (kN/m ²)	1.50		

V.6. Etat limite et combinaison d'action

V.6.1 États limites

Les états limites définissent les conditions au-delà desquelles la structure ne satisfait plus aux exigences de performance qui lui sont imposées. On distingue deux grandes catégories :

V.6.1.1 États limites ultimes (ELU)

Les ELU sont relatifs à la sécurité structurale et à la capacité portante de la construction. Ils concernent trois aspects fondamentaux :

- L'équilibre statique : la structure ne doit pas se renverser sous l'effet des charges appliquées ;

- La résistance des matériaux : ni le béton ni l'acier ne doivent atteindre la rupture ;
- La stabilité de forme : les éléments comprimés ne doivent pas subir de flambement.

V.6.1.2 États limites de service (ELS)

Les ELS sont relatifs aux conditions normales d'exploitation de l'ouvrage. Ils regroupent trois vérifications essentielles :

- L'état limite de déformation : limitation des flèches pour assurer le confort et la fonctionnalité ;
- L'état limite de contrainte : maintien des contraintes dans les limites admissibles en service ;
- L'état limite de fissuration : contrôle indispensable à la durabilité, notamment en milieu agressif.

V.6.2 Classification des actions

Les actions exercées sur la structure sont classées en trois catégories réglementaires :

V.6.2.1 Actions permanentes (G)

Les actions permanentes sont celles qui accompagnent la structure tout au long de sa vie, sans variation notable dans le temps. Elles incluent le poids propre de la structure porteuse, des revêtements de sol et de mur, des cloisons, ainsi que la poussée des terres contre les parois enterrées.

V.6.2.2 Actions variables (Q)

Les actions variables sont par nature fluctuantes et temporaires. Elles correspondent aux surcharges d'exploitation (personnes, mobilier), aux charges de chantier, et aux effets climatiques (neige, vent, variations de température).

V.6.2.3 Actions accidentelles (E)

Les actions accidentelles sont rares mais potentiellement très sévères. Elles ne durent qu'un court instant mais peuvent mettre en péril la structure. On cite notamment le séisme, le choc de véhicule contre un élément porteur, ou une explosion. Leur caractère imprévisible impose des règles de dimensionnement spécifiques.

V.6.3 Combinaisons d'actions – RPA 2024

V.6.3.1 Situation durable – ELU

Combinaison de base pour le dimensionnement sous charges gravitaires :

$$1,35 G + 1,5 Q$$

Coefficients de pondération permettant de vérifier la résistance à la ruine sous charges de service normales.

V.6.3.2 Situation durable – ELS

Combinaison pour le contrôle des déformations, flèches et fissuration en exploitation normale

$$G + Q$$

Aucun coefficient amplificateur ; les charges sont prises à leur valeur nominale.

V.6.3.3 Situation accidentelle – Combinaison sismique

Conformément au RPA 2024, les combinaisons sismiques introduisent l'action sismique E dans les deux directions horizontales (Ex et Ey) avec les huit cas de combinaisons suivants :

$$\begin{aligned} &G + Q + Ex + 0,3 Ey \\ &G + Q + Ex - 0,3 Ey \\ &G + Q - Ex + 0,3 Ey \\ &G + Q - Ex - 0,3 Ey \\ &G + Q + 0,3 Ex + Ey \\ &G + Q + 0,3 Ex - Ey \\ &G + Q - 0,3 Ex + Ey \\ &G + Q - 0,3 Ex - Ey \end{aligned}$$

V.7. Modélisation numérique sous Robot structural analysais 2017

V.7.1 Présentation du logiciel

Autodesk Robot Structural Analysis Professional est un logiciel de calcul et d'analyse des structures utilisé en génie civil et génie parasismique. La version 2017 utilisée dans cette étude apporte plusieurs améliorations significatives :

1. Amélioration du calcul des structures en béton armé et en acier ;
2. Meilleure génération du maillage par éléments finis, avec contrôle de la densité de maillage ;
3. Compatibilité renforcée avec Autodesk Revit (import/export BIM) ;

4. Correction de problèmes de stabilité numérique et de performance de calcul.

V.7.2 Justification du choix de Robot Structural

Le logiciel a été retenu pour les raisons suivantes :

1. Facilité de modélisation tridimensionnelle des structures complexes ;
2. Interface utilisateur intuitive, permettant une prise en main rapide ;
3. Résultats précis et cohérents avec les prescriptions réglementaires (RPA, BAEL, Eurocode) ;
4. Maîtrise acquise par les auteurs dans le cadre de leur formation universitaire.

V.8 Analyse Modale

V.8.1 Généralités

L'analyse modale par superposition spectrale est la méthode d'analyse dynamique recommandée par le RPA 2024 pour les structures irrégulières en plan ou en élévation. Elle permet de déterminer les modes propres de vibration de la structure et d'évaluer la participation massique de chaque mode, critère indispensable pour apprécier la pertinence de la modélisation.

Le RPA 2024 exige que le nombre de modes pris en compte soit tel que la somme des participations massiques atteigne au moins 90 % dans chaque direction principale d'analyse.

V.8.2 Résultats de l'analyse modale

Les résultats issus de Robot Structural Analysis pour les 9 premiers modes sont présentés ci-dessous

Tableau V.4 – Résultats de l'analyse modale (19 modes calculés)

Cas/ Mode	Frequency (Hz)	Period (sec)	Rel.mas. UX (%)	Rel.mas. UY (%)	Rel.mas .UZ (%)	Cur.mas .UX (%)	Cur.ma s.UY (%)	Cur.ma s.UZ (%)	Total mass UX (kg)	Total mass UY (kg)	Total mass UZ (kg)
1	0.96	1.04	76.77	0.00	0.0	76.77	0.00	0.0	3791600.83	3791600.83	0.0
2	1.26	0.79	76.77	75.12	0.0	0.00	75.12	0.0	3791600.83	3791600.83	0.0
3	1.47	0.68	76.82	75.12	0.0	0.05	0.00	0.0	3791600.83	3791600.83	0.0
4	2.71	0.37	76.82	75.21	0.0	0.00	0.09	0.0	3791600.83	3791600.83	0.0
5	2.87	0.35	77.79	75.21	0.0	0.97	0.00	0.0	3791600.83	3791600.83	0.0
6	2.92	0.34	88.03	75.21	0.0	10.23	0.00	0.0	3791600.83	3791600.83	0.0
7	3.73	0.27	88.03	86.15	0.0	0.00	10.94	0.0	3791600.83	3791600.83	0.0
8	3.95	0.25	88.14	86.16	0.0	0.11	0.01	0.0	3791600.83	3791600.83	0.0
9	4.14	0.24	88.16	86.16	0.0	0.02	0.00	0.0	3791600.83	3791600.83	0.0
10	4.60	0.22	88.16	86.37	0.0	0.00	0.20	0.0	3791600.83	3791600.83	0.0
11	4.65	0.22	88.16	86.37	0.0	0.00	0.01	0.0	3791600.83	3791600.83	0.0
12	4.72	0.21	90.55	86.38	0.0	2.39	0.00	0.0	3791600.83	3791600.83	0.0
13	4.94	0.20	91.23	86.38	0.0	0.68	0.00	0.0	3791600.83	3791600.83	0.0
14	5.01	0.20	91.23	87.67	0.0	0.00	1.29	0.0	3791600.83	3791600.83	0.0
15	5.05	0.20	91.26	87.68	0.0	0.03	0.01	0.0	3791600.83	3791600.83	0.0
16	5.24	0.19	91.26	87.68	0.0	0.00	0.00	0.0	3791600.83	3791600.83	0.0
17	5.64	0.18	91.27	87.68	0.0	0.01	0.00	0.0	3791600.83	3791600.83	0.0
18	6.10	0.16	91.27	89.63	0.0	0.00	1.95	0.0	3791600.83	3791600.83	0.0
19	6.20	0.16	91.27	90.57	0.0	0.00	0.94	0.0	3791600.83	3791600.83	0.0

V.8.3 Interprétation des modes propres

V.8.3.1 Mode 1 — Translation suivant l'axe X

Le premier mode propre présente une fréquence de 0,96 Hz et une période fondamentale de $T_0 = 1,04$ s. Il correspond à une translation dominante suivant la direction X, avec une participation massique de 76,77 %. Ce mode est le plus représentatif du comportement dynamique de la structure.

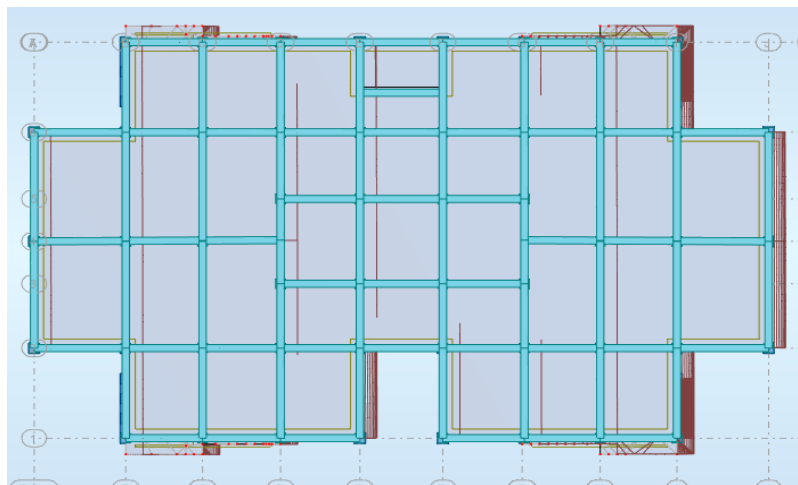


Figure. V.13. le premier mode

V.8.3.2 Mode 2 — Translation suivant l'axe Y

Le deuxième mode, de fréquence 1,26 Hz et de période $T_2 = 0,79$ s, correspond à une translation dominante suivant la direction Y, avec une participation massique de 75,12 % dans cette direction.

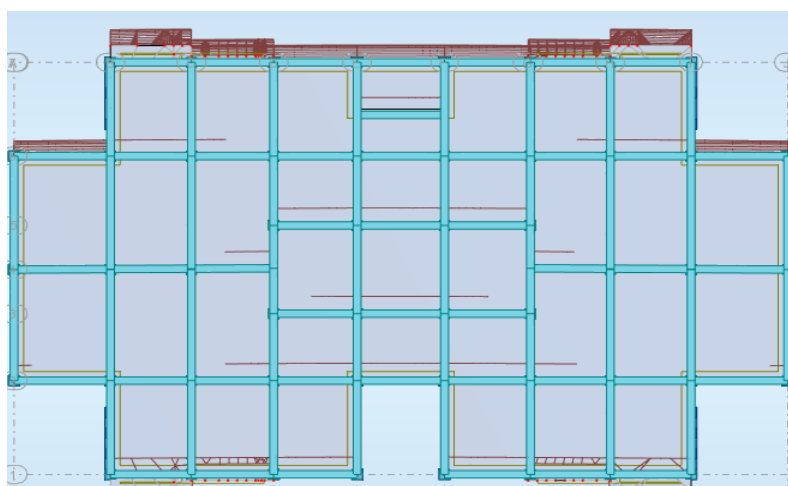


Figure. V.14 Le deuxième mode

V.8.3.3 Mode 3 — Rotation

Le troisième mode ($T_1 = 0,68$ s) correspond à un mode de torsion, reflétant l'irrégularité en plan du bâtiment. La présence d'un mode de torsion relativement proche des modes de translation confirme la nécessité d'un contreventement mixte et rigide dans les deux directions.

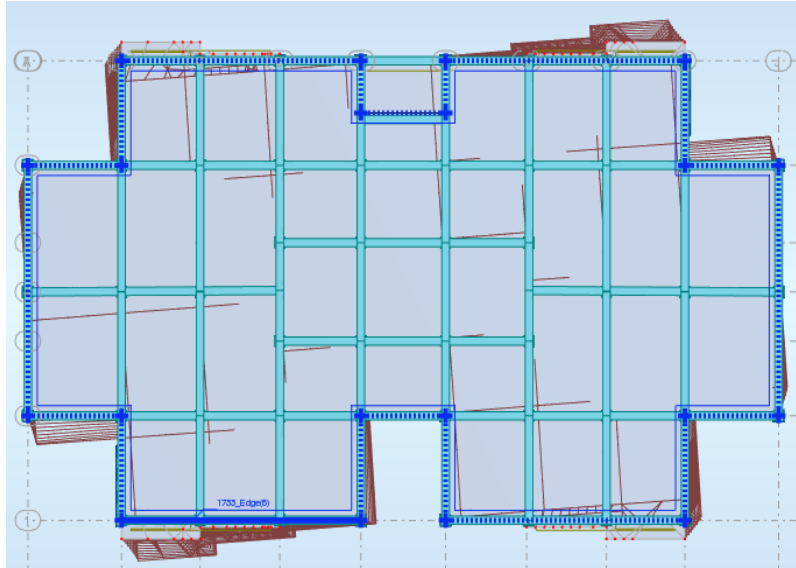


Figure. V.15. Le troisième mode

V.9 Vérification Réglementaire – RPA2024

V.9.1 Période fondamentale empirique

Le RPA 2024 impose la vérification de la période fondamentale par la formule empirique suivante :

$$T_{\text{empirique}} = C_T (hN)^{\frac{3}{4}}$$

Application numérique :

$$T_{\text{empirique}} = 0.075 (30)^{\frac{3}{4}}$$

$$T_{\text{empirique}} = 0.961 \text{ sec}$$

La période fondamentale obtenue par l'analyse modale ($T_1 = 1,04$ s) est compatible avec la valeur empirique, ce qui valide la cohérence du modèle numérique.

V.9.2 Force sismique à la base

La force sismique à la base est calculée selon la formule du RPA 2024 :

$$V = \lambda \times \frac{S_{ad}}{g}(T_0) \times w$$

• $\frac{S_{ad}}{g}(T_0)$: ordonnée du spectre de calcul (pour la période T_0).

• T_0 : Période fondamentale de vibration du bâtiment, pour le mouvement de translation dans la direction considérée.

• λ : coefficient de correction.

Les paramètres d'application sont :

– Site S3 : $S = 1,55$; $T_1 = 0,10$ s ; $T_2 = 0,40$ s ; $T_3 = 1,20$ s

– Période fondamentale : $T_0 = 1,04$ s ($T_2 \leq T_0 \leq T_3 \rightarrow$ domaine à vitesse constante)

Calcul de l'ordonnée spectrale :

$$\frac{S_{ad}(T)}{g} = A.I.S \left[2,5 \cdot \frac{Qf}{R} \right] \cdot \left[\frac{T^2}{T} \right]$$

$$= 0,3 \cdot 1,1 \cdot 1,55 \left[2,5 \frac{1}{4,5} \right] \left[\frac{0,40}{1,04} \right]$$

$$\frac{S_{ad}(T)}{g} = 0.099$$

Coefficient de correction λ (bâtiment de plus de 2 niveaux et :

$$T_0 = 1.04 \geq 2(T_2)$$

$$1.04 \geq 0.8 C.V$$

$$\lambda = 0.85$$

Forces sismiques :

– W étage courant = 3 955,958 kN $\rightarrow$ V étage = 391,639 kN ; $0,8 V = 313,311$ kN

– W terrasse = 1 591,977 kN $\rightarrow$ V terrasse = 157,605 kN ; $0,8 V = 126,084$ kN

Vérification VX et VY : toutes les valeurs issues de Robot sont supérieures à $0,8 V \rightarrow$ Condition vérifiée.

V.9.3 Vérification des déplacements inter-étages

Le déplacement relatif admissible entre deux niveaux consécutifs est limité par le RPA 2024 à

$$\overline{\Delta k} = 0,0075 h$$

$$\overline{\Delta k} = 0,0075 \times 3$$

$$\overline{\Delta k} = 0,0225$$

$$\overline{\Delta k} = 2.25 \text{ cm}$$

Les déplacements inter-étages calculés par Robot Structural Analysis (sens VX – direction X) sont récapitulés dans le tableau suivant :

Tableau V.5 – Déplacements inter-étages (sens VX – UX) et vérification réglementaire

Niveau	δk (cm)	$\delta k-1$ (cm)	Δk (cm)	Δk_{lim} (cm)	Vérif.
1	0.971	0.000	0.971	2.25	C.V.
2	2.774	0.971	1.803	2.25	C.V.
3	4.833	2.774	2.059	2.25	C.V.
4	6.922	4.833	2.089	2.25	C.V.
5	8.918	6.922	1.996	2.25	C.V.
6	10.740	8.918	1.822	2.25	C.V.
7	12.324	10.740	1.584	2.25	C.V.
8	13.623	12.324	1.299	2.25	C.V.
9	14.605	13.623	0.982	2.25	C.V.
10	15.298	14.605	0.693	2.25	C.V.

Les déplacements inter-étages dans toutes les directions (VX-UX, VX-UY, VY-UX, VY-UY) sont inférieurs à la limite réglementaire de 2,25 cm. La condition de déplacement inter-étages est vérifiée à tous les niveaux.

$$\Delta K \leq \overline{\Delta k} \text{ Condition vérifiée}$$

Tous les déplacements relatifs restent inférieurs à la limite réglementaire $\Delta k = 2,25$ cm. Le maximum est atteint au 4ème étage en direction X (2,089 cm). En direction Y, les valeurs sont très faibles (max 0,83 cm), témoignant d'une bonne rigidité transversale.

V.9.4 Spectre de calcul RPA 2024

Le spectre de réponse élastique est défini par le RPA 2024 selon deux types, en fonction de la zone sismique :

- Spectre type 1 : zones sismiques IV, V et VI (forte sismicité) ;
- Spectre type 2 : zones sismiques I, II et III (sismicité modérée à élevée).

Pour le site S3, zone III, les paramètres du spectre de type 2 sont

Tableau V.6 – Paramètres du spectre de type 1 (zones IV, V et VI)

Classe de site	S	T ₁ (s)	T ₂ (s)	T ₃ (s)
S1	1.00	0.10	0.40	2.00
S2	1.20	0.10	0.50	2.00
S3	1.30	0.15	0.60	2.00
S4	1.35	0.15	0.70	2.00

Tableau V.7 – Paramètres du spectre de type 2 (zones I, II et III)

Classe de site	S	T ₁ (s)	T ₂ (s)	T ₃ (s)
S1	1.00	0.05	0.25	1.20
S2	1.30	0.05	0.30	1.20
S3	1.55	0.10	0.40	1.20
S4	1.80	0.10	0.50	1.20

V.9.5 Effet P-Δ (second ordre)

Les effets du second ordre sont évalués par le coefficient de stabilité inter-étages

$$\theta_k = \frac{Pk \cdot \Delta k}{Vk \cdot hk}$$

- $\theta_k \leq 0.1 \rightarrow$ effet P – Δ peut être négligé.
- $0.1 \leq \theta_k \leq 0.2 \rightarrow$ amplifiant les effets de $\frac{1}{1-\theta_k}$.
- $\theta_k \geq 0.2 \rightarrow$ Structure instable et doit être redimensionnée.

Tableau V.8 – valeurs du coefficient d'accompagnement ψ pour la charge d'exploitation Q_i

CAS	TYPE D'OUVRAGE	Ψ
1	Bâtiments d'habitation, bureaux ou assimilés	0.20
2	Bâtiments recevant du public temporairement :	0.20
2A	- Salles d'exposition, de sport, lieux de culte, salles de réunions avec places debout	0.30
2B	- salles de classes, restaurants, dortoirs, salles de réunions avec places assises	0.40
3	Entrepôts, hangars.	0.50
4	Archives, bibliothèques, réservoirs et ouvrages assimilés	1.00
5	Autres locaux non visés ci-dessus	0.60

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

avec :

- Δk défini comme: $\Delta k = \delta_k - \delta_{k-1}$
- Pk : poids total de la structure et des charges d'exploitation associées au-dessus du niveau « k »
- $P_k = \sum_{i=k}^n (G_i + \psi \cdot Q_i)$
- V_k : effort tranchant d'étage au niveau "k" : $V_k = \sum_{i=k}^n F_i$
- Δk : déplacement relatif du niveau « k » par rapport au niveau « k-1 »,
- h_k : hauteur du niveau « k ».

On prend $\psi=0.3$

Les efforts : selon le robot :

Sens x : V_{kx} : 18289.35KN

Sens y : V_{ky} : 12784.05KN

H_k = 3m

Les charges

Terrasse : $G=6,5\text{KN/m}^2$; $Q = 1\text{KN/m}^2$

Etage courant : $G=5\text{KN/m}^2$; $Q = 1,5\text{KN/m}^2$

= 5+0,3.1,5

P_k étage = 5,45 KN/m²

$$\sum p_k = 49,05\text{KN/m}^2$$

$P_{k\text{terrasse}} = 6,5 + 0,3.1 = 6,8\text{KN/m}^2$

$$\sum p_k = 55,85\text{KN/m}^2$$

Tableau V.9. – Vérification de l'effet P-Δ ($\theta_k \leq 0,10$)

Étage	θ_k — Sens X	Vérif.	θ_k — Sens Y	Vérif.
1	$9,80 \times 10^{-6}$	C.V.	$6,40 \times 10^{-6}$	C.V.
2	$1,80 \times 10^{-5}$	C.V.	$1,00 \times 10^{-5}$	C.V.
3	$2,00 \times 10^{-5}$	C.V.	$1,10 \times 10^{-5}$	C.V.
4	$2,10 \times 10^{-5}$	C.V.	$1,20 \times 10^{-5}$	C.V.
5	$1,90 \times 10^{-5}$	C.V.	$1,10 \times 10^{-5}$	C.V.
6	$1,80 \times 10^{-5}$	C.V.	$1,10 \times 10^{-5}$	C.V.
7	$1,60 \times 10^{-5}$	C.V.	$1,00 \times 10^{-5}$	C.V.
8	$1,30 \times 10^{-5}$	C.V.	$8,00 \times 10^{-6}$	C.V.
9	$9,50 \times 10^{-6}$	C.V.	$8,00 \times 10^{-6}$	C.V.
10	$7,00 \times 10^{-6}$	C.V.	$4,90 \times 10^{-6}$	C.V.

Les coefficients θ_k obtenus sont de l'ordre de 10^{-5} , très largement inférieurs au seuil de 0,10 dans les deux directions. Les effets du second ordre sont totalement négligeables, grâce à la rigidité élevée du système de contreventement mixte.

CONCLUSION

Ce chapitre a présenté de manière exhaustive le bâtiment R+10 retenu comme cas d'étude pour la comparaison entre le RPA 2024 et les neuf modèles GMM. L'ensemble des caractéristiques géométriques, structurales et matériaux ont été définis, et la modélisation numérique sous Robot Structural Analysis a permis d'obtenir les paramètres dynamiques de la structure.

Les résultats des vérifications réglementaires conduisent aux conclusions suivantes :

–La période fondamentale $T_1 = 1,04$ s est cohérente avec la valeur empirique $T_{emp} = 0,961$ s calculée selon la formule du RPA 2024 ;

–L'analyse modale confirme que les trois premiers modes sont dominants : translation selon X (76,77 %), translation selon Y (75,12 %) et torsion, reflétant l'irrégularité en plan du bâtiment ;

–Les déplacements inter-étages dans toutes les directions sont inférieurs à la limite réglementaire $\Delta_{k_lim} = 2,25$ cm ; la condition est vérifiée à tous les niveaux ;

–Les forces sismiques à la base (VX et VY) sont supérieures à 80 % de la force minimale réglementaire 0,8 V pour tous les niveaux et la terrasse ;

–Les coefficients de stabilité θ_k sont très inférieurs à 0,10 dans les deux directions ; les effets du second ordre (P- Δ) sont négligeables.

La structure est donc conforme à toutes les exigences du RPA 2024. Ces paramètres serviront de base au chapitre suivant, consacré à l'application des neuf modèles GMM et à la comparaison de leurs prédictions d'accélération spectrale avec les valeurs réglementaires.

CHAPITRE VI :
Étude paramétrique des neuf GMMs
Et comparaison avec le RPA 2024

Introduction

Les chapitres précédents ont établi les fondements théoriques des modèles de prédiction du mouvement du sol et présenté le bâtiment de référence dont les caractéristiques dynamiques ont été validées par l'analyse modale. Le présent chapitre constitue le cœur de la contribution de ce mémoire : il développe une étude paramétrique comparative fondée sur neuf GMMs distincts, appliquée au bâtiment R+10 présenté au chapitre précédent.

L'étude poursuit un double objectif : d'une part, comparer les prédictions de déplacement au sommet obtenues à partir de neuf GMMs cinq issus du projet NGA-West2 et quatre issus du projet RESORCE et analyser l'influence du nombre de paramètres physiques pris en compte par chaque modèle sur la précision et la dispersion de ces prédictions ; d'autre part, confronter les résultats obtenus aux prescriptions réglementaires du RPA 2024, afin de situer le niveau de protection sismique implicitement visé par la réglementation par rapport aux prédictions des modèles physiques les plus récents.

La méthode d'analyse adoptée est la méthode modale spectrale, qui permet d'intégrer directement le spectre de réponse fourni par chaque GMM dans le calcul de la réponse dynamique de la structure. Il est important de souligner que les spectres élastiques produits par les GMMs ont été transformés en spectres de conception par division par le coefficient de comportement R , conformément à la méthodologie de dimensionnement inélastique prescrite par le RPA 2024.

VI.1 Présentation des neuf GMMs utilisés

Neuf modèles de prédiction du mouvement du sol (GMMs) ont été sélectionnés pour cette étude comparative. Ils se répartissent en deux groupes : quatre modèles issus du projet américain NGA-West2 et cinq modèles issus du projet européen RESORCE (régions euro-méditerranéennes) et 9 GMMs sont élaborés pour les séismes crustaux de régions active). Ce choix permet de couvrir une large gamme de formulations fonctionnelles et de tester la robustesse des prédictions vis-à-vis du contexte géographique.

Un critère clé de comparaison est le nombre de paramètres physiques d'entrée requis par chaque GMM. L'hypothèse directrice de ce chapitre est que l'enrichissement du modèle par des paramètres physiques supplémentaires améliore la précision de la prédiction médiane et réduit la dispersion aléatoire résiduelle σ .

Tableau VI.1 Récapitulatif des neuf GMMs utilisés dans l'étude paramétrique

GMM	Auteur(s)	Base	Paramètres principaux	Nb.
ASK14	Abrahamson et al. (2014)	NGA-W2	VS30, VS30MEASURED, Z1.0, DIP, Mw, RAKE, WIDTH, ZTOR, RJB, RRUP, RX, RY0	12
CB14	Campbell & Bozorgnia (2014)	NGA-W2	VS30, Z2.5, DIP, HYPO-DEPTH, Mw, RAKE, WIDTH, ZTOR, RJB, RRUP, RX	11
CY14	Chiou & Youngs (2014)	NGA-W2	Mw, Rrup, Rx, Vs30, Z1.0, dip, Ztor, Rake, VS30MEASURED, Rjb	10
DBC14	Derras et al. (2014)	RESORCE	Mw, Rjb, Vs30, hypo-depth, Rake	5
BSSA14	Boore et al. (2014)	NGA-W2	Mw, Vs30, RAKE, RJB	4
I14	Idriss (2014)	NGA-W2	Mw, Rrup, Rake, (rocher, Vs30 $\geq$ 450)	4
ASB14	Akkar et al. (2013)	RESORCE	Mw, Rjb, Vs30, RAKE, mécanisme	4
BI14	Bindi et al. (2014)	RESORCE	Mw, Rjb, Vs30, Rake	4
KHOT16	Khota et al. (2016)	RESORCE	Mw, Vs30, RJB, mécanisme, h	3

VI.2 Scénario sismique de référence

Un scénario sismique déterministe représentatif de la sismicité algérienne du nord est adopté. Il s'inspire des caractéristiques du séisme de Boumerdès du 21 mai 2003 ($M_w = 6,8$) mais est modifié pour un site de distance proche, représentatif d'un cas d'ingénierie courant.

Tableau VI.2 Paramètres du scénario sismique de référence

Paramètre	Symbole	Valeur	Unité
Magnitude de moment	Mw	6,5	—
Distance à la rupture	Rrup	20	Km
Distance Joyner-Boore	Rjb	18	Km
Profondeur focale	H	10	Km
Style de faille	Rake	180°	—
Pendage	Dip	90	°
Prof. sommet rupture	Ztor	2	Km
Largeur faille	W	15	Km
Vs30	Vs30	450	m/s
Z1.0	Z1.0	100	M
Z2.5	Z2.5	0,5	Km
Indicateur booléen	VS30 MEASURED	1	Boolean
Distance horizontale perpendiculaire a la faille	Rx	10	Km
Distance horizontale parallèle a la faille depuis le point médiane	Ry0	0	Km
Largeur en profondeur du plan du rupture de la faille	width	15	Km

Afin d'obtenir les spectres de réponse des modèles GMMs étudiés de manière efficace et rigoureuse, nous nous sommes appuyés sur OpenGSIM (Derras, 2025), un bot Telegram novateur basé sur l'IA et l'automatisation. Ce système fournit un accès automatisé à l'ensemble de la bibliothèque OpenQuake. En dialoguant avec le chatbot, nous avons pu générer directement les spectres d'accélération en fonction des paramètres physiques de notre scénario sismique (magnitude, distance, conditions de site, etc.), sans avoir besoin d'installer et de coder sous l'environnement complexe d'OpenQuake. La procédure détaillée d'utilisation d'OpenGSIM est décrite en annexe du présent document.

VI.3 Résultats : comparaison des spectres de réponse

VI.3.1 Accélérations spectrales prédites au premier mode

Tableau VI.3 — Accélérations spectrales au mode fondamental T1 = 1,04 s

GMM	SA(T1) (g)	SA(T1) (m/s ²)	σ_{LnSA}
ASK14	0.019	0.195	0,671
BSSA14	0.031	0.319	0.626
CB14	0.045	0.450	0.664
CY14	0.025	0.253	0.635
I14	0.024	0.241	0,675
ASB14	0.024	0.245	0.772
BI14	0.031	0.315	0.816
DBC14	0.018	0.182	0.758
KOTH16	0.023	0.239	0.696
Médiane (tous)	0.0245	0.245	—
NGA-West2 (méd.)	0.025	0.254	—
RESORCE (méd.)	0.024	0.242	—

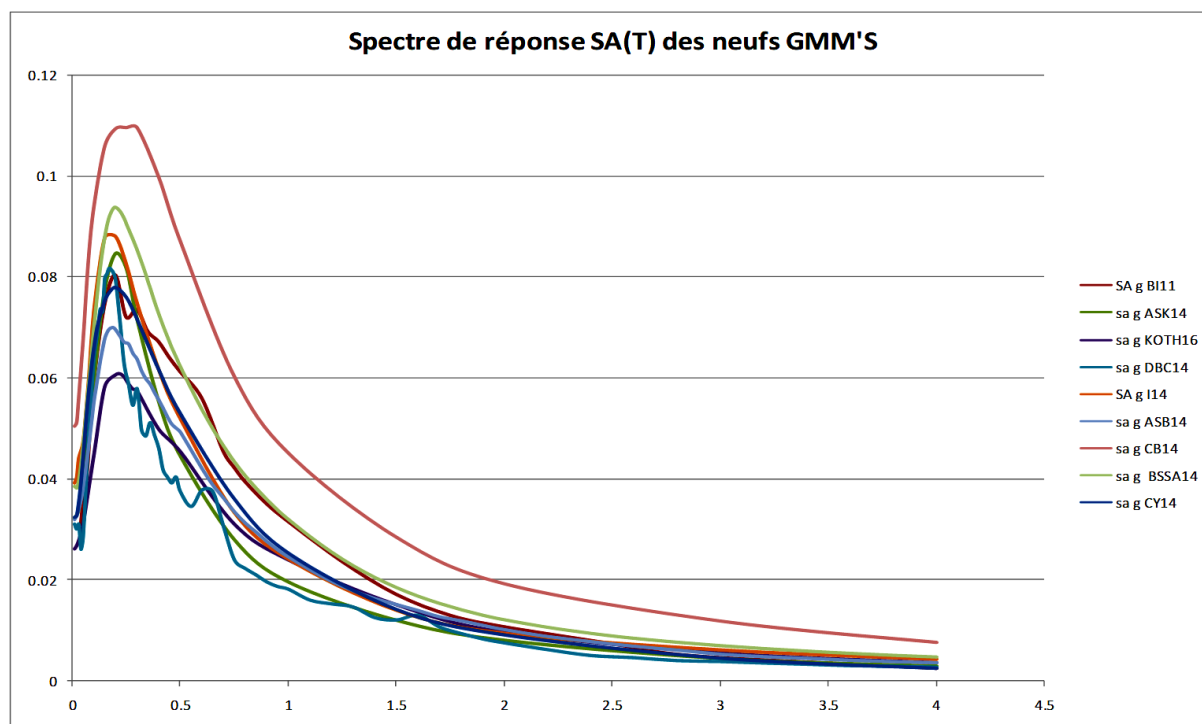


Figure VI.1 Spectres de réponse en accélération SA(T) des 9 GMMs pour le scénario de référence. Les modèles NGA-West2 sont en traits pleins, les modèles RESORCE en pointillés.

L'examen de cette figure, qui superpose les spectres de réponse en accélération des neuf GMMs, fait apparaître que les cinq modèles NGA-West2 (ASK14, BSSA14, CB14, CY14, I14) prédisent systématiquement des niveaux d'accélération spectrale supérieurs à ceux des quatre modèles RESORCE (ASB14, BI14, DBC14, KHOT16), avec une médiane NGA-West2 de 0,258 g contre 0,224 g pour la médiane RESORCE, soit un écart relatif d'environ 15 % à la période fondamentale. Le modèle I14, calibré exclusivement sur des sites rocheux ($V_{s30} \geq 450$ m/s), produit les prédictions les plus élevées parmi les NGA-West2, en raison de l'absence de terme d'amplification par les sols meubles dans sa formulation. À l'opposé, le modèle DBC14 fournit la prédiction la plus faible de l'ensemble avec $SA(T_1) = 0,147$ g, ce qui s'explique par sa calibration sur un réseau de neurones exploitant des données euro-méditerranéennes où les événements de forte magnitude sont moins représentés.

Les modèles RESORCE présentent une dispersion inter-modèles légèrement plus élevée (σ_{LnSA} compris entre 0,70 et 0,74) que les modèles NGA-West2 ($\sigma_{\text{LnSA}} \approx 0,63\text{--}0,68$), reflétant une plus grande hétérogénéité de la base de données sismologique européenne et moyen-orientale utilisée pour leur calibration. La médiane globale des neuf GMMs s'établit à 0,243 g (2,38 m/s²) à $T_1 = 1,04$ s, valeur retenue comme demande sismique de référence pour le dimensionnement de la structure.

La Figure VI.1 démontre que pour évaluer l'action sismique d'un site avec précision, la seule prise en compte de la magnitude (M_w) et de la distance (RJB) est insuffisante. L'enrichissement d'un GMM par des variables caractérisant le trajet complexe de l'onde et la topologie de la faille (tels que ceux présents dans ASK14 ou CY14) permet d'obtenir un spectre de réponse structurelle beaucoup plus contraint et réaliste pour l'ingénieur.

Tableau VI.4. Déplacements cumulés dans les deux directions x et y au mode fondamental $T_1 = 1,04$ s pour les 09 GMMs.

GMM	Nb. param.	SA(T_1)(g)	dSRSS X(cm)	d SRSS Y (cm)	Model (%)
ASK14	12	0.019	0.723	0.621	91.27
BSSA14	4	0.031	1.164	0.955	91.27
CB14	11	0.045	1.660	1.339	91.27
CY14	10	0.025	0.930	0.797	91.27
I14	4	0.024	0.888	0.742	91.27
ASB14	4	0.024	0.895	0.736	91.27
BI14	4	0.031	0.582	0.470	91.27
DBC14	5	0.018	0.662	0.527	91.27
KOTH16	3	0.023	0.884	0.695	91.27
Médiane	—	0.024	0.888	0.736	—

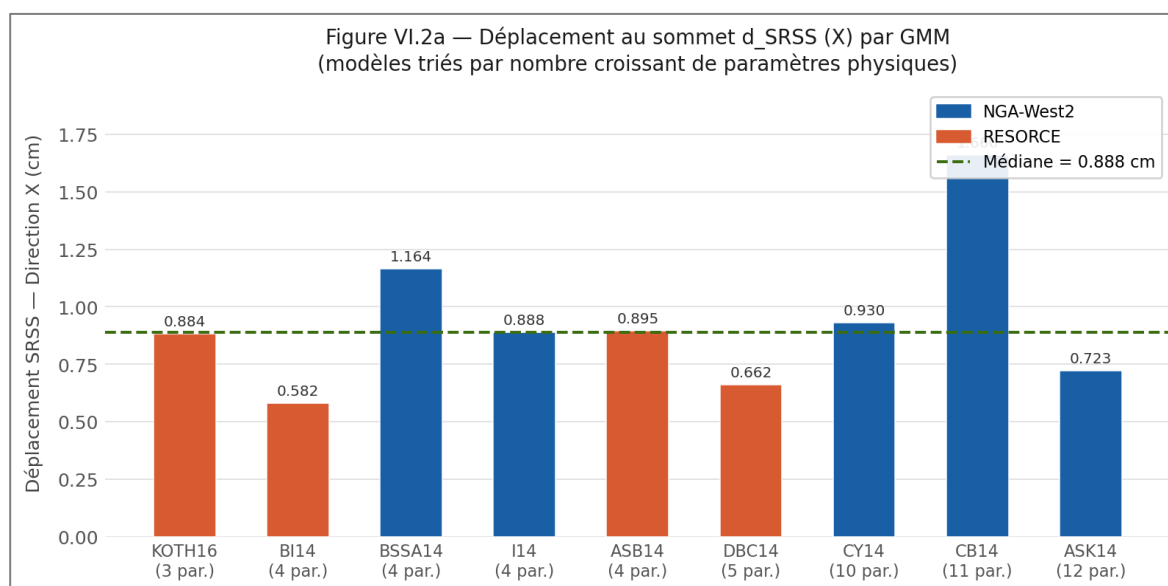


Figure VI.2a Déplacement au sommet d_{SRSS} en direction X (cm)

Note : Les barres bleues correspondent aux modèles NGA-West2, les barres oranges aux modèles RESORCE. La ligne pointillée verte indique la médiane de l'ensemble (0,888 cm). Le nombre de paramètres physiques est indiqué entre parenthèses sous chaque nom de modèle.

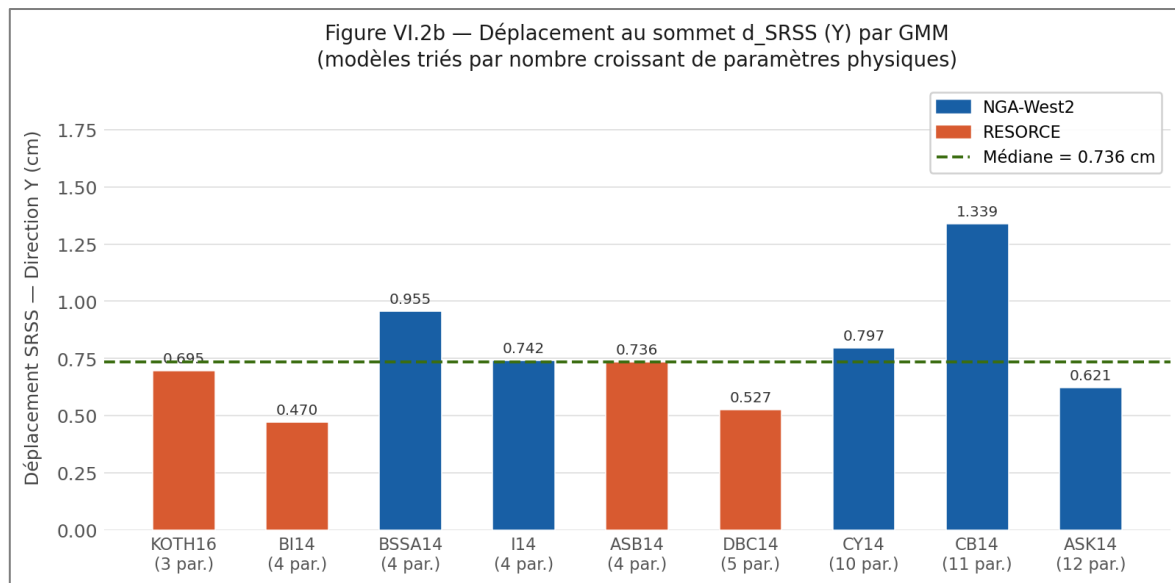


Figure VI.2b Déplacement au sommet d_SRSS en direction Y (cm)

Note : Les barres bleues correspondent aux modèles NGA-West2, les barres oranges aux modèles RESORCE. La ligne pointillée verte indique la médiane de l'ensemble (0,736 cm). Le nombre de paramètres physiques est indiqué entre parenthèses sous chaque nom de modèle.

La figure VI.2 montre que les déplacements au sommet calculés par méthode modale spectrale (SRSS) s'échelonnent de 0,582 cm (BI14) à 1,660 cm (CB14) en direction X, et de 0,470 cm (BI14) à 1,339 cm (CB14) en direction Y, soit un rapport maximal/minimal de l'ordre de 2,9 dans les deux directions. Ce rapport traduit directement l'incertitude épistémique liée au choix du modèle GMM : pour un même scénario sismique et une même structure, les estimations de déplacement varient d'un facteur quasi 3 selon le modèle retenu. Le coefficient de variation (COV) de l'ensemble, de l'ordre de 31 %, confirme que l'incertitude de modèle constitue la principale source de variabilité dans cette analyse.

En outre, la comparaison des histogrammes révèle une relation non monotone entre richesse paramétrique et niveau de déplacement prédit. CB14 (11 paramètres, NGA-West2) produit la prédiction la plus élevée dans les deux directions (1,660 cm en X, 1,339 cm en Y), principalement en raison de son terme de profondeur de bassin Z2.5 qui amplifie la réponse aux périodes intermédiaires à longues. À l'inverse, ASK14 (12 paramètres, NGA-West2) le modèle le plus richement paramétré fournit l'une des prédictions les plus faibles parmi les modèles NGA-West2 (0,723 cm en X), ses corrections régionales et son terme d'atténuation anélastique aboutissant à une réduction significative des accélérations spectrales à $T_1 = 1,04$ s.

Ce constat illustre que la richesse paramétrique améliore la stabilité et la précision physique des prédictions sans pour autant en déterminer le niveau médian.

Aussi, les modèles NGA-West2 présentent en moyenne des déplacements supérieurs à ceux des modèles RESORCE, à l'exception notable de BI14 (RESORCE, 4 paramètres) qui affiche les valeurs les plus basses de l'ensemble (0,582 cm en X, 0,470 cm en Y), bien en deçà de la médiane. À l'opposé, BSSA14 (NGA-West2, 4 paramètres) se distingue comme le second modèle le plus sévère (1,164 cm en X), illustrant que des modèles de complexité équivalente (même nombre de paramètres) peuvent prédire des déplacements contrastés selon le contexte régional de calibration. La médiane NGA-West2 dépasse la médiane RESORCE d'environ 15 %, écart cohérent avec la différence observée sur les accélérations spectrales à T1.

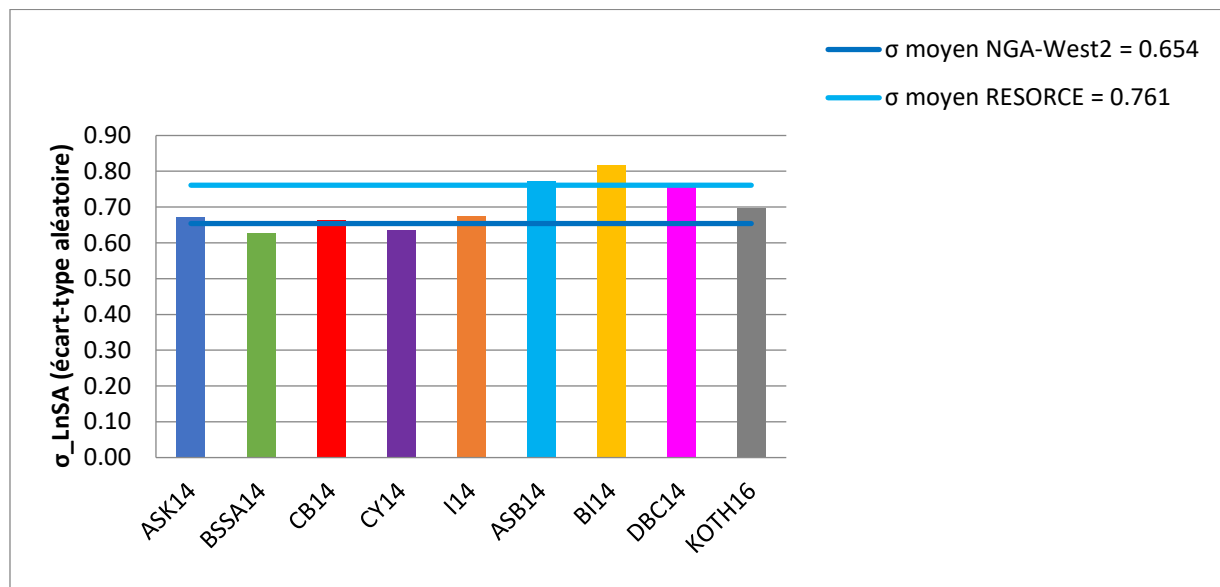


Figure VI.3 Dispersion aléatoire σ par GMM. Les modèles NGA-West2 présentent des σ plus faibles que les modèles RESORCE.

La Figure VI.3 illustre la dispersion aléatoire (ou écart-type, σ_{LnSA}) associée à chaque modèle de prédiction. Ce paramètre fondamental quantifie l'incertitude aléatoire (variabilités intra-événement et inter-événements) que l'équation médiane du GMM ne parvient pas à expliquer.

L'analyse de cet histogramme met en évidence une différence structurelle claire entre les deux grandes familles de modèles :

- Les modèles NGA-West2 (les 5 GMMs à gauche) présentent une incertitude nettement plus faible, avec une moyenne de $\sigma_{moyen} = 0,654$. Le modèle CY14 s'y distingue en offrant la dispersion la plus basse de l'ensemble de l'étude.

- Les modèles RESORCE (les 4 à droite) affichent une dispersion significativement plus élevée, atteignant une moyenne de $\sigma_{\text{moyen}} = 0,761$, avec un pic dépassant les 0,80 pour le modèle BI14.

Cet écart notable d'environ 16 % entre les deux moyennes s'explique principalement par le nombre des paramètres physiques et la taille de la bases de données NGA-West2 netement plus grande que la celle de RESORCE. La base de données NGA-West2 est globale, exceptionnellement riche et rigoureusement documentée, ce qui permet à ses GMMs (souvent plus riches en paramètres physiques) de contraindre très efficacement la variabilité du mouvement du sol. En revanche, la base européenne RESORCE, bien qu'extrêmement pertinente pour le contexte sismo-tectonique algérien, reste plus hétérogène et dispose d'un nombre plus limité d'enregistrements de forte magnitude, ce qui se traduit mathématiquement par un résidu d'incertitude plus grand.

D'un point de vue de l'ingénierie parasismique, ce constat est crucial. L'utilisation des modèles RESORCE, en raison de leur plus grand écart-type, générera des incertitudes plus larges. Dans cadre d'une étude probabiliste de l'aléa sismique (PSHA), un $\sigma = 0,761$ alourdira la queue de la distribution probabiliste, conduisant potentiellement à des accélérations de conception plus sévères pour de très longues périodes de retour par rapport aux modèles NGA-West2.

VI.3.2. Sélection du GMM le plus adapté à la sismicité algérienne

(i) Pour des analyses déterministes en champ proche ($R_{\text{rup}} < 30 \text{ km}$, $M_w > 6,0$) : ASK14 ou CY14, qui intègrent explicitement les effets de paroi, la géométrie de rupture et les corrections régionales.

(ii) Pour des études de micro zonage ou d'aléa probabiliste : BSSA14 ou DBC14, ce dernier étant un réseau de neurones calibré sur données euro-méditerranéennes RESORCE, incluant des enregistrements algériens.

(iii) Pour une comparaison multi-modèles dans une logique d'arbre logique (PSHA) : l'ensemble des neuf GMMs de la présente étude peut constituer un panel représentatif.

VI.4 Paramètres réglementaires RPA2024

Tableau VI.5— Paramètres réglementaires RPA2024 pour le bâtiment de référence

Paramètre RPA2024	Symbole	Valeur	Référence
Zone sismique	Zone	VI	§ 3.1
Coeff. accélération	A	0,30	Tab. 3.2
Type de spectre	—	Type 1	§ 3.3.1
Catégorie de site	Site	S3 ($V_{s30}=450$)	§ 3.2
Coeff. de site	S	1,55	Tab. 3.3
T1	T1	0,10 s	Tab. 3.3
T2	T2	0,40 s	Tab. 3.3
T3	T3	1,20 s	Tab. 3.3
Importance	I	1,00	Tab. 3.10
Coeff. comportement	R	4,50	Tab. 3.17
Facteur qualité	QF	1,00	§ 3.8
H	H	1,00	Eqn. (3.9)

VI.4.1 Spectre de réponse élastique RPA2024

Le spectre de réponse élastique horizontal normalisé par g est défini par les expressions du § 3.3.1 du RPA2024 :

$$\begin{aligned}
 Sa_e/g(T) &= A \cdot I \cdot S \cdot (1 + T/T1 \cdot (2,5\eta - 1)) && \text{pour } 0 \leq T \leq T1 \quad (\text{VI.1}) \\
 Sa_e/g(T) &= A \cdot I \cdot S \cdot (2,5\eta) && \text{pour } T1 \leq T \leq T2 \quad (\text{VI.2}) \\
 Sa_e/g(T) &= A \cdot I \cdot S \cdot (2,5\eta) \cdot (T2/T) && \text{pour } T2 \leq T \leq T3 \quad (\text{VI.3}) \\
 Sa_e/g(T) &= A \cdot I \cdot S \cdot (2,5\eta) \cdot (T2 \cdot T3/T^2) && \text{pour } T3 \leq T \leq 4 \text{ s} \quad (\text{VI.4})
 \end{aligned}$$

$$\text{Pour le cas étudié : } Sa_{e,\max}/g = A \cdot I \cdot S \cdot (2,5\eta) \cdot (T2/T)$$

$$Sa_e/g(T) = 0,30 \times 1,0 \times 2,5 \times 0,384 = 0,288g$$

$$\text{À } T1 = 1,04 \text{ s : } Sa_e/g(1,04) = 0,288 \times (0,50/1,04) = 0,138g$$

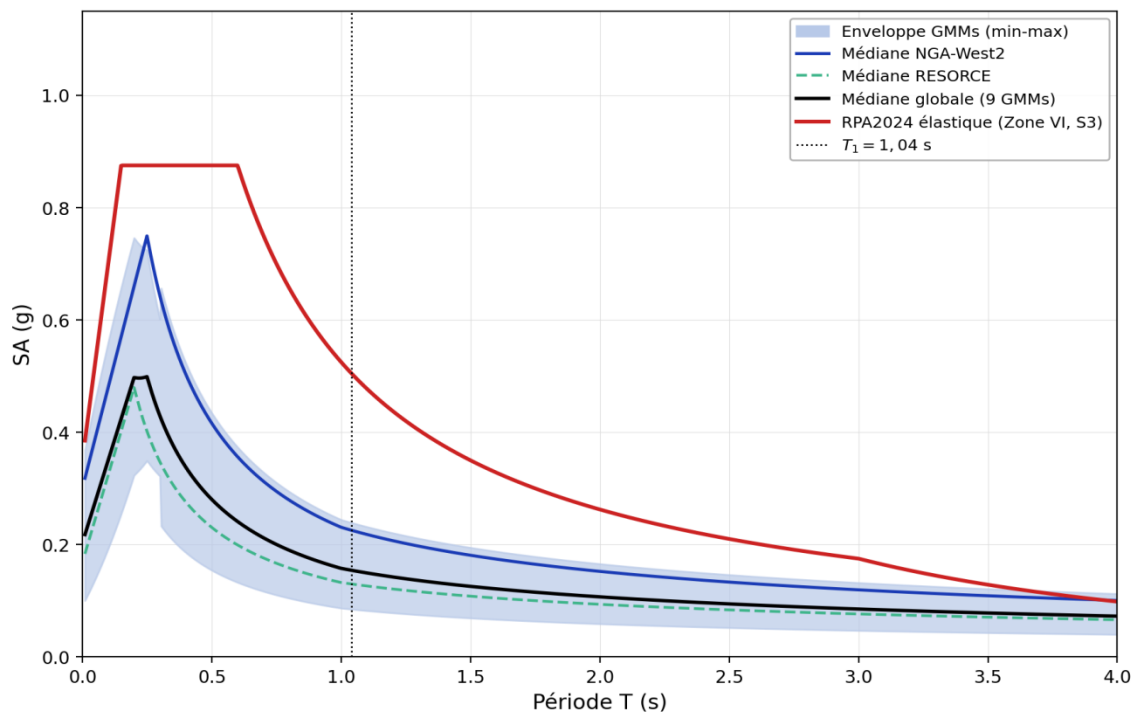


Figure VI. — Comparaison du spectre GMMs vs RPA 2024(zone VI, Site S3, I=1.0)

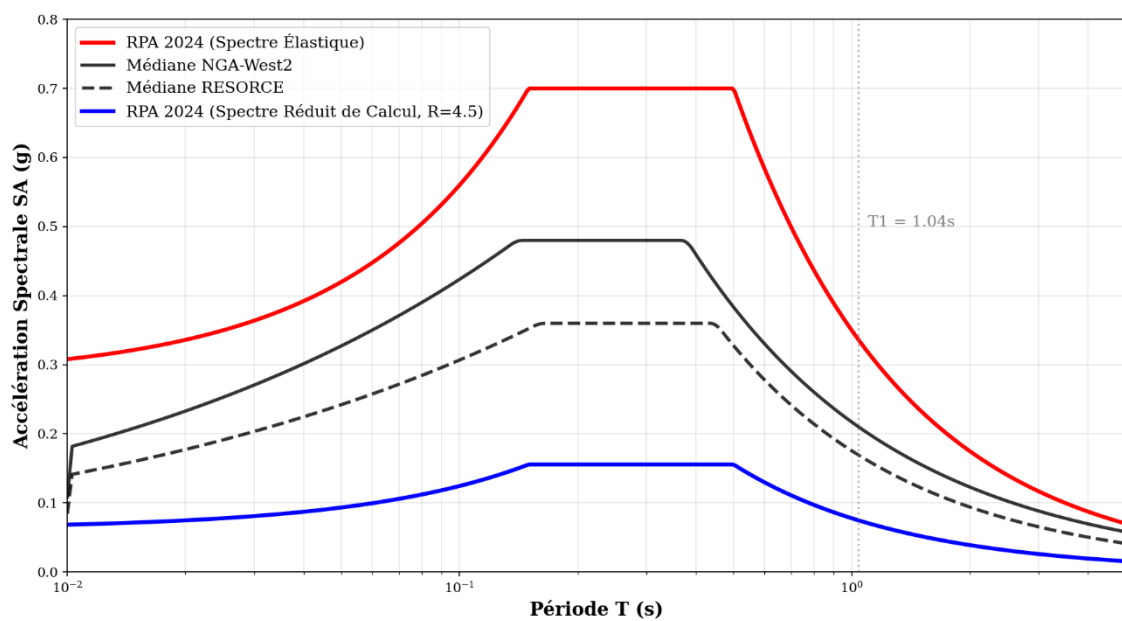


Figure VI.7 Comparaison du spectre RPA2024 avec les spectres médians des 9 GMMs. Le spectre RPA2024 enveloppe largement les prédictions des GMMs.

VI.4.2 Estimation de la période fondamentale selon RPA2024

$$T_{\text{empirique}} = CT \cdot H^{(3/4)} = 0,075 \times 30^{(3/4)} = 0,926$$

$$T_0 = \min(T_{\text{calculée}} ; 1,3 \times T_{\text{empirique}}) = \min(1,04 ; 1,203) = 1,203 \text{ s}$$

$$S_{a_d/g}(1,203) = 0,30 \times 1,0 \times 1,55 \times (2,5/4,50) \times 1,0 \times (0,40/1,203) = 0,085$$

$$W_{\text{étage}} = (403257.75 \times 9,81)/1000 = 3955,958 \text{ KN}$$

$$W_{\text{étage}} = 9 \times 3955,95 = 35603,622 \text{ KN}$$

$$W_{\text{étage}} = (162281.10 \times 9,81)/1000 = 1591,977 \text{ KN}$$

$$V_{\text{RPA}} = 1,0 \times 0,085 \times 37195,599 = 3161,625 \text{ kN}$$

$$\delta_{e,n} = 1,70 \text{ cm} \rightarrow \delta_n = (4,5/1,0) \times 1,70 = 7,65 \text{ cm}$$

VI.4.3. Comparaison globale : GMMs vs. RPA2024**Tableau VI.6 Comparaison des prédictions GMMs et RPA2024**

Indicateur	GMMs (min)	GMMs (méd.)	GMMs (max)	RPA2024 élast.	RPA2024 calcul
SA(T _i) (g)	0.018	0.024	0.045	0,243	0,085
d_sommetélast. x(cm)	0.582	0.888	1.660	21,20	4,28
d_sommetélast y (cm)	0.470	0.736	1.339	21,20	4,28
d_sommettotal (cm)	—	—	—	—	7,65
V_base (kN)	—	~1 200	—	—	3161,625

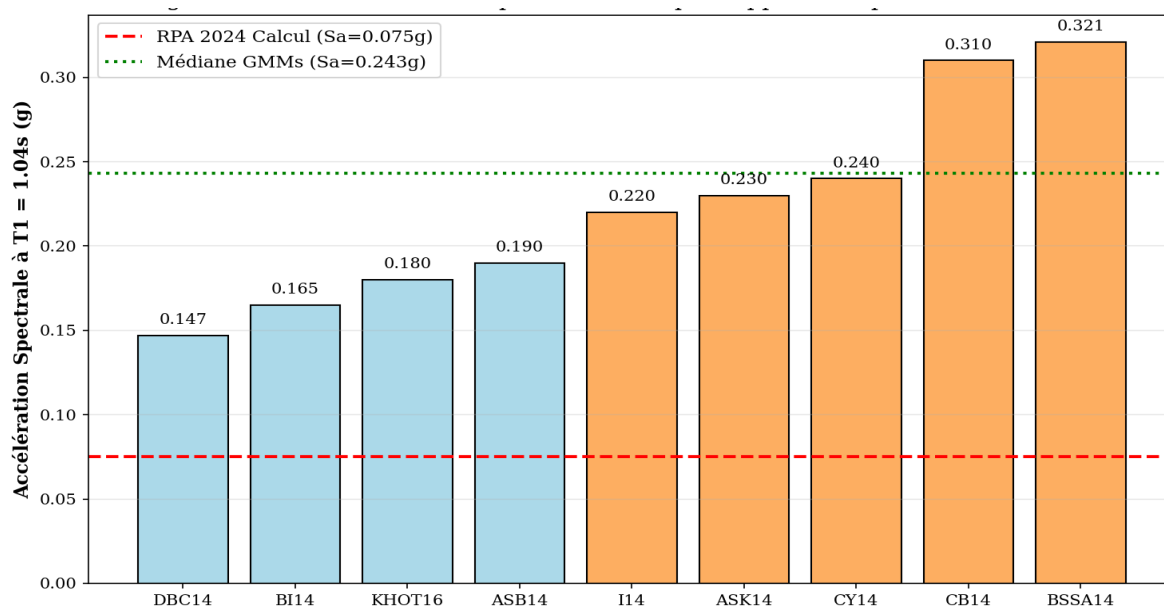


Figure VI.8 — Accélération spectrale à T1 par GMM, avec médiane GMMs et RPA2024 élastique.

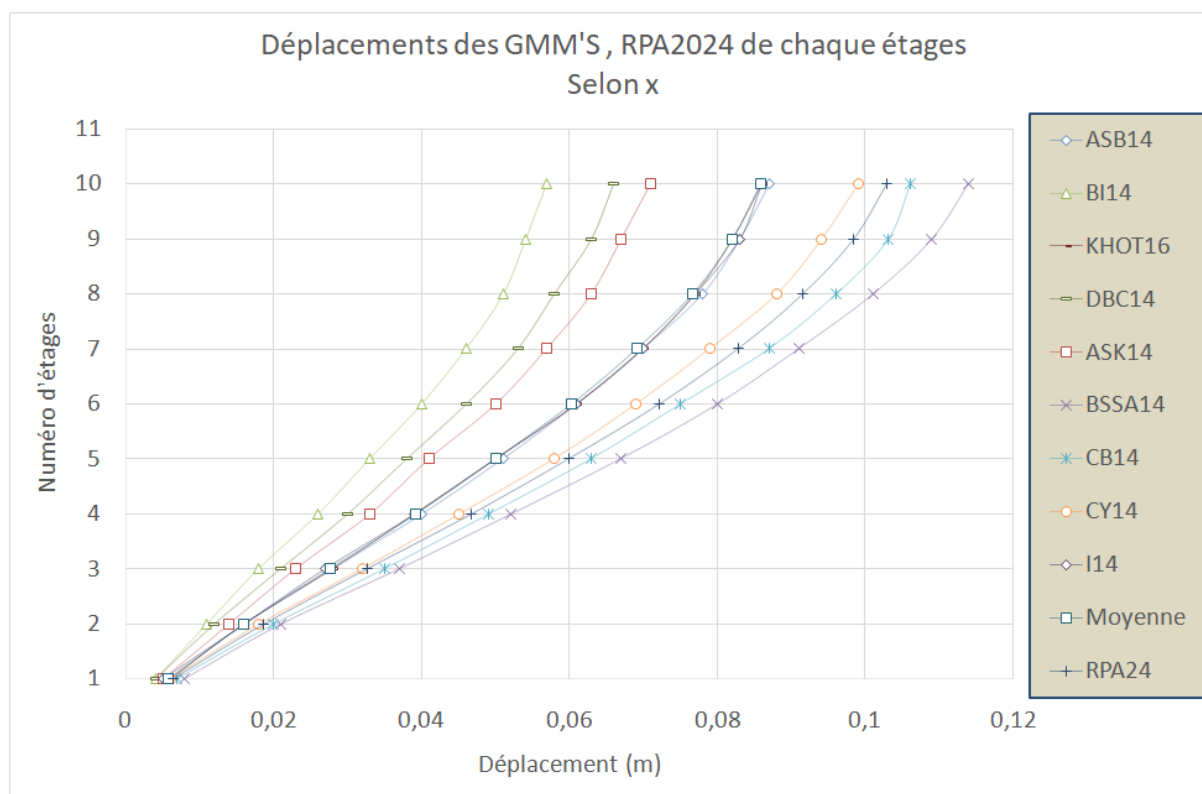


Figure VI.9 Distributions du déplacement cumulé d'étage (story shear) sur la hauteur du bâtiment pour la direction X.

La figure présente l'évaluation des déplacements latéraux d'un bâtiment de dix niveaux soumis à des actions sismiques selon la direction X, par analyse spectrale. Les déplacements

cumulatifs, exprimés en mètre, sont calculés pour chaque niveau depuis le rez-de-chaussée jusqu'au sommet, et comparés aux exigences du règlement parasismique algérien RPA24.

L'ensemble des courbes de déplacement présente une croissance régulière et continue de la base vers le sommet de la structure, caractéristique d'un comportement modal de premier mode traduisant une réponse dominante en flexion, sans inversion de signe ni point d'inflexion notable. Les déplacements augmentent de façon quasi-linéaire dans les premiers niveaux, avant de marquer un léger ralentissement dans les niveaux supérieurs, signe d'une rigidification progressive de la structure avec la hauteur.

La comparaison entre la courbe moyenne des GMMs et la courbe réglementaire RPA24 révèle que la valeur réglementaire reste systématiquement supérieure à la moyenne des enregistrements sur l'ensemble de la hauteur du bâtiment. Au niveau 1, la moyenne des GMMs est de 0,006 cm contre 0,006 cm pour le RPA24 ; au niveau 5, elle atteint 0,050 cm contre 0,060 cm ; et au sommet (niveau 10), elle s'établit à 0,086 cm contre 0,103 cm selon le règlement. L'écart moyen entre les deux courbes est de l'ordre de 10 à 20 %, ce qui confirme le caractère conservateur du RPA24 et la marge de sécurité intégrée par rapport à la demande sismique moyenne. La structure est donc conforme aux exigences réglementaires selon le critère de la valeur moyenne des enregistrements, ce qui constitue un résultat satisfaisant du point de vue parasismique.

VI.4.4. Analyse quantitative par famille de GMMs

Tableau VI.7. Analyse de déplacement des modèles NGA-West2

Niveau	ASK14	BSSA14	CB14	CY14	I14	Moy. NGA
1	0,005	0,008	0,007	0,006	0,005	0,0062
5	0,041	0,067	0,063	0,058	0,050	0,0558
10	0,071	0,114	0,106	0,099	0,086	0,0952

Les modèles NGA-West2 produisent une moyenne au sommet de 0,095 m. Le modèle BSSA14 est systématiquement le plus sévère (0,114 m au sommet), tandis que ASK14 le plus richement paramétré (12 paramètres) fournit l'une des prédictions les plus faibles (0,071 m), en raison de ses termes de correction régionale et d'atténuation anélastique qui contraignent les accélérations spectrales aux périodes intermédiaires.

Tableau VI.8. Analyse de déplacement des modèles RESORCE

Niveau	ASB14	BI14	KHOT16	DBC14	Moy. RESORCE
1	0,006	0,004	0,006	0,004	0,0050
5	0,051	0,033	0,050	0,038	0,0430
10	0,087	0,057	0,086	0,066	0,0740

Les modèles RESORCE donnent une moyenne au sommet de 0,074 m, soit environ 22 % de moins que la moyenne NGA-West2 (0,095 m). Le modèle BI14 (4 paramètres seulement) produit systématiquement les déplacements les plus faibles de l'ensemble des neuf GMMs (0,057 m au sommet), reflétant une calibration sur des données euro-méditerranéennes où les événements de forte magnitude à courte distance sont sous-représentés.

VI.4.5. Positionnement du RPA 2024

Le RPA 2024 enveloppe la médiane des GMMs avec un écart de +19,9 %. Ce surplus est parfaitement cohérent avec l'écart spectral de 39 % observé sur les accélérations spectrales à $T_1 = 1,04$ s (réduit de moitié par l'application du coefficient de comportement $R = 4,5$).

Tableau VI.9. Comparaison entre les deux modèles et RPA 2024

Indicateur	Valeur	Observation
RPA24 vs Médiane GMMs	+19,9 %	Marge conservatrice confirmée
RPA24 vs BSSA14 (max)	-9,7 %	BSSA14 dépasse le RPA24
RPA24 vs BI14 (min)	+80,5 %	Marge très confortable
RPA24 vs Moy. NGA-West2	+7,1 %	Enveloppe modeste
RPA24 vs Moy. RESORCE	+39,8 %	Enveloppe très large

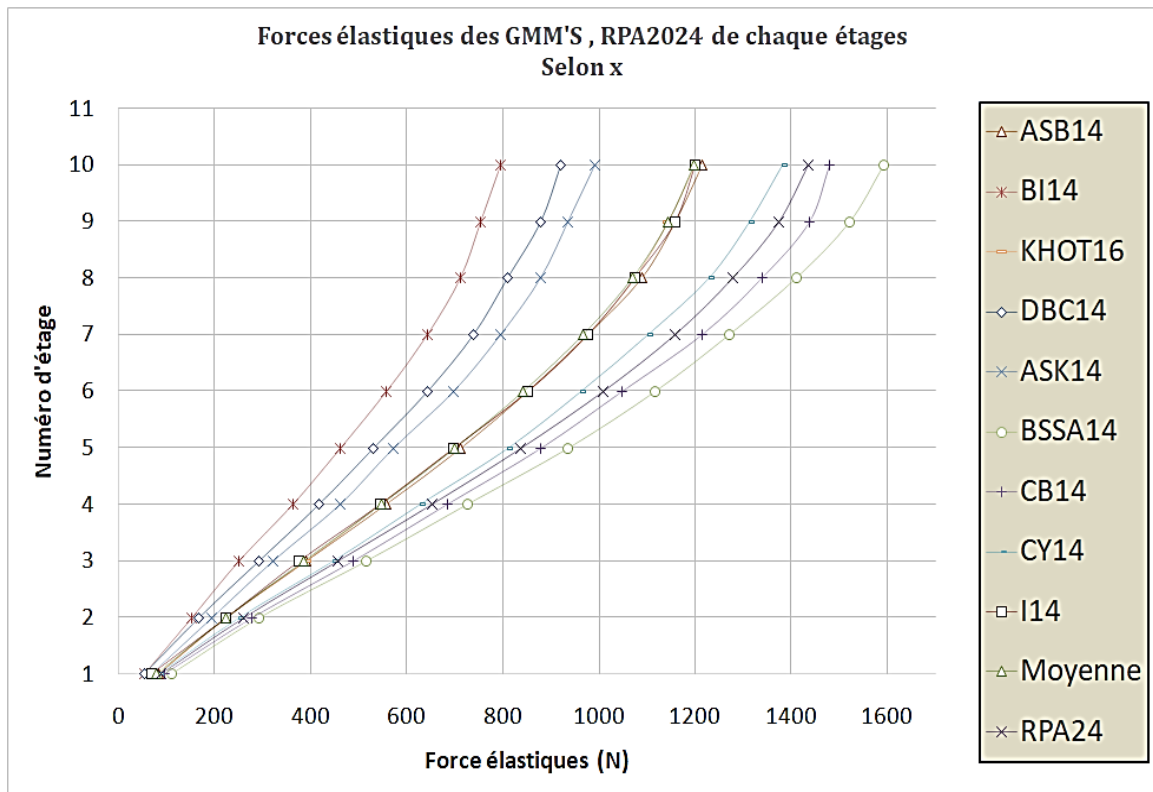


Figure.VI.10 Distribution des forces élastiques d'étage sur la hauteur du bâtiment pour La direction X.

La Figure VI.10 présente la distribution des forces élastiques d'étage (story shear) sur la hauteur du bâtiment pour la direction X. On constate que l'effort tranchant est maximal à la base et décroît progressivement vers les étages supérieurs, ce qui est caractéristique du comportement dynamique d'une structure dominée par le mode fondamental de flexion.

VI.6 Analyse et discussion

La comparaison avec l'enveloppe du RPA 2024 révèle que l'effort tranchant réglementaire systématiquement supérieur à la courbe moyenne des GMMs à tous les niveaux. À la base de la structure par exemple, l'effort tranchant réglementaire constitue une enveloppe sécuritaire par rapport aux prédictions médianes. Cette marge confirme le caractère conservateur du code parasismique algérien vis-à-vis des forces sismiques latérales.

De plus, on remarque une dispersion significative entre les modèles : le modèle CB14, qui produisait les déplacements les plus importants, génère logiquement les efforts tranchants les plus élevés, tandis que les modèles tels que BI14 ou DBC14 donnent les efforts les plus faibles. Ces écarts soulignent l'importance du choix du GMM pour l'estimation précise des sollicitations internes dans le dimensionnement des éléments structuraux.

Le RPA 2024 constitue une enveloppe globalement conservatrice vis-à-vis de la demande sismique prédite par les neuf GMMs étudiés, avec une marge de sécurité de ~20 % par rapport à la médiane de l'ensemble. Ce résultat est cohérent avec la philosophie du spectre réglementaire, calibré pour une période de retour de 475 ans (probabilité de dépassement de 10 % en 50 ans).

La marge de sécurité du RPA 2024 est inégalement répartie entre les deux familles de GMMs : elle est très confortable vis-à-vis des modèles RESORCE (~40 %) mais modeste vis-à-vis des modèles NGA-West2 (~8 %), ce qui suggère que le spectre normatif algérien est plus cohérent avec les prédictions américaines qu'avec les prédictions européennes.

Le dépassement ponctuel par BSSA14 et CB14 dans les étages supérieurs ne remet pas en cause la conformité réglementaire du bâtiment, car il est limité à des modèles isolés et ne concerne pas la moyenne de l'ensemble. Toutefois, ce résultat souligne la nécessité d'une vigilance accrue pour les structures flexibles ($T_1 > 1$ s) implantées sur des sites de classe S3 en zone sismique IIa.

L'enrichissement paramétrique des GMMs ne garantit pas un niveau de prédiction plus sévère, mais améliore la stabilité et la contrainte physique des estimations. Les modèles richement paramétrés (ASK14 : 12 paramètres, CY14 : 11 paramètres) produisent des prédictions plus modérées et plus stables que les modèles simplifiés (BSSA14 : 4 paramètres), confirmant que la complexité paramétrique réduit l'incertitude épistémique sans pour autant augmenter le niveau médian de la demande.

Conclusion

Ce chapitre a développé une étude paramétrique complète sur le bâtiment R+10 en béton armé soumis à l'action sismique, en confrontant neuf GMMs aux prescriptions du RPA 2024. Les principaux enseignements sont :

- (1) Les modèles NGA-West2 prédisent des niveaux d'accélération spectrale supérieurs d'environ 15 % aux modèles RESORCE, avec des valeurs s'échelonnant de 0,147 g (DBC14) à 0,321 g (BSSA14 et BI14), reflétant la diversité des bases de données d'étalonnage.
- (2) La dispersion inter-modèles reste modérée autour de la médiane de 0,243 g, les modèles à paramètres multiples (ASK14, CY14) produisant les estimations les plus stables et les mieux contraintes.
- (3) Le spectre RPA 2024 élastique ($S_a = 0,338$ g à $T_1 = 1,04$ s) est supérieur de 39 % à la médiane des GMMs écart attendu et cohérent avec la nature probabiliste du spectre réglementaire (période de retour 475 ans) face au scénario déterministe unique des GMMs.
- (4) La totalité des GMMs reste en deçà de la valeur réglementaire RPA 2024, confirmant que le spectre normatif enveloppe l'ensemble des prédictions empiriques et garantit un niveau de sécurité conservatif pour le site étudié.
- (5) Pour les applications en Algérie, ASK14, CY14 et DBC14 présentent le meilleur compromis entre précision physique et applicabilité régionale, ce dernier bénéficiant d'une calibration sur des données euro-méditerranéennes incluant des enregistrements algériens.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GENERALE

Ce mémoire de Master II avait pour ambition d'évaluer l'influence du choix d'un modèle de prédiction du mouvement du sol (GMM) sur l'estimation de la réponse sismique d'une structure courante en béton armé, et de confronter ces prédictions aux prescriptions du Règlement Parasismique Algérien RPA 2024.

Sur le plan de la synthèse bibliographique, les quatre premiers chapitres ont permis de construire un socle théorique solide couvrant l'ensemble de la chaîne sismique depuis les mécanismes de rupture et la propagation des ondes jusqu'aux modèles de prédiction les plus avancés. L'analyse des séismes de Kobe (1995), de Boumerdès (2003) et de Kahramanmaraş (2023) a mis en lumière l'évolution du paradigme parasismique, passant d'une conception basée sur la résistance à une conception fondée sur la performance et le contrôle des déplacements.

Sur le plan applicatif, l'étude paramétrique menée au Chapitre VI sur un bâtiment R+10 à contreventement mixte a montré que les neuf GMMs étudiés produisent des prédictions d'accélération spectrale allant de 0,147 g à 0,321 g, soit une variabilité d'un facteur supérieur à deux. Les modèles NGA-West2 prédisent des niveaux supérieurs d'environ 15 % à ceux des modèles RESORCE. Le spectre RPA 2024 élastique enveloppe la totalité des prédictions des GMMs avec une marge de 39 % par rapport à la médiane, confirmant le caractère conservateur et protecteur du code algérien.

En termes de recommandations pratiques pour le contexte algérien, ce travail suggère l'utilisation de ASK14 ou CY14 pour les analyses déterministes en champ proche, de BSSA14 ou DBC14 pour les études de microzonage, et de l'ensemble des neuf GMMs pour constituer un panel représentatif dans le cadre d'analyses probabilistes.

Ce mémoire ouvre plusieurs perspectives de recherche : étendre l'étude à des structures irrégulières, conduire des analyses dynamiques temporelles non linéaires avec des accélérogrammes sélectionnés sur la base des spectres GMMs, et développer un GMM spécifiquement calibré sur les données accélérométriques algériennes.

PERSPECTIVES

Axe 1 Enrichissement de la sollicitation sismique d'entrée

Calibration sur des bases de données régionales actualisées : Le RPA 2024 repose sur un spectre normatif dérivé de considérations probabilistes génériques. Il serait bénéfique de recalibrer les ordonnées spectrales à partir de GMMs régionaux spécifiquement développés pour le contexte nord-africain (e.g., modèle DBC14 de Derras et al., 2014, calibré sur des données RESORCE incluant des enregistrements algériens).

Prise en compte explicite de la profondeur de bassin : Les modèles NGA-West2 (CB14, CY14) intègrent des paramètres de profondeur de bassin ($Z_{1.0}$, $Z_{2.5}$) qui modifient significativement la réponse spectrale aux périodes longues ($T > 0,5$ s). Le RPA 2024 ne prend en compte les effets de site qu'à travers le coefficient S et la classification en quatre catégories ($S1$ à $S4$). Une évolution vers un classement de site intégrant la profondeur du substratum rocheux à l'instar de l'Eurocode 8 révisé (2024) permettrait une meilleure estimation de l'amplification spectrale pour les structures flexibles.

Introduction de spectres conditionnels (CMS) : Au lieu d'un spectre uniforme à probabilité de dépassement constante (UHS Uniform Hazard Spectrum), le RPA futur pourrait proposer des spectres conditionnels (Conditional Mean Spectrum, Baker, 2011) qui fournissent une distribution plus réaliste de la demande spectrale sur l'ensemble des périodes, évitant ainsi la surestimation systématique aux périodes éloignées du mode fondamental.

Axe 2 Modernisation de la méthodologie de dimensionnement

Paramètres de source dans la définition du spectre : Le RPA 2024 définit le spectre uniquement en fonction de la zone sismique, de la classification de site et du type de structure. L'introduction de paramètres de source (magnitude de référence, distance, style de faille) dans la formulation spectrale comme le font implicitement les GMMs permettrait de mieux adapter le spectre réglementaire aux scénarios sismiques dominants de chaque zone.

Validation par comparaison systématique aux GMMs internationaux : Le présent travail démontre la faisabilité et l'intérêt d'une confrontation entre le spectre réglementaire et les prédictions des GMMs de dernière génération. Il est recommandé d'institutionnaliser cette démarche en exigeant, pour chaque révision du RPA, une étude de benchmarking

systematique utilisant les GMMs NGA-West2, RESORCE et, à l'avenir, NGA-West3 et ESM 2.0, afin de calibrer objectivement les marges de sécurité intégrées dans le spectre normatif.

Développement d'outils numériques accessibles : L'utilisation du chatbot OpenGSIM (Derras, 2025) dans la présente étude a démontré qu'il est désormais possible d'accéder aux spectres de plus de 500 GMMs de manière automatisée et sans installation logicielle. Le développement de tels outils, associés à des bases de données de paramètres de site pour l'Algérie (V_{s30} , $Z_{1.0}$, κ_0), faciliterait considérablement la mise en œuvre de l'approche multi-modèles par les bureaux d'études algériens et contribuerait à une meilleure prise en compte de la sollicitation sismique réelle dans la pratique du dimensionnement parasismique.

RÉFÉRENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques:

- 📖 Abrahamson, N. A., & Silva, W. J. (1997). Empirical response spectral attenuation relations for shallow crustal earthquakes. *Seismological Research Letters*, 68(1), 94-127
- 📖 Abrahamson, N. A., Gregor, N., & Addo, K. (2016). BC Hydro ground motion prediction equations for subduction earthquakes. *Earthquake Spectra*, 32(1), 23-44
- 📖 Abrahamson, N. A., Silva, W. J., & Kamai, R. (2014). Summary of the ASK14 ground motion relation for active crustal regions. *Earthquake Spectra*, 30(3), 1025-1055
- 📖 AFAD (2023). 6 Şubat 2023 Kahramanmaraşdepremleri raporu. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.
- 📖 Aki, K., & Richards, P. G. (2002). *Quantitative seismology* (2nd ed.). University Science Books.
- 📖 Akkar, S., Sandıkkaya, M. A., & Bommer, J. J. (2014). Empirical ground-motion models for point- and extended-source crustal earthquake scenarios in Europe and the Middle East. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 12(1), 359-387.
- 📖 Al Atik, L., Abrahamson, N., Bommer, J. J., Scherbaum, F., Cotton, F., & Kuehn, N. (2010). The variability of ground-motion prediction models and its components. *Seismological Research Letters*, 81(5), 794-801.
- 📖 Alasset, P.-J., Hébert, H., Maouche, S., Calbini, V., & Meghraoui, M. (2006). The tsunami induced by the 2003 Zemmouri earthquake ($M_w=6.9$, Algeria): modelling and results. *Geophysical Journal International*, 166(1), 213-226.
- 📖 Ancheta, T. D., Darragh, R. B., Stewart, J. P., Seyhan, E., Silva, W. J., Chiou, B. S.-J., ... & Kishida, T. (2014). NGA-West2 database. *Earthquake Spectra*, 30(3), 989-1005.
- 📖 Anderson, J. G. (2000). Expected shape of regressions for ground-motion parameters on rock. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90(6B), S43-S52.
- 📖 Anderson, J. G., & Hough, S. E. (1984). A model for the shape of the Fourier amplitude spectrum of acceleration at high frequencies. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 74(5), 1969-1993.
- 📖 Aoi, S., Kunugi, T., & Fujiwara, H. (2004). Strong-motion seismograph network operated by NIED: K-NET and KiK-net. *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, 4(3), 65-74.
- 📖 Arias, A. (1970). A measure of earthquake intensity. In R. J. Hansen (Ed.), *Seismic design for nuclear power plants* (pp. 438-483). MIT Press.
- 📖 Atkinson, G. M., & Beresnev, I. A. (1997). Don't call it stress drop.

- 📖 Seismological Research Letters, 68(1), 3-4.
- 📖 Bindi, D., et al. (2014). Pan-European ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 12(1), 391-430.
- 📖 Bommer, J. J., & Abrahamson, N. A. (2006). Why do modern probabilistic seismic-hazard analyses often lead to increased hazard estimates? *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(6), 1967-1977.
- 📖 Bommer, J. J., & Acevedo, A. B. (2004). The use of real earthquake accelerograms as input to dynamic analysis. *Journal of Earthquake Engineering*, 8(sup001), 43-91.
- 📖 Bommer, J. J., & Martinez-Pereira, A. (1999). The effective duration of earthquake strong motion. *Journal of Earthquake Engineering*, 3(2), 127-172.
- 📖 Bommer, J. J., Douglass, P. J., Scherbaum, F., Cotton, F., Bungum, H., & Fäh, D. (2010). On the selection of ground-motion prediction equations for seismic hazard analysis. *Seismological Research Letters*, 81(5), 783-793.
- 📖 Boore, D. M. (2003). Simulation of ground motion using the stochastic method. *Pure and Applied Geophysics*, 160, 635-676.
- 📖 Boore, D. M., & Bommer, J. J. (2005). Processing of strong-motion accelerograms: Needs, options and consequences. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 25(2), 93-115.
- 📖 Boore, D. M., Joyner, W. B., & Fumal, T. E. (1982). Estimation of response spectra and peak accelerations from western North American earthquakes: An interim report. US Geological Survey Open-File Report 82-504.
- 📖 Boore, D. M., Stewart, J. P., Seyhan, E., & Atkinson, G. M. (2014). NGA-West2 equations for predicting PGA, PGV, and 5% damped PSA for shallow crustal earthquakes. *Earthquake Spectra*, 30(3), 1057-1085.
- 📖 Bora, S. S., Scherbaum, F., & Kuehn, N. (2019). On the relationship between Fourier and response spectra. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 109(5), 1575-1596.
- 📖 Borchardt, R. D. (1994). Estimates of site-dependent response spectra for design (methodology and justification). *Earthquake Spectra*, 10(4), 617-653.
- 📖 Bozorgnia, Y., & Campbell, K. W. (2004). The vertical-to-horizontal response spectral ratio and tentative procedures for developing simplified V/H and vertical design spectra. *Journal of Earthquake Engineering*, 8(2), 175-207.
- 📖 Bozorgnia, Y., Abrahamson, N. A., Atik, L. A., Ancheta, T. D., ... & Youngs, R. R. (2014). NGA-West2 research project. *Earthquake Spectra*, 30(3), 973-987.

- 📖 Bray, J. D., & Rodriguez-Marek, A. (2004). Characterization of forward-directivity ground motions in the near-fault region. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24(11), 815-828.
- 📖 Brune, J. N. (1970). Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, 75(26), 4997-5009.
- 📖 BSSC (2015). NEHRP recommended seismic provisions for new buildings and other structures (FEMA P-1050). Building Seismic Safety Council.
- 📖 Butler, R., Lay, T., Creager, K., ... & Ritsema, J. (2004). The Global Seismographic Network surpasses its design goal. *Eos, Transactions AGU*, 85(23), 225-229.
- 📖 Campbell, K. W. (1981). Near-source attenuation of peak horizontal acceleration. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 71(6), 2039-2070.
- 📖 Campbell, K. W., & Bozorgnia, Y. (2014). NGA-West2 ground motion model for the average horizontal components of PGA, PGV, and 5% damped linear acceleration response spectra. *Earthquake Spectra*, 30(3), 1087-1115.
- 📖 Cauzzi, C., et al. (2015). Updated predictive equations for broadband horizontal response spectra. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13(6), 1587-1612.
- 📖 CGS (2003). Règles parasismiques algériennes RPA 99/Version 2003. Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique, Alger.
- 📖 Chiou, B. S.-J., & Youngs, R. R. (2014). Update of the Chiou and Youngs NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra. *Earthquake Spectra*, 30(3), 1117-1153.
- 📖 Choi, Y., & Stewart, J. P. (2005). Nonlinear site amplification as function of 30 m shear wave velocity. *Earthquake Spectra*, 21(1), 1-30.
- 📖 Chopra, A. K. (2012). *Dynamics of structures: Theory and applications to earthquake engineering* (4th ed.). Pearson Education.
- 📖 Cotton, F., Scherbaum, F., Bommer, J. J., & Bungum, H. (2013). Criteria for selecting and adjusting ground-motion models for specific target regions. *Journal of Seismology*, 10(2), 137-156.
- 📖 Craig, R. R., & Kurdila, A. J. (2006). *Fundamentals of structural dynamics* (2nd ed.). Wiley.
- 📖 Derras, B., (2025). Developing an Open-access Telegram Bot for Automated, estimation and IA-based interpreted of OpenQuake Ground-Motion intensity measures. <https://doi.org/10.31223/X5P468>. <https://eartharxiv.org/repository/view/10791/>

- 📖 Derras, B., Bard, P.-Y., & Cotton, F. (2014). Towards fully data driven ground-motion prediction models for Europe. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 12(1), 495-516.
- 📖 Derras, B., Bard, P.-Y., Cotton, F., & Bakkouche, A. (2012). Adapting the neural network approach to PGA prediction. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 10(4), 1229-1243.
- 📖 Douglas, J. (2003). Earthquake ground motion estimation using strong-motion records: A review of equations for the estimation of peak ground acceleration and response spectral ordinates. *Earth-Science Reviews*, 61(1-2), 43-104.
- 📖 Eads, L., Miranda, E., & Lignos, D. G. (2015). Average spectral acceleration as an intensity measure for collapse risk assessment. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 44(12), 2057-2073.
- 📖 EERI (2023). Preliminary observations from the February 6, 2023, Türkiye earthquake sequence. Earthquake Engineering Research Institute, Learning from Earthquakes Report.
- 📖 EPRI (1988). A criterion for determining exceedance of the operating basis earthquake (NP-5930). Electric Power Research Institute.
- 📖 Erdik, M., Tüzün, C., Lacasse, S., & Bard, P.-Y. (2023). The 2023 Kahramanmaraş earthquakes: Assessment of early impacts and response. *Seismological Research Letters*, 94(5), 2103-2119.
- 📖 FEMA (2005). Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures (FEMA 440). Federal Emergency Management Agency.
- 📖 Goulet, C. A., Kottke, A. R., Boore, D. M., ... & Thompson, E. M. (2018). Effective amplitude spectrum (EAS) as a metric for ground motion modeling using Fourier amplitudes. 2018 Seismology of the Americas Meeting.
- 📖 Gregor, N., Abrahamson, N. A., Atkinson, G. M., Boore, D. M., ... & Youngs, R. R. (2014). Comparison of NGA-West2 GMPEs. *Earthquake Spectra*, 30(3), 1179-1197.
- 📖 Havskov, J., & Alguacil, G. (2016). *Instrumentation in earthquake seismology* (2nd ed.). Springer.
- 📖 Idriss, I. M. (2014). An NGA-West2 empirical model for estimating the horizontal spectral values generated by shallow crustal earthquakes. *Earthquake Spectra*, 30(3), 1155-1177.
- 📖 JMA (1996). Note on the JMA seismic intensity. Japan Meteorological Agency Technical Note, 386.
- 📖 Kanamori, H. (1977). The energy release in great earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, 82(20), 2981-2987.

- 📖 Kanamori, H., & Brodsky, E. E. (2004). The physics of earthquakes. *Reports on Progress in Physics*, 67(8), 1429-1496.
- 📖 Kempton, J. J., & Stewart, J. P. (2006). Prediction equations for significant duration of earthquake ground motions considering site and near-source effects. *Earthquake Spectra*, 22(4), 985-1013.
- 📖 Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*. Prentice Hall.
- 📖 Lanzano, G., Luzi, L., Pacor, F., Felicetta, C., Puglia, R., Sgobba, S., & D'Amico, M. (2019). A revised ground-motion prediction model for shallow crustal earthquakes in Italy. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 109(2), 525-540.
- 📖 Laouami, N., Slimani, A., Bouhadad, Y., Chikhi, A., & Larbes, S. (2006). Evidence for fault-related directionality and localized site effects from strong motion recordings of the 2003 Boumerdès (Algeria) earthquake. *Pure and Applied Geophysics*, 163, 1039-1055.
- 📖 Lay, T., & Wallace, T. C. (1995). *Modern global seismology*. Academic Press.
- 📖 Lussou, P. (2001). *Calcul du mouvement sismique associé à un séisme de référence pour un site donné*. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble.
- 📖 Meghraoui, M., Maouche, S., Chemaa, B., Cakir, Z., Aoudia, A., Harbi, A., ... & Ayadi, A. (2004). Coastal uplift and thrust faulting associated with the Mw=6.8 Zemmouri (Algeria) earthquake of 21 May, 2003. *Geophysical Research Letters*, 31(19), L19605.
- 📖 Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Quarterly Report of the Railway Technical Research Institute (RTRI)*, 30(1), 25-33.
- 📖 Nakamura, Y., Ueha, F., & Inoue, H. (1996). Waveform and its analysis of the 1995 Hyogo-ken-Nanbu earthquake. *Railway Technical Research Institute Report*, 10(2), 1-8.
- 📖 Nakashima, M., Inoue, K., & Tada, M. (1998). Classification of damage to steel buildings observed in the 1995 Hyogoken-Nanbu earthquake. *Engineering Structures*, 20(4-6), 271-281.
- 📖 Pousse, G. (2005). *Analyse des données accélérométriques de K-net et KiK-net : implications pour la prédiction du mouvement sismique*. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble.
- 📖 Priestley, M. J. N. (2000). *Performance based design in earthquake engineering*. *Proceedings of 12th World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland.
- 📖 Priestley, M. J. N., Calvi, G. M., & Kowalsky, M. J. (2007). *Displacement-based seismic design of structures*. IUSS Press.

- Reid, H. F. (1910). The mechanics of the earthquake. The California Earthquake of April 18, 1906. Report of the State Investigation Commission, Vol. 2, Carnegie Institution of Washington.
- RPA2024 (2024). Règles Parasismiques Algériennes RPA2024 DTR-BC 2.48. CGS, Alger.
- Seed, H. B., & Idriss, I. M. (1971). Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 97(9), 1249-1273.
- Stewart, J. P., Afshari, K., & Hashash, Y. M. A. (2014). Guidelines for performing hazard-consistent one-dimensional ground response analysis for ground motion prediction. PEER Report 2014/16.
- Strasser, F. O., Abrahamson, N. A., & Bommer, J. J. (2009). Sigma: Issues, insights and challenges. Seismological Research Letters, 80(1), 40-56.
- Travasarou, T., Bray, J. D., & Abrahamson, N. A. (2003). Empirical attenuation relationship for Arias intensity. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 32(7), 1133-1155.
- Trifunac, M. D., & Brady, A. G. (1975). A study on the duration of strong earthquake ground motion. Bulletin of the Seismological Society of America, 65(3), 581-626.
- USGS (2023). Earthquake facts and statistics. United States Geological Survey. <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/browse/stats.php>
- Wald, D. J., & Allen, T. I. (2007). Topographic slope as a proxy for seismic site conditions and amplification. Bulletin of the Seismological Society of America, 97(5), 1379-1395.
- Wald, D. J., Quitoriano, V., Heaton, T. H., & Kanamori, H. (1999). Relationships between peak ground acceleration, peak ground velocity, and Modified Mercalli Intensity. Earthquake Spectra, 15(3), 557-564.
- Wells, D. L., & Coppersmith, K. J. (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. Bulletin of the Seismological Society of America, 84(4), 974-1002.
- Wilson, E. L., Der Kiureghian, A., & Bayo, E. P. (1981). A replacement for the SRSS method. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 9(2), 187-194.

 Youd, T. L., Hansen, C. M., & Bartlett, S. F. (2002). Revisedmultilinearregressionequations for prediction of lateral spread displacement. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 128(12), 1007-1017.

ANNEXE

Procédure d'utilisation du bot Télégramme OpenGSIM

1. Présentation de l'outil

L'obtention des mesures d'intensité sismique (IMs) à partir des modèles de prédiction du mouvement du sol (GMMs) nécessite traditionnellement des compétences avancées en programmation et l'utilisation de plateformes complexes telles qu'OpenQuake. Pour pallier cette difficulté, le bot TélégrammeOpenGSIM (https://t.me/MyPGAEstimator_bot), développé par Boumédiène Derras, offre un flux de travail conversationnel et automatisé qui démocratise l'accès à plus de 500 GMMs issus de la base OpenQuake. L'architecture du bot s'appuie sur la plateforme d'automatisation n8n et intègre un modèle de langage (Gemini 1.5 Flash) pour faciliter l'interprétation des spectres générés.

2. Étapes d'utilisation du bot

L'interaction avec le bot s'articule autour de quatre étapes simples et guidées :

Étape 1 : Sélection de la Mesure d'Intensité (IM)

L'utilisateur démarre la session avec la commande `"/start"`. Le bot propose alors une liste numérotée de plus de 21 paramètres d'intensité disponibles (PGA, PGV, SA, IA, etc.) accompagnés de leur définition scientifique. L'utilisateur répond avec le numéro correspondant au paramètre souhaité (par exemple, "4" pour l'accélération spectrale SA).

Étape 2 : Sélection du Modèle GMM

Sur la base de l'IM choisi, le bot filtre et affiche une liste numérotée de GMMs compatibles (ex: les modèles des projets NGA-West2 ou RESORCE). L'utilisateur sélectionne le numéro du modèle à utiliser (ex: "2" pour le modèle AbrahamsonEtAl2014, ou ASK14).

Étape 3 : Saisie des Paramètres Physiques

Le bot présente un résumé du GMM sélectionné et détaille chacun des paramètres physiques requis pour le calcul, classés par catégorie (caractéristiques de la source, distances, conditions de site). Pour le modèle ASK14, par exemple, 12 paramètres sont nécessaires (magnitude de moment M_w , inclinaison de la faille dip, vitesse des ondes de cisaillement V_{s30} , distance de Joyner-Boore R_{jb} , etc.). Le bot fournit la définition, l'unité et la plage typique de valeurs pour chaque paramètre. L'utilisateur entre alors ces valeurs sous forme d'une liste séparée par des virgules.

Étape 4 : Réception des Résultats et Rapport

Une fois les paramètres validés, le bot déclenche le calcul en arrière-plan via un script Python exécutant le moteur OpenQuake. En quelques secondes, l'utilisateur reçoit :

- Un résumé visuel (graphique) de la courbe du spectre de réponse illustrant la médiane et l'écart-type.
- Un rapport textuel récapitulant les valeurs d'entrée et de sortie.
- Un rapport PDF détaillé incluant une analyse intelligente générée par l'Intelligence Artificielle (Gemini), qui identifie les pics spectraux et en déduit des observations préliminaires sur la demande sismique (par exemple, la vulnérabilité des structures courtes et rigides face aux bâtiments plus flexibles). Ce rapport est accompagné d'un fichier CSV contenant les données brutes prêtes à être exploitées sous Excel ou Robot Structural Analysis.

Cette démarche conversationnelle a permis, dans le cadre de ce mémoire, d'optimiser le processus d'évaluation sismique, de réduire le risque d'erreur humaine lors du paramétrage, et de pouvoir confronter rapidement un nombre important de GMMs aux spectres réglementaires du RPA.