

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 أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd - Tlemcen -  
Faculté de TECHNOLOGIE



## **MEMOIRE**

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

**En** : Génie civil

**Spécialité** : Master structures

### **Thème**

**ETUDE COMPARATIVE (RPA/EC8/ASCE07) DE  
L'INFLUENCE DE L'EFFET DE SITE SUR LA REPONSE  
DYNAMIQUE**

**Présenté par**

*LIANI IMADEDINE*

*MATALLAH WALID*

**Devant le jury composé de**

Pr.ZENDAGUI.D

Univ. Tlemcen

Président

Dr.BENADLA.Z

Univ. Tlemcen

Examinatrice

Dr.DJAFOUR.N

Univ. Tlemcen

Encadreur

Dr.BENMANSOUR.N

Univ. Tlemcen

Encadreur

**ANNEE UNIVERSITAIRE 2019/2020**



# DEDICACES

*Je dédie ce travail :*

*À ma famille, en particulier mes parents qui m'ont guidé et soutenu durant tout mon parcours.*

*Mon frère MOHAMMED et tous mes frères, que dieu les garde pour moi.*

*À mes amis.*

*Walid*

*Du profond du mon cœur de dédie ce travail :*

*À mes chers parents Source de vie, d'amour et d'affections, je vous remercie pour tout le soutien que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours.*

*Ma grande mère, mes frères , ma sœur et ces enfants source de la joie et de bonheur.*

*À tout mes amis et mes proches tout particulièrement rania.*

*Imad*

# REMERCIEMENTS

*Nous remercions avant tout Allah «Aza Wa Jalla» de nous avoir gardé en bonne santé afin de mener à bien ce projet de fin d'étude.*

*Nous remercions également nos familles pour les sacrifices qu'elles ont fait pour que nous puissions terminer nos études.*

*Nous tenons aussi à remercier nos promoteurs Dr. DJAFOUR N et Dr. BENMANSOUR N., pour leurs suivi et leurs conseils durant la réalisation de ce travail.*

*Nous adressons nos vifs remerciements au président du jury Pr ZENDAGUI D qui a bien voulu nous honorer par sa présence en qualité de président malgré ses occupations très multiples. De même nous tenons à remercier Dr BENADLA Z pour ses remarques et suggestions.*

*Nous remercions également l'ensemble des enseignants du département de génie civil qui ont assuré notre formation.*

*Nous remercions également tous nos amis pour leur aide, leur patience, leur compréhension et leur encouragement.*

*Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements et notre profonde gratitude au chef du département de génie civil Dr. HAMDAOUI K et le Doyen de la Faculté de Technologie pour leurs précieux conseils durant tout le cycle de nos études.*

*Enfin nous remercions tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.*

# *Table des Matières*

ملخص	vi
Résumé .....	vi
Abstract .....	vi
Liste des Tableaux.....	vii
Liste des Figures.....	x
Liste des symboles.....	xiii.
Introduction générale .....	1
Chapitre 1.....	3
REVUE BIBLIOGRAPHIQUE.....	3
1.1 Introduction .....	3
1.2 Les paramètres temporels d'un signal sismique.....	3
1.2.1 L'accélération maximale.....	3
1.2.2 La vitesse maximale et le déplacement maximal .....	4
1.3 Les paramètres du contenu fréquentiel .....	5
1.3.1 Spectre de réponse de sol .....	6
1.4 La durée d'un signal sismique .....	7
1.5 Les types d'ondes sismique .....	8
1.5.1 Les ondes de volume.....	8
1.5.2 Les ondes de surface .....	10
1.6 Réglementations parasismiques .....	11
1.6.1 Règle parasismique algérien 99 version 2003 (RPA99 version 2003).....	11
1.6.2 Eurocode 8 .....	14
1.6.3 L'ASCE07-16.....	17
1.7 Conclusion.....	22
Chapitre 2.....	23
GENERALITES SUR L'EFFET DE SITE .....	23
2.1 Introduction .....	23
2.2 Généralité .....	24
2.3 Les effets des conditions locales du site sur le mouvement du sol.....	26
2.4 L'évidence de l'effet de site .....	26
2.4.1 Le séisme de Nord-Ouest de l'Inde dans l'Etat du Gujarat 2001 .....	26
2.4.2 Zonage sismique indien (Global Séismique Hazard Assessment Program)29	

2.4.3	Les effets de site .....	30
2.4.4	Échelle Medvedev-Sponheuer-Karnik.....	32
2.5	L'effet de site lié à la topographie .....	33
2.6	L'effet de site lié à la géologie.....	34
2.7	Méthodes usuelles de détermination des effets de site.....	34
2.7.1	Modélisations numériques.....	34
2.7.2	Méthode classique par enregistrement de la sismicité.....	35
2.8	Conclusion.....	35
	Chapitre 3.....	36
	LES SPECTRES DE REPONSES REGLEMENTAIRES .....	36
3.1	Introduction .....	36
3.2	Les spectres de réponse.....	37
3.2.1	Spectre de réponse de RPA 99 VERSION 2003.....	37
3.2.2	Spectre de réponse en Eurocode 8 .....	43
3.2.3	Spectre de réponse dans l'IBC (ASCE07-16) .....	53
3.2.4	Rapport d'enquête géotechnique supplémentaires et exigences pour les catégories de conception sismique D à F .....	62
3.2.5	Conclusion.....	64
	Chapitre 4.....	66
	COMPARAISON DES SPECTRES DE REPONSES ELASTIQUES DE RPA99/V2003, ASCE07-16, EC8 TYPE 1 ET 2.....	66
4.1	Introduction .....	66
4.2	Comparaison des classifications des sites.....	66
4.3	Etude des spectres élastiques .....	67
4.3.1	Comparaison des formules des spectres du RPA avec les spectres élastiques européens (EC 8) et américain (ASCE 07-16) .....	69
4.3.2	Comparaisons entre les spectres de réponses relatifs aux règlements RPA 99V2003, EC8 et ASCE07-16.....	71
4.3.3	Comparaisons des accélérations spectrales maximales des codes RPA, EC8et ASCE07 : .....	86
4.4	Analyse de la différence entre les spectres de l'RPA et ceux de l'EC8 et l'ASCE07.....	88
4.5	Conclusion.....	98
	Chapitre 5.....	100
	ETUDE COMPARATIVE DE L'EFFET DE SITE SUR LA REPONSE SISMIQUE REGLEMENTAIRE DES BATIMENTS.....	100

5.1	Introduction .....	100
5.2	Caractéristiquesdesbâtimentsétudiés .....	100
5.3	Analyse dynamique modale.....	102
5.4	Etude comparative des réponses sismiques réglementaires.....	104
5.4.1	Etude comparative du modèle 1.....	105
5.4.2	Etude comparative du modèle 2.....	108
5.5	Conclusion.....	112
	Conclusion générale.....	113
	Références Bibliographiques.....	117
	Sites web.....	119

## ملخص

أظهرت الدراسات الميدانية للدمار الناجم عن العديد من الزلازل حول العالم أن هناك تفاوتًا كبيرًا في درجة الضرر الناجم عن الزلازل نفسه مع وجود منطقة دمار كامل بجواره. منطقة أخرى تقريبًا لم تتأثر. هذا يوضح تأثير الموقع في هذا العمل ، نقارن بين القوانين الرسمية : الجزائرية والأمريكية والفرنسية من حيث تأثير الموقع ..من خلال دراسة كيفية أخذ هذا التأثير بعين الاعتبار في طيف الاستجابة..

## Résumé

Les enquêtes sur le terrain de la dévastation causée par de nombreux tremblements de terre dans le monde ont montré qu'il existe une grande disparité dans le degré de dommages causé par le même séisme avec la présence d'une zone de dévastation complète à côté d'une autre zone presque non affectée. Cela démontre clairement l'impact du site. Dans ce travail, nous comparons les codes réglementaires : algérien, américain et français en termes d'influence du site en étudiant comment cet effet est pris en compte dans le spectre de réponse.

## Abstract

Field investigations of the devastation caused by many earthquakes around the world have shown that there is a great disparity in the degree of damage caused by the same earthquake with the presence of a zone of complete devastation next an unaffected area. This clearly demonstrates the impact of the site. In this work, we compare the design codes: Algerian, American and French in terms of site influence by studying how this effect is taken into account in the response spectrum

## Liste des Tableaux

Tableau 1-1. Durées typiques du séisme à des distances de moins de 10 km de l'épicentre.[2].....	8
Tableau 2-1. L'échelle MSK (Medvedev-Sponheuer-Karnik) [2].....	33
Tableau 3-1. La classification des zones sismiques selon RPA [7] .....	38
Tableau 3-2. Classification des groupes d'usage sismiques selon le RPA [7] ...	39
Tableau 3-3. Coefficient d'accélération selon le RPA [7] .....	39
Tableau 3-4. Classification des sites selon RPA [7]. .....	39
Tableau 3-5. Valeurs de $T1$ et $T2$ pour les différents sites [7]. .....	40
Tableau 3-6. Valeurs des pénalités $Pq$ [7]. .....	41
Tableau 3-7. Valeurs du coefficient de comportement $R$ [7].....	42
Tableau 3-8. Valeurs de $\xi$ (%) [7]......	42
Tableau 3-9. Classification des sites selon l'EC8 [8]. .....	44
Tableau 3-10. Coefficient d'accélération au niveau de rocher $agR(m/s^2)$ [8]. .	45
Tableau 3-11. Coefficient d'importance $\gamma_1$ [8]. .....	46
Tableau 3-12. Les valeurs du paramètre de sol $S$ .....	47
Tableau 3-13. Coefficient de sol .....	50
Tableau 3-14. Valeurs recommandées des paramètres décrivant les spectres de réponse élastique vertical.[9] .....	51
Tableau 3-15. Facteurs d'amplification topographique selon l'EC8 [9]. .....	52
Tableau 3-16. Classification de site ASCE07-16 [9].....	53
Tableau 3-17. Coefficient de site $Fa$ pour une période $T = 0.2s$ [9].....	54
Tableau 3-18. Coefficient de site $Fv$ pour un période $T = 1s$ [9] .....	54
Tableau 3-19. Facteur d'importance pour ASCE07 [9] .....	58
Tableau 3-20. Valeurs du coefficient vertical $Cv$ [9].....	62
Tableau 3-21. Coefficient de sol $[F]_{PGA}$ [9].....	63
Tableau 4-1. Les types de sol définis dans l'EC8, l'ASCE07/16 et le RPA 99/2003.....	67
Tableau 4-2. Cordonnées de spectres élastique pour EC8, RPA99 et ASCE07	69
Tableau 4-3. Les différents facteurs utilisés par le RPA 99/2003, par l'EC8 et l'ASCE07-16.....	70
Tableau 4-4. Paramètres des spectres de réponse. ....	72

Tableau 4-5. Valeurs d'accélération correspondantes aux périodes 0 s;0.05 s; 0.3 s ; 1 s et 4 s (site rocheux - $ag = 0.1g$ ).....	75
Tableau 4-6. Valeurs d'accélération correspondantes aux périodes 0 s; 0.05 s; 0.3 s ; 1 s et 4 s (site rocheux - $ag=0.3g$ ) .....	76
Tableau 4-7. Valeurs d'accélération correspondantes aux périodes 0 s ;0.05 s ; 0.3 s ; 1 s et 4 s (site rocheux - $ag=0.4g$ ) .....	76
Tableau 4-8. Valeurs d'accélération correspondantes aux périodes 0s;0.05s; 0.3s ; 1s et 4s (site ferme - $ag = 0.1g$ ).....	79
Tableau 4-9. Valeurs d'accélération correspondantes aux périodes 0s;0.05s; 0.3s ; 1s et 4s (site ferme - $ag = 0.3g$ ).....	79
Tableau 4-10. Valeurs d'accélération correspondantes aux périodes 0s;0.05s; 0.3s ; 1s et 4s (site ferme - $ag = 0.4g$ ).....	80
Tableau 4-11 Valeurs d'accélération correspondantes aux périodes 0s;0.05s; 0.3s ; 1s et 4s (site meuble - $ag = 0.1g$ ).....	82
Tableau 4-12. Valeurs d'accélération correspondantes aux périodes 0s;0.05s; 0.3s ; 1s et 4s (site meuble - $ag = 0.3g$ ).....	83
Tableau 4-13. Valeurs d'accélération correspondantes aux périodes 0s;0.05s; 0.3s ; 1s et 4s (site meuble - $ag = 0.4g$ ).....	83
Tableau 4-14. Valeurs d'accélération correspondantes aux périodes 0s ; 0.05s; 0.3s ; 1s et 4s (site très meuble - $ag = 0.1g$ ).....	85
Tableau 4-15. Valeurs d'accélération correspondantes aux périodes 0s ; 0.05s; 0.3s ; 1s et 4s (site très meuble - $ag = 0.3g$ ).....	86
Tableau 4-16. Valeurs d'accélération correspondantes aux périodes 0s ;0.05s; 0.3s ; 1s et 4s (site très meuble - $ag = 0.4g$ ).....	86
Tableau 4-17. Comparaison des rapports pour $ag = 0.1g$ et un site rocheux. ....	89
Tableau 4-18. Comparaison des rapports pour $ag = 0.1g$ et un site ferme.....	90
Tableau 4-19. Comparaison des rapports pour $ag = 0.1g$ et un site meuble. ....	90
Tableau 4-20. Comparaison des rapports pour $ag = 0.1g$ et un site très meuble. ....	90
Tableau 4-21. Comparaison des rapports pour $ag = 0.3g$ et un site rocheux. ....	91
Tableau 4-22. Comparaison des rapports pour $ag = 0.3g$ et un site ferme.....	91
Tableau 4-23. Comparaison des rapports pour $ag = 0.3g$ et un site meuble. ....	91
Tableau 4-24. Comparaison des rapports pour $ag = 0.3$ et un site très meuble. ....	91
Tableau 4-25. Comparaison des rapports pour $ag = 0.4g$ et un site rocheux. ....	92
Tableau 4-26. Comparaison des rapports pour $ag = 0.4g$ et un site ferme.....	92
Tableau 4-27. Comparaison des rapports pour $ag = 0.4g$ et un site meuble. ....	92

Tableau 4-28. Comparaison des rapports pour $a_g = 0.4g$ et un site très meuble. .....	92
Tableau 5-1. Caractéristiques géométriques des ouvrages étudiés. ....	101
Tableau 5-2. Résultats de 1 <sup>ère</sup> modèle. ....	103
Tableau 5-3. Résultats du 2 <sup>ème</sup> modèle R+4. ....	104
Tableau 5-4. Efforts tranchant à la base suivant les deux directions $F_y$ et $F_x$ pour le modèle1. ....	105
Tableau 5-5. Les efforts tranchant à la base suivant les deux directions $F_y$ et $F_x$ pour la structure R+4 étages. ....	109

## Liste des Figures

Figure 1-1. Accélérogrammes enregistré au barrage de Pacoima et les sismogrammes de vitesse et de déplacement et l'accélération [1]....	5
Figure 1-2. Spectre de sol pour un projet avec représentation tri logarithmique [3] .....	7
Figure 1-3. Ondes de volume [4] .....	9
Figure 1-4. Ondes de surface [4] .....	10
Figure 2-1. Effets de sites dus à la réflexion des ondes sur les parois d'une montagne et sur la surface de sol [13] .....	25
Figure 2-2. Schéma illustrant différentes configurations géologiques locales susceptibles de modifier la propagation des ondes sismiques qui les traversent.[13] .....	25
Figure 2-3. Localisation de l'état du Gujarat au Nord Ouest de la plaque indienne [6]. .....	27
Figure 2-4. Situation de l'épicentre du séisme de Bhuj du 26/01/2001 dans le cadre géodynamique de la collision [6]. .....	28
Figure 2-5. Carte de la région du Kachchh à l'Ouest de l'Etat du Gujarat [6]. .	29
Figure 2-6. Zonage sismique de l'Inde [6]. .....	30
Figure 2-7. Effet de site à Anjar le quartier Nord [6].....	31
Figure 2-8. Effet de site à Anjar ; le quartier Centre [6]. .....	31
Figure 3-1. Carte de zonage selon le RPA [7] .....	38
Figure 3-2. Spectres de réponse élastique pour les sols des classes S1 à S4 selon le RPA [7]. .....	43
Figure 3-3. Carte de zonage selon l'EUROCODE 08 (la France). .....	46
Figure 3-4. Forme standard du spectre de réponse Eurocode 8 [8]. .....	49
Figure 3-5. Spectres de réponses élastiques réglementaires TYPE 01 [9].....	50
Figure 3-6. Spectres de réponses élastiques réglementaires TYPE 02. ....	51
Figure 3-7. Variation du coefficient de site $F_a$ .....	55
Figure 3-8. Variation du coefficient de site $F_v$ .....	55
Figure 3-9. Accélération spectrale de 0,2 seconde (SA) avec une probabilité de dépassement de 2 % en 50 ans [11]. .....	56
Figure 3-10. Accélération spectrale de 1 seconde (SA) avec une probabilité de dépassement de 2 % en 50 ans [11]. .....	56
Figure 3-11. Logiciel qui permet de calculer Ss et S1 [11]. .....	57

Figure 3-12. Logiciel qui permet de calculer $S_s$ et $S_1$ [11].	57
Figure 3-13. Spectre de réponse de la conception pour ASCE07 [9]	59
Figure 3-14. Spectres de réponse élastiques réglementaire ASCE07 [10].	60
Figure 3-15. Période de transaction de longue durée TL [10].	61
Figure 3-16. Spectres de réponses horizontales et verticales pour un site rocheux et $a_g = 0.1 g$ .	62
Figure 3-17. Spectres de réponse avec et sans coefficient de site pour $a_g = 0.1 g$	64
Figure 4-1. Construction de spectres de déplacement linéaire pour un enregistrement du tremblement de terre de North Palm Springs en 1986.[14]	68
Figure 4-2. Spectres de réponse des règlements RPA, EC8 et ASCE07-16 ( $a_g = 0.1g$ - site rocheux).	74
Figure 4-3. Spectres de réponse des règlements RPA, EC8 et ASCE07-16 ( $a_g = 0.3g$ - site rocheux).	75
Figure 4-4. Spectres de réponse des règlements RPA, EC8 et ASCE07-16 ( $a_g = 0.4g$ - site rocheux).	75
Figure 4-5. Spectres de réponse des règlements RPA, EC8 et ASCE07-16 ( $a_g = 0.1g$ - site ferme).	78
Figure 4-6. Spectres de réponse des règlements RPA, EC8 et ASCE07-16 ( $a_g = 0.3g$ - site ferme).	78
Figure 4-7. Spectres de réponse des règlements RPA, EC8 et ASCE07-16 ( $a_g = 0.4g$ - site ferme).	78
Figure 4-8. Spectres de réponse des règlements RPA, EC8 et ASCE07-16 ( $a_g = 0.1g$ - site meuble).	81
Figure 4-9. Spectres de réponse des règlements RPA, EC8 et ASCE07-16 ( $a_g = 0.3g$ - site meuble).	81
Figure 4-10. Spectres de réponse des règlements RPA, EC8 et ASCE07-16 ( $a_g = 0.4g$ - site meuble).	82
Figure 4-11. Spectres de réponse des règlements RPA, EC8 et ASCE07-16 ( $a_g = 0.1g$ - site très meuble).	84
Figure 4-12. Spectres de réponse des règlements RPA, EC8 et ASCE07-16 ( $a_g = 0.3g$ - site très meuble).	84
Figure 4-13. Spectres de réponse des règlements RPA, EC8 et ASCE07-16 ( $a_g = 0.4g$ - site très meuble).	85
Figure 4-14. Les accélérations maximales pour $a_g = 0.1g$ .	87
Figure 4-15. Les accélérations maximales pour $a_g = 0.3g$ .	88

Figure 4-16. Les accélérations maximales pour $a_g=0.4g$ .....	88
Figure 4-17. Variation des rapports pour $a_g=0.1 g$ et $T=0.05 s$ .....	93
Figure 4-18. Variation des rapports pour $a_g=0.1 g$ et $T=0.3 s$ .....	93
Figure 4-19. Variation des rapports pour $a_g=0.1 g$ et $T=1 s$ .....	94
Figure 4-20. Variation des rapports pour $a_g=0.1 g$ et $T=2 s$ .....	94
Figure 4-21. Variation des rapports pour $a_g=0.3 g$ et $T=0.05 s$ .....	95
Figure 4-22. Variation des rapports pour $a_g=0.3 g$ et $T=0.3 s$ .....	95
Figure 4-23. Variation des rapports pour $a_g=0.3 g$ et $T=1 s$ .....	95
Figure 4-24. Variation des rapports pour $a_g=0.3 g$ et $T=2 s$ .....	96
Figure 4-25. Variation des rapports pour $a_g=0.4 g$ et $T=0.05 s$ .....	96
Figure 4-26. Variation des rapports pour $a_g=0.4g$ et $T=0.3 s$ .....	97
Figure 4-27. Variation des rapports pour $a_g=0.4 g$ et $T=1 s$ .....	97
Figure 4-28. Variation des rapports pour $a_g=0.4 g$ et $T=2s$ .....	97
Figure 5-1. Vue en 3D des modèles éléments finis des bâtiments considérés.	102
Figure 5-2. Effort tranchant à la base pour un site rocheux direction FY.....	107
Figure 5-3. Effort tranchant à la base pour un site rocheux direction FX.....	107
Figure 5-4. Effort tranchant à la base pour un site ferme direction FY .....	107
Figure 5-5. Effort tranchant à la base pour un site ferme direction FX .....	107
Figure 5-6. Effort tranchant à la base pour un site meuble direction FY.....	108
Figure 5-7. Effort tranchant à la base pour un site meuble direction FX.....	108
Figure 5-8. Effort tranchant à la base pour un site très meuble direction FY ..	108
Figure 5-9. Effort tranchant à la base pour un site très meuble direction FX..	108
Figure 5-10. Effort tranchant à la base pour un site rocheux direction FY.....	110
Figure 5-11. Effort tranchant à la base pour un site rocheux direction FX.....	110
Figure 5-12. Effort tranchant à la base pour un site ferme direction FY .....	110
Figure 5-13. Effort tranchant à la base pour un site ferme direction FX .....	110
Figure 5-14. Effort tranchant à la base pour un site meuble direction FY.....	111
Figure 5-15. Effort tranchant à la base pour un site meuble direction FX.....	111
Figure 5-16. Effort tranchant à la base pour un site très meuble directionFY.	111
Figure 5-17. Effort tranchant a la base pour un site très meuble direction FX	111

## Liste des symboles

$h_i$  : L'épaisseur de la couche (en mètres).

$V_{si}$  : La vitesse de l'onde de cisaillement (m/s)

$d_i$  : L'épaisseur de toute couche comprise entre 0 et 30 m

$N$  : Résistance à la pénétration standard moyenne du champ

$N_{ch}$  : Résistance standard moyenne à la pénétration pour les couches de sol sans cohésion

$S_u$  : Résistance moyenne au cisaillement non drainée

$d_c$  : Epaisseur totale des couches de sol cohésives dans la partie supérieure 100 pieds (30 m).

$L_x, L_y$  : Largeur et longueur de bâtiment dans la direction « x » ou « y »

$S_a/g$  : Accélération spectrale

$T$  : Période fondamentale de la structure

$D$  : Facteur d'amplification dynamique moyen

$h_i$  : épaisseur de la couche (i)

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

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

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

$A$  : Coefficient d'accélération de zone

$R$  : Coefficient de comportement de la structure

$Q$  : Facteur de qualité

$\eta$  : Facteur de correction d'amortissement.

$\xi$  : Pourcentage d'amortissement critique

$T_1, T_2$  : Caractéristiques associées à la catégorie de site. Ils donnent respectivement les limites inférieure et supérieure du spectre en accélération.

$S$  : Paramètre du sol.

$S_{DS}$  : Paramètre d'accélération de la réponse spectrale de conception à courtes périodes.

$S_{D1}$  : Paramètre d'accélération de la réponse spectrale de conception à une période de 1s.

$T_0$  : Limite inférieure des périodes correspondant au palier d'accélération spectrale constante.

$T_s$  : Limite supérieure des périodes correspondant au palier d'accélération spectrale constante.

$T_L$  : Période de transition de longue durée (s).

$S_s$  : Accélération de la réponse spectrale maximale du tremblement de terre considéré à courtes périodes.

$S_1$  : Accélération de la réponse spectrale du tremblement de terre considéré à  $T=1s$

$ag$  : Accélération de calcul pour un sol de classe A.

$\eta$  : Coefficient de correction de l'amortissement.

$T_B$  : Limite inférieure des périodes correspondant au palier d'accélération spectrale constante.

$T_C$  : Limite supérieure des périodes correspondant au palier d'accélération spectrale constante.

$T_D$  : Valeur définissant le début de la branche à déplacement spectral constant.

$F_x$  : l'effort tranchant a la base suivant la direction X

$F_Y$  : l'effort tranchant a la base suivant la direction Y

# *Introduction générale*

La surface du globe est composée d'une douzaine de gros morceaux, que nous appelons plaques tectoniques. Elles forment l'enveloppe superficielle de la terre d'une épaisseur d'une centaine de kilomètres. C'est la "lithosphère". Les mouvements de ces plaques provoquent une accumulation d'énergie qui cause une rupture brutale de la plaque, c'est le tremblement de terre.

Il est devenu reconnu que les conditions locales du site ont un rôle très important sur la réponse de la structure. Tous les séismes récents ont montré que les mouvements sismiques et les dégâts associés peuvent varier spatialement d'une façon extrêmement rapide. L'importance des conditions locales du site a été reconnue en 1960 à Caracas, la capitale du Venezuela. Il existe d'autres exemples comme le séisme de Mexico en 1985, de l'Asnam en Algérie 1980. Suite au séisme de Gujarat, le 26 janvier 2001, un quartier a été complètement dévasté alors qu'un autre, à quelques centaines de mètres, n'a enregistré que des dégâts vraiment mineurs. Ces observations mettent en évidence l'influence du site local sur la réponse dynamique.

L'effet de site est lié à l'effet d'amplification des ondes sismiques. On peut le quantifier et le prendre en compte par plusieurs méthodes : expérimentales et numériques ou réglementaires. Les différents codes sismiques réglementaires prennent en compte les effets de sites en introduisant des facteurs d'amplifications pour différentes catégories de sites ou bien des facteurs d'amplification topographique.

L'objectif de ce travail est d'effectuer une étude comparative de l'influence de l'effet de site sur la réponse dynamique selon le RPA (Règlement Parasismique Algérien), l'EC8 (Eurocode 8) et l'IBC/ASCE07-16 (International Building Code). Cette étude est structurée en cinq chapitres :

1. Le premier chapitre donne une revue bibliographique et une petite présentation des codes parasismiques RPA99, EC8 et ASCE07-16.
2. Le deuxième chapitre traite des généralités sur les effets de site et les différentes méthodes d'évaluation.

3. Le troisième chapitre est consacré à la présentation des spectres de réponses élastique horizontaux et verticaux de chaque code avec la définition des différents facteurs constituant les expressions des spectres de réponses
4. Le quatrième chapitre est destiné à une comparaison des spectres de réponses en étudiant la variation de l'accélération
5. Le cinquième chapitre aborde une comparaison des efforts tranchants à la base d'une structure pour différentes accélérations et différents sites.

Le travail est achevé par des conclusions et des perspectives.

# Chapitre 1

## REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

### 1.1 Introduction

L'amélioration des données sismiques et des installations informatiques a permis de faire des progrès spectaculaires dans le domaine du calcul, des techniques de localisation et de quantification des tremblements de terre. Certaines des techniques les plus éprouvées pourraient bien être prêtes pour une utilisation de routine. Plusieurs paramètres sismiques ont été présentés dans la littérature au cours des dernières années. Ces paramètres peuvent être utilisés pour exprimer l'intensité des excitations sismiques et pour simplifier leur description. Les observations post-séismiques sur le terrain et les études numériques ont montré l'interdépendance entre les paramètres sismiques et l'état des dégâts des bâtiments après les tremblements de terre.

### 1.2 Les paramètres temporels d'un signal sismique

#### 1.2.1 L'accélération maximale

Dans la pratique actuelle la conception de structures résistantes aux séismes consiste à utiliser l'accélération maximale du sol, (Figure 1-1), comme mesure de la gravité du mouvement du sol, même si l'accélération maximale n'est pas le meilleur paramètre pour représenter cette caractéristique du mouvement du sol. L'accélération de pointe est utilisée en raison de sa familiarité et de sa large acceptation dans le milieu de l'ingénierie comme la mesure des forces latérales sur les systèmes structuraux à

haute fréquence. Pour les systèmes à moyenne et basse fréquence, les données sur la vitesse au sol et le déplacement sont plus applicables. [1]

### **1.2.2 La vitesse maximale et le déplacement maximal**

Le mouvement du sol peut également être caractérisé par des historiques de vitesse et du temps de déplacement dérivés d'un accéléromètre et de leurs valeurs maximales. Les valeurs de vitesse et de déplacement du sol semblent avoir une limite supérieure plus déterminante que l'accélération du sol(Figure 1-1).

Les historiques de temps du déplacement et les spectres sont utilisés pour définir le moment sismique, la chute de contrainte et les dimensions de la source et sont également utilisés dans les études de propagation des ondes sismiques. Les amplitudes de déplacement du sol sont propagées de manière plus cohérente que les amplitudes de vitesse et d'accélération du sol, car leur composition spectrale à basse fréquence n'est pas très sensible à la dispersion par de petites inhomogénéités géologiques. Des historiques de vitesse et du temps de déplacement sont nécessaires, respectivement, pour modéliser les effets des séismes sur les structures à moyenne et basse fréquence. Les historiques de temps et de vitesse peuvent être utilisés en conjonction avec la vitesse d'onde de cisaillement des matériaux de surface pour estimer le niveau de déformation de cisaillement induite dans le sol.[1]

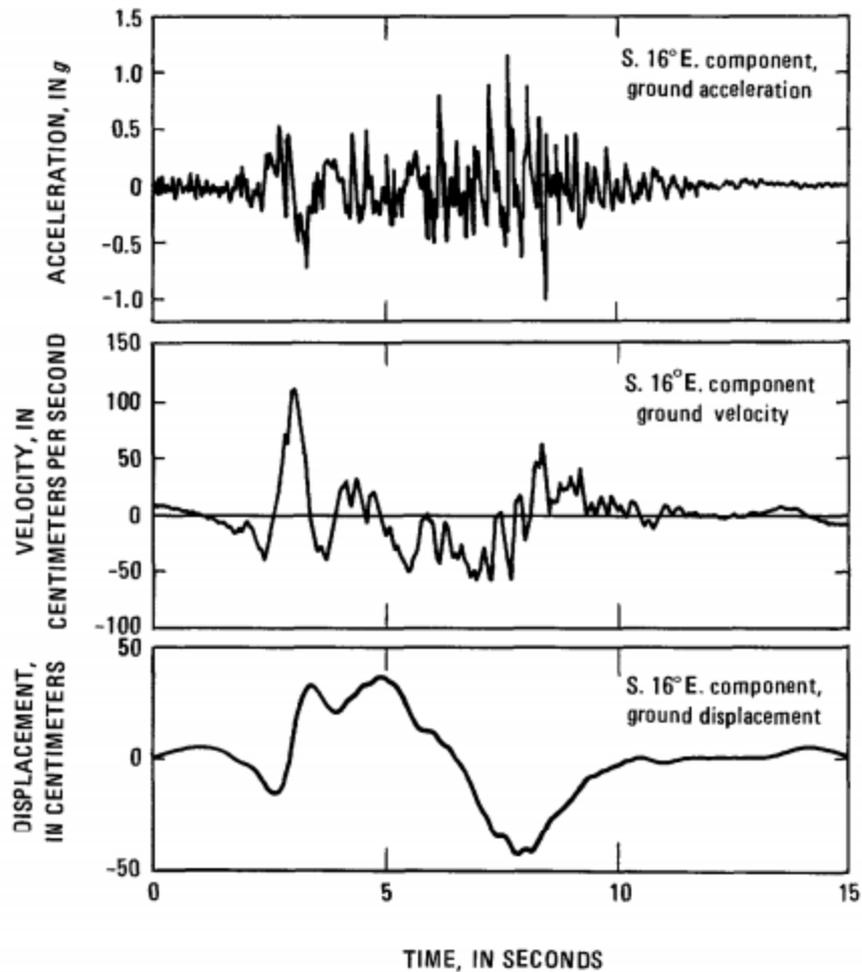


Figure 1-1. Accélérogrammes enregistré au barrage de Pacoima et les sismogrammes de vitesse et de déplacement et l'accélération [1]

### 1.3 Les paramètres du contenu fréquentiel

Il est reconnu que la réponse dynamique des structures conformes, qu'il s'agisse de bâtiments, de ponts, de pentes ou de dépôts du sol, est très sensible à la fréquence à laquelle ils sont chargés. Les tremblements de terre produisent un chargement compliqué avec des composantes de mouvement qui couvrent un large intervalle de fréquences. Le contenu fréquentiel décrit la façon dont l'amplitude d'un mouvement sismique est répartie entre différentes fréquences. Puisque le contenu fréquentiel d'un mouvement sismique influencera fortement les effets de ce mouvement, la caractérisation du mouvement ne peut être complète sans tenir compte de son contenu fréquentiel. Ceci peut être effectué à l'aide du spectre de réponse. [2]

### 1.3.1 Spectre de réponse de sol

Une fois que les caractéristiques de l'ébranlement du sol à la suite ont été établis, les spectres de réponse élastique peuvent être définis. Les spectres de réponse sont définis en utilisant des procédures indépendantes ou dépendantes du site. La définition de l'apport sismique et de la réponse du site est un processus controversé. La controverse est causée en partie par le débat sur la disponibilité des ressources géologiques, des données géophysiques, sismologiques et géotechniques sont adéquats pour préciser l'apport sismique et la réponse du site précisément. Il existe plusieurs types de spectres de réponses mais dans le domaine du parasismique un type est largement utilisable, ce spectre décrit la réponse maximale d'un système à un seul degré de liberté (SDOF) à un mouvement d'entrée particulier en fonction de la fréquence naturelle (ou période naturelle). [1]

Les spectres de réponse d'oscillateur sont couramment représentés par des graphiques tri logarithmique (Figure 1-2.) qui permettent de lire sur un seul graphique les trois grandeurs: le déplacement relatif, la pseudovitesse relative, la pseudo-accelération absolue.

Le contenu en fréquence du spectre de l'oscillateur reflète le contenu en fréquence de l'accéléromètre utilisé, il est donc "marqué" par la nature du sol plutôt qu'enregistré. Par conséquent, pour développer le spectre terrestre pendant la phase du projet, il est recommandé de construire des spectres d'oscillateur pour plusieurs cartes d'accélération et de construire un spectre d'enveloppe qui lisse l'antirésonance [3].

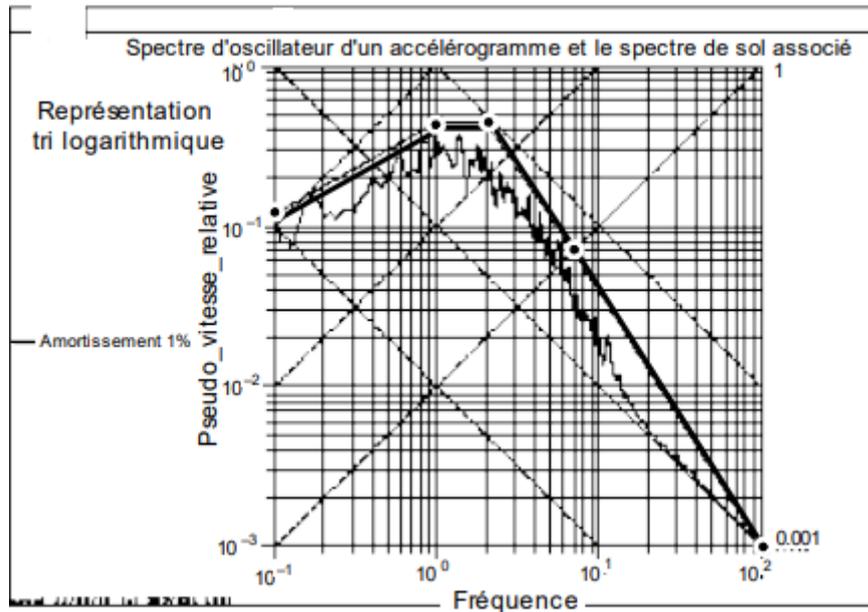


Figure 1-2. Spectre de sol pour un projet avec représentation tri logarithmique [3]

## 1.4 La durée d'un séisme

La durée de mouvements forts du sol peut avoir une forte influence sur les dégâts du séisme. De nombreux processus physiques, tels que la dégradation de la rigidité, la résistance de certains types de structures et l'accumulation de pressions de l'eau interstitielle dans les sables lâches et saturés, sont sensibles au nombre de changement de signe de charges ou de contraintes qui se produisent lors d'un tremblement de terre. Un mouvement de courte durée ne produira pas des changements de signe de charge suffisants pour causer des dommages importants dans une structure, même si l'amplitude du mouvement est élevée. D'autre part, un mouvement d'amplitude modérée mais de longue durée peut produire des changements de signe de charges suffisants pour causer des dommages importants.

La durée d'un mouvement du sol est fortement liée au temps nécessaire pour la libération de l'énergie de déformation accumulée par la rupture le long de la faille. Quand la longueur ou la surface de rupture de la faille croît, le temps requis pour la rupture augmente. En conséquence, la durée du mouvement fort croît avec l'augmentation de la magnitude du séisme [2].

Tableau 1-1. Durées typiques du séisme à des distances de moins de 10 km de l'épicentre.[2]

Magnitude	La durée (seconde)	
	Siterocheux	Sitemeuble
5	4	8
5.5	6	12
6	8	16
6.5	11	23
7	16	32
7.5	22	45
8	31	62

## 1.5 Les types d'ondes sismique

Il existe plusieurs types d'ondes sismiques et elles se déplacent toutes de différentes manières. Les deux principaux types d'ondes sont les ondes corporelles et les ondes de surface. Les ondes corporelles peuvent traverser les couches internes de la terre, mais les ondes de surface ne peuvent se propager que le long de la surface de la planète comme des ondulations sur l'eau. Les tremblements de terre émettent de l'énergie sismique sous forme d'ondes corporelles et d'ondes de surface. Les enregistrements sismiques des tremblements de terre ont conduit à la découverte du cœur de la terre et des cartes possibles des différentes couches à l'intérieur de la terre. Les ondes sismiques se plient, réfléchissent et changent de vitesse à la limite entre différents matériaux sous la surface de la terre.

### 1.5.1 Les ondes de volume

Voyageant à travers l'intérieur de la terre, les ondes corporelles ou les ondes de volume arrivent avant les ondes de surface émises par un tremblement de terre. Ces ondes sont plus fréquentes que les ondes de surface.

### 1.5.1.1 Ondes Pouondes primaires

Le premier type d'onde corporelle est l'onde P ou onde primaire(Figure 1-3). C'est le type d'onde sismique le plus rapide et, par conséquent, le premier à arriver à une station sismique. L'onde P peut se déplacer à travers la roche solide et les fluides, comme l'eau ou les couches liquides de la terre. Elle pousse et tire la roche qu'elle traverse, tout comme les ondes sonores poussent et tirent l'air.

Les ondes P sont également connues sous le nom d'ondes de compression, en raison de la poussée et de la traction qu'elles exercent. Soumises à une onde P, les particules se déplacent dans la même direction que l'onde, qui est la direction dans laquelle l'énergie voyage, et est parfois appelée la direction de propagation de l'onde[5].Figure 1-3

### 1.5.1.2 Ondes Souondes secondaires

La deuxième onde corporelle est l'onde S ou onde auxiliaire, qui est la deuxième onde que l'on rencontre lors d'un tremblement de terre. L'onde S (Figure 1-3)est plus lente que l'onde P et ne peut se déplacer que dans les roches solides, mais pas dans les milieux liquides. C'est cette caractéristique des ondes S qui a incité les sismologues à conclure que le noyau externe de la terre est liquide. Les ondes S déplacent les particules de roche vers le haut ou vers le bas, ou perpendiculairement à la direction de propagation des ondes [5].

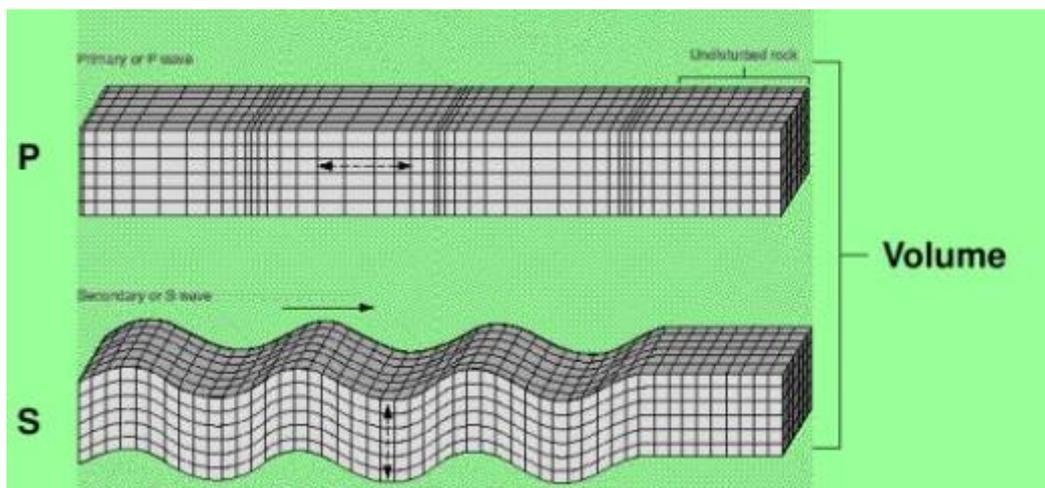


Figure 1-3. Ondes de volume [4]

## 1.5.2 Les ondes de surface

La fréquence des ondes de surface se propageant uniquement à travers la croûte terrestre et est inférieure à celle des ondes de volume. Il est donc facile de les distinguer sur les cartes sismiques. Bien qu'elles soient émises après les ondes de volume, les ondes de surface sont presque entièrement responsables des dommages et destructions liés aux tremblements de terre. Lorsque le séisme est plus profond, ces dommages ainsi que l'intensité des ondes de surface diminueront.

### 1.5.2.1 Ondes de Love

Le premier type d'onde de surface est appelé onde de Love (Figure 1-4). Monsieur Love est un mathématicien britannique qui a développé un modèle mathématique de ce type d'ondes en 1911. C'est l'onde de surface la plus rapide et peut déplacer le sol de gauche à droite. L'onde de Love est limitée à la surface de la croûte terrestre et produit un mouvement complètement horizontal [5].

### 1.5.2.2 Ondes de Rayleigh

Un autre type d'onde de surface est l'onde de Rayleigh, (Figure 1-4), du nom de John Lord Rayleigh, qui a prédit mathématiquement l'existence de ce type d'onde en 1885. La plupart des tremblements de terre sont causés par les ondes de Rayleigh, qui peuvent être beaucoup plus importantes que les autres ondes [5].

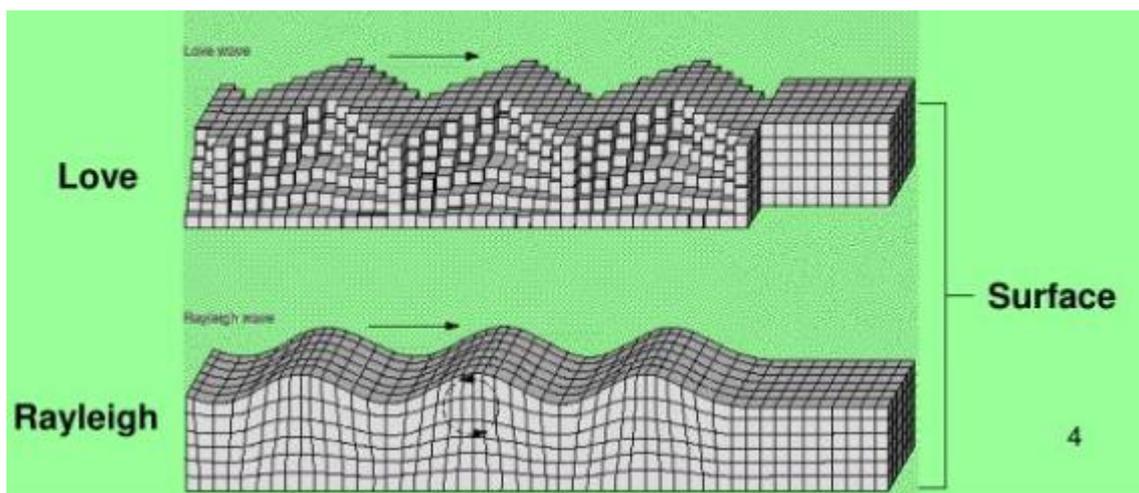


Figure 1-4. Ondes de surface [4]

## **1.6 Réglementations parasismiques**

Après tous les tremblements de terre qui se sont produits, au part avant il devrait y avoir des codes réglementaire pour aider les ingénieurs dans la conception et la construction des structure antisismiques, et puisque l'intensité du tremblement de terre varie d'un pays à un autre et d'une région à une autre, chaque pays doit fournir son propre code qui dépend principalement de la région dans laquelle il est situé ,aussi les lois et les règles qui doivent être suivies pour obtenir des constructions antisismiques.

Dans le monde il existe plusieurs codes et règlements parasismiques, dans cette étude on s'intéresse à trois codes différents : le règlement parasismique algérien (RPA), le règlement européen appelé eurocode (EC8) et le règlement américain (ASCE07-16). L'objectif principal de cette étude est de comparer l'impact de l'effet de site sur la réponse dynamique entre les différents règlements cités ci avant.

### **1.6.1 Règle parasismique algérien 99 version 2003 (RPA99 version 2003)**

#### **1.6.1.1 Historique**

La première application de la loi nationale algérienne relative à la conception parasismique des bâtiments était en 1983 après le tremblement de terre d'El Asnam de magnitude égale à 7,3 sur l'échelle de Richter. Avant cette date, le code du bâtiment français était appliqué en Algérie. Une loi a été adoptée en 1980, qui a ensuite été révisé en 1988, 1999 et 2003 après le séisme de Boumerdes 21 mai 2003 [7].

#### **1.6.1.2 Objectif du RPA99 version 2003**

Ces règles visent à assurer une protection acceptable de la vie humaine et des constructions en ce qui concerne les effets des actions sismiques par une conception et un dimensionnement parasismique pour des ouvrages courants.

Les objectifs ainsi visés consistent à doter la structure :

- D'une rigidité et d'une résistance suffisante pour limiter les dommages non structuraux et éviter les dommages structuraux par un comportement essentiellement élastique de la structure face à un séisme modéré, relativement fréquent.

- D'une ductilité et d'une capacité de dissipation d'énergie adéquate pour permettre à la structure de subir des déplacements inélastiques avec des dommages limités et sans effondrement, ni perte de stabilité, face à un séisme majeur, plus rare[7].

### **1.6.1.3 Domaine d'application**

Ces règles sont applicables à toutes les constructions courantes. Cependant, ils ne sont pas directement applicables aux constructions telles que :

- Constructions et installations pour lesquelles les conséquences d'un dommage même léger peuvent être d'une exceptionnelle gravité: centrales nucléaires, installations GNL, installations de fabrication et de stockage des produits inflammables, explosifs, toxiques, ou polluants.
- Ouvrages d'art (barrages, ouvrages maritimes, ponts, tunnels,...)
- Réseaux et ouvrages enterrés [7].

### **1.6.1.4 Condition d'application**

Les constructions auxquelles s'appliquent les présentes règles doivent satisfaire concomitamment aux règles de conception, de calcul et d'exécution applicables. Par ailleurs, au cas où les sollicitations issues d'un calcul aux effets du vent sont plus défavorables, ce sont ces dernières qu'il y a lieu de prendre en considération pour la vérification de la résistance et de la stabilité de l'ouvrage, mais, en même temps, les dispositions constructives des règles RPA doivent être respectées[7].

### **1.6.1.5 Choix du site**

Pour le choix du site, une attention particulière doit être portée aux conditions défavorables suivantes :

- Présence de failles reconnues actives
- Zones suspectes de liquéfaction
- Terrains instables et topographie superficielle accidentée :
  - Pentes instables, abords des falaises, rives et berges sujettes à affouillement.

- Terrains tassant, gorgés d'eau, mal drainés ou inondables.
  - Terrains susceptibles de s'effondrer sous l'effet des secousses.
  - Présence des cavités souterraines.
  - Présence de remblais non compactés.
  - Crêtes, pitons rocheux.
  - Bords de vallées encaissées.
  - Abords de changements de pente importants.
- Présence d'alluvions d'épaisseur variable en pied de pente ou d'épaisseur importante en milieu de vallées (susceptible d'amplification).
  - Présence de formations géologiques différentes

Le choix définitif du site sera arrêté sur la base des résultats d'investigations dont l'importance sera en rapport avec celle de l'ouvrage projeté. Le type et l'importance de ces investigations pourront être utilement orientés par les résultats d'études de micro-zonage sismique là où elles existent[7].

#### **1.6.1.6 Conditions de site nécessitant des investigations approfondies**

Les conditions de site qui nécessitent des investigations approfondies sont les suivantes :

- Présence de sols instables sous les actions sismiques tels que : sols liquéfiables, sols faiblement cimentés, anciens remblais.
- Présence de sols vaseux ou d'argile avec une très forte teneur en matière organique sur une épaisseur de plus de 3 m.
- Présence d'argile très plastique (indice de plasticité  $IP > 75$ ) sur une épaisseur de plus de 6 m.
- Présence sur une épaisseur de plus de 30 m d'une couche d'argile molle à moyennement raide :

$$q_c = 1.5 \text{ à } 5 \text{ MPA}, P_l = 0.5 \text{ à } 2 \text{ MPA}, E_p = 5 \text{ à } 25 \text{ MPA}, q_u = 0.1 \text{ à } 0.4 \text{ MPA}$$

#### **1.6.1.7 CLASSIFICATION DES OUVRAGES SELON LEUR IMPORTANCE Lors de l'implantation des ouvrages, il faudrait :**

Groupe 1A : Ouvrages d'importance vitale : Ouvrages vitaux qui doivent demeurer opérationnels après un séisme majeur pour le besoins de la survie de la région, de la sécurité publique et de la défense nationale

Groupe 1B : Ouvrages de grande importance ; Ouvrages abritant fréquemment de grands rassemblements de personnes

Groupe 2 : Ouvrages courants ou d'importance moyenne : Ouvrages non classés dans les autres groupes 1A, 1B ou 3.

Groupe 3 : Ouvrages de faible importance

### **1.6.1.8 Classification des sols**

Selon le RPA99/2003 les sites sont classés en quatre catégories en fonction des propriétés mécaniques des sols qui les constituent. Chaque catégorie de site est associée à un spectre de réponses en termes d'accélération et de modification. L'activité sismique est donc prise en compte par la forme du spectre de réponse sans tenir compte de la non-linéarité du sol ni de l'amplification topographique ou sédimentaire[7].

## **1.6.2 Eurocode 8**

### **1.6.2.1 Présentation des Eurocode8 partie 1 (2004)**

Cette Norme européenne EN 1998-1, Eurocode 8 : Calcul des structures pour leur résistance aux séismes — Règles générales, actions sismiques et règles pour les bâtiments, a été élaborée par le Comité Technique CEN/TC 250 « Eurocodes structuraux». Le CEN/TC 250 est responsable de tous les Eurocode des structuraux dont le programme comprend les normes citées ci-dessous, chacune étant en général constituée d'un certain nombre de parties :

Eurocode 0 : Bases de calcul des structures

Eurocode 1 : Actions sur les structures

Eurocode 2 : Calcul des structures en béton

Eurocode 3 : Calcul des structures en acier

Eurocode 4 : Calcul des structures mixtes acier-béton

Eurocode 5 : Calcul des structures en bois

Eurocode 6 : Calcul des structures en maçonnerie

Eurocode 7 : Calcul géotechnique

Eurocode 8 : Calcul des structures pour leur résistance aux séismes

Eurocode 9 : Calcul des structures en aluminium [9]

L'Eurocode 8 comprend différentes parties en complément de la partie 1EN 1998:

- L'EN 1998-2, qui contient des dispositions spécifiques aux ponts ;
- L'EN 1998-3, qui contient des dispositions pour l'évaluation et la mise à niveau parasismique des bâtiments ;
- L'EN 1998-4, qui contient des dispositions spécifiques aux silos, réservoirs et réseaux de tuyauteries ;
- L'EN 1998-5, qui contient des dispositions spécifiques aux fondations, ouvrages de soutènement et aux aspects géotechniques ;
- L'EN 1998-6, qui contient des dispositions spécifiques aux tours, mâts et cheminée.

### **1.6.2.2 Domaine d'application de l'EN1998**

Ces règles s'appliquent au dimensionnement et à la construction de bâtiments et d'ouvrages de génie civil en zones sismiques. Son but est d'assurer qu'en cas de séisme :

- Les vies humaines sont protégées ;
- Les dommages sont limités ;
- Les structures importantes pour la protection civile restent opérationnelles[8].

### **1.6.2.3 Actions sismiques**

Dans le cadre de l'EN 1998, les territoires nationaux doivent être divisés par les autorités nationales en zones sismiques, en fonction de l'aléa local. Par définition, à l'intérieur de chaque zone, l'aléa peut être supposé constant.

Pour la plupart des applications de l'EN 1998, l'aléa est pris en compte par un seul paramètre, l'accélération maximale de référence au niveau d'un sol de classe A

(sol rocheux), notée agR. Des paramètres additionnels requis pour des types spécifiques de structure sont données dans les parties concernées de l'EN 1998.

Le mouvement sismique peut également être représenté par une accélération du sol en fonction du temps ou par des grandeurs associées (vitesse et déplacement)[8].

#### 1.6.2.4 Conditions de sol

Il y a lieu que le site de construction et la nature du terrain de fondation soient normalement exempts de risques de rupture du terrain, d'instabilité des pentes et de tassements permanents causés par liquéfaction ou densification du sol en cas de séisme. La possibilité d'apparition de tels phénomènes doit être examinée conformément aux exigences de l'EN 1998-5:2004.

Selon le degré d'importance de la structure et les conditions particulières du projet, il convient de mener des investigations du sol et/ou des études géologiques pour déterminer les actions sismiques.[8]

#### 1.6.2.5 Définition des paramètres de classe de sol

Il convient de classer le site selon la valeur moyenne de la vitesse des ondes de cisaillement,  $V_{s30}$ . Cette dernière est calculée conformément à l'expression suivante :

$$V_{s30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{V_i}} \quad \text{Equation 1}$$

Où

$h_i$  : L'épaisseur de la couche (en mètres).

$V_{si}$  : La vitesse de l'onde de cisaillement (m/s) [8].

**Site classe A** : Rocher ou autre formation géologique de ce type comportant une couche superficielle d'au plus 5 m de matériau moins résistant. La valeur de la vitesse de l'onde de cisaillement  $V_{s30} > 800 \text{ m/s}$ .

**Site classe B** : Dépôts raides de sable, de gravier ou d'argile sur-consolidée, d'au moins plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur, caractérisés par une augmentation

progressive des propriétés mécaniques avec la profondeur. La valeur de la vitesse de l'onde de cisaillement dans ce cas varie entre 360 – 800  $m/s$ .

**Site classe C :**Dépôts profonds de sable de densité moyenne, de gravier ou d'argile moyennement raide, ayant des épaisseurs de quelques dizaines à plusieurs centaines de mètres. La valeur de la vitesse de l'onde de cisaillement dans ce cas varie entre 180 – 360  $m/s$ .

**Site classe D :**Dépôts de sol sans cohésion de densité faible à moyenne (avec ou sans couches cohérentes molles) ou comprenant une majorité de sols cohérents mous à fermes. La valeur de la vitesse de l'onde de cisaillement dans ce cas est inférieure à 180  $m/s$ .

**Site classe E :**Profil de sol comprenant une couche superficielle d'alluvions avec des valeurs de  $V_s$  de classe C ou D et une épaisseur comprise entre 5 m environ et 20 m, reposant sur un matériau plus raide avec  $V_s > 800 m/s$

**Site classe S1 :**Dépôts composés, ou contenant, une couche d'au moins 10 m d'épaisseur d'argiles molles/vases avec un indice de plasticité élevé ( $PI > 40$ ) et une teneur en eau importante.

**Site classe S2 :**Dépôts de sols liquéfiables d'argiles sensibles ou tout autre profil de sol non compris dans les classes de A à E ou S1 [8].

#### **1.6.2.6 Facteur d'amplification topographique**

Certains facteurs d'amplification de l'action sismique sont simplifiés. Ces facteurs sont assimilés au paramètre de caractérisation du profil S et doivent être appliqués de préférence lorsque les pentes font partie d'irrégularités topographiques bidimensionnelles, telles que les crêtes et les longues pentes supérieures à 30 m[8].

#### **1.6.3 L'ASCE07-16**

Le Code uniforme de la construction (UBC Uniform Building Code) a été promulgué pour la première fois par la conférence internationale des agents du bâtiment (ICBO) du 18 au 21 octobre 1927. Des éditions révisées de ce code sont publiées environ tous les 3 ans. Le code de construction uniforme (UBC) a fusionné avec le code de construction national (BOCA) et le code de construction standard pour

former les codes internationaux de construction et publie une famille de codes modèles tels que le code de construction, le code électrique, le code de plomberie et le code de zonage.

Le nouveau code national est le code international de construction (IBC), produit pour la première fois en 2000 par le conseil international du code (ICC). Il combine les trois codes modèles de construction publiés par le BOCA (Building Officials Code Administrators), l'ICBO (International Conference of Building Official) et le SBCCI (Southern Building Code Congress International). L'ICC a décidé de publier des éditions révisées tous les 3 ans. Aujourd'hui, la plupart des États suivent uniquement la CCI.

Il existe d'autres normes tels que : l'Applied Technology Council (ATC), la norme de l'American National Standards Institute (ANSI) et la norme ASCE Std 7, les codes ACI et AISC. Ces codes sont utilisés dans des applications spéciales et sont également référencés par les codes IBC. Par exemple, l'IBC se réfère à la norme ASCE 7 (Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures) pour toutes les charges de calcul, telles que les charges permanentes, les charges dues au vent, ainsi que pour les dispositions de conception sismique. De même, l'ASTM concerne les essais de matériaux, et l'ACI les structures en béton.

### **1.6.3.1 Domaine d'application**

Chaque structure et partie de celle-ci, y compris les éléments non structurels, sont conçues et construites de manière à résister aux effets des mouvements sismiques, comme le prescrivent les exigences sismiques de cette norme. Certaines structures non constructives relèvent également du champ d'application et sont conçues et construites conformément aux exigences de conception sismique pour les structures non constructives [9].

### **1.6.3.2 Le Rapport d'enquête géotechnique**

Un rapport doit être prévu pour une structure classée dans la catégorie de conception sismique C, D, E ou F conformément à la présente section. Une enquête doit être menée et un rapport doit être soumis, il comprend une évaluation des potentiels géologiques et les risques sismiques :

- Instabilité de la pente.
- Liquéfaction.
- Tassement différentiel.
- Déplacement de la surface dû à une faille ou à un étalement latéral.

Le rapport doit également contenir des recommandations pour la conception de fondations appropriées ou d'autres mesures visant à atténuer les effets des dangers mentionnés précédemment [10].

### **1.6.3.3 Classes de sites**

Le sol du site doit être classé en fonction des 30 m supérieurs de son profil. Lorsque les données spécifiques au site ne sont pas disponibles à une valeur de 100 pieds, les propriétés appropriées du sol peuvent être estimées par le professionnel qui prépare l'étude du sol en se basant sur les conditions géologiques connues. Lorsque les propriétés du sol ne sont pas connues avec suffisamment de détails pour déterminer la classe de site, la classe de site D doit être utilisée à moins que l'autorité compétente ou les données géotechniques déterminent la présence de sols de classe E ou F sur le site. Les classes de site A et B ne sont pas attribuées à un site s'il y a plus de 3 mètres de sol entre la surface de la roche et le fond de la semelle d'épandage ou du tapis de fondation.[10]

### **1.6.3.4 Définitions des classes de sites**

**Classe de site F :** Lorsque l'une des conditions suivantes est remplie, le site est classé en classe de site F

- Sols vulnérables à une défaillance ou à un effondrement potentiel sous charge sismique, tels que les sols liquéfiables, les argiles rapides et très sensibles, et les sols faiblement cimentés.

#### **Exception**

Pour les structures ayant des périodes de vibration fondamentales égale ou inférieure à 0,5 s, l'analyse de la réponse du site n'est pas nécessaire pour déterminer les accélérations spectrales pour les sols liquéfiables.

- Tourbe et/ou argiles hautement organiques [ $H > 3$  m où  $H$  épaisseur du sol] de tourbe et/ou de l'argile hautement organique.
- Argile à très haute plasticité [ $H > 7,6$  m avec  $PI > 75$ ].
- Argiles dures molles et moyennes très épaisses [ $H > 37$  m avec  $s, < 50$  kPa].

**Site d'argile tendre de classe E :** Lorsqu'un site ne remplit pas les conditions requises selon les critères de la classe de site F, et il y a une épaisseur totale d'argile molle de plus de 3 m où une couche d'argile molle est définie de  $s, < 25$  kPa, et  $PI > 20$ , il doit être classé comme site de classe E.

**Classes de site C, D et E :** L'existence de la classe de site C, Les sols D et E sont classés selon l'une des trois méthodes suivantes, les valeurs de  $U_s$ ,  $N$  et  $S$  étant calculées dans tous les cas comme indiqué :

1.  $V_s$  pour les 100 premiers pieds (30 m).
2.  $N$  pour les 30 premiers mètres (méthode  $N$ ).
3.  $N_{ch}$  pour les couches de sol sans cohésion ( $PI < 20$ ) dans les 100 premiers pieds (30 m) et  $S$ , pour les couches de sol cohésives ( $PI > 20$ ).

**Vitesse des ondes de cisaillement pour la classe de site B :** L'onde de cisaillement la vitesse de la roche, classe de site B, doit être mesurée sur place ou estimé par un ingénieur géotechnique, géologue ingénieur, ou sismologue pour les roches compétentes avec une fracturation modérée et l'altération climatique. Une roche plus tendre et plus fortement fracturée et altérée par les intempéries doivent être soit mesurés sur place pour la vitesse des ondes de cisaillement, soit classés dans la classe de site C.

**Vitesse des ondes de cisaillement pour la classe de site A :** La catégorie de roche dure, classe de site A, doit être étayée par une mesure de la vitesse des ondes de cisaillement, soit sur le site, soit sur des profils du même type de roche dans la même formation avec un degré d'altération égal ou supérieur et de fracturation. Lorsque les conditions de roche dure sont connues pour être continues jusqu'à une profondeur de 30 m, la vitesse des ondes de cisaillement en surface Il est permis d'extrapoler les mesures pour évaluer  $V_s$ . [9]

### 1.6.3.5 Définition des paramètres de classe de sol

Vitesse moyenne des ondes de cisaillement  $V_s$ , est déterminée selon la formule suivante :

$$V_s = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{V_{si}}} \quad \text{Equation 2}$$

$d_i$  : L'épaisseur de toute couche comprise entre 0 et 30 m

$V_{si}$  : Vitesse de l'onde de cisaillement (m/s)

$N$  : Résistance à la pénétration standard moyenne du champ

$N_{ch}$  : Résistance standard moyenne à la pénétration pour les couches de sol sans cohésion

$PI$  : l'indice de plasticité (Limites d'Atterberg)

$$N = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{N_i}} \quad \text{Equation 3}$$

$$N_{ch} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{N_i}} \quad \text{Equation 4}$$

$$S_u = \frac{d_c}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{S_{ui}}} \quad \text{Equation 5}$$

$S_u$  : Résistance moyenne au cisaillement non entraîné

$d_c$  : Epaisseur totale des couches de sol cohésives dans la partie supérieure 100 pieds (30 m).

$d_c$  : La résistance au cisaillement non déformé en psf (kPa), ne devant pas dépasser 240 kPa[9].

## 1.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons commencé par définir les paramètres temporels d'un signal sismique à savoir l'accélération, la vitesse, le déplacement, la durée, ainsi que le spectre de réponse. Nous avons, ensuite, présenté brièvement, les différents codes parasismiques qui font l'objet de notre étude comparative à savoir le règlement parasismique Algérien (RPA), le règlement européen Eurocode (EC8) et le règlement Américain (ASCE). Nous avons également présenté, la classification des sites à la base de  $V_{s30}$ ,  $N$  et  $S_u$  ainsi que la manière dont chaque code prend en compte l'influence des conditions locales et caractéristiques géologiques et topographiques de sol sur l'action sismique.

Dans le chapitre suivant nous allons aborder le paramètre ciblé dans notre étude comparative et qui est l'effet de site.

## **Chapitre 2**

# **GENERALITES SUR L'EFFET DE SITE**

### **2.1 Introduction**

Les enseignements tirés dans le monde entier des forts tremblements de terre ont permis de distinguer l'amplification des sites et la liquéfaction des sols comme deux des principales causes de dommages aux structures naturelles et artificielles lors d'événements sismiques. Les secousses du sol observées à la surface lors d'un tremblement de terre dépendent des caractéristiques de la source sismique et du mécanisme focal, de la propagation des ondes en profondeur depuis la faille jusqu'au sol rocheux, et des conditions locales du sol. Les deux premiers phénomènes sont couramment étudiés par les sismologues, les géologues et les géophysiciens, tandis que le troisième relève du domaine de la géotechnique sismique, étant fortement lié au comportement mécanique des sols soumis à une charge dynamique. Le terme "effet de site" fait référence à l'ensemble des modifications du mouvement du substratum rocheux, en termes d'amplitude et de fréquence.

Dans ce chapitre nous décrivons l'effet de site de nature géologique et topographique ainsi que les méthodes expérimentales et numériques d'évaluation des effets de site qui sont essentiels dans la détermination de l'aléa local. Dans les méthodes expérimentales nous décrivons la méthode des rapports spectraux,

## 2.2 Généralité sur l'effet de site

Le mouvement du sol qui peut être enregistré sur la surface libre d'un sol est le résultat final d'une série de phénomènes qui peuvent être regroupés en trois typologies fondamentales : le mécanisme source, la propagation des ondes sismiques (Figure 2-2) vers le substrat rocheux de l'interface en dessous de l'étude site et les effets sur le site. Les deux premières caractéristiques définissent le type d'entrée sismique ainsi que la troisième représente toutes les modifications pouvant survenir à la suite de l'interaction entre les ondes sismiques et les caractéristiques locales du site étudié. Les propriétés physiques et mécaniques des sols ainsi que leurs caractéristiques morphologiques et stratigraphiques affectent significativement les caractéristiques du mouvement du sol observé en surface. L'ensemble du processus de modification subi par une entrée sismique donnée en termes d'amplitude, de contenu fréquentiel et de durée, en raison des caractéristiques locales, est généralement appelé "réponse sismique locale". Il est en effet bien connu que la composition spectrale d'un événement sismique est modifiée d'abord pendant le trajet source-substrat rocheux (fonction d'atténuation), puis, lorsque l'entrée sismique interagit avec le sol mou placé entre le substratum rocheux et la surface libre.

Ce phénomène (Figure 2-1 et Figure 2-2) est crucial dans la construction de bâtiments antisismiques et chaque site doit être étudié de manière notamment dans cette perspective. Les conditions locales du site peuvent profondément influencer toutes les fonctionnalités importantes : l'amplitude dépend de la géométrie et des propriétés des matériaux du sous-sol, la topographie du site, ainsi que les caractéristiques du signal sismique. La nature des effets locaux du site peut être illustrée de plusieurs manières : par de simples analyses théoriques de la réponse du sol, par des mesures des mouvements de la surface et du sous-sol de ce site, et par des mesures de mouvement de surface dans des sites avec des conditions différentes du sous-sol.

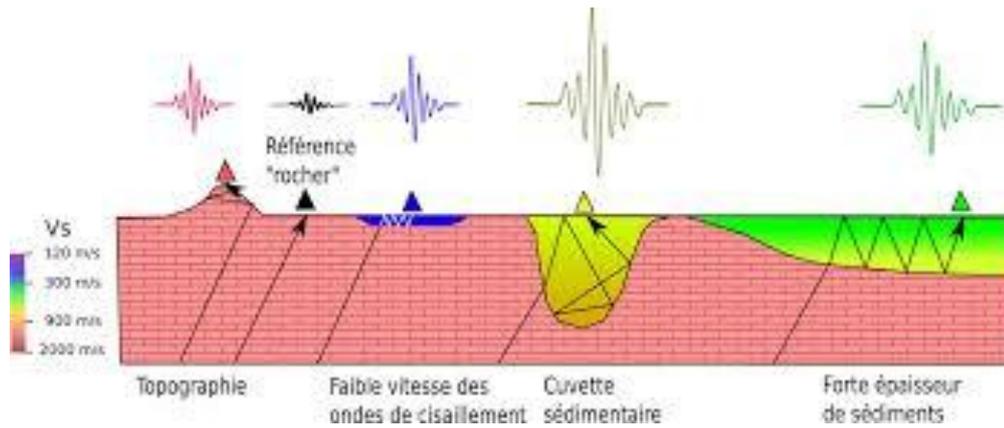


Figure 2-1. Effets de sites dus à la réflexion des ondes sur les parois d'une montagne et sur la surface de sol [13]

Le signal sismique au-dessus de chaque configuration illustre schématiquement l'amplification des ondes associée. Sur cet exemple, le mouvement au rocher (référence) n'est pas affecté par les effets de site.

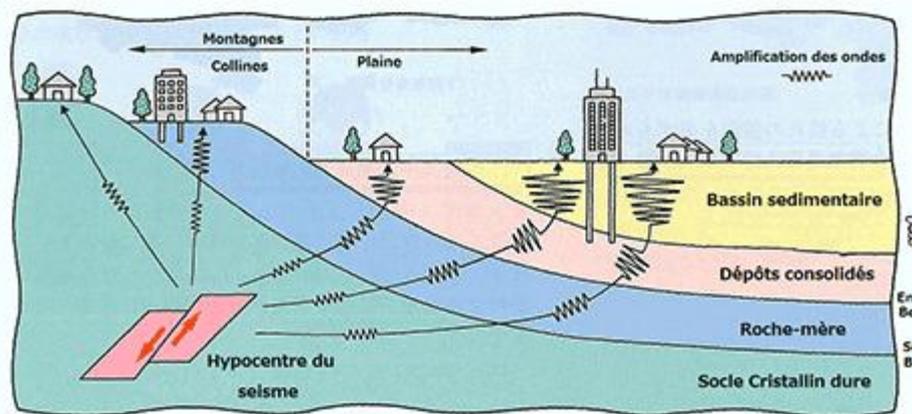


Figure 2-2. Schéma illustrant différentes configurations géologiques locales susceptibles de modifier la propagation des ondes sismiques qui les traversent.[13]

Le signal sismique au-dessus de chaque configuration illustre schématiquement l'amplification des ondes associées. Dans cet exemple, le mouvement de la roche (référence) n'est pas affecté par les effets du site. De gauche à droite : mouvement amplifié par la topographie (rouge), mouvement de référence (noir), mouvement amplifié par les couches géologiques de surface à basse vitesse (bleu), mouvement amplifié par un bassin sédimentaire (jaune) et mouvement amplifié par les couches

géologie de surface épaisse (vert). Les couleurs dans le milieu géologique indiquent des ordres de grandeur des vitesses des ondes de cisaillement ( $V_s$ ). Les ondes de cisaillement sont les vibrations sismiques les plus énergétiques et les plus dommageables dans les bâtiments. La vitesse de propagation des ondes de cisaillement dans la terre est un paramètre important pour évaluer les effets du site.

## **2.3 Les effets des conditions locales du site sur le mouvement du sol**

Les conditions locales du site peuvent influencer profondément toutes les caractéristiques importantes (amplitude, contenu en fréquence et durée) d'un fort mouvement du sol. L'étendue de leur influence dépend de la géométrie et des propriétés des matériaux du sous-sol, sur le site topographie, et sur les caractéristiques du mouvement d'entrée. La nature des effets du site local peut être illustrée de plusieurs façons : par des analyses simples et théoriques de la réponse du sol, par des mesures des mouvements réels de la surface et du sous-sol sur le même site, et par des mesures des mouvements de la surface du sol à partir de sites présentant des conditions de sous-sol différentes.[2]

## **2.4 L'évidence de l'effet de site**

D'autres preuves de l'importance des conditions locales du site peuvent être obtenues en comparant les dégâts observés sur la surface du sol à différents endroits. Par exemple, le séisme de San Francisco 1957, Mexico city 19 septembre 1958 et le séisme du Nord-Ouest de l'Inde dans l'Etat du Gujarat du 26 janvier 2001.

### **2.4.1 Le séisme de Nord-Ouest de l'Inde dans l'Etat du Gujarat 2001**

Un important séisme s'est produit au Nord-Ouest de l'Inde dans l'Etat du Gujarat, un des états les plus industriels de l'Inde (Figure 2-3) le 26 janvier 2001.

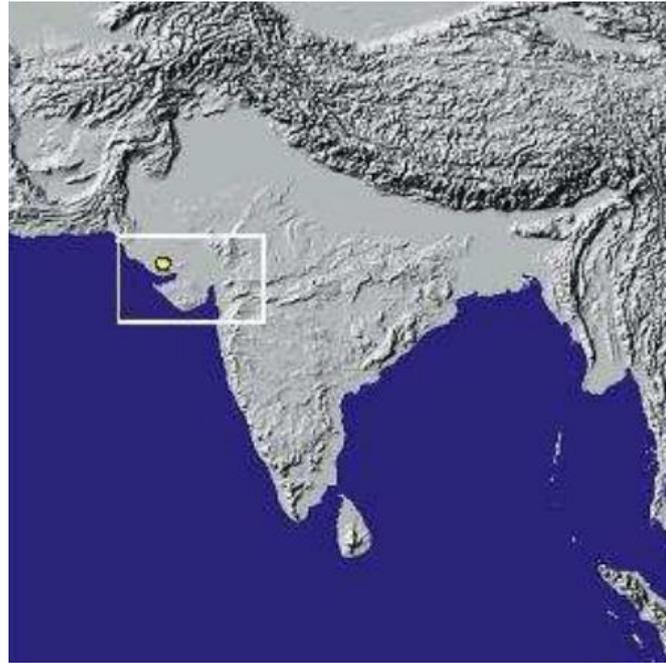


Figure 2-3. Localisation de l'état du Gujarat au Nord Ouest de la plaque indienne [6].

Ce séisme a atteint une magnitude  $M=7,5$  calculée par l'USGS, l'épicentre a été loin de Gujarat de plus de 200 kilomètres. L'Inde est le siège d'une activité sismique intense qui est due à la collision entre la plaque indienne et la plaque Eurasie. Cette sismicité se localise essentiellement en limite de plaques, au nord du pays le long de la chaîne Himalayenne[6].

Figure 2-3. Localisation de l'état du Gujarat au Nord Ouest de la plaque indienne [6]

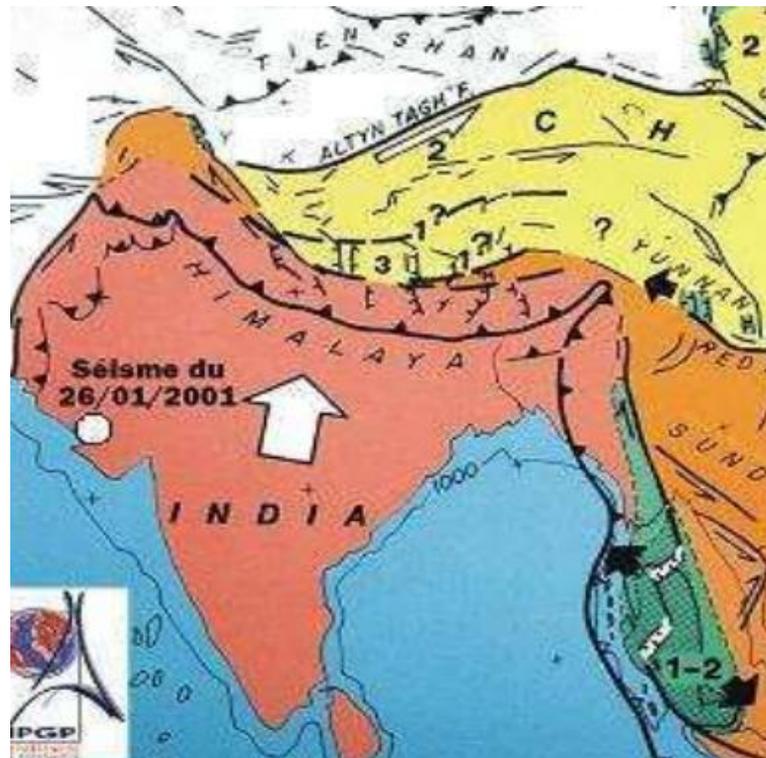


Figure 2-4. Situation de l'épicentre du séisme de Bhuj du 26/01/2001 dans le cadre géodynamique de la collision [6].

Le séisme a été ressenti dans l'ensemble de l'Etat du Gujarat mais la zone de dégâts maximum (intensité X sur l'échelle MSK) (Tableau 2-1.) correspond à la région de Kutch (ou Kachchh), limitée par les déserts du Great Runn of Kutch au Nord-Ouest, du Little Runn of Kutch à l'Est et par la mer d'Oman à l'Ouest (Figure 2-5)[6].

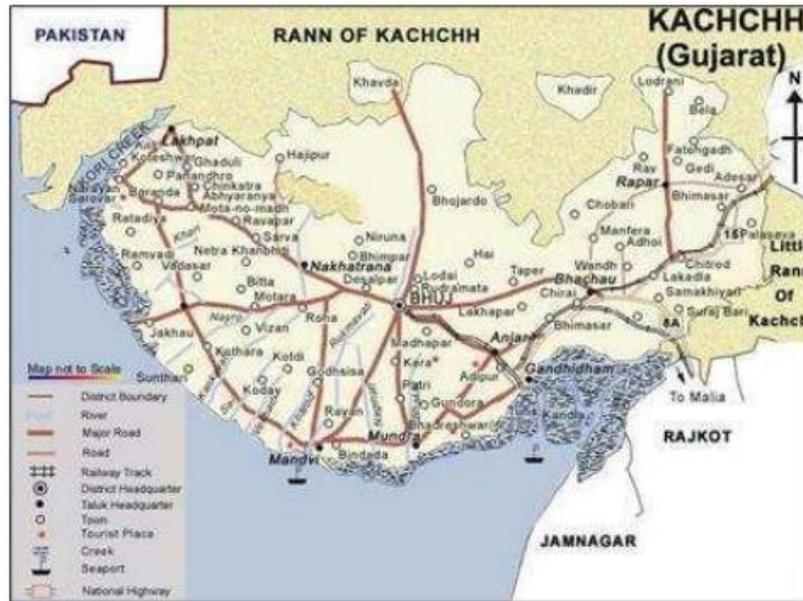


Figure 2-5. Carte de la région du Kachchh à l’Ouest de l’Etat du Gujarat [6].

#### 2.4.2 Zonage sismique indien (Global Séismique Hazard Assessment Program)

Bathia et al. (1999) ont évalué l'aléa probabiliste pour l'Inde et les régions alentours. Le PGA (peak ground accélération) a été calculé pour une probabilité de dépassement de 10% sur 50 ans. La loi d'atténuation utilisée est celle de Joyner et Boore (1981) car il n'y a pas de lois spécifiques à l'Inde. Les valeurs du PGA ont été reportées dans la Figure 2-6[6].

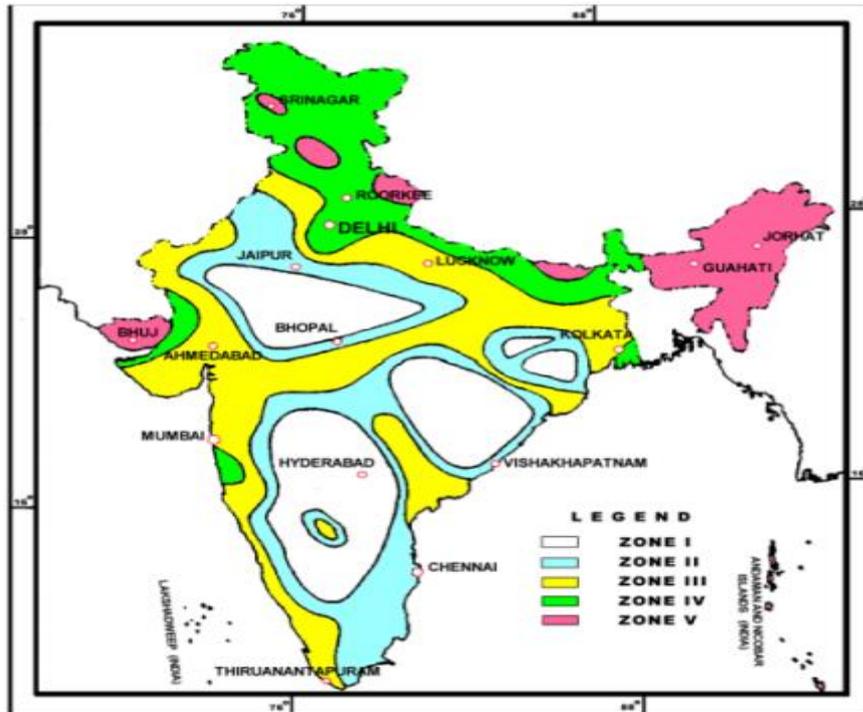


Figure 2-6. Zonage sismique de l'Inde [6].

Zone I : 0.0 g → 0.1 g

Zone II : 0.1g → 0.2 g

Zone III : 0.2g → 0.3 g

Zone IV : 0.3g → 0.4 g

Zone V : > 0.5 g

Suivant ce zonage, l'état du Gujarat serait en zone III (0.25 g).

### 2.4.3 Les effets de site

De grandes épaisseurs s'étaient éboulés en plusieurs endroits et il est, en l'absence de données géologiques et de profils pédologiques précis, difficile de déterminer avec précision l'impact du site. Le contraste mécanique entre les strates ne semble généralement pas très important et le relief se détache rarement.

Deux cas nous ont paru intéressants vis-à-vis des effets de site :

1. Le fort de Bhuj : Le fort de Bhuj occupe des crêtes assez marquées, dominant la ville de 50 à 80 mètres. Il est constitué de fortins ou de tours reliés par des chemins de ronde qui suivent la crête les murs, en maçonnerie et de probable

que ces dommages, infligés à une structure massive et rigide, soient dus à une amplification de la vibration en crête.

2. La ville d'Anjar : La ville d'Anjar d'environ 60000 habitants (Figure 2-7, Figure 2-8), située à environ 50 km à l'est-sud-est de Bhuj, offre un contraste saisissant entre :
  - Le centre et le sud de la ville, très durement touchés par des séismes d'intensité de VIII à IX à l'échelle de MSK.
  - Le quartier nord-est, où les dommages sont à peine perceptibles (V à VI sur l'échelle de MSK).



Figure 2-7. Effet de site à Anjar le quartier Nord [6].



Figure 2-8. Effet de site à Anjar ; le quartier Centre [6].

Les renseignements obtenus auprès de la population confirment cette observation ; le séisme de 1956, moins violent mais dont l'épicentre était très proche de la ville, aurait engendré le même phénomène, conduisant une part des habitants à se réinstaller au nord-est. Cette différence d'intensité entre ces deux quartiers à peine éloignés de 500 m, observée lors de deux séismes différents, semble caractéristique d'un effet de site. L'examen des conditions de sol montre au premier abord que le quartier nord-ouest serait fondé sur des basaltes (qui affleurent au voisinage de la route à l'entrée nord d'Anjar), tandis que le reste de la ville serait construit sur des colluvions meubles ou des grès altérés[6].

#### **2.4.4 Échelle Medvedev-Sponheuer-Karnik**

L'échelle MSK est une échelle de mesure de l'intensité de séisme d'une manière quantitatif (Tableau 2-1.), la plus ancienne mesure de la taille et l'intensité des séismes. L'intensité est une description qualitative des effets du séisme à un endroit particulier, comme en témoignent les dommages observés et les réactions humaines, parce que des descriptions qualitatives des effets des séismes sont disponibles tout au long de l'histoire, le concept d'intensité peut être appliqué aux comptes historiques pour estimer l'emplacement et la taille des séismes survenus avant la mise au point des instruments sismiques modernes.

Cette application a été très utile pour caractériser les taux de récurrence des séismes de différentes tailles à différents endroits, une étape critique dans l'évaluation de la probabilité de risques sismiques. Les intensités peuvent également être utilisées pour estimer les niveaux de mouvement du sol.

Tableau 2-1. L'échelle MSK (Medvedev-Sponheuer-Karnik) [2]

Degré	Dégâts observés
I	Seuls les sismographes très sensibles enregistrent les vibrations.
II	Secousses à peine perceptibles; quelques personnes au repos ressentent le séisme.
III	Vibrations comparables à celles provoquées par le passage d'un petit camion.
IV	Vibrations comparables à celles provoquées par le passage d'un gros camion.
V	Séisme senti en plein air; les dormeurs se réveillent.
VI	Les meubles sont déplacés.
VII	Quelques lézardes apparaissent dans les édifices.
VIII	Les cheminées des maisons tombent.
IX	Les maisons s'écroulent. Les canalisations souterraines sont cassées.
X	Destruction des ponts et des digues. Les rails de chemin de fer sont tordus.
XI	Les constructions les plus solides sont détruites. Grands éboulements.
XII	Les villes sont rasées. Bouversements importants de la topographie. Fissures visibles à la surface.

## 2.5 L'effet de site lié à la topographie

Certaines observations à travers le monde ont montré que le mouvement sismique du sol a été perturbé par la présence d'une topographie prononcée. C'est l'hypothèse qui a été avancée pour expliquer les dégâts importants survenus au cours du tremblement de terre à Lambesc (1906) dans le village de Rognes sur un relief saisissant. Quelques exemples ailleurs montrent une plus grande destruction dû aux reliefs: par exemple lors du tremblement de terre de San Fernando (1971), lors du tremblement de terre Whittier Narrows (Californie, 1987) ou lors du tremblement de terre de Northridge (Californie, 1994). Pour ce dernier cas, Spudich, sismologue à US Geological a observé une forte augmentation du mouvement sismique généré par une série de répliques entre le haut et le bas d'une montagne à Los Angeles.

Ces effets également révélés par des simulations numériques qui ont montré que l'effet de la topographie se caractérise principalement par une amplification significative du mouvement du sol (30 100%). La présence et l'emplacement de cette amplification sont étroitement liés à la caractéristique de l'onde sismique incidente (longueur d'onde) et de la géométrie pente [10].

## **2.6 L'effet de sítelié à la géologie.**

Les effets de site de nature géologique ont bénéficié d'un grand nombre d'observations systématiques. La plupart des villes exposées aux tremblements de terre dans le monde ont montré des dommages variables en fonction de la nature du sol, d'autant plus qu'ils reposent presque systématiquement sur des obturations alluviales. Coburn et Spence soutiennent qu'entre les sols escarpés ou rocheux et sédiments mous, les intensités macroséismiques peuvent varier selon un niveau de dommage. Pour les constructions plus faibles (par exemple en maçonnerie), il peut correspondre à une augmentation des dégâts d'environ 30%, ce qui est traduit en termes de pertes de vie par une augmentation considérable de victimes. En France, certaines villes ont des effets de site majeurs. Ce sont par exemple les cas de Grenoble, Annecy, Nice ou Lourdes qui pour certains les années font l'objet d'un suivi initié par le réseau accélérométrique permanent. En général, trois observations caractérisent la présence des effets de site: L'amplification du mouvement sismique dans les couches molles généralement situés en surface, la résonance de fréquence au sein de ces couches, et l'allongement du mouvement sismique[10].

## **2.7 Méthodes usuelles de détermination des effets de site.**

### **2.7.1 Modélisations numériques.**

La modification du signal vibratoire par les dernières quelques dizaines à quelques centaines de mètres de la croûte terrestre a été l'objet de nombreuses études par des sismologues et des géotechniciens. Différents modes de calcul de propagation des ondes ont ainsi été proposés, en une, deux, voire trois dimensions, en faisant l'hypothèse ou non de la linéarité du comportement des sols. La plupart des types de phénomènes peuvent aujourd'hui être modélisés de façon plus ou moins satisfaisante. Cependant, la validité des résultats numériques dépend complètement de la qualité et de la quantité des paramètres géophysiques utilisés ; ce qui implique une bonne connaissance de la géométrie des interfaces souterraines et des caractéristiques mécaniques de chaque formation. La marge d'incertitude liée à ces données, ainsi que les coûts relatifs à leur obtention rendent le plus souvent indispensable la mesure

directe de l'effet de site sur le terrain. De plus, les résultats d'une expérimentation sont, de façon générale, mieux accueillis dans la pratique que ceux provenant des calculs.

### **2.7.2 Méthode classique par enregistrement de la sismicité.**

L'autre approche pour déterminer les effets de site utilise donc la voie expérimentale. La méthode classique consiste à enregistrer des séismes sur différents sites représentatifs et à comparer les résultats avec une station de référence. Cette dernière station sera choisie, idéalement, sur le substratum horizontal. Les données sismiques exploitées proviennent de l'enregistrement des vibrations du sol, au moyen de capteurs de vitesse de vibration pour les mouvements relativement faibles et de capteurs d'accélération pour les mouvements les plus forts. Chaque événement sismique enregistré sur un site résulte de différents facteurs. Le signal enregistré est traité numériquement par des transformées de Fourier pour obtenir son spectre en fréquence.

## **2.8 Conclusion.**

Ce chapitre est destiné à des généralités sur l'effet de site, nous avons décrit différentes méthodes expérimentales et numériques d'évaluation des effets de site, nous avons également montré l'évidence de l'effet de site à travers l'exemple du séisme de DE BHUJ (GUJARAT, INDE) du 26 janvier 2001.

Dans le chapitre suivant nous allons présenter les spectres de réponses de chaque code parasismique et puis faire la comparaison entre les différents spectres.

## Chapitre 3

# LES SPECTRES DE REPONSES REGLEMENTAIRES

### 3.1 Introduction

La nécessité d'une recherche sur la relation entre l'action d'un séisme et la structure d'un bâtiment, ou en d'autres termes la réponse du bâtiment face à un tremblement de terre donné est justifiée par les dommages constatés lors des grands séismes historiques. L'analyse de la variabilité géographique des intensités et l'observation des dommages provoqués lors de ces grands séismes historiques ont constitué la base de la prise de conscience de l'influence des sols et ont amené à leurs attributions des effets sur la distribution des dommages. Différents types de sol soumis à la même sollicitation sismique ont des réponses différentes, ce qui explique la variabilité des dommages des constructions et des intensités. Les effets de site ont des conséquences sur l'aggravation du risque sismique, comme c'était le cas lors du séisme de Gujarat janvier 2001 [6]. Dans un but de prévention, il est nécessaire de quantifier ces effets de sites, pour mieux prévenir les risques sismiques. Dans ce cadre, les réglementations parasismiques consistent à prendre en compte l'effet de site géologique en multipliant l'accélération spectrale attendue du sol par un coefficient dépendant de la nature des sols. Ainsi le palier des accélérations constantes change en fonction du changement du site.

Dans le présent chapitre nous présentons les spectres de réponses représentant l'action sismique pour un site donné, suivant les trois codes, le RPA 99 VERSION 2003, l'Eurocode 8 et l'IBC (ASCE07-16). On note que dans cette étude on s'intéresse au cas des bâtiments.

## 3.2 Les spectres de réponse

Les spectres de réponse tirent leur origine et leur intérêt de l'assimilation, en première approximation, du comportement sismique d'un bâtiment à la réponse d'un oscillateur simple à un degré de liberté. La représentation en spectre de réponse vise à donner accès directement aux mouvements maximums subis par le centre de gravité de la structure. La représentation graphique d'un spectre de réponse est construite point par point en faisant varier la fréquence d'un oscillateur à un degré de liberté et en reportant cette fréquence en abscisse et le maximum temporel de la réponse à une sollicitation sismique en ordonnée. On obtient ainsi un spectre de réponse pour un amortissement fixé. Les spectres de réponse élastiques sont très utilisés en ingénierie parasismique car, en première approximation, les structures simples peuvent être assimilées à un oscillateur à un degré de liberté dont la fréquence propre et l'amortissement sont à peu près connus. Les mouvements au centre de gravité peuvent alors être raisonnablement estimés dès lors que l'on suppose que la structure se comporte de manière élastique linéaire. Même pour les structures qui ne peuvent pas être modélisées par un système à un seul degré de liberté, la réponse maximale de la structure peut être estimée en superposant les réponses maximales modales.

### 3.2.1 Spectre de réponse de RPA 99 VERSION 2003

Le règlement parasismique algérien adopte un seul spectre de réponse élastique horizontale, pour le calcul de l'action sismique. Ce spectre est formulé comme suite :

$$\frac{S_a}{g} = \begin{cases} 1.25A \left(1 + \frac{T}{T_1} \left(2.5 \eta \frac{Q}{R} - 1\right)\right) & 0 \leq T \leq T_1 \\ 2.5 \eta (1.25A) \left(\frac{Q}{R}\right) & T_1 \leq 0 \leq T_2 \\ 2.5 \eta (1.25A) \left(\frac{Q}{R}\right) \left(\frac{T_2}{T}\right)^{\frac{2}{3}} & T_2 \leq 0 \leq 3.0s \\ 2.5 \eta (1.25A) \left(\frac{Q}{R}\right) \left(\frac{T_2}{3}\right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{3}{T}\right)^{\frac{5}{3}} & T \geq 3.0s \end{cases} \quad \text{Equation 6}$$

Avec :

$A$  : coefficient d'accélération de zone. (Tableau 3-1.)

$R$  : coefficient de comportement de la structure. (Tableau 3-7)

$Q$  : facteur de qualité. (Tableau 3-6)

$\eta$  : Facteur de correction d'amortissement.

$\xi$  : pourcentage d'amortissement critique (Tableau 3-8).

$T_1, T_2$  : Caractéristiques associées à la catégorie de site (Tableau 3-5).

Ces coefficients sont présentés par la suite.

### 3.2.1.1 Coefficient d'accélération de zone

Le règlement parasismique algérien (RPA) divise le territoire national en cinq zones de sismicité croissante comme le montre la Figure 3-1, ainsi que le Tableau 3-1..



Figure 3-1. Carte de zonage selon le RPA [7]

Tableau 3-1. La classification des zones sismiques selon RPA [7]

Zone				
0	I	II a	II b	III
Sismicité négligeable	Sismicité faible	Sismicité moyenne	Sismicité moyenne	Sismicité élevée

Le RPA fait également une classification des ouvrages selon leur importance, compte tenu de la nature et de destination de l'ouvrage vis-à-vis des objectifs visés. La réglementation définit alors quatre groupes comme le montre le Tableau 3-2..

Tableau 3-2. Classification des groupes d'usage sismiques selon le RPA [7]

Groupe			
1A	1B	2	3

Le coefficient d'accélération de zone est alors donné par le Tableau 3-3. Il dépend de la zone sismique ainsi que du groupe d'usage du bâtiment.

Tableau 3-3. Coefficient d'accélération selon le RPA [7]

Groupe	Zone			
	I	II a	II b	III
1A	0.15	0.25	0.30	0.40
1B	0.12	0.20	0.25	0.30
2	0.10	0.15	0.20	0.25
3	0.07	0.1	0.14	0.18

### 2.2.1.2 Classification des sites

Les sites sont classés en quatre catégories en fonction des propriétés mécaniques des sols qui les constituent.

Le Tableau 3-4 donne la classification des sites en fonction des valeurs des vitesses d'ondes de cisaillement.

Tableau 3-4. Classification des sites selon RPA [7].

Catégorie	Site	$V_s$ (m/s)(g)
S1	Site Rocheux	$V_s \geq 800$
S2	Site ferme	$400 \leq V_s \leq 800$
S3	Site meuble	$200 \leq V_s \leq 400$
S4	Site très meuble	$100 \leq V_s \leq 200$

Dans le RPA le site est défini également par les périodes caractéristiques  $T_1$  et  $T_2$  associées à la catégorie de site. Leurs valeurs pour les différents sites sont données dans le Tableau 3-5.

Tableau 3-5. Valeurs de  $T_1$  et  $T_2$  pour les différents sites [7].

Site	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>
$T_1$ (sec)	0.15	0.15	0.15	0.15
$T_2$ (sec)	0.3	0.40	0.50	0.70

### 3.2.1.2 Facteur de qualité Q

Le facteur de qualité de la structure est fonction de :

- La redondance et de la géométrie des éléments qui la constituent
  - La régularité en plan et en élévation
  - La qualité du contrôle de la construction

La valeur de Q est déterminée par la formule :

$$Q = 1 + \sum_1^6 Pq \quad \text{Equation 7}$$

$Pq$  : est la pénalité à retenir selon que le critère de qualité  $q$  est satisfait ou non. Sa valeur est donnée au Tableau 3-6.

Tableau 3-6. Valeurs des pénalités  $Pq$ [7].

Critère q	$Pq$	
	Observe	N / observe
Conditions minimales sur les files de contreventement	0	0.5
Redondance en plan	0	0.5
Régularité en plan	0	0.5
Régularité en élévation	0	0.5
Contrôle de la qualité des matériaux	0	0.5
Contrôle de la qualité de l'exécution	0	0.1

### 3.2.1.3 Coefficient de comportement $R$ selon le RPA

Le RPA détermine le coefficient de comportement par une valeur unique en fonction du système de contreventement. Les valeurs de ce coefficient sont données par le Tableau 3-7.

Tableau 3-7. Valeurs du coefficient de comportement R[7].

Catégorie	Description du système de contreventement	Valeur de <b>R</b>
<b>A</b>	<b>Béton armé</b>	
1a	Portique auto stables sans remplissages en maçonnerie rigide.	5
1b	Portique auto stables avec remplissages en maçonnerie rigide.	3.5
2	Voiles porteurs	3.5
3	Noyau	3.5
4a	Mixte portiques/ voiles avec interaction.	5
4b	Portiques contreventés par des voiles	4
5	Console verticale a masses reparties	2
6	Pendule inverse	2

### 3.2.1.4 Facteur de correction d'amortissement

Le facteur de correction d'amortissement est donné par la formule ci-dessous :

$$\eta = \sqrt{\frac{7}{(2 + \xi)}} \geq 0.7 \quad \text{Equation 8}$$

Où  $\xi$ (%) est le pourcentage d'amortissement critique qui dépend du matériau constitutif, du type de structure et de l'importance des remplissages.

Quand  $\xi = 5 \%$ , on a  $\eta = 1$ . Les différentes valeurs de  $\xi$  sont données par le Tableau 3-8.

Tableau 3-8. Valeurs de  $\xi$  (%) [7].

Remplissage	Portiques		Voiles ou murs
	Béton arme	Acier	Béton arme/maçonnerie.
<b>Leger</b>	6	4	10
<b>Dense</b>	7	5	

La Figure 3-2 donne les spectres de réponse élastique ( $R = 1$ ) du RPA pour les différentes catégories de site et pour  $Q = 1, A = 0,1$  et  $\xi = 5\%$ .

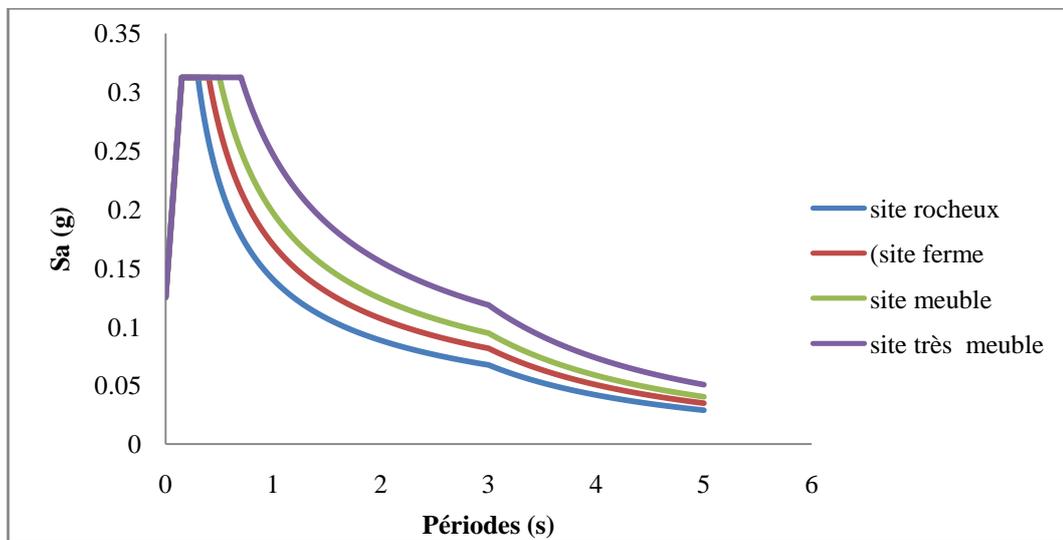


Figure 3-2. Spectres de réponse élastique pour les sols des classes S1 à S4 selon le RPA[7].

### 3.2.2 Spectre de réponse en Eurocode 8

#### 3.2.2.1 Classification des sites

La première version de l'Eurocode 8 (CEN, 1994) proposait l'utilisation de spectres de réponse élastique dépendant du site pour trois classes de sol A, B et C, qui correspondent approximativement aux sols durs, intermédiaires et mous.

Dans la version actuelle de l'EC8, le paramètre  $V_{s30}$  (la vitesse moyenne estimée pour les 30 premiers mètres de sol) est utilisé comme paramètre principal de classification, conformément à la pratique américaine, ainsi que, le NSPT (nombre de coups par essai de pénétration normalisé (SPT)), l'indice de plasticité PI et la résistance au cisaillement du sol non drainé  $C_u$ .

Pour la définition du type de sol, il est possible d'intégrer des données in situ provenant des mêmes zones ou de zones proches présentant des caractéristiques géologique similaires.

La valeur de  $V_S$  pour un profil peut être estimée par des corrélations empiriques avec la résistance de pénétration in-situ SPT (Standard pénétration test) et d'autres essais géotechniques et les propriétés du sol. Pour les structures importantes dans les

régions à forte «Un examen plus détaillé des effets du site pour tenir compte de la géologie profonde peut être précisé dans les annexes nationales. Malheureusement, ce raffinement a rarement lieu(Trifunac, 2012) [8].

Bien que le code européen (EC8) utilise le terme types de sol, on peut voir à partir de ce qui précède, qu'en fait, ils ne représentent que cinq plages de rigidité du sol près de la surface (Tableau 3-9), sans aucune référence à l'épaisseur des couches de sol ou des dépôts géologiques en contrebas (Trifunac, 2012)[8].

Tableau 3-9. Classification des sites selon l'EC8 [8].

EC8				
Catégorie	Site	$V_s$ (m/s)(g)	$N_{SPT}$	$C_U$ (kpa)
A	Site rocheux	$V_s \geq 800$	-	-
B	Site ferme	$360 \leq V_s \leq 800$	>50	>250
C	Site profond de sable moyennement dense et gravier ou d'argile moyennement raide	$180 \leq V_s \leq 360$	15 – 50	70 – 250
D	Site de sol sans cohésion de densité faible à moyenne	$V_s \leq 180$	< 15	< 70
E	Site de sol avec une couche superficielle d'alluvions repose sur un matériau plus raide	/	-	-
S1	Site composé ou contenant une couche argileuse de plus de 10 m d'épaisseur	$V_s < 100$ (valeur indicative)	-	10 – 20
S2	Site de sol liquéfiable d'argiles sensibles ou autre sol non compris précédemment	/	-	-

### 3.2.2.2 Coefficient d'accélération de zone

Le paramètre retenu pour décrire l'aléa sismique au niveau national est une accélération  $a_{gR}$ , accélération du sol «au rocher », le sol rocheux est pris comme référence,(classe A (voir ci-dessous les classes de sol)),  $a_{gR}$  résultant de la situation du

bâtiment par rapport à la zone sismique. Les valeurs des accélérations  $a_{gR}$  exprimées en mètres par seconde au carré, sont données par le Tableau 3-10,. Ces valeurs sont spécifiques pour les différentes zones de la France (Figure 3-3) mais pour chaque pays européen il existe une carte de zonage spécifique.

Dans ce cas le zonage réglementaire définit cinq zones de sismicité croissante basées sur un découpage communal. La zone 5, regroupant les îles antillaises, correspond au niveau d'aléa le plus élevé du territoire national. La métropole et les autres présentent quatre zones sismiques, de la zone 1 de très faible sismicité (bassin aquitain, bassin parisien...) à la zone 4 de sismicité moyenne (fossé rhénan, massifs alpin et pyrénéen).

Tableau 3-10. Coefficient d'accélération au niveau de rocher  $a_{gR}(m/s^2)$  [8].

<b>Zone de sismicité</b>	<b>Niveau de l'aléa</b>	<b><math>a_{gR}(m/s^2)</math></b>
Zone 1	Très faible	0.4
Zone 2	Faible	0.7
Zone 3	Modéré	1.1
Zone 4	Moyen	1.6
Zone 5	Fort	3

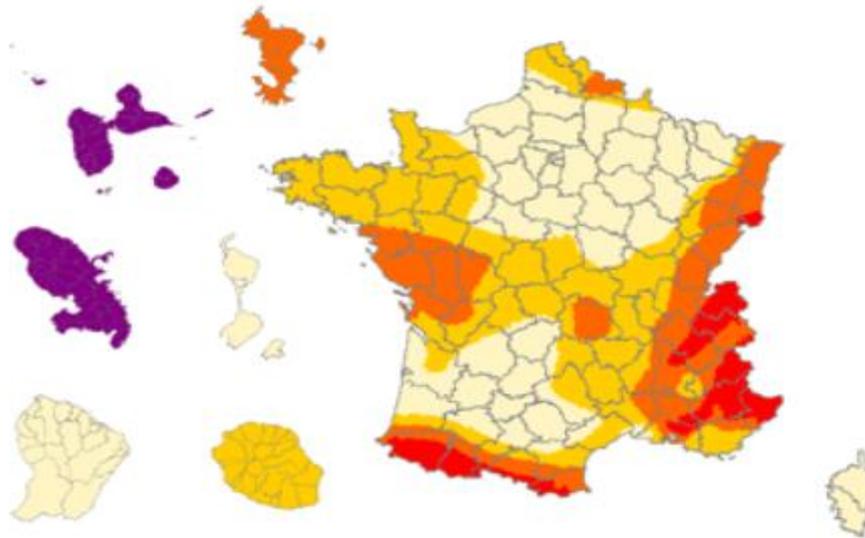


Figure 3-3. Carte de zonage selon l'EUROCODE 08 (la France).

L'accélération de calcul au niveau d'un sol de type rocheux (classe A au sens de la norme NF EN 1998-1),  $a_g$ , est égale à  $a_{gR}$  multipliée par le coefficient d'importance  $\gamma_1$ .

$$a_g = \gamma_1 \times a_{gR} \quad \text{Equation 9}$$

Tableau 3-11. Coefficient d'importance  $\gamma_1$  [8].

		Coefficient d'importance $\gamma_1$
Classe de bâtiment	I	0.8
	II	1
	III	1.2
	IV	1.4

La nature du sol est prise en compte par l'intermédiaire du paramètre de sol S.

Tableau 3-12. Les valeurs du paramètre de sol S.

). Les valeurs du paramètre de sol S, résultant de la classe de sol (au sens de la norme NF EN 1998-1) sous le bâtiment.

Tableau 3-12. Les valeurs du paramètre de sol S.

Classe de sol	S (pour la zone de sismicité 1 à 4)	S (pour la zone de sismicité 5)
A	1	1
B	1.35	1.2
C	1.5	1.15
D	1.6	1.35
E	1.8	1.4

Il faut noter que pour les structures importantes ( $\gamma_1 > 1,0$ ), il faut tenir compte des effets d'amplification topographique. Une majoration de l'action sismique est introduite par l'application d'un coefficient d'amplification topographique, (Tableau 3-15) dans les vérifications de la stabilité du sol pour les structures de catégorie III ou IV définies ci-dessous.

**Catégorie d'importance III** : Structures dont la défaillance présente un risque élevé pour les personnes et celles présentant le même risque en raison de leur importance socio-économique :

- Les bâtiments d'habitations collectives ou de bureaux dont la hauteur dépasse 28m ;
- Les ERP des 1<sup>ère</sup>, 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> catégories ;
- Les bâtiments pouvant accueillir simultanément plus de 300 personnes (notamment commerces, bureaux, bâtiments industriels),
- Les établissements scolaires,
- Les bâtiments des centres de production collective d'énergie

**Catégorie d'importance IV** : Structures dont le fonctionnement est primordial pour la sécurité civile, pour la défense ou pour le maintien de l'ordre public :

- Les bâtiments abritant les moyens opérationnels de secours ou de la défense (hommes et/ou matériel) ;

- Les bâtiments assurant le maintien des communications (tours hertziennes, centres vitaux des réseaux de télécommunication, etc.) ;
- Les bâtiments assurant le contrôle de la circulation aérienne ;
- Les établissements de santé ;
- Les bâtiments de distribution ou de stockage de l'eau potable ;
- Les bâtiments des centres de distribution publique de l'énergie ;
- Les bâtiments des centres météorologiques.

En fonction du type de sol, précédemment défini, l'Eurocode 8.1 donne les valeurs de  $S$ ,  $T_B$ ,  $T_C$  et  $T_D$ .

La nature du sol est exprimée par l'intermédiaire du paramètre de sol  $S$ . Les différentes valeurs de ce paramètre de sol, résultant de la classe de sol (au sens de la norme NF EN 1998-1 septembre 2005) sous le bâtiment, sont données par le Tableau 3-13.

### 3.2.2.3 Spectre de réponse élastique horizontal $S_e(t)$

Le spectre de réponse élastique  $S_e(T)$  pour les composantes horizontales de l'action sismique est défini par les expressions suivantes :

$$S_e(T) = \begin{cases} a_g \cdot S \cdot \left(1 + \frac{T}{T_B} \cdot (\eta \cdot 2.5 - 1)\right) & 0 \leq T \leq T_B \\ a_g \cdot S \cdot 2.5 \eta & T_B \leq 0 \leq T_C \\ a_g \cdot S \cdot 2.5 \eta \cdot \left(\frac{T_C}{T}\right) & T_C \leq 0 \leq T_D \\ a_g \cdot S \cdot 2.5 \eta \cdot \left(\frac{T_d \cdot T_C}{T^2}\right) & T_D \leq T \leq 4s \end{cases} \quad \text{Equation 10}$$

Avec :

$a_g$  : Accélération de calcul pour un sol de classe A.

$\eta$  : Coefficient de correction de l'amortissement avec la valeur de référence.

$T_B$  : Limite inférieure des périodes correspondant au palier d'accélération spectrale constante.

$T_C$ : Limite supérieure des périodes correspondant au palier d'accélération spectrale constante.

$T_D$ : Valeur définissant le début de la branche à déplacement spectral constant.

$S$  : Paramètre du sol.

Les valeurs de périodes  $T_B$ ,  $T_C$  et  $T_D$  et du paramètre du sol  $S$  qui décrivent la forme du spectre de réponse élastique, dépendent de la classe du sol.

La Figure 3-4 **Error! Reference source not found.** donne la forme standard du spectre de réponse selon l'Eurocode 8.

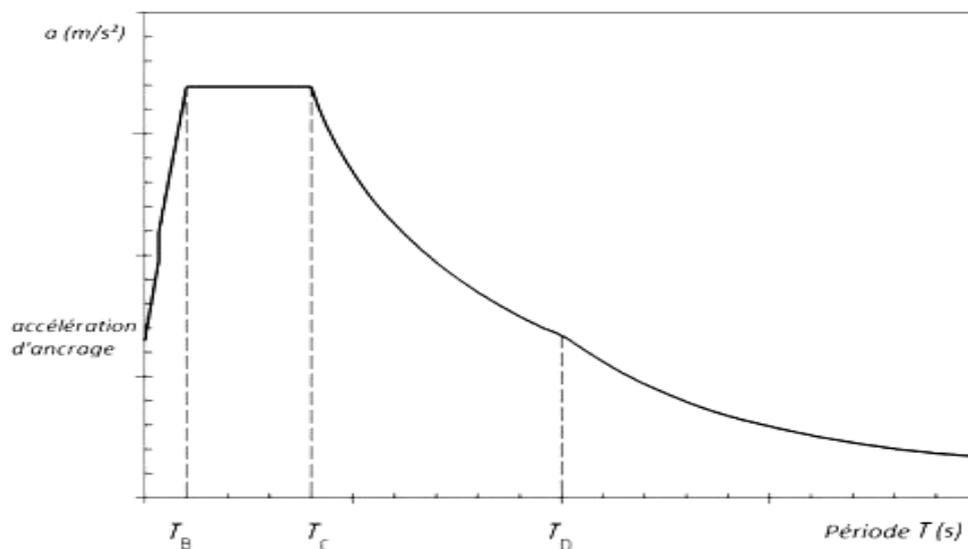


Figure 3-4. Forme standard du spectre de réponse Eurocode 8 [8].

Si la géologie profonde n'est pas prise en compte, il est recommandé d'utiliser deux types de spectre : les types 1 et 2. Le type 1 correspond à de fortes magnitudes, et le type 2 correspond à une magnitude déduite des ondes de surface et est inférieure ou égale à 5.5.

Pour les cinq classes de sol A, B, C, D et E, les valeurs recommandées des paramètres  $S$ ,  $T_B$ ,  $T_C$  et  $T_D$  sont données dans le Tableau 3-13 pour le spectre de type 1 et le spectre de type 2.

Tableau 3-13.Coefficient de sol

Classe de sol	Type 2				Type 1			
	Pour les zones de sismicité 1 à 4				Pour la zone de sismicité 5			
	S	T <sub>B</sub> (s)	T <sub>C</sub> (s)	T <sub>D</sub> (s)	S	T <sub>B</sub> (s)	T <sub>C</sub> (s)	T <sub>D</sub> (s)
A	1.0	0.05	0.25	1.2	1.0	0.15	0.4	2
B	1.35	0.05	0.25	1.2	1.2	0.15	0.5	2
C	1.5	0.10	0.25	1.2	1.15	0.20	0.6	2
D	1.8	0.10	0.30	1.2	1.35	0.20	0.8	2
E	1.6	0.05	0.25	1.2	1.4	0.15	0.5	2

La Figure 3-5 et la Figure 3-6, ci-dessous, montrent respectivement les formes des spectres recommandés de type 1 et de type 2, pour 5 % d'amortissement et normalisé par  $a_g$ .

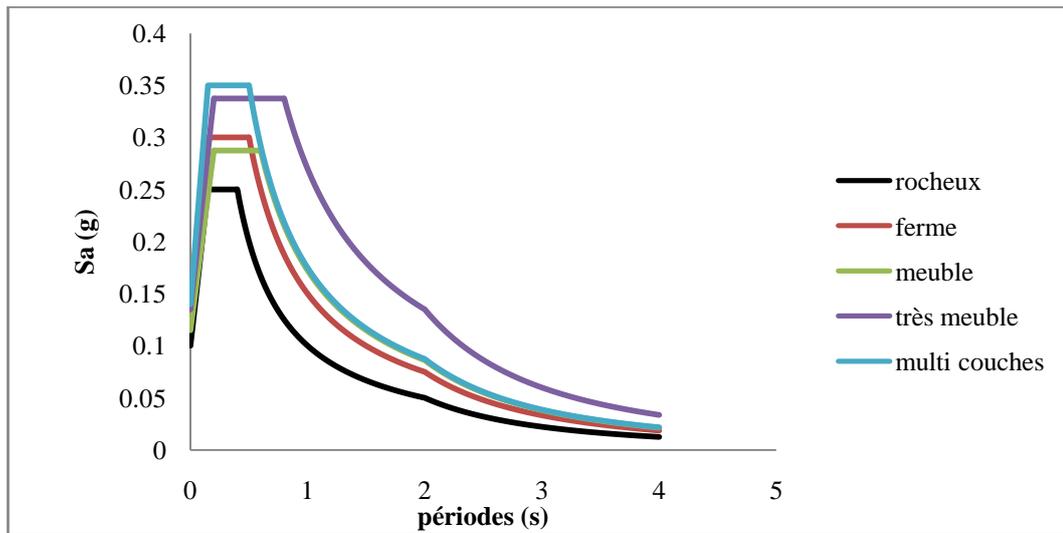


Figure 3-5. Spectres de réponses élastiques réglementaires TYPE01 [9].

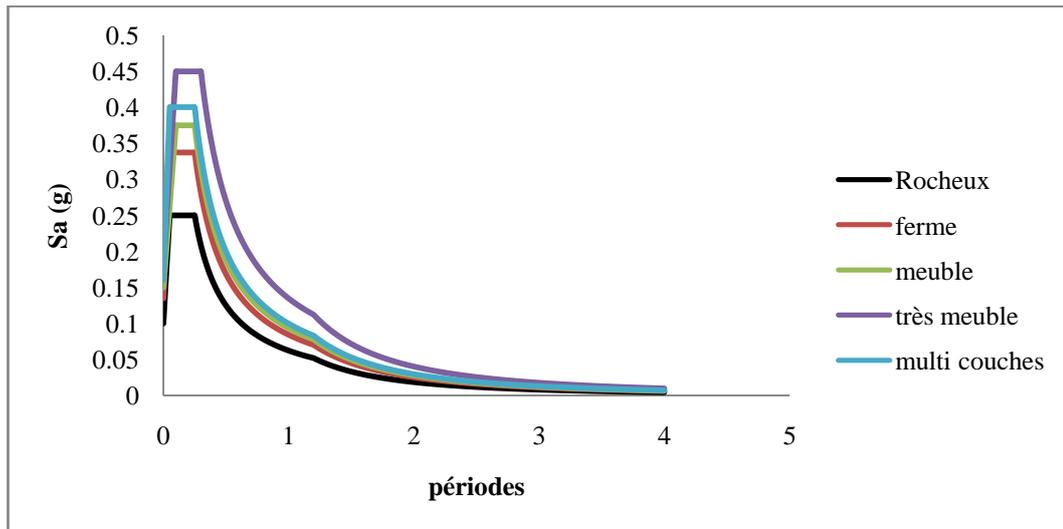


Figure 3-6. Spectres de réponses élastiques réglementaires TYPE02.

### 3.2.2.4 Spectre de réponse élastique verticale

La composante verticale de l'action sismique doit être représentée par un spectre de réponse élastique,  $S_{ve}(T)$ , calculé en utilisant les expressions suivantes :

$$S_{ve}(T) = \begin{cases} a_{vg} \cdot \left(1 + \frac{T}{T_B} \cdot (\eta \cdot 2.5 - 1)\right) & 0 \leq T \leq T_B \\ a_{vg} \cdot 3 \cdot \eta & T_B \leq T \leq T_C \\ a_{vg} \cdot 3 \cdot \eta \cdot \left(\frac{T_C}{T}\right) & T_C \leq T \leq T_D \\ a_{vg} \cdot 3 \cdot \eta \cdot \left(\frac{T_d \cdot T_c}{T^2}\right) & T_D \leq T \leq 4s \end{cases} \quad \text{Equation 9}$$

Tableau 3-14. Valeurs recommandées des paramètres décrivant les spectres de réponse élastique vertical.[9]

Spectre	$a_{vg}/a_g$	$T_B$	$T_c$	$T_D$
Type 01	0.9	0.05	0.15	1
Type 2	0.45	0.05	0.15	1

Pour une magnitude déduite des ondes de surface,  $M_s$ , et inférieure ou égale à 5.5, il est recommandé d'adopter le type de spectre 2. Pour les cinq classes de sol A, B, C, D et E, les valeurs recommandées des paramètres qui décrivent les spectres verticaux

sont données dans le Tableau 3-14. Ces valeurs recommandées ne s'appliquent pas aux sols spéciaux de classes S1 et S2.

### 3.2.2.5 Facteurs d'amplification topographique de l'eurocode8

L'intérêt pour les effets de site topographiques commença lorsque de fortes accélérations furent enregistrées lors un très grand nombre d'études, aussi bien observationnelles que numériques, ont été menées afin de mieux comprendre ces effets. Leurs conclusions sont exhaustivement répertoriées et convergent sur les points suivants :

Le mouvement sismique est amplifié au sommet des montagnes ou près du sommet d'une pente, et dé amplifié au creux des canyons.

La bande de fréquence où l'amplification est maximale correspond à des longueurs d'onde comparables aux dimensions horizontales du relief.

Les effets topographiques deviennent négligeables si la longueur d'onde est très grande devant les dimensions du relief.

Sur les flancs d'une montagne, l'amplitude du mouvement peut présenter de grandes variations spatiales, dues aux interférences entre ondes incidentes et ondes diffractées

Plus le ratio de forme (ou la pente) du relief est élevé(e), plus l'amplification du mouvement au sommet et les variations spatiales d'amplitude sur les flancs sont grandes.

Tableau 3-15. Facteurs d'amplification topographique selon l'EC8 [9].

<b>Description</b>	<b>Pente</b>	<b>St</b>
Topographie négligeable	$< 15^\circ$	1
Versants et pentes isolées	$\geq 15^\circ$	$\geq 1.2$
Buttes larges à la base	$< 30^\circ$	$\geq 1.2$
	$\geq 30^\circ$	$\geq 1.4$

### 3.2.3 Spectre de réponse dans l'IBC (ASCE07-16)

#### 3.2.3.1 Classification des sites

Les codes sismiques américains antérieurs à 1994 (par exemple, les dispositions ATC de 1978) proposaient quatre types de sol caractérisés par des critères à la fois qualitatifs et quantitatifs, y- compris le type, l'épaisseur et la vitesse des ondes de cisaillement.

Dans les codes sismiques américains postérieurs à 1994 (par exemple, les éditions 1994 et 1997 de NEH le Code international de la construction de 2000) un nouveau système de catégorisation des sols a été introduit (Tableau 3-16), qui utilise  $V_{s,30}$  (la vitesse moyenne estimée pour les 30 premiers mètres de sol) comme paramètre principal de catégorisation. Le nombre de coups de pénétration standard NSPT (nombre de coups par essai de pénétration normalisé (SPT)) et la résistance au cisaillement non drainée  $S_u$  peuvent être également utilisés pour caractériser les 30 premiers mètres du sol.

Tableau 3-16. Classification de site ASCE07-16 [9].

Classe de sol	Description	$V_{s, 30}$ (m/s)	NSPT	$S_u$ (kPa)
A	Roche dur	>1500	-	
B	Roche	760-1500	-	
C	Sol très dense et roche tendre	360-760	>50	>100
D	Sol rigide	180-360	15-50	50-100
E	Sol mou	<180	<15	<50

#### 3.2.3.2 Coefficients d'accélération de zone Ss et S1

L'ASCE utilise deux accélérations  $S_s$  et  $S_1$ ,  $S_s$  pour une période de 0.2 s et le  $S_1$  pour une période de 1s. Les valeurs des accélérations sont données dans la Figure 3-9 et la Figure 3-10. Les valeurs électroniques des paramètres d'accélération cartographiés et d'autres paramètres de conception sismique sont fournis par l'USGS.

L'USGS est une agence scientifique du gouvernement des États-Unis. Les scientifiques de l'USGS étudient le paysage des États-Unis, ses ressources naturelles et

les risques naturels qui les menacent. L'organisation compte quatre grandes disciplines scientifiques, concernant la biologie, la géographie, la géologie et l'hydrologie. L'USGS est un organisme de recherche et d'enquête sans aucune responsabilité réglementaire.

Pour chaque accélération il existe des coefficients de site  $F_a$  et  $F_v$  en fonction de la nature de sol, comme le montrent le Tableau 3-18 et le Tableau 3-18 ci-dessous.

Tableau 3-17. Coefficient de site  $F_a$  pour une période  
 $T = 0.2s$  [9].

Classe de site	Coefficient de site $F_a$					
	$S_s < 0.25$	$S_s = 0.5$	$S_s = 0.75$	$S_s = 1.0$	$S_s > 1.25$	$S_s > 1.5$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.80	0.8
B	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
C	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
D	1.6	1.4	1.3	1.2	1.1	1
E	2.4	1.7	1.3	1.1	1	0.8

Tableau 3-18. Coefficient de site  $F_v$  pour un période  
 $T = 1s$  [9]

Classe de site	Coefficient de site $F_v$					
	$S_1 < 0.1$	$S_1 = 0.2$	$S_1 = 0.3$	$S_1 = 0.4$	$S_1 = 0.5$	$S_1 > 0.6$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
C	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.4
D	2.4	2.2	2	1.9	1.8	1.7
E	4.2	3.3	2.8	2.4	2.2	2

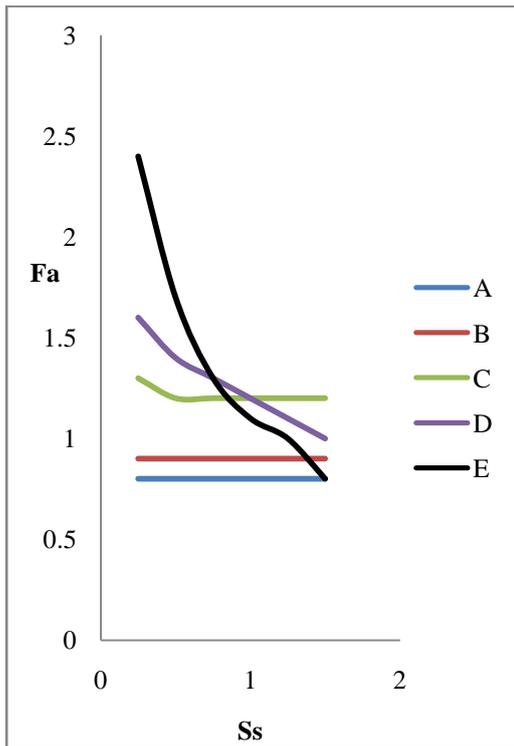


Figure 3-7.  
Variation du coefficient de site  $F_a$

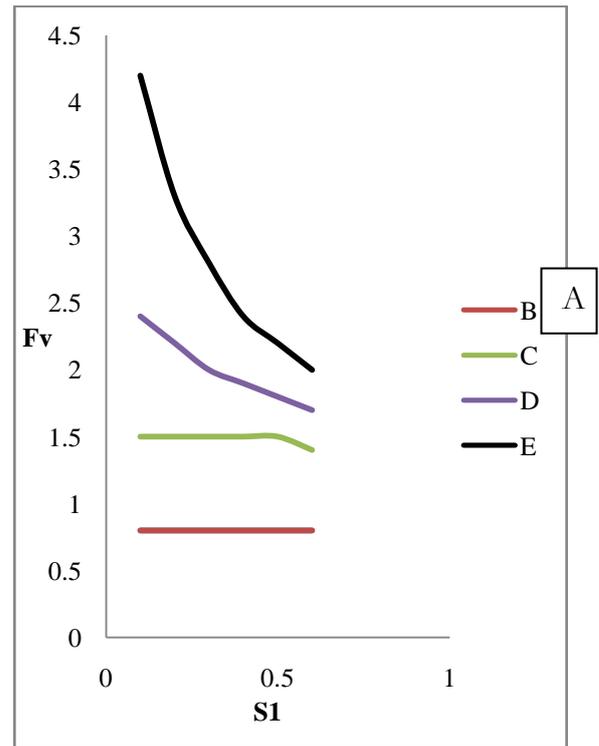


Figure 3-8.  
Variation du coefficient de site  $F_v$

### 3.2.3.3 Détermination de Ss et S1 (USGS)

Pour la détermination de Ss et S1 il existe des carte de zonage (Figure 3-9 et Figure 3-10), des outils numérique, un programme celle de USGS et des sites web qui sont plus performants que les cartes, ces outils ont une base de donnée sur la topographie du pays (états unis), on donne comme input la localisation (des information sur le degré de latitude et le degré de longitude) qui permet de donner les accélérations Ss et S1 de la région choisie, il permet aussi l'exploitation des résultats (Sds, Sms) et le traçages des spectres de réponses comme le montrent la Figure 3-11 et la Figure 3-12.

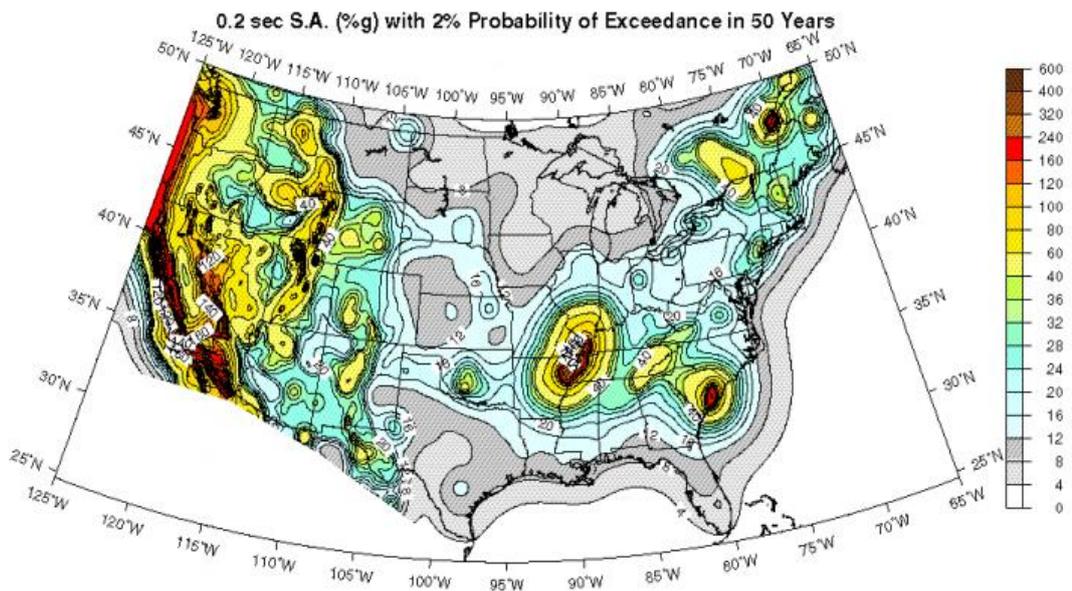


Figure 3-9. Accélération spectrale de 0,2 seconde (SA) avec une probabilité de dépassement de 2 % en 50 ans[11].

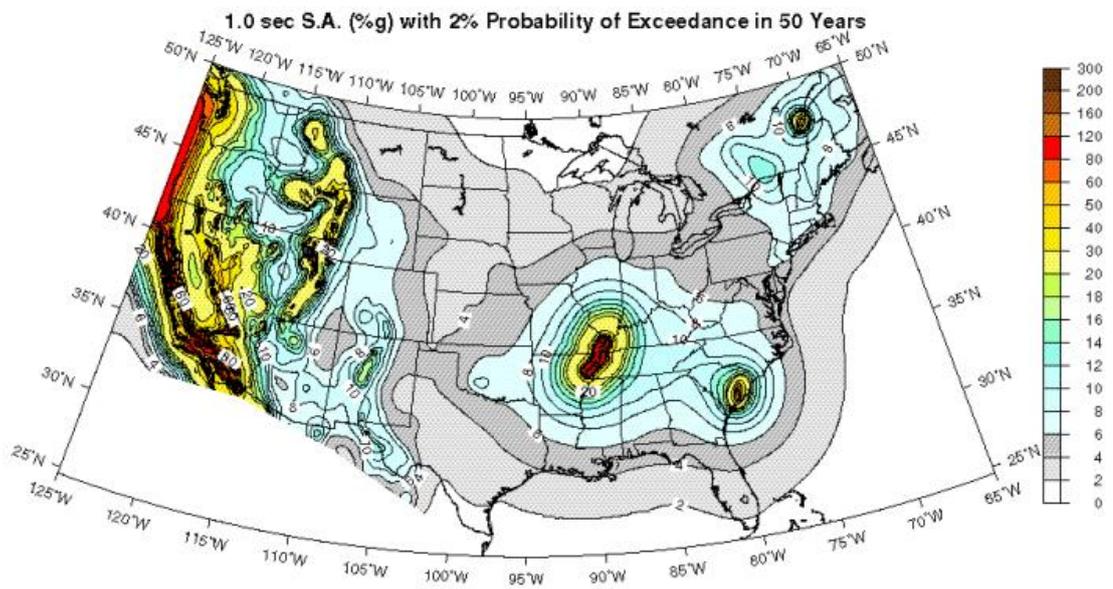


Figure 3-10. Accélération spectrale de 1 seconde (SA) avec une probabilité de dépassement de 2 % en 50 ans[11].

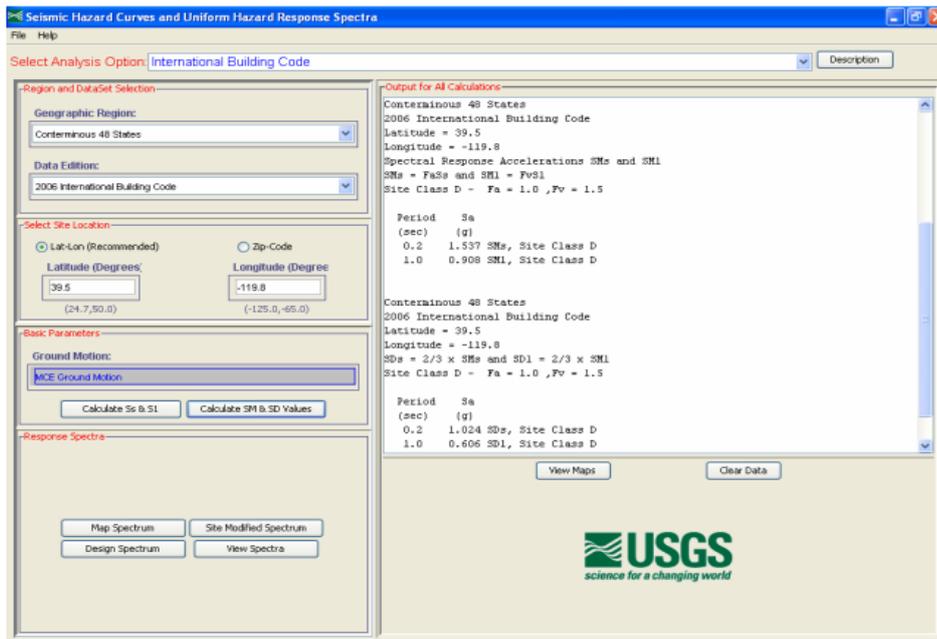


Figure 3-11. Logiciel qui permet de calculer Ss et S1 [11].

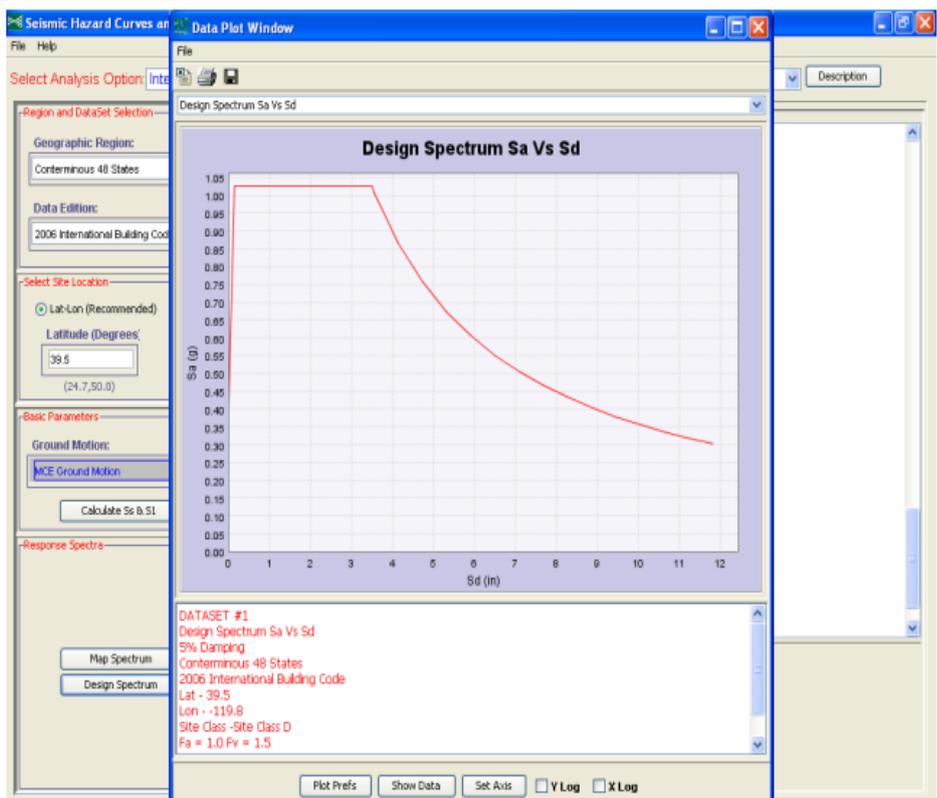


Figure 3-12. Logiciel qui permet de calculer Ss et S1 [11].

### 3.2.3.4 Facteur d'importance

Tableau 3-19. Facteur d'importance pour ASCE07 [9]

		Coefficient d'importance
Classe de bâtiment	I	1
	II	1
	III	1.25
	IV	1.5

### 3.2.3.5 Spectres de réponse élastique horizontale

$$S_a/g \equiv \begin{cases} S_{DS} \left( 0.4 + 0.6 * \frac{T}{T_0} \right) & 0 \leq T \leq T_0 \\ S_{DS} & T_0 \leq T \leq T_S \\ \frac{S_{D1}}{T} & T_S \leq T \leq T_L \\ \frac{S_{D1} T_L}{T^2} & T_L \geq 3.0s \end{cases} \quad \text{Equation 10}$$

Avec :

$S_{DS}$ : Le paramètre d'accélération de la réponse spectrale de conception à de courtes périodes.

$S_{D1}$  : Le paramètre d'accélération de la réponse spectrale de conception à Période 1 seconde.

$T$  : la période fondamentale de la structure, en secondes (s).

$T_0$ : Période donne la limite inférieure des périodes correspondant au palier d'accélération spectrale constante.

$$T_0 = 0.2 * \frac{S_{D1}}{S_{DS}}$$

$T_S$ : Période donne la limite supérieure des périodes correspondant au palier d'accélération spectrale constante.

$$T_S = \frac{S_{D1}}{S_{DS}}$$

$T_L$  = période de transition de longue durée (s). (Figure 3-15)

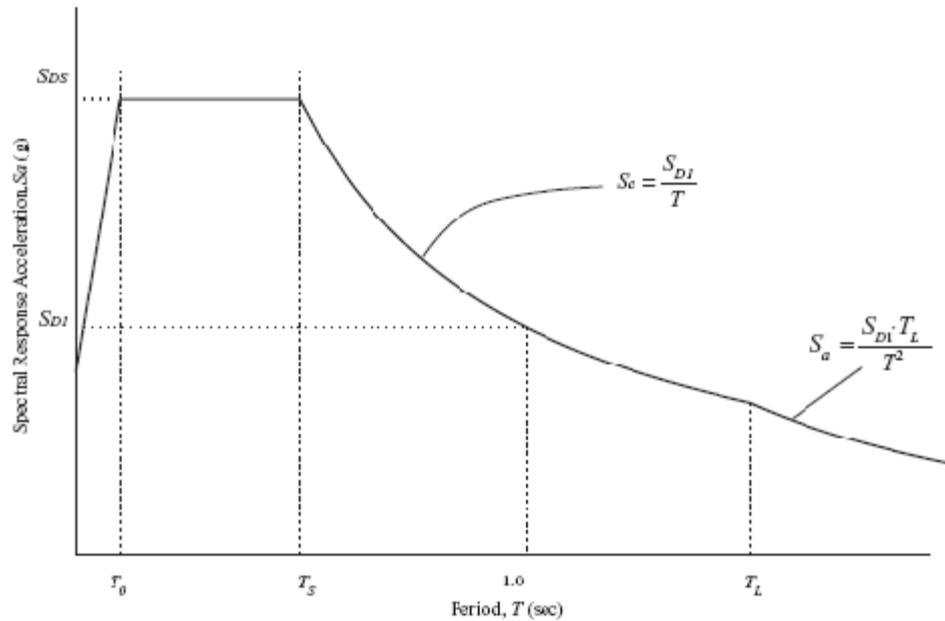


Figure 3-13. Spectre de réponse de la conception pour ASCE07 [9]

Les accélérations spectrales  $S_{DS}$  et  $S_{D1}$  sont données par les relations suivantes :

$$S_{DS} = \frac{2}{3} S_{ms}$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3} S_{m1}$$

Avec:

$$S_{m1} = F_V * S_1$$

$$S_{ms} = F_a * S_S$$

Où:

$S_S$ : l'accélération de la réponse spectrale maximale du tremblement de terre considéré à court terme ( $T=0.2$  s).

$S_1$ : l'accélération de la réponse spectrale maximale du tremblement de terre considéré à une période de 1 s.

$S_{ms}$  : Le tremblement de terre maximum considéré, amorti à 5 %, c'est la réponse spectrale.

D'accélération correspondante à une période de 0.2 s

$S_{m1}$  : Le tremblement de terre maximum considéré, amorti à 5 %, c'est la réponse spectrale. D'accélération correspondante à une période de 1 s

$F_a$  : Coefficient de site pour les périodes courtes. (à une période de 0.2 s). il est donné par le Tableau 3-17

$F_v$  : coefficient de site pour les périodes longues (à une période de 1. s). [06]. il est donné par le .Tableau 3-18

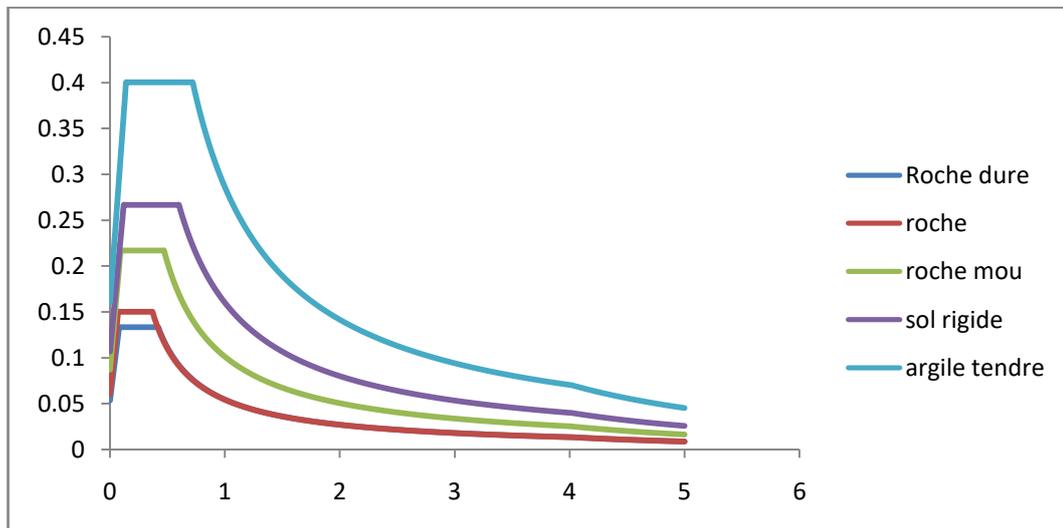


Figure 3-14. Spectres de réponse élastiques réglementaire ASCE07 [10].

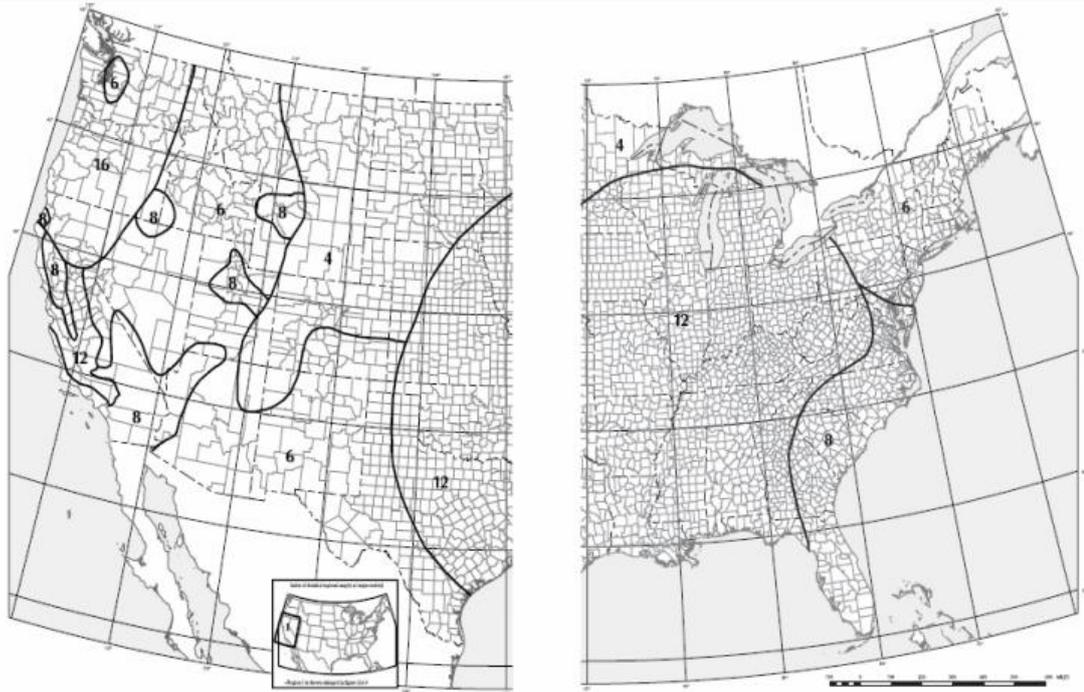


Figure 3-15. Période de transaction de longue durée TL [10].

### 3.2.3.6 Spectres de réponse élastique verticale

Lorsqu'un spectre de réponse verticale est requis par cette norme et que des procédures spécifiques au site ne sont pas utilisées, l'accélération spectrale de réponse verticale,  $S_{aMv}(T)$ , doit être développée comme suit :

$$S_{aMv}(T) = \begin{cases} 0.3 \cdot C_v S_{ms} & 0 \leq T \leq 0.025 \text{ s} \\ 20 \cdot C_v S_{ms} (T_v - 0.025) + 0.3 \cdot C_v S_{ms} & 0.025 \text{ s} \leq T \leq 0.05 \text{ s} \\ 0.8 \cdot C_v S_{ms} & 0.05 \text{ s} \leq T \leq 0.15 \text{ s} \\ 0.8 \cdot C_v S_{ms} \cdot \left(\frac{0.15}{T_v}\right)^{0.75} & 0.15 \text{ s} \leq T \leq 2 \text{ s} \end{cases} \quad \text{Equation 11}$$

Avec ;

$C_v$  : Coefficient vertical, il est défini dans le Tableau 3-20.

$S_{ms}$  : Tremblement de terre maximum considéré, à 5 % d'amortissement, c'est la réponse spectrale

$T_v$  : La période verticale de vibration.

Tableau 3-20. Valeurs du coefficient vertical Cv [9].

$S_s$	Site classe A et B	Site classe C	Site classe D ,E,F
$S_s \geq 2.0$	0.9	1.3	1.5
$S_s = 1.0$	0.9	1.1	1.3
$S_s = 0.6$	0.9	1	1.1
$S_s = 0.3$	0.8	0.8	0.9
$S_s \leq 0.2$	0.7	0.7	.7

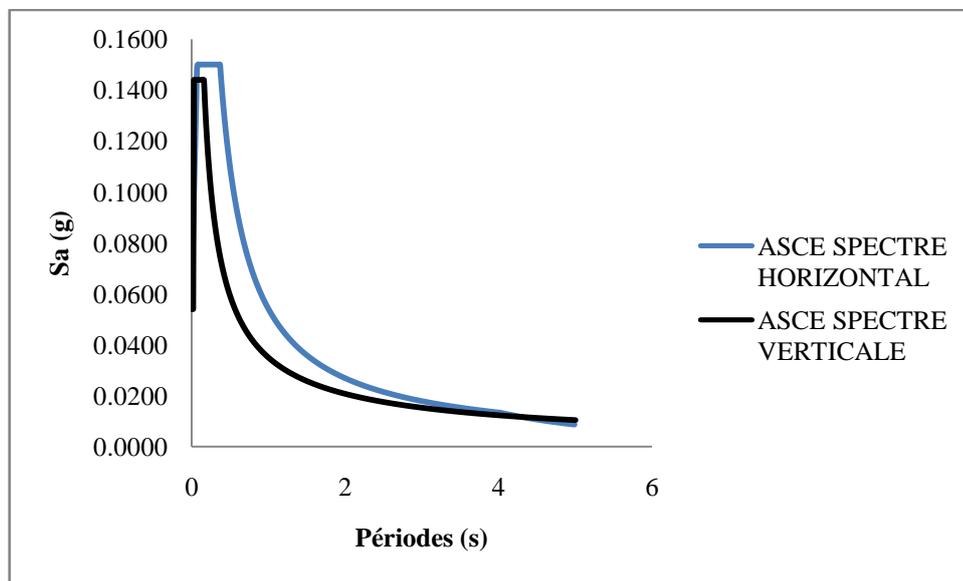


Figure 3-16. Spectres de réponses horizontales et verticales pour un site rocheux et  $a_g = 0.1$  g

### 3.2.4 Rapport d'enquête géotechnique supplémentaires et exigences pour les catégories de conception sismique D à F

Le rapport d'enquête géotechnique pour une structure classée dans la catégorie de conception sismique D, E ou F doit comprendre tous les éléments suivants, selon le cas :

La détermination des pressions sismiques latérales dynamiques sur le sous-sol et les murs de soutènement causées par les mouvements du sol lors des séismes de conception.

Le potentiel de liquéfaction et de perte de résistance du sol évalué pour l'accélération maximale du sol sur le site, la magnitude du séisme et les caractéristiques de la source, conformément à la  $MCE_G$  (Maximum Considerate Earth quak) l'accélération maximale au sol. L'accélération maximale au sol doit être déterminée sur la base d'une étude spécifique au site en tenant compte des effets d'amplification du sol.

$$PGA_M = PGA \cdot F_{PGA} \quad \text{Equation 14}$$

$PGA_M$ : Accélération maximale au sol pendant le pic du tremblement de terre, ajustée en fonction des effets de classe du site.

PGA : accélération maximale au sol pendant le pic du tremblement de terre

$F_{PGA}$ : Coefficient de site (Amplification de sol) Tableau 3-21

Tableau 3-21. Coefficient de sol  $[F]_{PGA}$  [9]

$S_s$	Site classe A et B	Site classe C	Site classe D, E, F
$S_s \geq 2.0$	0.9	1.3	1.5
$S_s = 1.0$	0.9	1.1	1.3
$S_s = 0.6$	0.9	1	1.1
$S_s = 0.3$	0.8	0.8	0.9
$S_s \leq 0.2$	0.7	0.7	0.7

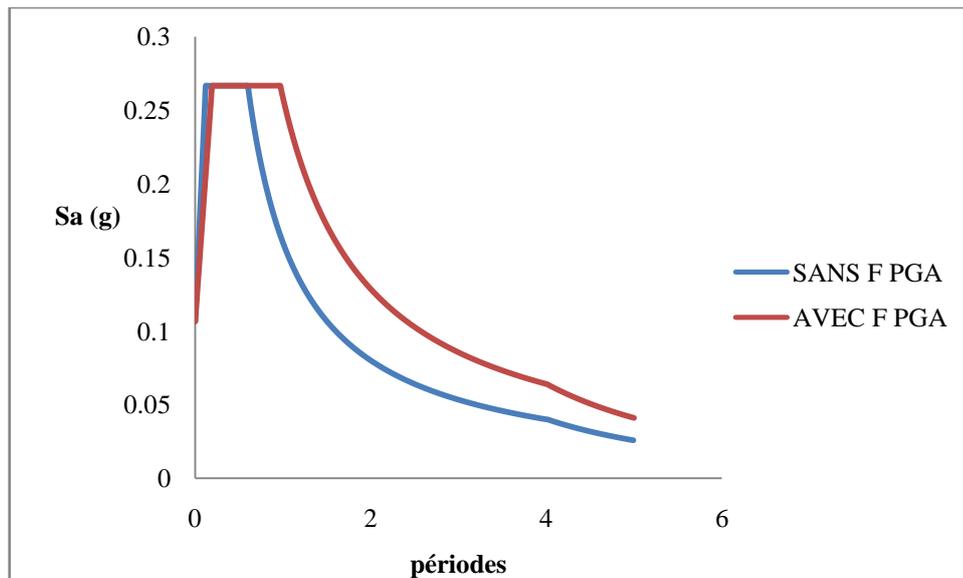


Figure 3-17. Spectres de réponse avec et sans coefficient de site pour  $a_g = 0.1 \text{ g}$

### 3.2.5 Conclusion

Ce chapitre est destiné à une description des spectres de réponses des codes réglementaires algérien (RPA99V/2003), européen (EUROCODE8) et American (UBC/ASCE07), ainsi que la différence entre les expressions des spectres. Il est clair que les coefficients diffèrent d'un code à un autre. L'EC8 et ASCE07 possèdent des coefficients de site pour les différents types de sol. Cela ne s'est pas terminé ici, car l'ASCE a assigné pour chaque accélération un coefficient de site spécifique  $F_v$  et  $F_a$ . Ceci veut dire que le code American a donné une grande importance au facteur d'amplification associé aux effets de site par rapport au code européen. Cependant la RPA ne possède aucun de ces facteurs. L'EC8 a aussi défini des spectres de type 01 et des spectres de type 02. La RPA fixe les périodes, alors que l'ASCE calcule les périodes en fonction des accélérations. La différence du point de vue, classement des différentes catégories de sol, du coefficient d'importance et du facteur d'amplification topographique.

Le chapitre 4 est destiné à une étude comparative détaillée entre les spectres de réponse élastique des différentes réglementations parasismiques, le RPA, l'EC8 et l'ASCE.



## **Chapitre 4**

# **COMPARAISON DES SPECTRES DE REPONSES ELASTIQUES DE RPA99/V2003, ASCE07-16, EC8 TYPE 1 ET 2**

### **4.1 Introduction**

Ce chapitre est destiné à une comparaison entre la classification des sites et les spectres de réponse élastiques horizontaux des règles sismiques pour chacun des codes, RPA, EC8 et ASCE. Nous faisons également une comparaison du point de vue de l'accélération spectrale selon certaines périodes de référence sélectionnées, pendant plusieurs mouvements sismiques augmentant progressivement et passant d'un mouvement PGA modéré à très élevé, prenant successivement les valeurs de 0.1g, 0.3g et 0.4g, pour les différentes catégories de sols, rocheux, fermes, meubles et très meubles. Dans cette étude on s'intéresse aux spectres horizontaux seulement car le règlement parasismique algérien ne possède pas de spectres de réponses verticaux.

### **4.2 Comparaison des classifications des sites**

Les recommandations du RPA, de l'EC8 et de l'ASCE 07 classent les sols en fonction de la vitesse moyenne de propagation des ondes de cisaillement  $V_{s30}$ , si cette dernière est disponible, ou par le nombre de comptages par essai de pénétration NSPT normalisé. Sur la base de l'une de ces valeurs, l'Eurocode8 classe les sols en sept (07) catégories (Tableau 3-9), l'ASCE en six (06) catégories (Tableau 3-16.), cependant le

RPA99 / v2003 n'adopte que quatre (4) catégories (Tableau 3-4). Il convient de noter ici que l'Eurocode8 et l'ASCE donnent plus de détails dans la classification du sol que le RPA99/v2003 (Tableau 4-1.). Dans les sites rocheux l'ASCE possède un type de roche, qui est la roche dure, qui n'existe pas dans les autres règlements, alors la comparaison avec l'ASCE dans le site rocheux va se faire avec le sol de type B.

A travers le Tableau 4-1. on remarque que les limites  $V_s$  caractérisant les classes de sol sont sensiblement les mêmes pour les trois codes étudiés excepté que l'ASCE diffère deux classes de sol pour les types rocheux.

Tableau 4-1. Les types de sol définis dans l'EC8, l'ASCE07/16 et le RPA 99/2003

RPA99/2003	EC8	ASCE7-16
<b>Sol type 01</b>	<b>Sol type A</b>	<b>Sol type A</b>
$V_s \geq 800 \text{ m/s}$	$V_s \geq 800 \text{ m/s}$	$V_s \geq 1500 \text{ m/s}$
<b>Sol type 02</b>	<b>Sol type B</b>	<b>Sol type B</b>
$400 \leq V_s \leq 800 \text{ m/s}$	$360 \leq V_s \leq 800 \text{ m/s}$	$760 \leq V_s \leq 1500 \text{ m/s}$
<b>Sol type 03</b>	<b>Sol type C</b>	<b>Sol type C</b>
$200 \leq V_s \leq 400 \text{ m/s}$	$180 \leq V_s \leq 360 \text{ m/s}$	$360 \leq V_s \leq 760 \text{ m/s}$
<b>Sol type 04</b>	<b>Sol type D</b>	<b>Sol type D</b>
$100 \leq V_s \leq 200 \text{ m/s}$	$V_s < 180 \text{ m/s}$	$180 \leq V_s \leq 360 \text{ m/s}$
		<b>Sol type E</b>
		$V_s < 180$

### 4.3 Etude des spectres élastiques

Le spectre de réponse typique des mouvements du sol lors d'un tremblement de terre représente une enveloppe des réponses de pointe de nombreux systèmes à un seul degré de liberté (SDOF) avec des périodes différentes. Le spectre de réponse à l'accélération d'un mouvement du sol est une relation entre la période naturelle de vibration d'un système à degré de liberté unique et l'accélération absolue maximale qu'il subit sous l'effet du mouvement du sol. De même, un spectre de réponse de déplacement représente généralement le déplacement maximal, par rapport au sol, de

nombreux systèmes (SDOF) ayant des périodes différentes. Par conséquent, la construction d'un spectre de réponse implique l'analyse de nombreux systèmes (SDOF) différents. La valeur de chaque point du spectre est la réponse de crête d'un système à un seul degré de liberté d'une période donnée. Ceci est illustré dans la Figure 4-1 ci-dessous, où le spectre de déplacement d'un enregistrement du tremblement de terre de Palm Springs est montré, ainsi que la réponse historique à plusieurs périodes. La relation entre la réponse de pointe aux différentes périodes et le spectre  $y$  est illustrée graphiquement [14].

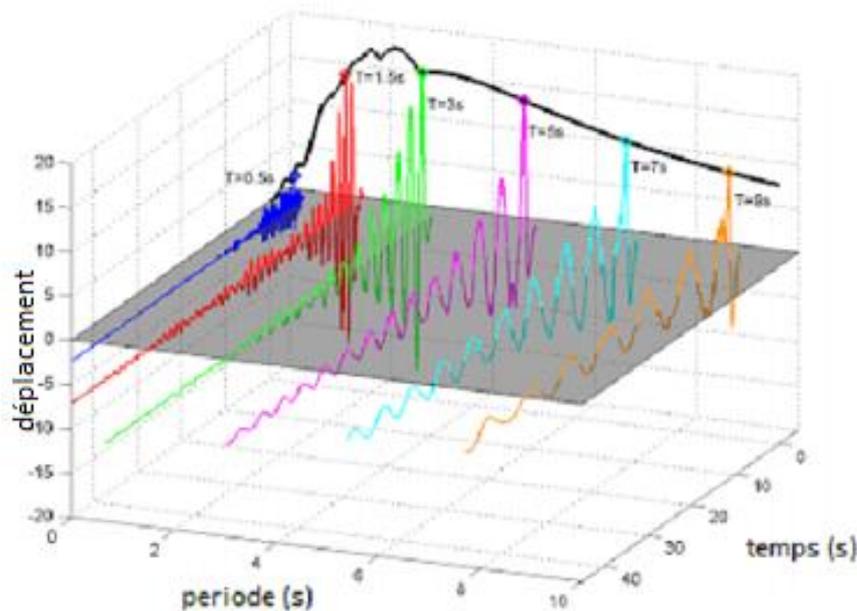


Figure 4-1. Construction de spectres de déplacement linéaire pour un enregistrement du tremblement de terre de North Palm Springs en 1986.[14]

Les mouvements sismiques sont caractérisés par un spectre de réponse élastique (par la réglementation ou dans le cadre du micro-zonage), ancré à période nulle ( $T=0$ ) à une accélération de calage (notée,  $a_g$  dans les normes l'EC8, Adans le RPA et estimé en fonction de  $S_s$  et  $S_1$  dans l'ASCE) et dépendant de la zone sismique et de la nature du sol. Le spectre de réponse est une courbe représentant l'accélération maximale induite par les vibrations sismiques en fonction de la période propre d'un oscillateur simple (pendule, ressort, ...) et de son amortissement critique. Le spectre de

réponse propre est un outil utilisé par les concepteurs d'ouvrage (bâtiments, ouvrage d'art...) pour le calcul de la réponse sismique maximale directement.

#### 4.3.1 Comparaison des formules des spectres du RPA avec les spectres élastiques européens (EC 8) et américain (ASCE 07-16)

Différentes expressions sont utilisées pour construire les spectres de réponse élastiques. Le Tableau 4-3. donne ces expressions pour les trois règlements, le RPA, l'EC8 et l'ASCE07-16. On note que pour le RPA le spectre élastique correspond au cas où la constante R est égale à 1.

Tableau 4-2. Cordonnées de spectres élastique pour EC8, RPA99 et ASCE07

RPA99v2003	EC8	ASCE07-16
$0 \leq T \leq T_1$	$0 \leq T \leq T_B$	$0 \leq T \leq T_0$
$1.25A \left(1 + \frac{T}{T_1} \left(2.5 \eta \frac{Q}{R} - 1\right)\right)$	$a_g S \left(1 + \frac{T}{T_B} (\eta 2.5 - 1)\right)$	$S_{DS} \left(0.4 + 0.6 \frac{T}{T_0}\right)$
$T_1 \leq 0 \leq T_2$	$T_B \leq 0 \leq T_C$	$T_0 \leq 0 \leq T_S$
$2.5 \eta (1.25A) \left(\frac{Q}{R}\right)$	$a_g \cdot S \cdot 2.5 \eta$	$S_{DS}$
$T_2 \leq 0 \leq 3.0s$	$T_C \leq 0 \leq T_D$	$T_S \leq 0 \leq T_L$
$2.5 \eta (1.25A) \left(\frac{Q}{R}\right) \left(\frac{T_2}{T}\right)^{\frac{2}{3}}$	$a_g \cdot S \cdot 2.5 \eta \left(\frac{T_C}{T}\right)$	$\frac{S_{D1}}{T}$
$T \geq 3.0s$	$T_D \leq T \leq 4s$	$T_L \geq 5.0s$
$2.5 \eta (1.25A) \left(\frac{Q}{R}\right) \left(\frac{T_2}{3}\right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{3}{T}\right)^{\frac{5}{3}}$	$a_g S 2.5 \eta \left(\frac{T_D \cdot T_C}{T^2}\right)$	$\frac{S_{D1} T_L}{T^2}$

Les différents facteurs utilisés par les trois règlements qui font l'objet de notre étude sont définis dans le Tableau 4-3..

Tableau 4-3. Les différents facteurs utilisés par le RPA 99/2003, par l'EC8 et l'ASCE07-16

RPA99/2003	<p>A : Coefficient d'accélération de zone</p> <p>R : Coefficient de comportement de la structure</p> <p>Q : Facteur de qualité</p> <p><math>\eta</math> : Facteur de correction d'amortissement.</p> <p><math>\xi</math> : Pourcentage d'amortissement critique</p> <p><math>T_1, T_2</math> : Caractéristiques associées à la catégorie de site. Ils donnent respectivement les limites inférieure et supérieure du spectre en accélération.</p>
EC8	<p><math>ag</math> : Accélération de calcul pour un sol de classe A.</p> <p><math>\eta</math> : Coefficient de correction de l'amortissement avec la valeur de référence.</p> <p><math>T_B</math>: Limite inférieure des périodes correspondant au palier d'accélération spectrale constante.</p> <p><math>T_C</math>: Limite supérieure des périodes correspondant au palier d'accélération spectrale constante.</p> <p><math>T_D</math>: Valeur définissant le début de la branche à déplacement spectral constant.</p> <p>S : Paramètre du sol.</p>
ASCE 07	<p><math>S_{DS}</math> : Paramètre d'accélération de la réponse spectrale de conception à courtes périodes.</p> <p><math>S_{D1}</math> : Paramètre d'accélération de la réponse spectrale de conception à une période de 1s.</p> <p><math>T_0</math> Limite inférieure des périodes correspondant au palier d'accélération spectrale constante.</p> <p><math>T_s</math> Limite supérieur des périodes correspondant au palier d'accélération spectrale constante.</p> <p><math>T_L</math> =Période de transition de longue durée (s).</p> <p><math>S_s</math> = Accélération de la réponse spectrale maximale du tremblement de terre considéré à courtes périodes.</p>

	<p>S1 = Accélération de la réponse spectrale maximale du tremblement de terre considéré à une période de 1 s.</p> <p><math>S_{ms}</math> : Séisme maximum considéré, 5 % d'amortissement, réponse spectralen accélération à courtes périodes adaptée à la classe de site.</p> <p><math>S_{m1}</math> = Séisme maximum considéré, amorti à 5 %, réponse spectrale en accélération à une période de 1 s ajustée pour le site.</p> <p>Fa = coefficient de site a courte période T= 0.2 s.</p> <p>Fv = coefficient de site pour une période égale à 1s [06]</p>
--	---

### 4.3.2 Comparaisons entre les spectres de réponses relatifs aux règlements RPA 99V2003, EC8 et ASCE07-16

La comparaison entre les spectres élastiques horizontaux de l'EC 8 type 01,02 et de l'ASCE07-16 avec les spectres du RPA99 est faite dans cette section pour les sites rocheux, fermes, meubles, et très meubles, ce qui correspond aux sites S1, S2, S3 et S4 pour le RPA tandis que pour l'EC8 ça correspond aux sites A, B, C et D concernant l'ASCE07 les sites considérés sont B, C, D et E. Tout en variant l'accélération maximale au niveau de la roche, on considère trois valeurs, 0.1g, 0.3g, et 0.4g.

Dans une étude comparative en utilisant différents codes, il est important d'avoir une base commune pour la spécification du risque sismique, en d'autres termes, l'accélération maximale au niveau de la roche (PGA) doit être la même. On rappelle que cette accélération est égale au produit  $A \times g$  dans le RPA et à  $ag$  dans l'EC8. Cependant comme il a été mentionné au chapitre3, l'ASCE ne travaille pas avec l'accélération de pointe du sol mais avec deux autres paramètres suffisants à définir le spectre de réponse. Il détermine une accélération de référence, accélération spectrale maximale, pour les périodes courtes à 0.2s, notée Ss, et une autre pour les périodes longues à 1.0s, notée S1. Il faut donc estimer Ss et S1 de sorte à avoir le même niveau du risque sismique. A travers les relations du spectre de réponse de l'ASCE07 (Tableau 4-2), on remarque que le rapport entre l'accélération spectrale maximale à courte période (à  $T_0$ ) et le PGA (ordonnée spectrale à la période zéro) est de 2.5. En effet, dans la présente étude, Ss a été considéré égal à 2,5 fois le PGA au niveau de la roche. Néanmoins, il n'existe pas de corrélation de ce type pour S1, qui dépend de la magnitude du tremblement de terre [18]. Toutefois, on remarque que dans tous les

autres codes, l'accélération spectrale à la période de 1.0 s, dans les classes de site équivalentes à la classe B du site ASCE07, est égale au PGA. Par conséquent, dans cette étude comparative S1 a été considéré égal au PGA pour la classe de site B[12].

On note que, dans cette étude, le coefficient d'amortissement est pris égal à 5%, le facteur de qualité Q utilisé dans le RPA est égal à 1. Concernant les périodes caractéristiques et les facteurs de sites, ils sont résumés dans le Tableau4-4.

Tableau4-4. Paramètres des spectres de réponse.

Règlements	Paramètres	Site rocheux	Site ferme	Site meuble	Site très meuble
<b>RPA</b>	T <sub>1</sub>	0.15	0.15	0.15	0.15
	T <sub>2</sub>	0.3	0.4	0.5	0.7
<b>EC8 Type01</b>	T <sub>B</sub>	0.15	0.15	0.2	0.2
	T <sub>C</sub>	0.4	0.5	0.6	0.8
	T <sub>D</sub>	2	2	2	2
	S	1	1.2	1.15	1.35
<b>EC8 Type02</b>	T <sub>B</sub>	0.05	0.05	0.1	0.1
	T <sub>C</sub>	0.25	0.25	0.25	0.3
	T <sub>D</sub>	1.2	1.2	1.2	1.2
	S	1	1.35	1.5	1.8
<b>ASCE07</b> <b>ag=0.1g</b>	T <sub>0</sub>	0.071	0.092	0.11	0.14
	T <sub>s</sub>	0.35	0.46	0.59	0.7
	T <sub>L</sub>	4	4	4	4
	F <sub>a</sub>	0.9	1.3	1.6	2.4
	F <sub>v</sub>	0.8	1.5	2.4	4.2
<b>ASCE07</b> <b>ag=0.3g</b>	T <sub>0</sub>	0.071	0.1	0.12	0.17
	T <sub>s</sub>	0.35	0.5	0.6	0.88
	T <sub>L</sub>	4	4	4	4

	Fa	0.9	1.2	1.3	1.3
	Fv	0.8	1.5	2	2.8
<b>ASCE07</b> <b>ag=0.4g</b>	T <sub>0</sub>	0.071	0.13	0.12	0.17
	T <sub>s</sub>	0.35	0.66	0.63	0.89
	T <sub>L</sub>	4	4	4	4
	Fa	0.9	1.2	1.2	1.1
	Fv	0.8	1.5	1.9	2.4

#### 4.3.2.1 Site rocheux

Les Figure 4-2, Figure 4-3 et Figure 4-4 montrent une comparaison entre les spectres de réponses horizontaux du RPA, de l'EC8 type01 et 02, et de l'ASCE07. Ceci en considérant  $a_g=0.1$  g, 0.3g et 0.4g et un site rocheux. Nommé S1 dans le RPA, Type A dans l'EC8 et Type B dans l'ASCE07. Les valeurs des accélérations spectrales pour les périodes 0s; 0.05s; 0.3s ; 1s et 4s sont présentées par les Tableau 4-5, Tableau 4-6 et Tableau 4-7. On remarque à travers ces résultats que:

- Le RPA donne des valeurs d'accélérations spectrales plus importantes par rapport aux autres codes sur tous le contenu fréquentiel.
- Les spectres obtenus par l'EC8 Type01 et Type02 sont proches jusqu'à une période de 0.25 s ( $=T_c$  du spectre type02) où les valeurs du spectre type01 deviennent plus importantes que celles du spectre type02. Ceci est évident puisque le palier des accélérations constantes du spectre type02 est rétréci par rapport au spectre type01. C'est dû à la différence entre les tremblements de terre en champs proches et en champs lointains.
- L'ASCE07 donne les valeurs spectrales les plus faibles par rapport aux autres codes. Néanmoins, à partir d'une période proche de 0.35s ( $=T_s$ ) les spectres de l'ASCE et de l'EC8 type02 se rapprochent.
- Les variations dans les spectres sont dues principalement au facteur de site S qui est égale à 1 pour l'EC8 tandis que pour l'ASCE les coefficients de site pour les courtes et longues périodes, Fa et Fv, sont inférieures à 1. De plus,

l'ASCE07 donne le spectre le plus faible car le risque sismique en utilisant ce code est réduit de  $2/3$ . Le RPA donne le spectre le plus important parce qu'il est multiplié par un coefficient de 1.25. Il est majoré donc par 25% bien que le site soit rocheux. On rappelle également que le coefficient de qualité  $Q$  a été pris égale 1. Dans le cas où  $Q > 1$  le spectre sera majoré par  $1.25 \times Q$ .

- En comparant la longueur du palier d'accélérations constante on trouve qu'elles sont presque similaires pour le RPA, L'ASCE07 et L'EC8 type 01 utilisé dans la majorité des cas. La limite inférieure la plus faible dans ce cas est donnée par l'EC8 type02 et l'ASCE07.

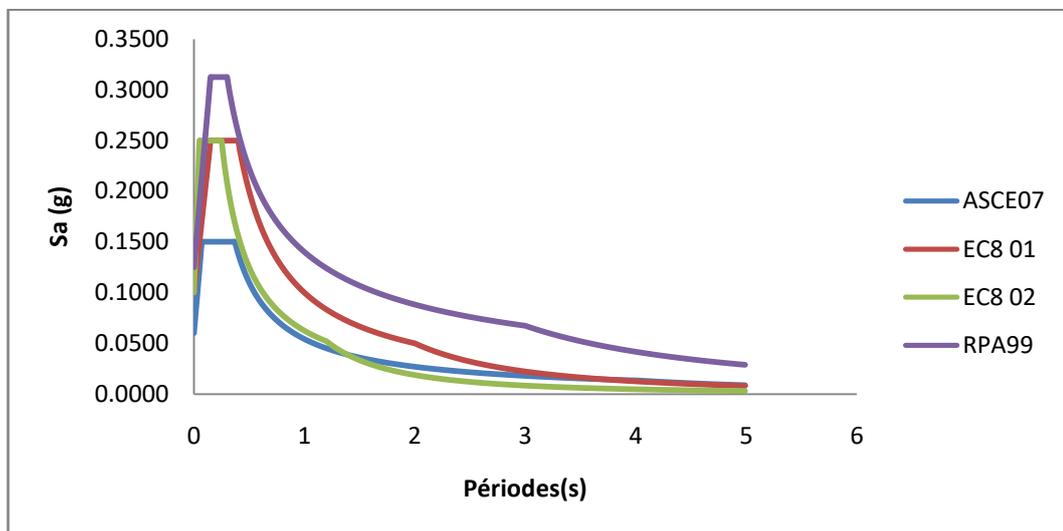


Figure 4-2. Spectres de réponse des règlements RPA, EC8 et ASCE07-16 ( $a_g = 0.1g$  - site rocheux).

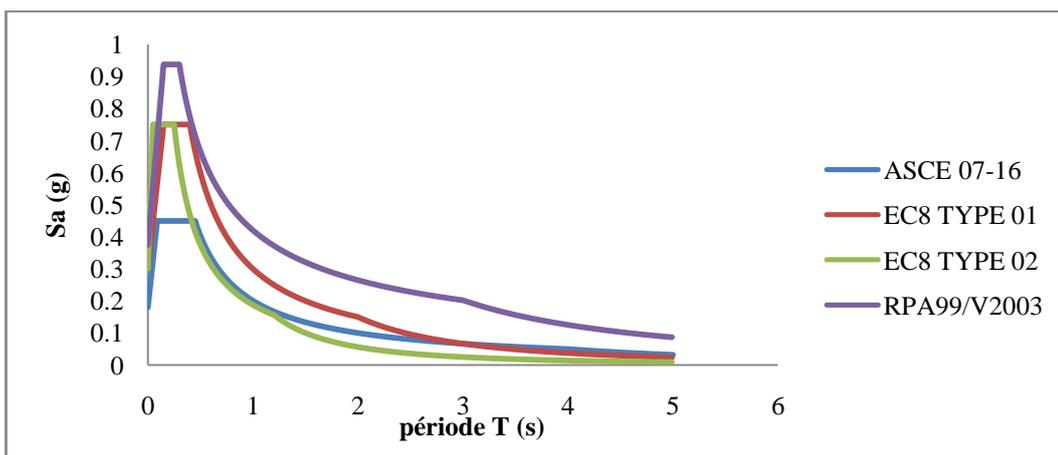


Figure 4-3. Spectres de réponse des règlements RPA, EC8 et ASCE07-16 ( $a_g = 0.3g$  - site rocheux).

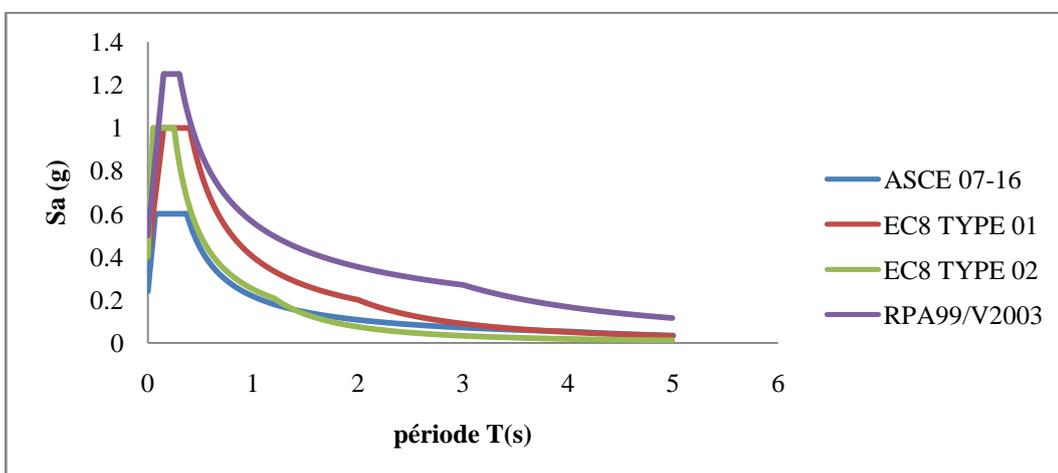


Figure 4-4. Spectres de réponse des règlements RPA, EC8 et ASCE07-16 ( $a_g = 0.4g$  - site rocheux).

Tableau 4-5. Valeurs d'accélération correspondantes aux périodes 0s;0.05s; 0.3s ; 1s et 4s (site rocheux - $a_g = 0.1g$ )

Périodes (s)	Accélérations $S_a$ (g)			
	ASCE 07-16	EC8 T 01	EC8 T 02	RPA99
0	0.0600	0.1	0.1	0.125
0.05	0.1233	0.15	0.25	0.1875

0.3	0.1500	0.25	0.20833	0.3125
1	0.0541	0.1	0.0625	0.14005
2	0.0269	0.05	0.01875	0.08822
4	0.0134	0.0125	0.00469	0.04168

Tableau 4-6. Valeurs d'accélération correspondantes aux périodes 0s;0.05s; 0.3s ; 1s et 4s (site rocheux - ag=0.3g)

Périodes (s)	Accélérations Sa (g)			
	ASCE07-16	EC8 T 01	EC8 T 02	RPA99
0	0.18	0.3	0.3	0.375
0.05	0.33188	0.45	0.75	0.5625
0.3	0.45	0.75	0.625	0.9375
1	0.20112	0.3	0.1875	0.42014
2	0.06679	0.06667	0.025	0.20198
4	0.05007	0.0375	0.01406	0.12505

Tableau 4-7. Valeurs d'accélération correspondantes aux périodes 0s;0.05s; 0.3s ; 1s et 4s (site rocheux - ag=0.4g)

Périodes (s)	Accélérations Sa (g)			
	ASCE07-16	EC8 T 01	EC8 T 02	RPA99
0	0.24	0.4	0.4	0.5
0.05	0.49312	0.6	1	0.75
0.3	0.6	1	0.83333	1.25
1	0.21646	0.4	0.25	0.56018
2	0.10744	0.2	0.075	0.35289

4	0.05353	0.05	0.01875	0.16673
---	---------	------	---------	---------

#### 4.3.2.2 Site ferme

Dans cette partie, on compare les spectres des règlements considérés dans la présente étude pour le cas du site ferme, équivalent au site S2 du RPA, site B pour l'EC8 et site C pour l'ASCE07. Toute en prenant trois valeurs d'accélération maximale au niveau de la roche  $a_g=0.1g$ ,  $a_g=0.3g$  et  $a_g=0.4g$ . La comparaison est représentée par les Figure 4-5, Figure 4-6 et Figure 4-7 ainsi que les Tableau 4-8, Tableau 4-9 et Tableau 4-10. On observe dans ce cas que :

- Pour toutes les  $a_g$  considérées, le spectre de l'RPA et celui de L'EC8 type01 sont presque similaires jusqu'à une période proche de 1s, ceci peut être expliqué par le faite que le coefficient de site associé au spectre type 01 de l'EC8 est égal à 1.2 une valeur proche du coefficient 1.25 multiplié par le spectre de l'RPA. De plus les paliers des accélérations constantes correspondantes à ces deux spectres se rapprochent. Néanmoins, pour des périodes supérieures à 1 s les accélérations spectrales de l'RPA deviennent plus importantes que celles de l'EC8 type01, ceci est dû à la différence entre les formules exprimant les spectres dans cette gamme des fréquences.
- Malgré que les coefficients de site de l'ASCE07 soient supérieures ou égales à 1.2, ce code donne toujours les plus faibles spectres jusqu'à une période de l'ordre de 3s, à partir de laquelle ces spectres rejoignent ceux de l'EC8 type 01. Ceci est attribué à la réduction de  $2/3$  du risque sismique.
- Les spectres de l'EC8 type02 donnent les valeurs les plus importantes pour la gamme des périodes courtes. Le palier des accélérations constantes est le plus court dans ce cas.

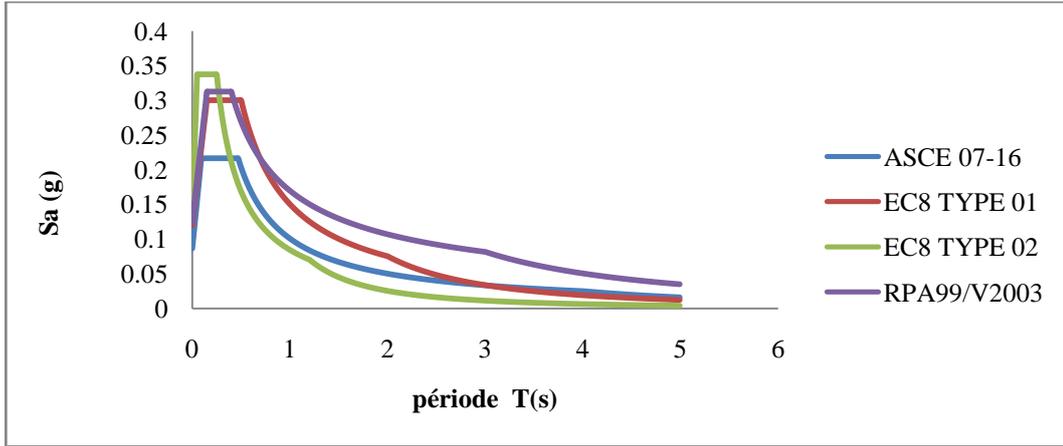


Figure 4-5. Spectres de réponse des règlements RPA, EC8 et ASCE07-16 ( $a_g = 0.1g$ - site ferme).

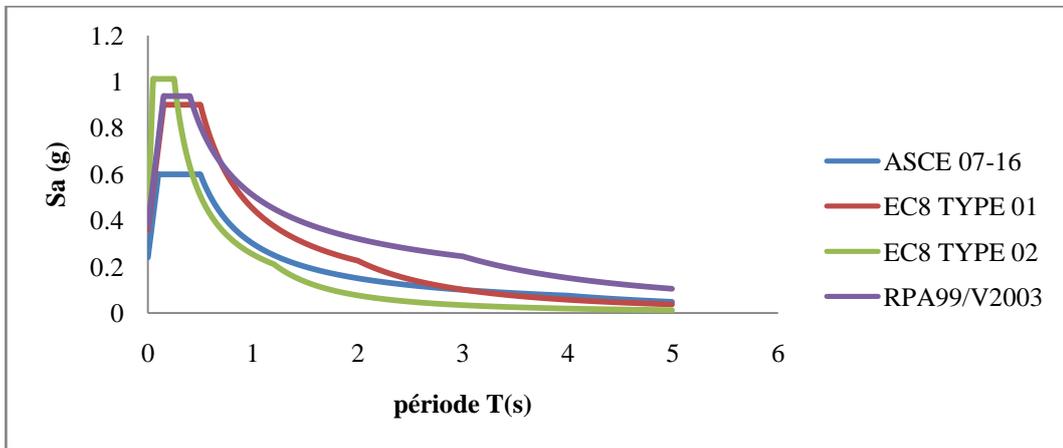


Figure 4-6. Spectres de réponse des règlements RPA, EC8 et ASCE07-16 ( $a_g = 0.3g$ - site ferme).

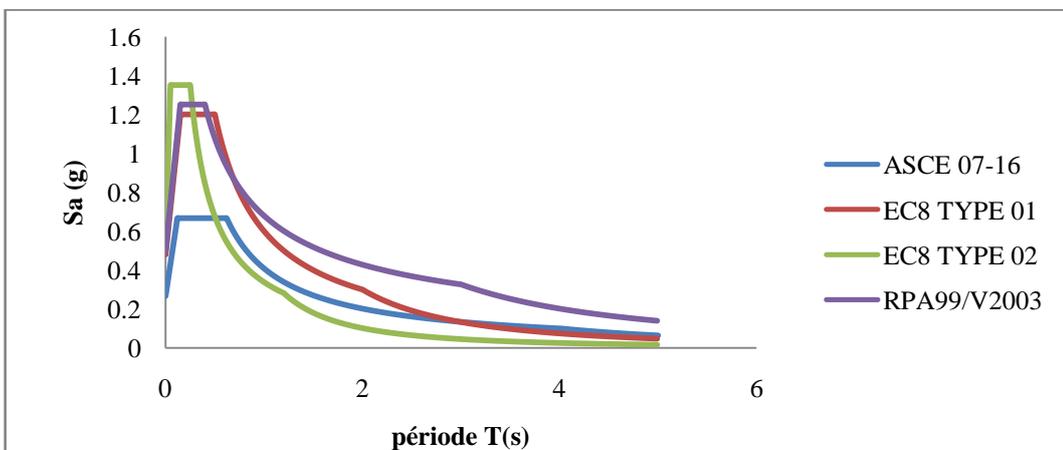


Figure 4-7. Spectres de réponse des règlements RPA, EC8 et ASCE07-16 ( $a_g = 0.4g$ - site ferme).

Tableau 4-8. Valeurs d'accélération correspondantes aux périodes 0s;0.05s; 0.3s ; 1s et 4s (site ferme - ag = 0.1g)

Périodes (s)	Accélérations Sa (g)			
	ASCE 07-16	EC8 T 01	EC8 T 02	RPA99
0	0.08667	0.12	0.135	0.125
0.05	0.15708	0.18	0.3375	0.1875
0.3	0.21667	0.3	0.28125	0.3125
1	0.10085	0.15	0.08437	0.16965
2	0.05021	0.075	0.02531	0.10687
4	0.02505	0.01875	0.00633	0.05049

Tableau 4-9. Valeurs d'accélération correspondantes aux périodes 0s;0.05s; 0.3s ; 1s et 4s (site ferme - ag = 0.3g).

Périodes (s)	Accélérations Sa (g)			
	ASCE07-16	EC8 T 01	EC8 T 02	RPA99
0	0.24	0.36	0.405	0.375
0.05	0.42	0.54	1.0125	0.5625
0.3	0.6	0.9	0.84375	0.9375
1	0.3	0.45	0.25312	0.50896
2	0.15	0.225	0.07594	0.32062
4	0.075	0.05625	0.01898	0.15148

Tableau 4-10. Valeurs d'accélération correspondantes aux périodes 0s;0.05s; 0.3s ; 1s et 4s (site ferme -  $a_g = 0.4g$ ).

Périodes (s)	Accélération $S_a$ (g)			
	ASCE07-16	EC8 T 01	EC8 T 02	RPA99
0	0.26667	0.48	0.54	0.5
0.05	0.43333	0.72	1.35	0.75
0.3	0.66667	1.2	1.125	1.25
1	0.40816	0.6	0.3375	0.67861
2	0.20202	0.3	0.10125	0.4275
4	0.1005	0.075	0.02531	0.20198

#### 4.3.2.3 Site meuble

L'étude comparative entre les spectres de réponses de l'RPA, EC8 et l'ASCE07 a été faite également pour le cas du site meuble, représenté par site 1 en RPA, site C en EC8 et site D en ASCE07. Les résultats sont illustrés par les Figure 4-8, Figure 4-9 et Figure 4-10 ainsi que par les Tableau 4-12, Tableau 4-13 et Tableau 4-14. On observe dans ce cas que:

- Dans le cas où  $a_g=0.1g$  les spectres de l'EC8 type01, l'ASCE sont du même ordre de grandeur sur tous le contenu fréquentiel. Ceci est dû à l'importance des coefficients de site dans l'ASCE dans ce cas. Le spectre de l'RPA se rapproche de ces deux spectres en donnant des valeurs un peu plus importantes.
- Dans le cas des accélérations  $a_g=0.3g$  et  $a_g=0.4g$ , on a les mêmes constatations pour les spectres de l'RPA et de l'EC8 que dans le cas de  $a_g=0.1g$ . Dans ces deux codes les caractéristiques du site ne dépendent pas de  $a_g$ . Cependant dans l'ASCE07 les coefficients de site diminuent en augmentant  $a_g$  par conséquent l'ASCE donnent des valeurs spectrales plus faibles que ceux des deux autres codes lorsque  $a_g=0.3g$  et  $a_g=0.4g$ .

- Pour la gamme des hautes fréquences, quelque soit l'accélération, le spectre de l'EC8 type02 donne les valeurs spectrales les plus importantes ceci est dû à l'importance du coefficient de site qui est égale dans ce cas à 1.5.

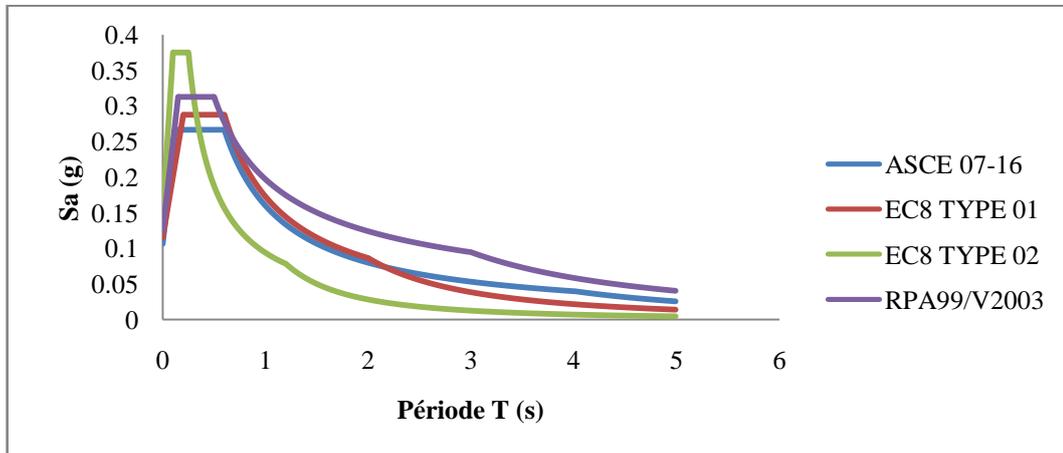


Figure 4-8. Spectres de réponse des règlements RPA, EC8 et ASCE07-16 ( $a_g = 0.1g$ - site meuble).

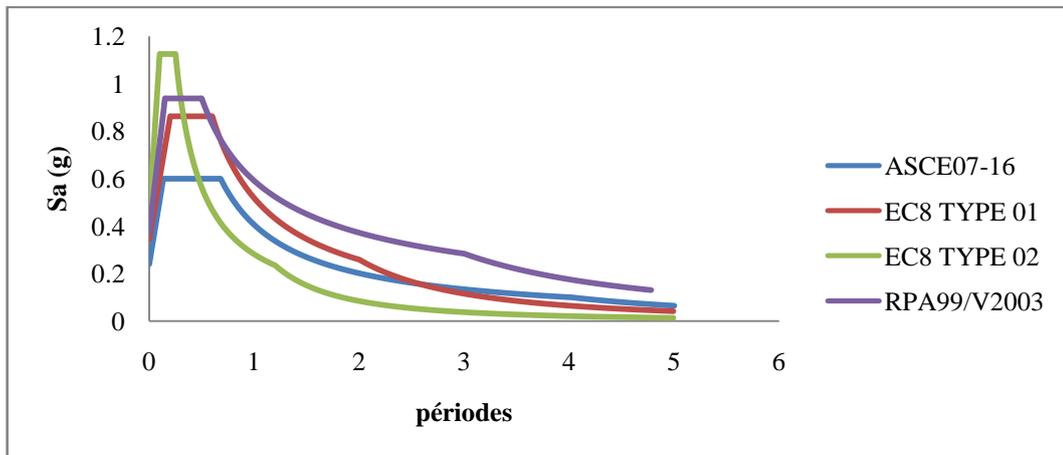


Figure 4-9. Spectres de réponse des règlements RPA, EC8 et ASCE07-16 ( $a_g = 0.3g$ - site meuble).

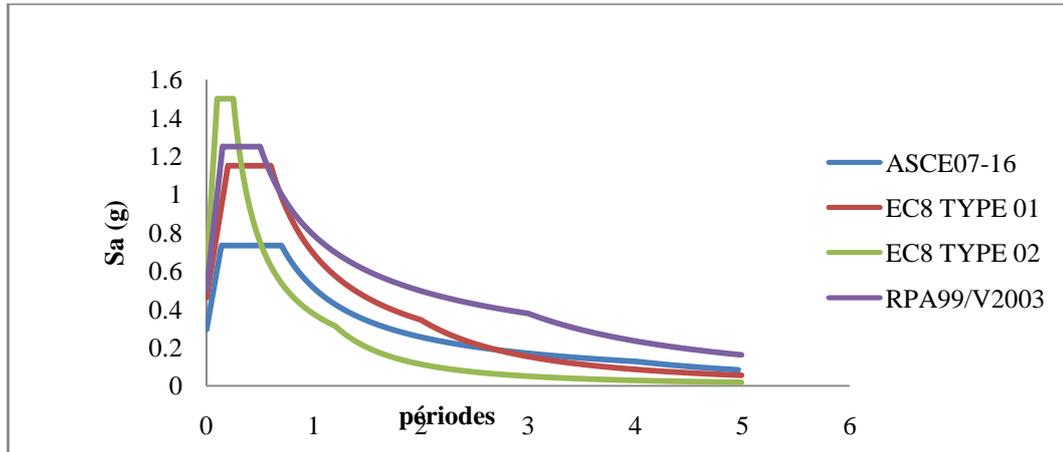


Figure 4-10. Spectres de réponse des règlements RPA, EC8 et ASCE07-16 ( $a_g = 0.4g$ - site meuble).

Tableau 4-11 Valeurs d'accélération correspondantes aux périodes 0s;0.05s; 0.3s ; 1s et 4s (site meuble -  $a_g = 0.1g$ ).

Périodes (s)	Accélérations $S_a$ (g)			
	ASCE07-16	EC8 T 01	EC8 T 02	RPA99
0	0.10667	0.115	0.15	0.125
0.05	0.17333	0.15812	0.2625	0.1875
0.3	0.26667	0.2875	0.3125	0.3125
1	0.16	0.1725	0.09375	0.19686
2	0.08	0.08625	0.02812	0.12402
4	0.04	0.02156	0.00703	0.05859

Tableau 4-12. Valeurs d'accélération correspondantes aux périodes 0s;0.05s; 0.3s ; 1s et 4s (site meuble - ag = 0.3g).

Périodes (s)	Accélérations Sa (g)			
	ASCE07-16	EC8 T 01	EC8 T 02	RPA99
0	0.24	0.345	0.45	0.375
0.05	0.375	0.47437	0.7875	0.5625
0.3	0.6	0.8625	0.9375	0.9375
1	0.4	0.5175	0.28125	0.59059
2	0.2	0.25875	0.08437	0.37205
4	0.1	0.06469	0.02109	0.17578

Tableau 4-13. Valeurs d'accélération correspondantes aux périodes 0s;0.05s; 0.3s ; 1s et 4s (site meuble - ag = 0.4g).

Périodes (s)	Accélérations Sa (g)			
	ASCE07-16	EC8 T 01	EC8 T 02	RPA99
0	0.29	0.46	0.6	0.5
0.05	0.45	0.6325	1.05	0.75
0.3	0.73333	1.15	1.25	1.25
1	0.51	0.69	0.375	0.78745
2	0.25	0.345	0.1125	0.49607
4	0.12	0.08625	0.02812	0.23438

#### 4.3.2.4 Site très meuble

Dans le cas du site très meuble les résultats de la comparaison entre les spectres du RPA, de l'EC8 et de l'ASCE07 sont résumés dans les Figure 4-11, Figure 4-12 et Figure 4-13 et dans les Tableau 4-15, Tableau 4-16 et Tableau 4-17. On déduit à partir de ces résultats que:

- Le spectre de L'ASCE07 est plus important que ceux de l'RPA et de l'EC8 type 01 dans le cas de ag=0.1g, tandis que pour les accélérations ag=0.3g et ag=0.4g les spectres de l'ASCE deviennent les plus faibles. Comme on l'a déjà

mentionné avant les coefficients de site de l'ASCE07 dépendent de  $a_g$ , ils diminuent en augmentant cette dernière.

- Les spectres de l'RPA et de l'EC8 type 01 se rapprochent, l'EC8 donne des accélérations spectrales plus importantes jusqu'à une période proche de 1.5s où les valeurs donnée par le RPA deviennent plus importantes.
- Le spectre de l'EC8 type 02 donne toujours les valeurs les plus importantes dans le cas des hautes fréquences, ce qui est dû à l'importance du coefficient de site égal à 1.8.

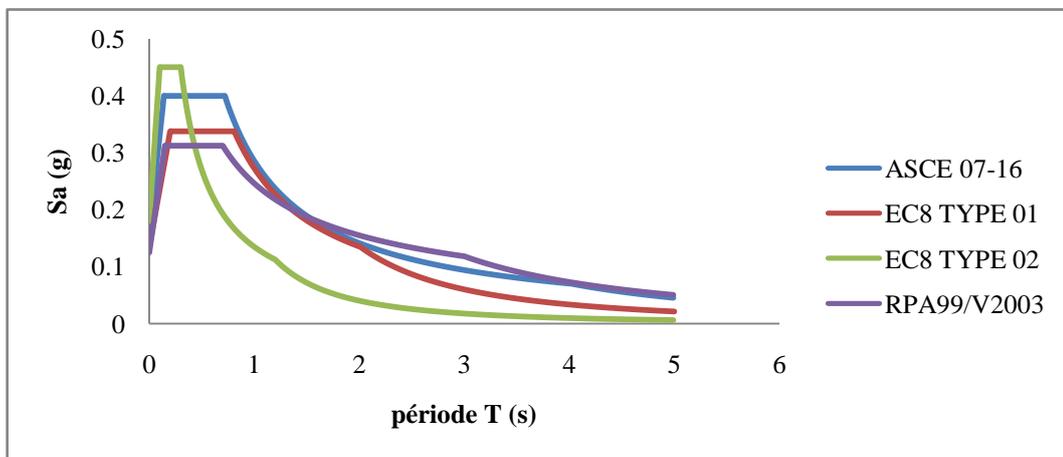


Figure 4-11. Spectres de réponse des règlements RPA, EC8 et ASCE07-16 ( $a_g = 0.1g$ - site très meuble).

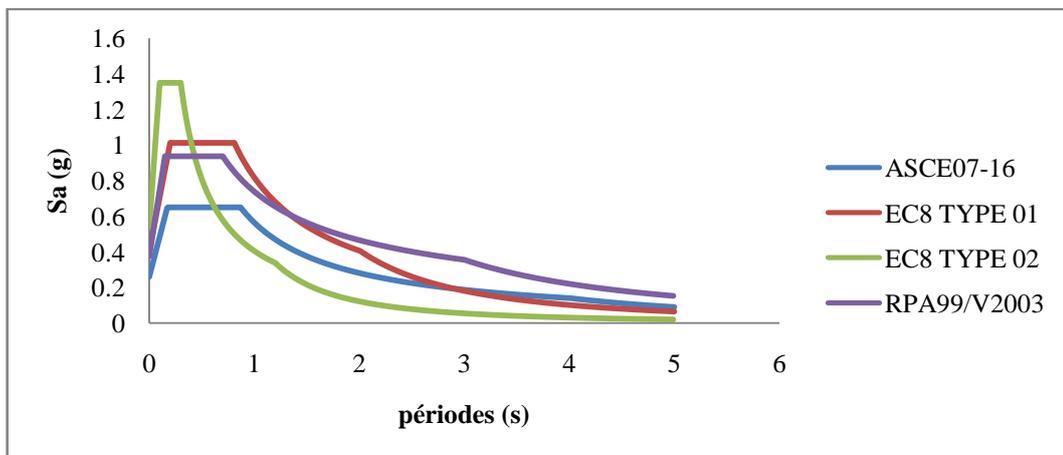


Figure 4-12. Spectres de réponse des règlements RPA, EC8 et ASCE07-16 ( $a_g = 0.3g$ - site très meuble).

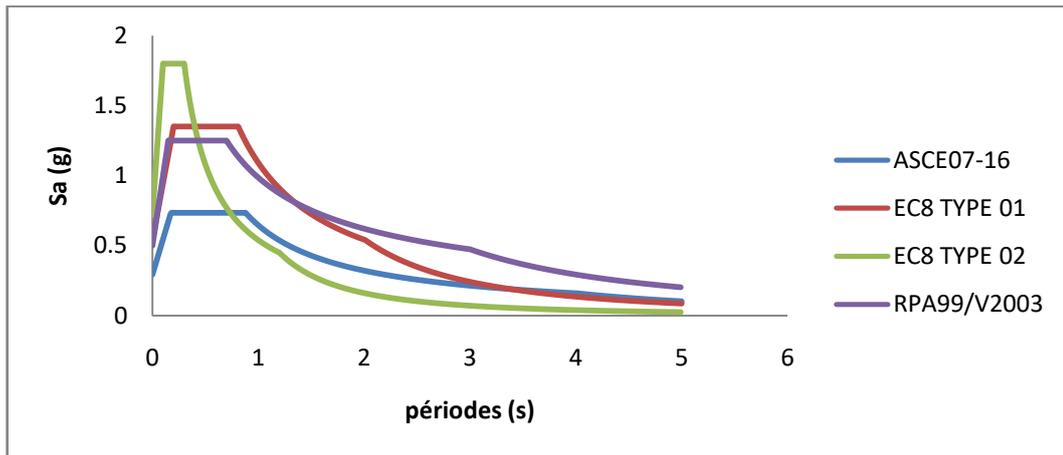


Figure 4-13. Spectres de réponse des règlements RPA, EC8 et ASCE07-16 ( $a_g = 0.4g$  - site très meuble).

Tableau 4-14. Valeurs d'accélération correspondantes aux périodes 0s;0.05s; 0.3s ; 1s et 4s (site très meuble -  $a_g = 0.1g$ ).

Périodes (s)	Accélération $S_a$ (g)			
	ASCE07-16	EC8 T 01	EC8 T 02	RPA99
0	0.16	0.135	0.18	0.125
0.05	0.24571	0.18563	0.315	0.1875
0.3	0.4	0.3375	0.45	0.3125
1	0.28571	0.27273	0.135	0.24637
2	0.14141	0.13568	0.0405	0.1552
4	0.07035	0.03392	0.01012	0.07333

Tableau 4-15. Valeurs d'accélération correspondantes aux périodes 0s;0.05s; 0.3s ; 1s et 4s (site très meuble -  $a_g = 0.3g$ )

Périodes (s)	Accélérations $S_a$ (g)			
	ASCE07-16	EC8 T 01	EC8 T 02	RPA99
0	0.26	0.405	0.54	0.375
0.05	0.37	0.55688	0.945	0.5625
0.3	0.65	1.0125	1.35	0.9375
1	0.56	0.81818	0.405	0.7391
2	0.28	0.40704	0.1215	0.46561
4	0.14	0.10176	0.03037	0.21998

Tableau 4-16. Valeurs d'accélération correspondantes aux périodes 0s;0.05s; 0.3s ; 1s et 4s (site très meuble -  $a_g = 0.4g$ ).

Périodes (s)	Accélérations $S_a$ (g)			
	ASCE07-16	EC8 T 01	EC8 T 02	RPA99
0	0.2933	0.54	0.72	0.5
0.05	0.419	0.7425	1.26	0.75
0.3	0.7333	1.35	1.8	1.25
1	0.64	1.09091	0.54	0.98547
2	0.32215	0.54271	0.162	0.62081
4	0.16054	0.13568	0.0405	0.29331

### 4.3.3 Comparaisons des accélérations spectrales maximales des codes RPA, EC8 et ASCE07 :

Les Figure 4-14, Figure 4-15 et Figure 4-16 illustrent une comparaison entre les valeurs maximales des accélérations spectrales calculées par le RPA, L'EC8 et l'ASCE07 en considérant les sites rocheux, ferme, meuble et très meuble, qui sont définies de la même manière que la section précédente, et en variant le niveau du risque sismique par la variation de l'accélération maximale au niveau de la roche. On considère les valeurs  $a_g=0.1g$ ,  $0.3g$  et  $0.4g$ . A partir de ces figures on peut constater que:

- Dans le cas du site rocheux le RPA donne toujours une accélération plus importante que celle estimée par l'EC8 et l'ASCE07. Ceci est dû au coefficient 1.25 multiplié par le spectre de l'RPA qui est supérieure à celui de l'EC8, égal à 1 et de l'ASCE égale à 0.9.
- Pour les sites ferme, meuble et très meuble le RPA et l'EC8 type01 donne des valeurs maximales d'accélérations proches. Dans ces cas les coefficients de site sont égaux à 1.2, 1.15 et 1.35. Leur moyenne est proche de 1.25.
- L'accélération maximale de l'ASCE07 dépend de  $a_g$ . Ce code donne les valeurs maximales les plus faibles dans tous les cas à l'exception du cas de site très meubles avec  $a_g=0.1g$  où l'accélération maximale est supérieure à celles de l'EC8 type01 et de l'RPA. On note aussi que dans le cas du site meuble avec  $a_g=0.1g$  l'accélération maximale de l'ASCE se rapprochent à celles de l'EC8 et de l'RPA.
- Les accélérations maximales de l'RPA sont constantes pour chacune des valeurs de  $a_g$ . C'est à dire elles sont indépendantes du site contrairement aux autres codes.
- Le spectre de l'EC08 type 02 donne les accélérations les plus importantes dans tous les cas puisque qu'il est destiné au tremblement de terre en champ proche.

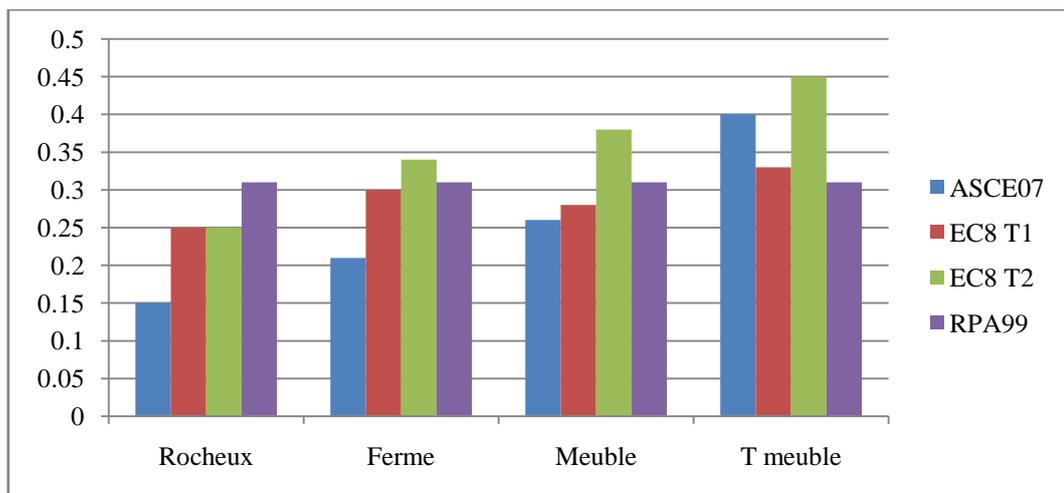


Figure 4-14. Les accélérations maximales pour  $a_g = 0.1g$ .

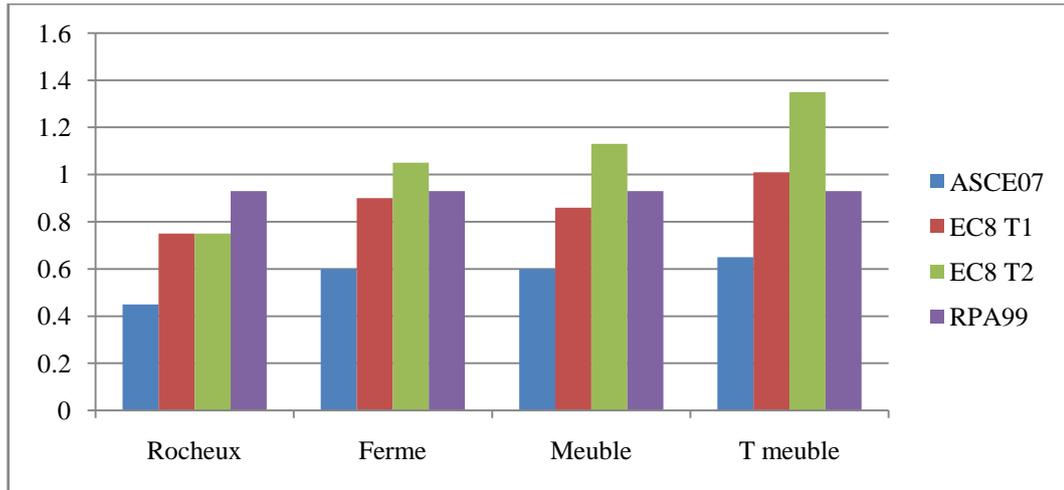


Figure 4-15. Les accélérations maximales pour  $a_g = 0.3g$ .

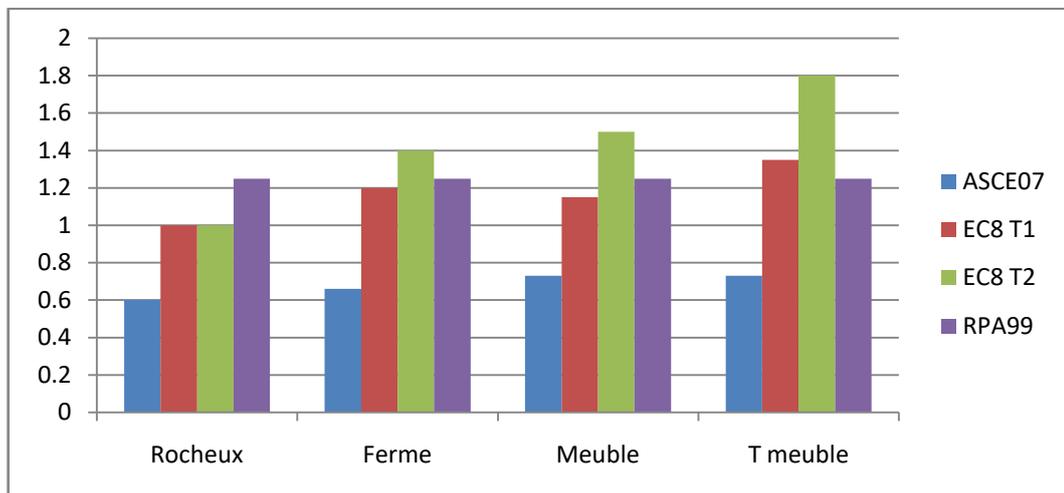


Figure 4-16. Les accélérations maximales pour  $a_g = 0.4g$ .

#### 4.4 Analyse de la différence entre les spectres de l'RPA et ceux de l'EC8 et l'ASCE07

L'objectif de cette partie est d'analyser quantitativement les différences entre les spectres de réponse de l'RPA, l'EC8 et l'ASCE07 pour différentes périodes, courtes et longues. On a calculé donc les rapports entre les accélérations spectrales de l'EC8 et l'ASCE07 et celles de l'RPA. Les rapports calculés sont présentés par les Tableaux 4-17 à Tableau 4-28, ainsi que par les Figure 4-17 à Figure 4-28. Les résultats trouvés confirment les observations faites avant. En plus de quelques détails résumés par les points suivants:

- Pour une période courte de 0.05 le rapport RPA/EC8 02 varie entre 0.55 et 0.75, le rapport RPA/EC8 01 est égal à 1.25 pour un site rocheux et varie entre 1.01 et 1.18 pour les autres sites. Tandis que pour le rapport RPA/ASCE on note qu'il varie de 1.08 à 1.78 à l'exception du cas de site très meuble avec  $a_g=0.1g$  où il est égal à 0.78.
- Pour une période de 0.3s le rapport RPA/EC8 02 est supérieur à 1 avec un maximum de 1.52 à l'exception du cas du site très meuble où ce rapport est égal à 0.69. Tandis que le rapport RPA/EC8 01 prend des valeurs autour de 1 à l'exception du site rocheux où il est de 1.25. Et pour le rapport RPA/ASCE on remarque qu'il varie entre 1.17 et 2.08 à l'exception du site très meuble où il vaut 0.78.
- Pour une période égale à 1s les rapports sont supérieurs à 1 sauf dans le cas du site très meuble pour le rapport RPA/EC8 01 et le cas du site très meuble et  $a_g=0.1g$  pour le rapport RPA/ASCE où ils sont inférieurs à 1.
- Pour les longues périodes supérieures à 2s les rapports sont tous supérieurs à 1.

Tableau 4-17. Comparaison des rapports pour  $a_g = 0.1g$  et un site rocheux.

Rapport	Périodes (s)					
	0 s	0.05 s	0.3 s	1 s	2 s	4 s
<b>RPA/EC8 02</b>	1.25	0.75	1.500024	2.2408	4.705067	8.886994
<b>RPA/EC8 01</b>	1.25	1.25	1.25	1.4005	1.7644	3.3344
<b>RPA/ASCE</b>	2.083333	1.520928	2.083333	2.588246	3.284438	3.115097

Tableau 4-18. Comparaison des rapports pour  $a_g = 0.1g$  et un site ferme.

<b>Rapport</b>	<b>Périodes (s)</b>					
	0	0.05	0.3	1	2	4
<b>RPA/EC8 02</b>	0.925926	0.555556	1.111111	2.010786	4.222442	7.976303
<b>RPA/EC8 01</b>	1.041667	1.041667	1.041667	1.131	1.424933	2.6928
<b>RPA/ASCE</b>	1.442252	1.193659	1.442286	1.682201	2.12846	2.015569

Tableau 4-19. Comparaison des rapports pour  $a_g = 0.1g$  et un site meuble.

<b>Rapport</b>	<b>Périodes (s)</b>					
	0	0.05	0.3	1	2	4
<b>RPA/EC8 02</b>	0.833333	0.714286	1	2.09984	4.410384	8.334282
<b>RPA/EC8 01</b>	1.086957	1.185808	1.086957	1.141217	1.437913	2.717532
<b>RPA/ASCE</b>	1.171838	1.081752	1.17186	1.230375	1.55025	1.46475

Tableau 4-20. Comparaison des rapports pour  $a_g = 0.1g$  et un site très meuble.

<b>Rapport</b>	<b>Périodes (s)</b>					
	0	0.05	0.3	1	2	4
<b>RPA/EC8 02</b>	0.694444	0.595238	0.694444	1.824963	3.832099	7.246047
<b>RPA/EC8 01</b>	0.925926	1.010074	0.925926	0.903348	1.143868	2.161851
<b>RPA/ASCE</b>	0.78125	0.763095	0.78125	0.862308	1.097518	1.04236

Tableau 4-21. Comparaison des rapports pour  $a_g = 0.3g$  et un site rocheux.

Rapport	Périodes (s)					
	0	0.05	0.3	1	2	4
<b>RPA/EC8 02</b>	1.25	0.75	1.5	2.240747	8.0792	8.894026
<b>RPA/EC8 01</b>	1.25	1.25	1.25	1.400467	3.029549	3.334667
<b>RPA/ASCE</b>	2.083333	1.69489	2.083333	2.089002	3.024105	2.497503

Tableau 4-22. Comparaison des rapports pour  $a_g = 0.3g$  et un site ferme.

Rapport	Périodes (s)					
	0	0.05	0.3	1	2	4
<b>RPA/EC8 02</b>	0.925926	0.555556	1.111111	2.010746	4.222017	7.981033
<b>RPA/EC8 01</b>	1.041667	1.041667	1.041667	1.131022	1.424978	2.692978
<b>RPA/ASCE</b>	1.5625	1.339286	1.5625	1.696533	2.137467	2.019733

Tableau 4-23. Comparaison des rapports pour  $a_g = 0.3g$  et un site meuble.

Rapport	Périodes (s)					
	0	0.05	0.3	1	2	4
<b>RPA/EC8 02</b>	0.833333	0.714286	1	2.099876	4.409743	8.334756
<b>RPA/EC8 01</b>	1.086957	1.185783	1.086957	1.141237	1.437874	2.717267
<b>RPA/ASCE</b>	1.5625	1.5	1.5625	1.476475	1.86025	1.7578

Tableau 4-24. Comparaison des rapports pour  $a_g = 0.3$  et un site très meuble.

Rapport	Périodes (s)					
	0 s	0.05 s	0.3 s	1 s	2 s	4 s
<b>RPA/EC8 02</b>	0.694444	0.595238	0.694444	1.824938	3.832181	7.243332
<b>RPA/EC8 01</b>	0.925926	1.010092	0.925926	0.903346	1.143892	2.161753
<b>RPA/ASCE</b>	1.442308	1.52027	1.442308	1.319821	1.662893	1.571286

Tableau 4-25.Comparaison des rapports pour  $ag = 0.4g$   
et un site rocheux.

<b>Rapport</b>	<b>Périodes (s)</b>					
	0 s	0.05 s	0.3 s	1 s	2 s	4 s
<b>RPA/EC8 02</b>	1.25	0.75	1.500006	2.24072	4.7052	8.892267
<b>RPA/EC8 01</b>	1.25	1.25	1.25	1.40045	1.76445	3.3346
<b>RPA/ASCE</b>	2.083333	1.520928	2.083333	2.587915	3.284531	3.114702

Tableau 4-26.Comparaison des rapports pour  $ag = 0.4g$   
et un site ferme.

<b>Le rapport</b>	<b>Périodes (s)</b>					
	0 s	0.05 s	0.3 s	1 s	2 s	4 s
<b>RPA/EC8 02</b>	0.925926	0.555556	1.111111	2.010696	4.222222	7.980245
<b>RPA/EC8 01</b>	1.041667	1.041667	1.041667	1.131017	1.425	2.693067
<b>RPA/ASCE</b>	1.874977	1.730783	1.874991	1.662608	2.116127	2.009751

Tableau 4-27.Comparaison des rapports pour  $ag = 0.4g$   
et un site meuble.

<b>Le rapport</b>	<b>Périodes (s)</b>					
	0 s	0.05 s	0.3 s	1 s	2 s	4 s
<b>RPA/EC8 02</b>	0.833333	0.714286	1	2.099867	4.409511	8.334993
<b>RPA/EC8 01</b>	1.086957	1.185771	1.086957	1.141232	1.437884	2.717449
<b>RPA/ASCE</b>	1.724138	1.666667	1.704553	1.54402	1.98428	1.953167

Tableau 4-28.Comparaison des rapports pour  $ag = 0.4g$   
et un site très meuble.

<b>Le rapport</b>	<b>Périodes (s)</b>					
	0 s	0.05 s	0.3 s	1 s	2 s	4 s
<b>RPA/EC8 02</b>	0.694444	0.595238	0.694444	1.824944	3.83216	7.242222
<b>RPA/EC8 01</b>	0.925926	1.010101	0.925926	0.903347	1.143907	2.161778
<b>RPA/ASCE</b>	1.724138	1.789976	1.704623	1.539797	1.927084	1.827021

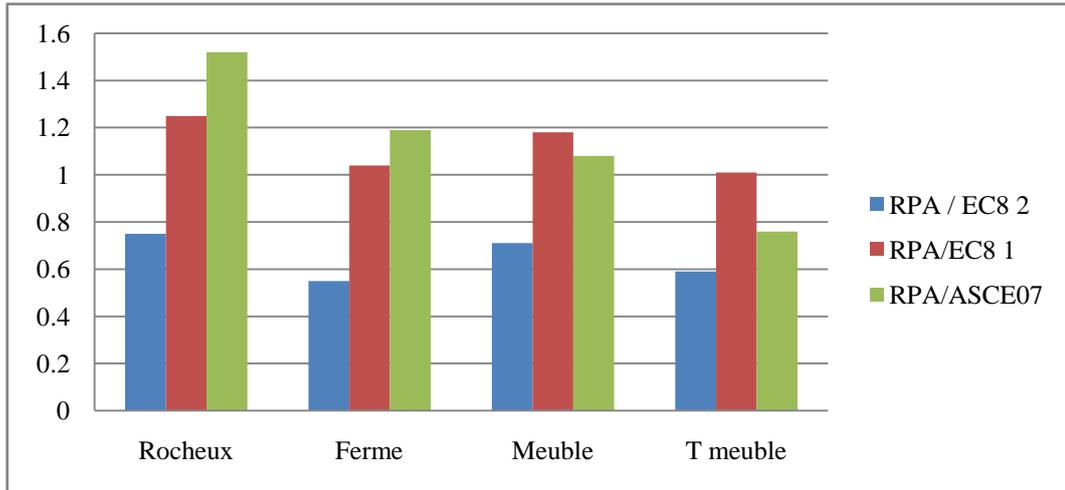


Figure 4-17. Variation des rapports pour  $a_g=0.1 \text{ g}$  et  $T=0.05 \text{ s}$ .

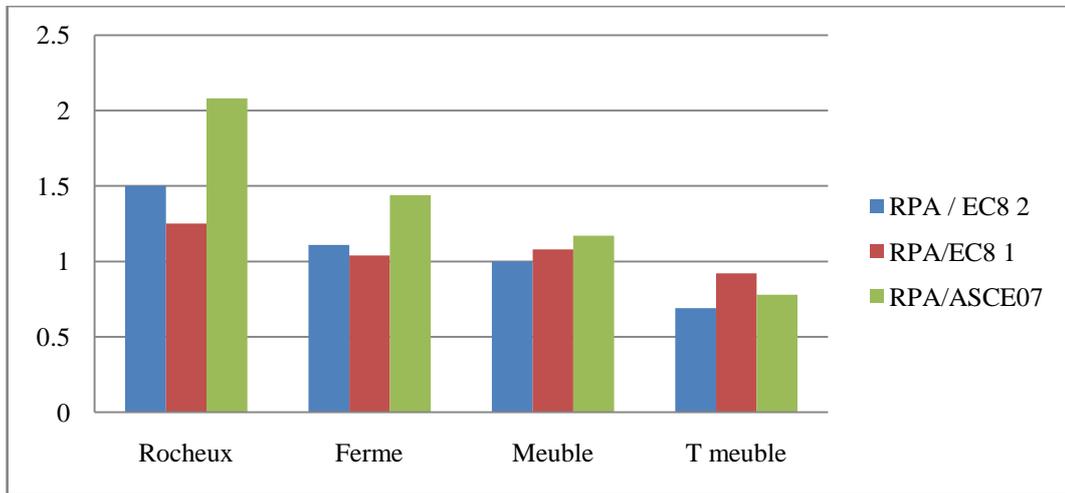


Figure 4-18. Variation des rapports pour  $a_g=0.1 \text{ g}$  et  $T=0.3 \text{ s}$ .

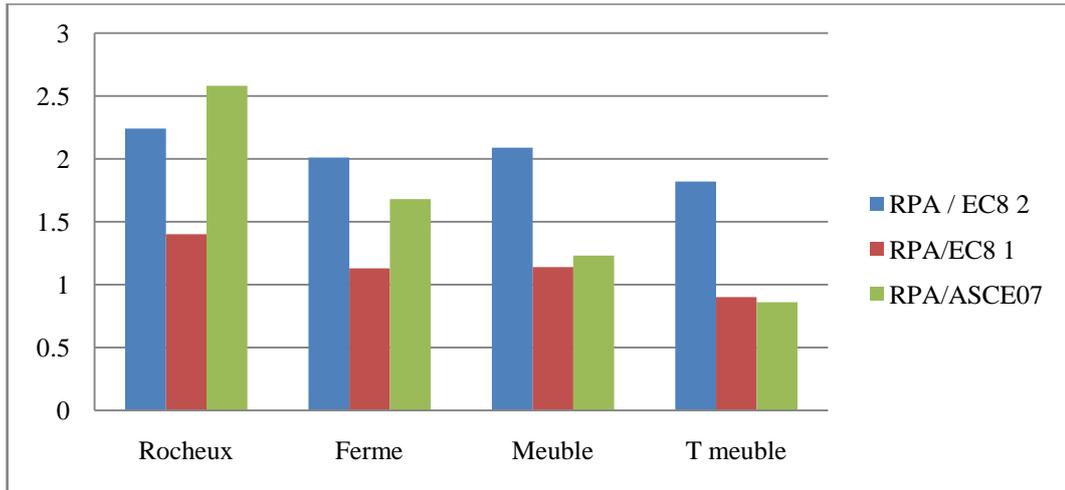


Figure 4-19. Variation des rapports pour  $a_g=0.1$  g et  $T=1$  s.

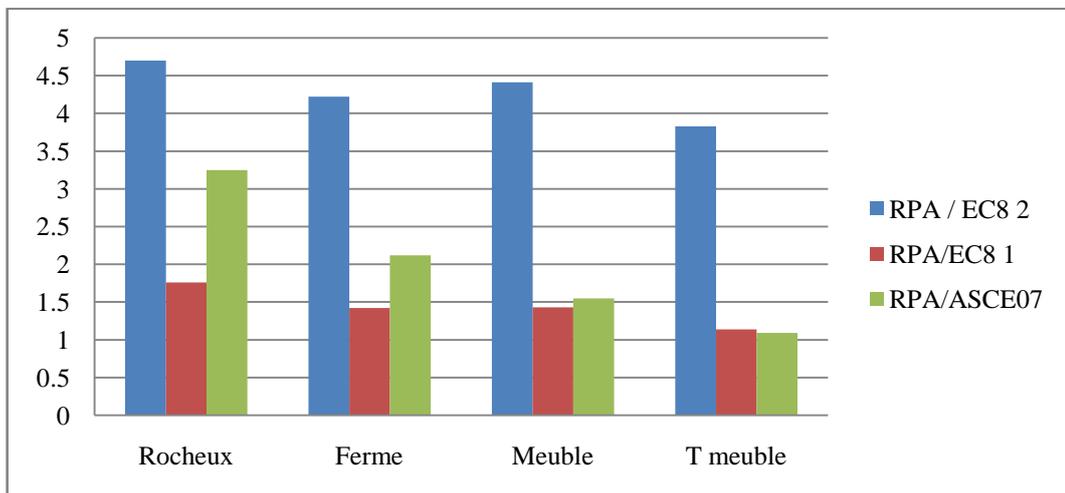


Figure 4-20. Variation des rapports pour  $a_g=0.1$  g et  $T=2$  s.

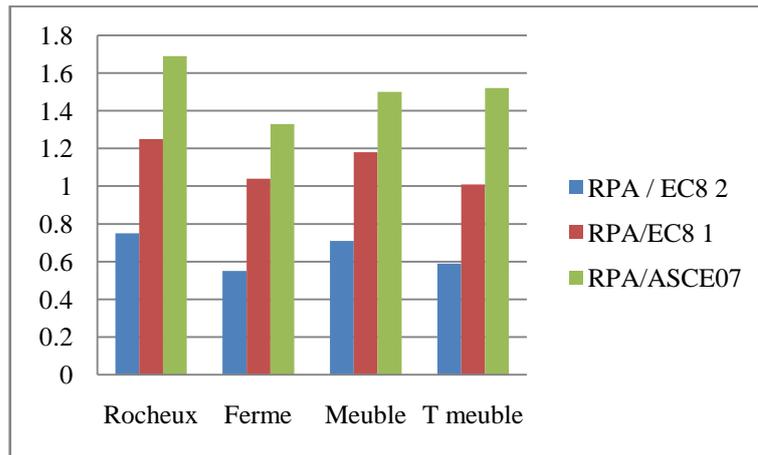


Figure 4-21. Variation des rapports pour  $a_g=0.3$  g et  $T=0.05$  s.

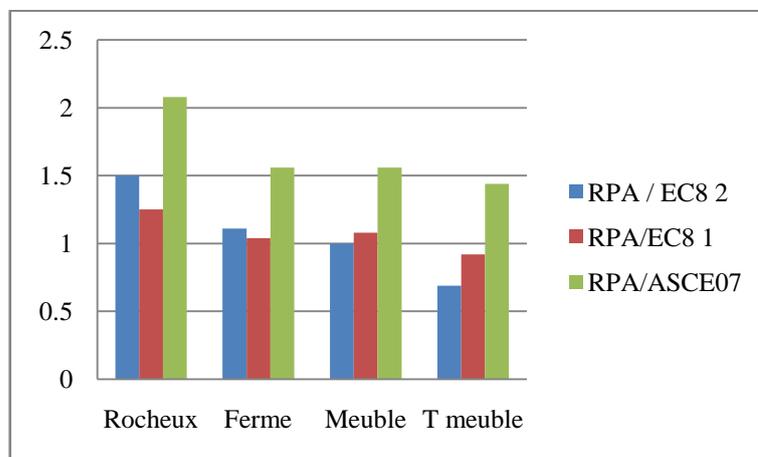


Figure 4-22. Variation des rapports pour  $a_g=0.3$  g et  $T=0.3$  s.

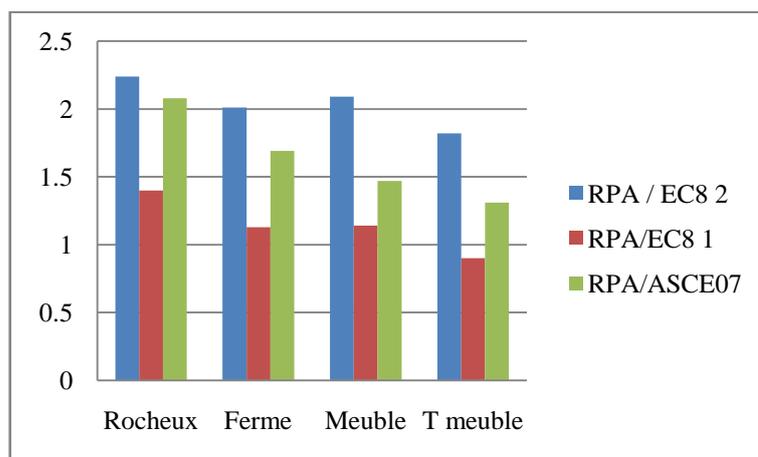


Figure 4-23. Variation des rapports pour  $a_g=0.3$  g et  $T=1$  s.

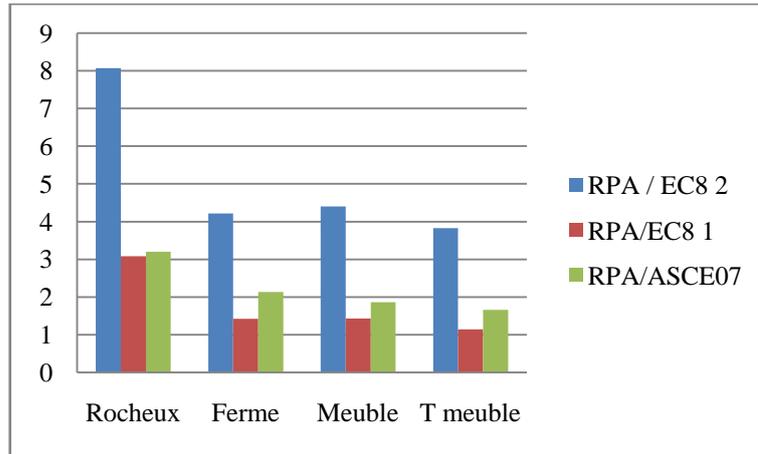


Figure 4-24. Variation des rapports pour  $a_g=0.3$  g et  $T=2$  s.

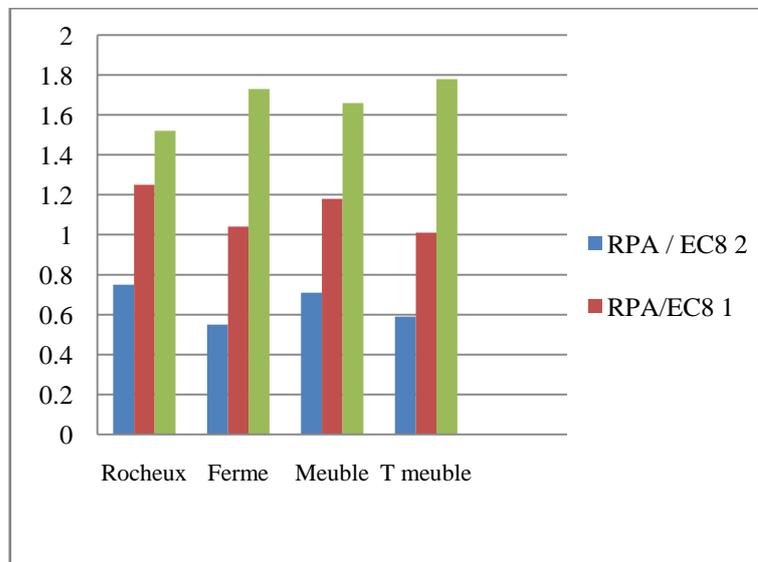


Figure 4-25. Variation des rapports pour  $a_g=0.4$  g et  $T=0.05$  s.

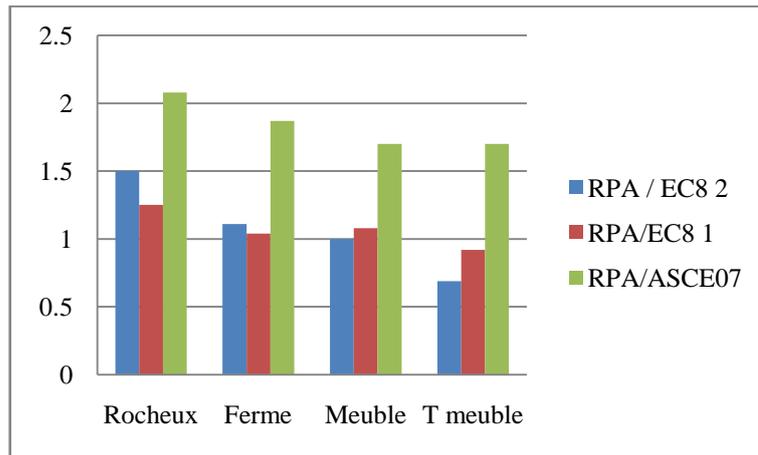


Figure 4-26. Variation des rapports pour  $a_g=0.4g$  et  $T=0.3 s$ .

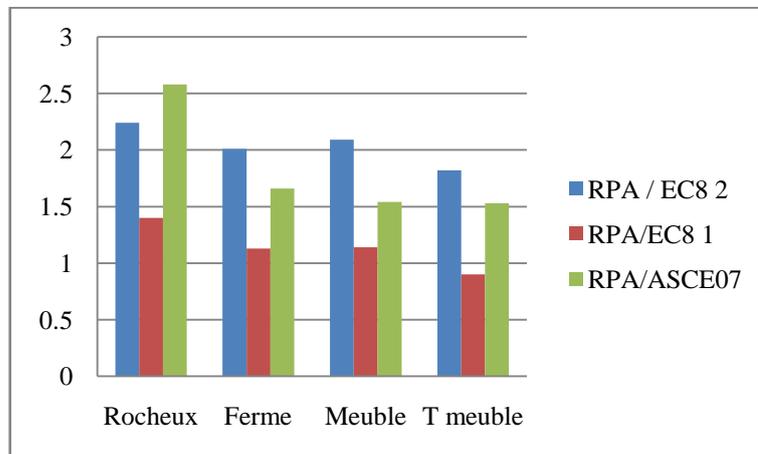


Figure 4-27. Variation des rapports pour  $a_g=0.4 g$  et  $T=1 s$ .

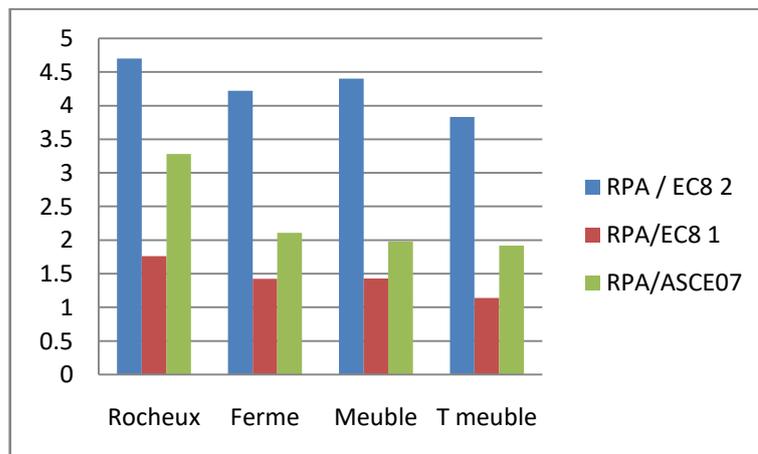


Figure 4-28. Variation des rapports pour  $a_g=0.4 g$  et  $T=2s$ .

## 4.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons procédé à une comparaison entre les spectres de réponse des règles sismiques pour chacun des codes, RPA99/V2003, EUROCODE 8 type 01 et 02, et l'ASCE07-16. Après analyse des résultats obtenus dans ce chapitre, nous pouvons noter que les codes européen et américain spécifient un coefficient caractérisant la nature du sol contrairement au code algérien.

Nous avons également remarqué que pour le code européen, le coefficient de sol change d'un type de sol à un autre. Ce code spécifie deux types de spectre type01 et type02. Le type01 correspond aux fortes magnitudes en champs lointaine et le type02 correspond à des magnitudes plus faibles en champs proches. La raison pour laquelle l'accélération maximale au type02 était supérieure à l'accélération maximale au type01. Ceci est dû au coefficient de site qui est plus grand pour le type 02. Les périodes caractéristiques du site T1 et T2 étaient plus faibles pour le type 2 que pour le type 1.

Le code américain est plus précis que ses homologues européen et algérien car l'American Géologique Institute a fourni des paramètres importants pour les spectres de séismes, incluant  $F_v$  et  $F_a$ , deux coefficients représentant l'effet de site en courte période (0.2s) et à 1s. Ces coefficients dépendent de la nature du sol et changent en fonction des accélérations mesurées pour chaque zone. Concernant les périodes caractérisant le palier des accélérations constantes elles ne sont pas fixes comme pour les autres codes, les périodes varient en fonction des accélérations  $S_{d1}$  et  $S_{d2}$ . Selon l'ASCE07 le risque sismique est réduit de 2/3 ce qui a conduit à des faibles valeurs des spectres par rapport aux autres codes à l'exception du site très meuble avec  $a_g=0.1g$ .

Suivant le code algérien, le palier des accélérations constantes est représenté par  $T1 = 0.15$  s dans tous les cas et  $T2$  qui varie en fonction du site. Ce code a la même accélération maximale quel que soit le site. L'amplification dû au site est caractérisée par un coefficient constant égal à 1.25 multiplié par les spectres de réponses. Ce coefficient est voisin des coefficients de site associant aux spectres type 01 de l'EC8 dans les cas des sites ferme, meuble et très meuble. Dans ces cas les spectres du RPA se rapprochent à ceux de l'EC8 type01. En revanche dans le cas du site rocheux

l'amplification de 1.25 des spectres du RPA conduit à des valeurs spectrales importantes.

## **Chapitre 5**

# **ETUDE COMPARATIVE DE L'EFFET DE SITE SUR LA REPONSE SISMIQUE REGLEMENTAIRE DES BATIMENTS**

### **5.1 Introduction**

L'étude sismique de la structure vise à garantir que le bâtiment est protégé des effets des tremblements de terre par une conception et une taille appropriées, tout en satisfaisant les trois aspects fondamentaux de la conception: résistance, construction et économie. Sur la base de l'observation des lois et règlements antisismiques, cet objectif ne peut être atteint que par des calculs appropriés. Dans ce chapitre, nous comparons la réponse sismique obtenus par le RPA avec celles calculée par les méthodes de calcul dynamique établies par EC8 et ASCE07-16, on s'intéresse particulièrement à l'effet de site. Deux bâtiments en béton armé de hauteurs différentes ont été choisis pour cette étude. Pour atteindre nos objectifs, nous utiliserons les logiciels SAP2000 et Etabs 17.

### **5.2 Caractéristiques des bâtiments étudiés**

Pour cette étude, nous avons choisi deux ouvrages en béton armé, le premier est un bâtiment R+12 avec 2 sous-sols à usage de bureaux appelé modèle 1 et le second est un R+4 à usage d'habitation nommé modèle 2. Ces bâtiments sont implantés à Tlemcen, classé selon le RPA99/2003 comme zone à faible sismicité (Zone I).La

structure du premier modèle est composée d'un contreventement mixte (voiles-portiques), et celle du modèle 2 est composée de portiques autostables (poteaux - poutre). Ces modèles sont classés réguliers selon les conditions du RPA99/2003.

Les caractéristiques géométriques des deux ouvrages sont réunies dans le Tableau 5-1. :

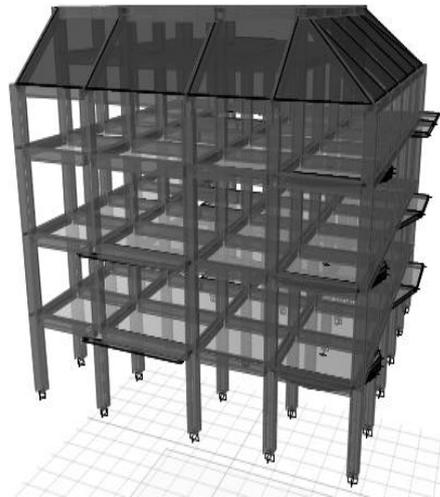
Tableau 5-1. Caractéristiques géométriques des ouvrages étudiés.

	<b>Ouvrage 1 (R+12 + 2 avec sous-sol)</b>	<b>Ouvrage 2 (R+4)</b>
Hauteur totale (m)	45.9	13
Hauteur du RDC (m)	4.08	3.06
Hauteur d'étage (m)	3.06	3.06
Longueur du bâtiment dans le sens x Dx(m)	27.15	14.8
Longueur du bâtiment dans le sens y Dy(m)	18.8	16.4

Les bâtiments ont été modélisés à l'aide du logiciel SAP2000 et ETABS 17 où les poteaux et les poutres sont modélisés avec des éléments poutres (frame), et les voiles en éléments plaque (shell). Les planchers sont considérés comme des diaphragmes rigides, et les masses sont concentrées au nœud maître de chaque niveau et les nœuds de la base sont fixes (base encastree). Les modèles établis sont représentés par la Figure 5-1.



(a) Modèle 1



(b) Modèle 2

Figure 5-1. Vue en 3D des modèles éléments finis des bâtiments considérés.

### 5.3 Analyse dynamique modale

Après leur modélisation, les structures ont été soumises à une analyse dynamique modale pour vérifier les périodes propres et les pourcentages de participation modale, les résultats de cette analyse sont réunis dans le Tableau 5-2. et le Tableau 5-3.

Tableau 5-2.Résultats de 1<sup>ère</sup> modèle.

Mode	Période	Masse modale (%)			Cumul des masses modales (%)		
		Ux	Uy	Uz	Ux	Uy	Uz
1	1.340771	0.62209	0.00119	0.000002559	0.62209	0.00119	0.00000255
2	0.795538	0.00166	0.57894	3.827E-07	0.62375	0.58013	0.00000294
3	0.612076	0.00217	0.00154	3.733E-07	0.62592	0.58167	0.00000331
4	0.373528	0.13141	0.0003	0.00003342	0.75732	0.58197	0.00003673
5	0.18935	0.00074	0.21032	0.00034	0.75807	0.79229	0.00038
6	0.176536	0.04928	0.0013	0.00008621	0.80735	0.79358	0.00046
7	0.150648	0.000007505	0.00039	0.15842	0.80736	0.79397	0.15888
8	0.147258	0.00037	0.0003	0.01138	0.80772	0.79427	0.17026
9	0.142406	0.00002556	0.00001393	0.00005574	0.80775	0.79429	0.17032
10	0.139728	4.995E-07	0.00048	0.25264	0.80775	0.79477	0.42296
11	0.137981	0.00017	0.000004368	0.01038	0.80791	0.79478	0.43334
12	0.126876	0.000003091	0.00006772	0.00351	0.80792	0.79485	0.43685

A travers l'analyse des vibrations des bâtiments étudiés. On remarque pour les deux ouvrages, un mode de translation suivant le sens X, et on constate que le deuxième mode est aussi un mode de translation selon le sens Y.

Tableau 5-3. Résultats du 2<sup>ème</sup> modèle R+4.

Mode	Période	Masse modale			Cumul des masses modales		
		(%)			(%)		
		Ux	Uy	Uz	Ux	Uy	Uz
1	0.568	0.8164	0.0004	0.000002559	0.8164	0.0004	0.000002559
2	0.524	0.0004	0.7829	1. 67E-07	0.8168	0.7833	1. 67E-07
3	0.482	0.000006396	0.0414	2.13E-09	0.8169	0.8247	2.13E-09
4	0.155	0.1207	0.0009	0.00001568	0.9375	0.8256	0.00001568
5	0.146	0.0008	0.1175	0.00045	0.9383	0.9432	0.00045
6	0.133	0.0016	0.0006	0.0000785	0.9399	0.9437	0.0000785
7	0.077	0.0439	0.001	0.25647	0.9838	0.9448	0.25647
8	0.074	0.0009	0.0422	0.0558	0.9847	0.9869	0.0558
9	0.067	0.0009	0.0001	0.00004585	0.9856	0.987	0.00004585
10	0.052	0.0078	0.0044	0.02468	0.9934	0.9914	0.02468
11	0.052	0.0061	0.0056	0.00578	0.9995	0.997	0.00578
12	0.05	0.0001	0.0021	0.0044	0.9996	0.9991	0.0044

## 5.4 Etude comparative des réponses sismiques réglementaires

Les bâtiments modélisés précédemment, ont été soumis aux différents cas de chargements sismiques déterminés par les spectres de réponse calculés dans le chapitre 4 selon le RPA, l'EC8 et l'ASCE07. En considérant quatre types de site: rocheux, ferme, meuble et très meuble. Et trois valeurs d'accélération maximales au niveau de la roche:  $a_g=0.1g$ ,  $0.3g$  et  $0.4g$ . Nous avons tiré pour chaque cas les efforts tranchants maximaux à la base. On note qu' en utilisant la méthode de superposition modale spectrale, 48 analyses dynamiques à été faites pour chacun des deux modèles considérés et dans les deux directions.

## 5.4.1 Etude comparative du modèle 1

Les efforts tranchants maximaux à la base obtenus dans les deux directions du modèle1 sont donnés par le Tableau 5-4 et les Figure 5-4etFigure 5-11. A travers ces résultats on observe les points suivants:

Tableau 5-4.Efforts tranchant à la base suivant les deux directions Fy et Fx pour le modèle1.

		RPA 99 v 2003		EC8 Type 1		EC8 Type2		ASCE16	
		FX KN	FY KN	FX KN	FY KN	FX KN	FY KN	FX KN	FY KN
<b>Site rocheux</b>									
0.1g	EX1	6955.01	570.90	4980.46	435.94	3105.65	311.66	2790.07	243.99
	EY1	567.16	9829.56	432.97	7672.34	309.11	5960.70	242.31	4325.79
0.3g	EX1	20869.44	1712.70	14941.03	1307.82	9317.00	934.98	9630.35	850.80
	EY1	1701.48	29486.88	132.41	23586.36	927.34	17882.43	845.00	14898.67
0.4g	EX1	27823.35	2283.60	19921.52	1743.77	12422.66	1246.66	11165.86	975.92
	EY1	2268.65	39317.10	176.54	33128.39	1236.46	23843.45	969.21	17300.32
<b>Site ferme</b>									
0.1g	EX1	8304.25	668.54	6953.35	617.71	4192.67	420.74	4765.61	422.53
	EY1	664.36	11257.93	613.51	10758.95	417.30	8047.11	419.65	7386.91
0.3g	EX1	24908.40	2005.50	20860.04	1853.13	12577.64	1262.23	13906.71	1235.43
	EY1	1992.95	33773.34	1840.54	32277.05	1251.91	24141.48	1227.03	21518.17
0.4g	EX1	33213.37	2673.99	27813.38	2470.84	16770.28	1682.98	17960.14	1624.08
	EY1	2657.26	45029.91	2454.05	43036.00	1669.21	32188.56	1613.05	28117.20
<b>Site meuble</b>									
0.1g	EX1	9364.05	754.91	7639.61	684.43	7098.71	636.97	7098.71	636.97
	EY1	750.99	12628.17	679.82	11804.59	632.66	11017.19	632.66	11017.19
0.3g	EX1	28115.98	2266.96	22918.80	2053.32	13975.33	1402.48	17535.81	1589.75
	EY1	2252.87	37884.98	2039.50	35414.30	1391.01	26823.73	1579.01	27416.89
0.4g	EX1	37488.13	3022.63	30558.85	2737.79	18633.59	1869.97	22019.82	1996.14
	EY1	3003.85	50513.63	2719.35	47219.42	1854.67	35765.03	1982.68	34379.30
<b>Site très meuble</b>									
0.1g	EX1	11374.45	918.99	11452.69	1031.75	6584.25	629.99	12227.31	1113.94
	EY1	913.33	15215.13	1024.88	17614.42	625.18	11681.58	1106.42	19189.71
0.3g	EX1	34123.34	2756.96	34358.06	3095.25	19752.82	1889.97	23601.98	2022.89
	EY1	2740.00	45645.40	3074.65	52843.25	1875.54	35044.59	2009.86	34082.55
0.4g	EX1	45497.25	3675.81	45810.74	4126.99	26337.12	2519.95	26912.46	2288.25
	EY1	3653.21	60857.95	4099.53	70457.66	2500.72	46726.02	2273.61	38451.88

- On remarque que les valeurs de Fx sont plus petites par rapport à Fy ceci parce que la période fondamentale de ce bâtiment suivant x est de 1.34s, période correspondantes à des faibles accélérations spectrales. Contrairement à la période fondamentale du sens y qui est de 0.79s.

- L'ASCE donne dans tous les cas des valeurs proches à ceux donnés par le spectre type02 de l'EC8.
- Pour un site rocheux, quel que soit  $a_g$ , on remarque que les valeurs des efforts tranchants maximaux à la base obtenues dans les deux directions du modèle 1 sous le RPA sont plus importantes par rapport à celles trouvées à travers l'EC8 et l'ASCE 07. Les résultats sous le spectre type01 de l'EC8 sont les plus proches de ceux de l'RPA.
- Pour un site ferme et pour les accélérations 0.1g et 0.3 g et 0.4g on observe que dans le sens y du modèle 1 (FY), les résultats obtenus en utilisant le RPA possède des valeurs assez proche avec ceux obtenus sous le spectre type01 de l'EC8. En revanche suivant la direction x (Fx) le RPA conduit aux valeurs les plus importantes.
- Pour un site meuble on remarque pour la valeur de  $a_g = 0.1g$  que les efforts trouvés sous l'ASCE 07 sont devenus plus proche de ceux obtenus par les spectres de l'RPA et de l'EC8 types01 ce qui est dû à l'importance des coefficients de site dans ce cas. Les efforts trouvés sous le RPA sont les plus importants et sont proches à ceux de l'EC8 type01 surtout dans le sens y.
- Pour un site très meuble on voit clairement que le spectre de l'EC8 type01 donne les valeurs des efforts les plus importants dans les deux directions pour les valeurs de  $a_g$  de 0.3 g et 0.4g. Cependant pour  $a_g = 0.1g$  c'est l'ASCE07 qui donne les valeurs les plus importantes. Le RPA donne des résultats proches de ceux de l'EC8 type01.

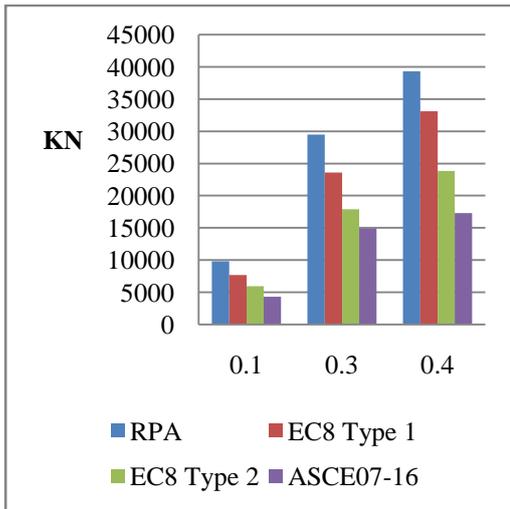


Figure 5-2. Effort tranchant à la base pour un site rocheux direction FY

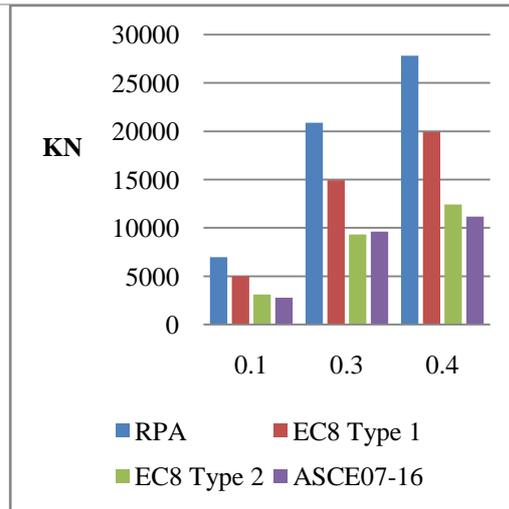


Figure 5-3. Effort tranchant à la base pour un site rocheux direction FX

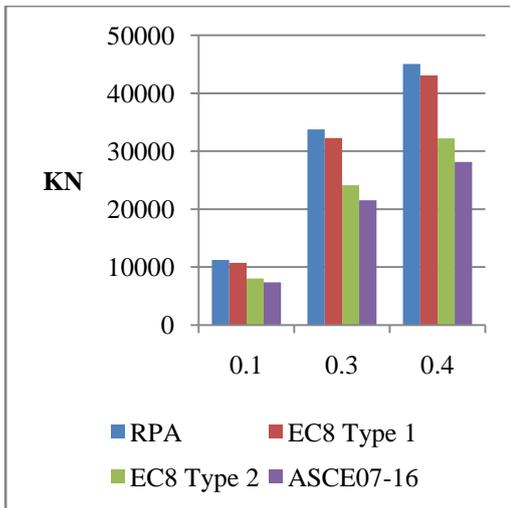


Figure 5-4. Effort tranchant à la base pour un site ferme direction FY

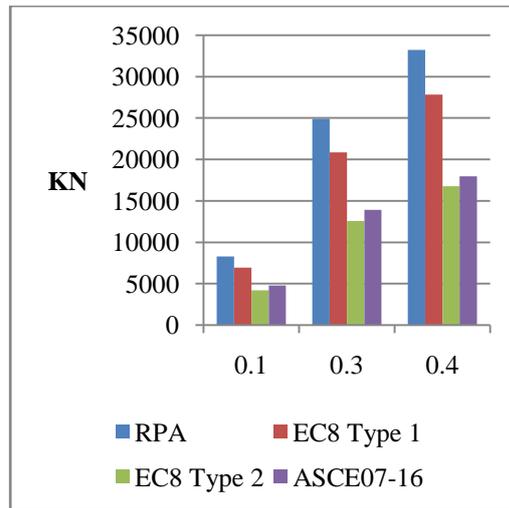


Figure 5-5. Effort tranchant à la base pour un site ferme direction FX

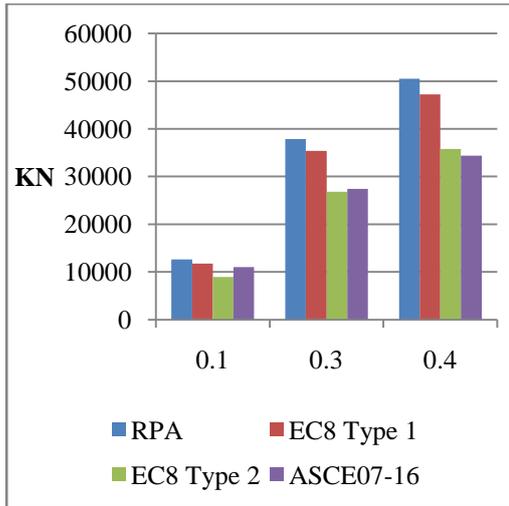


Figure 5-6. Effort tranchant à la base pour un site meuble direction FY

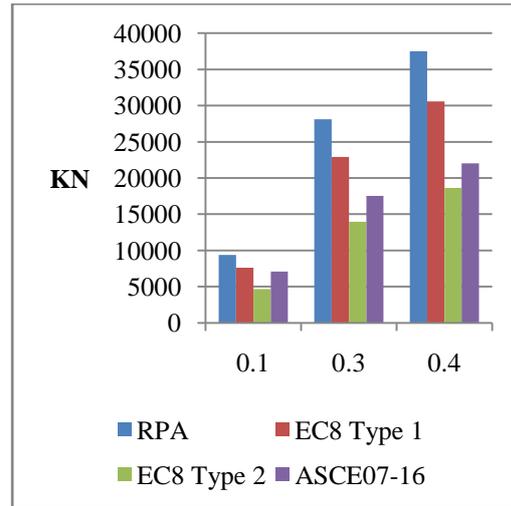


Figure 5-7. Effort tranchant à la base pour un site meuble direction FX

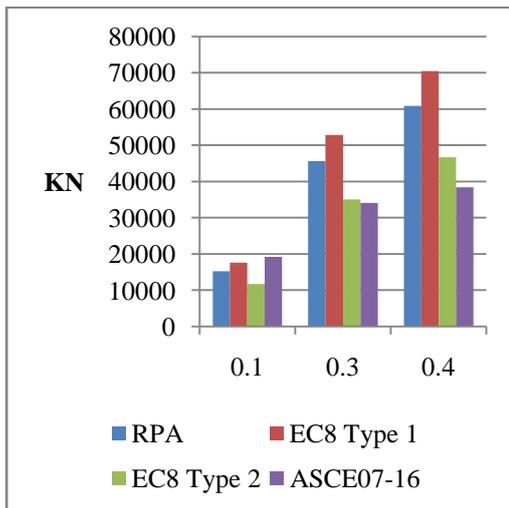


Figure 5-8. Effort tranchant à la base pour un site très meuble direction FY

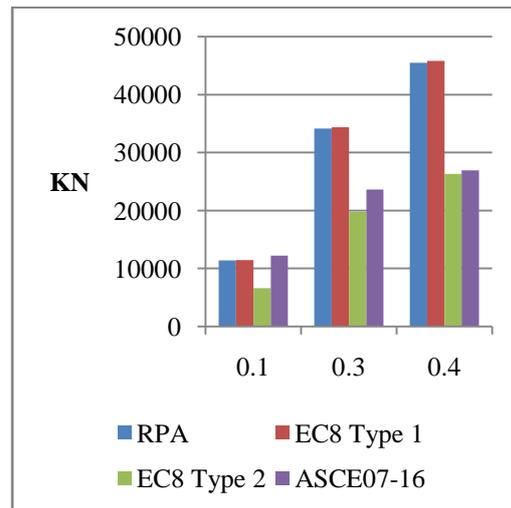


Figure 5-9. Effort tranchant à la base pour un site très meuble direction FX

## 5.4.2 Etude comparative du modèle 2

Le Tableau 5-5 et les Figures 5-10 à Figure 5-17 montrent les efforts sismiques à la base pour les différents types de sols et selon les différents codes RPA, EC8 et l'ASCE07 obtenus pour le modèle 2. Les résultats dans ce cas sont résumés par les points suivants:

Tableau 5-5. Les efforts tranchant à la base suivant les deux directions Fy et Fx pour la structure R+4 étages.

		RPA 99 v 2003		EC8 Type 1		EC8 Type2		ASCE16	
		FX KN	FY KN	FX KN	FY KN	FX KN	FY KN	FX KN	FY KN
Site rocheux									
0.1g	EX1	1949.25	50.1675	1680.896	43.1976	1092.111	31.6729	926.4925	24.4302
	EY1	50.1675	1994.063	43.1976	1765.625	31.6729	1141.486	24.4302	974.8468
0.3g	EX1	5848.53	150.4963	5042.071	129.5883	3276.623	95.0208	3381.731	85.9032
	EY1	150.496	5981.433	129.5883	5296.873	95.0208	3424.465	85.9032	3560.592
0.4g	EX1	7797.79	200.6639	6723.108	172.7868	4368.740	126.6938	3704.463	97.7112
	EY1	200.663	7975.555	172.7868	7 062.49	126.6938	4565.951	97.7112	3899.250
Site ferme									
0.1g	EX1	2828.86	58.3823	2500.367	62.3893	1474.704	42.7638	1696.932	42.8445
	EY1	58.3823	2862.45	62.3893	2622.849	42.7638	1541.25	42.8445	1787.877
0.3g	EX1	7923.82	175.134	7500.194	187.1492	4423.519	128.2774	5002.473	125.254
	EY1	175.134	7998.872	187.1492	7867.762	128.2774	4622.954	125.254	5249.538
0.4g	EX1	10590.1	233.5044	9999.654	249.5194	5898.223	171.0305	6221.105	147.3817
	EY1	233.504	10690.63	249.5194	10489.80	171.0305	6163.428	147.3817	6048.078
Site meuble									
0.1g	EX1	2704.15	66.2098	2673.890	62.3442	1634.368	47.1576	2488.627	58.957
	EY1	66.2098	2764.841	62.3442	2598.383	47.1576	1708.662	58.957	2419.412
0.3g	EX1	8111.55	198.6352	8021.66	187.0309	4902.969	141.4722	5598.140	132.547
	EY1	198.635	8295.331	187.0309	7795.124	141.4722	5125.970	132.547	5442.475
0.4g	EX1	10814.8	264.8384	10695.55	249.375	6537.337	188.6298	6841.638	161.9309
	EY1	264.838	11060.17	249.3751	10393.50	188.6298	6834.632	161.9309	6651.394
Site très meuble									
0.1g	EX1	2915.39	68.9136	3138.914	73.1866	2312.667	63.433	3731.928	88.3176
	EY1	68.9136	2833.122	73.1866	3050.275	63.433	2423.719	88.3176	3628.155
0.3g	EX1	8746.18	206.7407	9416.731	219.5581	6937.395	190.2948	6054.918	142.1501
	EY1	206.740	8499.366	219.5581	9150.799	190.2948	7271.269	142.1501	5883.081
0.4g	EX1	11661.5	275.6542	12555.64	292.7447	9250.201	253.7401	6829.859	160.2397
	EY1	275.654	11332.48	292.7447	12201.07	253.7401	9695.777	160.2397	6636.108

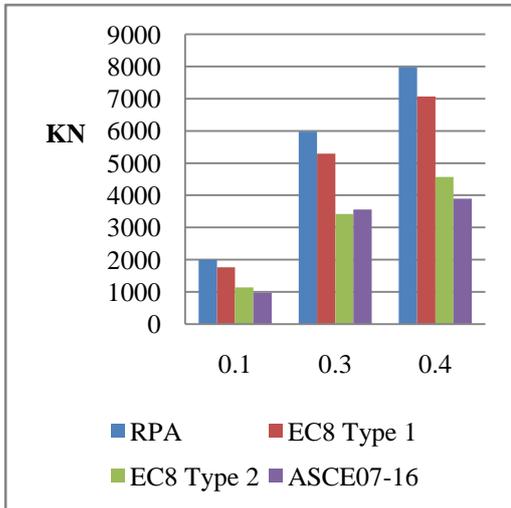


Figure 5-10. Effort tranchant à la base pour un site rocheux direction FY

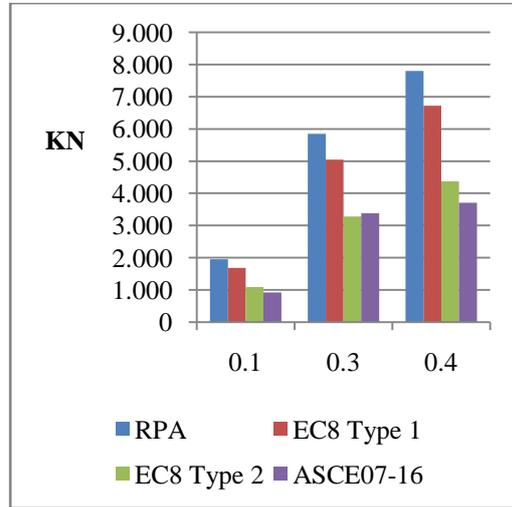


Figure 5-11. Effort tranchant à la base pour un site rocheux direction FX

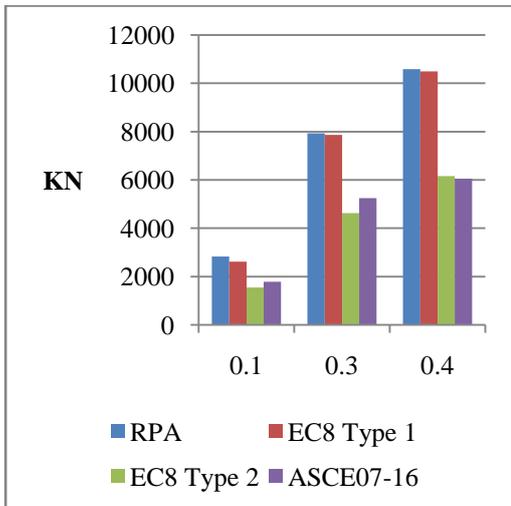


Figure 5-12. Effort tranchant à la base pour un site ferme direction FY

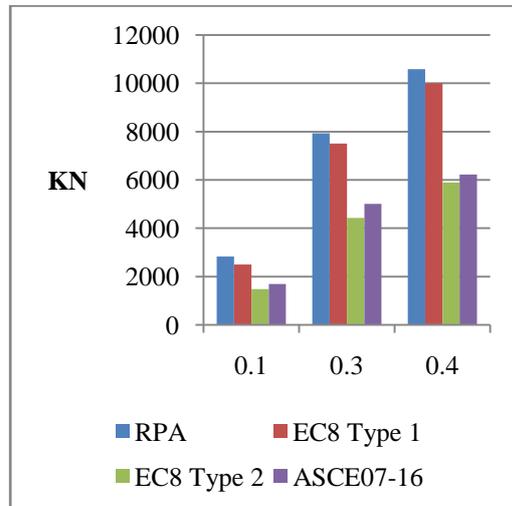


Figure 5-13. Effort tranchant à la base pour un site ferme direction FX

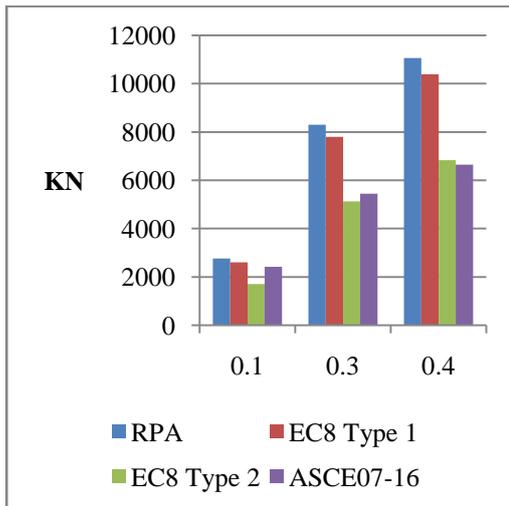


Figure 5-14. Effort tranchant à la base pour un site meuble direction FY

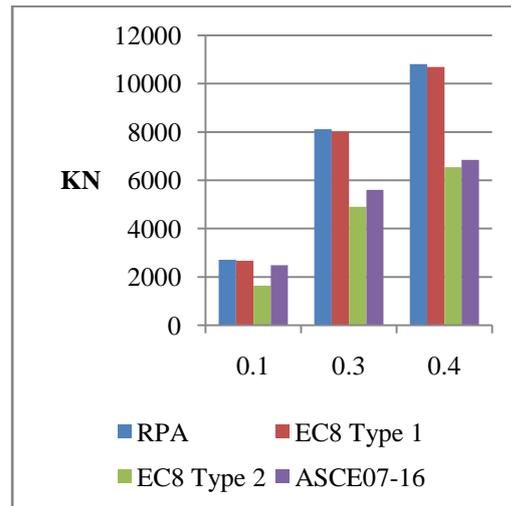


Figure 5-15. Effort tranchant à la base pour un site meuble direction FX

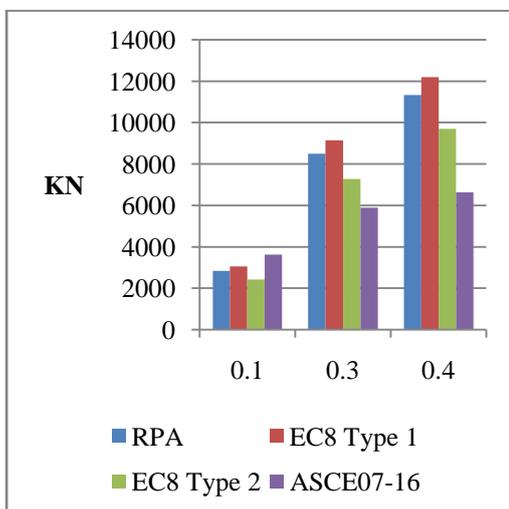


Figure 5-16. Effort tranchant à la base pour un site très meuble direction FY

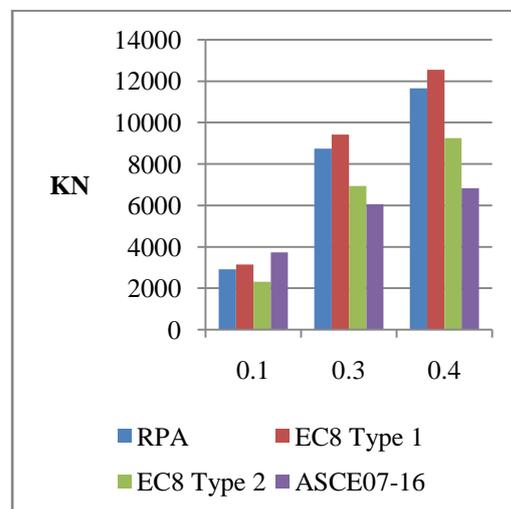


Figure 5-17. Effort tranchant à la base pour un site très meuble direction FX

- Les efforts tranchants maximaux à la base obtenus dans les deux directions du modèle 2 sont presque similaires ceci est dû à la symétrie de la structure. Dans ce cas les périodes fondamentales des deux directions se rapprochent.
- Le RPA donne les valeurs les plus importantes dans tous les cas à l'exception du cas de site très meuble où pour  $a_g=0.1g$  les efforts maximaux sont donnés par l'ASCE07 tandis que pour  $a_g=0.3g$  et  $0.4g$  l'EC08 type01 ils sont donnés par l'EC08 type01.
- Les résultats de l'RPA sont proches à ceux donnés par l'EC08 type01, surtout dans les cas des sites meubles et très meubles.

## 5.5 Conclusion

Ce chapitre a été destiné à une comparaison entre les efforts tranchants à la base de deux structures de hauteurs différentes. Le chargement sismique est déterminé par les spectres de l'RPA99, l'EC 8 type 01 et 02, et l'ASCE07. On a pris en compte la variation du type de sol ainsi que l'importance du risque sismique. Les résultats obtenus montrent dans un site rocheux le RPA possède des valeurs plus grandes que les autres car le spectre de réponse est toujours multiplié par 1.25, et pour un site ferme l'EC8 01 se rapproche de l'RPA mais toujours le code algérien donne la plus grande valeur, et nous remarquons que pour un site meuble l'EC08 type01 donne des valeurs plus importantes et sont proches à ceux donnés par l'RPA99, à l'exception du cas de site très meuble pour  $a_g=0.1g$  les efforts maximaux sont donnés par l'ASCE07.

## *Conclusion générale*

Ce travail est une étude comparative concernant l'influence de l'effet de site sur la réponse dynamique. Trois codes parasismiques tenant compte de ces effets ont été comparés.

Au premier lieu nous avons défini les paramètres d'amplitude et les paramètres de contenu fréquentiel ainsi que les différentes ondes sismiques. Nous avons également présenté les différents codes parasismiques RPA (règles parasismique algériennes), EC8 (Eurocode 8) et le ASCE07 (American society of civil engineering) en expliquant comment chacun de ces codes décrit la réponse du sol via des paramètres comme  $V_{s30}$ ,  $N$  et  $S_u$ . La prise en compte des effets du site par l'EC8 est faite par l'introduction du coefficient de site  $S$  qui varie en fonction de la nature de sol ainsi que le coefficient topographique. L'ASCE possède des coefficients de site en fonction des accélérations et un coefficient  $F$  si le sol est liquéfiable. Le RPA n'introduit aucun coefficient.

Une description des spectres de réponses des codes réglementaires algérien (RPA99V/2003), européen (EUROCODE8) et American (UBC/ASCE07), a permis de relever des différences dans les expressions des spectres. Il est clair que les coefficients diffèrent d'un code à un autre. L'EC8 et ASCE07 possèdent des coefficients de site pour les différents types de sol. L'ASCE07 a assigné pour chaque accélération un coefficient de site spécifique  $F_v$  et  $F_a$ . Ceci veut dire que le code American donne une grande importance au facteur d'amplification associé aux effets de site par rapport au code européen. Cependant l'EC8 et le RPA donnent une valeur de PGA en fonction du zonage. L'ASCE7 fournit des cartes pour les périodes longues avec des valeurs variant de 4 à 16 secondes, alors que l'Eurocode 8 et le RPA recommande des valeurs constantes de 2 et 3 secondes, respectivement. L'ASCE7 est le seul code qui tient compte de l'effet de l'amplitude du site ce qui entraîne une réduction des facteurs d'amplification du sol à un PGA plus élevé du mouvement du sol (l'effet de la non-linéarité du sol) sur le facteur d'amplification

Nous avons également remarqué que pour le code européen, le coefficient de sol change d'un type de sol à un autre. Ce code spécifie deux types de spectre type01 et type02. Le type01 correspond aux fortes magnitudes en champs lointaine et le type02

correspond à des magnitudes plus faibles en champs proches. La raison pour laquelle l'accélération maximale au type02 est supérieure à l'accélération maximale au type01. Ceci est dû au coefficient de site qui est plus grand pour le type 02. Les périodes caractéristiques du site T1 et T2 étaient plus faibles pour le type 2 que pour le type 1.

Le code américain est plus précis que ses homologues européen et algérien car l'American Géologique Institute a fourni des paramètres importants pour les spectres de séismes, incluant  $F_v$  et  $F_a$ , deux coefficients représentant l'effet de site en courte période (0.2s) et à 1s. Ces coefficients dépendent de la nature du sol et changent en fonction des accélérations mesurées pour chaque zone. Concernant les périodes caractérisant le palier des accélérations constantes elles ne sont pas fixes comme pour les autres codes, les périodes varient en fonction des accélérations  $S_{d1}$  et  $S_{ds}$ . Selon l'ASCE07 le risque sismique est réduit de 2/3 ce qui a conduit à des faibles valeurs des spectres par rapport aux autres codes à l'exception du site très meuble avec  $a_g=0.1g$ .

Suivant le code algérien, le palier des accélérations constantes est représenté par  $T1 = 0.15$  s dans tous les cas et  $T2$  qui varie en fonction du site. Ce code a la même accélération maximale quel que soit le site. L'amplification dû au site est caractérisée par un coefficient constant égal à 1.25 multiplié par les spectres de réponses. Ce coefficient est voisin des coefficients de site associant aux spectres type 01 de l'EC8 dans les cas des sites ferme, meuble et très meuble. Dans ces cas les spectres du RPA se rapprochent à ceux de l'EC8 type01. En revanche dans le cas du site rocheux l'amplification de 1.25 des spectres du RPA conduit à des valeurs spectrales importantes

La dernière partie de notre travail est une comparaison entre les efforts tranchants à la base de deux structures de hauteurs différentes. Le chargement sismique est déterminé par les spectres del'RPA99, l'EC 8 type 01 et 02, et l'ASCE07. La variation du type de sol ainsi que l'importance du risque sismique sont pris en compte. Les résultats obtenus montrent que dans un site rocheux le RPA possède des valeurs plus importantes que les autres car le spectre de réponse est toujours multiplier par 1.25 , et pour un site ferme les résultats obtenus par l'EC8 01 sont très proches des résultats obtenus par le RPA mais toujours ce dernier donne la plus grande valeur. Nous remarquons également que pour un site meuble l'EC08 type01 donne des valeurs plus

importantes et sont proches à ceux donnés par le RPA99. Dans le cas du site très meuble pour  $a_g=0.1g$  les efforts maximaux sont donnés par l'ASCE07.

Comme proposition il faut que le RPA donne plus d'importance au coefficient de site car le coefficient de 1.25 surestime le spectre de réponse dans les sites rocheux. En matière de perspectives, on pense qu'il pourrait être intéressant de tenir compte de la non linéarité dans les spectres et voir son influence sur les structures dans la prochaine étude comparative.



## Références Bibliographiques

- [1]. **WALTER, W.** *Procedures for Estimating Earthquake Ground Motions.* WASHINGTON : united states government printing office, 1980.
- [2]. **Kramer and Steven, L.** *Geotechnical Earthquake Engineering.* s.l. : prentice hall, 1996.
- [3]. **Sylvie, A.** *Réponse sismique par méthode spectrale.* s.l. : code aster, 2011.
- [4]. **Kalare, C.** *Prospection par ondes de surface.* slideserve. [Online] <https://www.slideserve.com/>.
- [5]. **upseis.** What Are Seismic Waves. michigentech [Online] [www.geo.mtu.edu/UPSeis/waves.html](http://www.geo.mtu.edu/UPSeis/waves.html).
- [6]. **AFPS, Rapport de la mission.** *le seisme de bhuj.* PARIS : siege social et secretariat, 26 janvier 2001.
- [7]. **RPA99/V2003.** *Règles parasismiques algériennes 99 ,* 2003
- [8]. **EUROCODE 08.** *Calcul des structures à leur résistance au séisme,* 2004
- [9]. **IBC (ASCE07).** *Minimum Design Loads on Buildings and Other Structures,* 2018
- [10]. **Philippe, G.** *effets de site.* GRENOBLE : institut des sciences de la terre, 2009.
- [11]. **Nicolas, L.** *Ground Motions for Design.* s.l. : u.s. geological survey, 2007.
- [12]. *A Comparative Study of Design Base Shear for RC Buildings in Selected.* **Vijay, N, Yogendra, S and L, Dominik.** s.l. : reserchegate, 2012



## **Sites web**

[13][www.irsn.fr/FR/connaissances/Installations\\_nucleaires/La\\_surete\\_Nucleaire/risque\\_sismique\\_installations\\_nucleaires/Pages/4Qu\\_est\\_ce\\_qu\\_un\\_effet\\_de\\_site.aspx#.Xk5zMChKjIU](http://www.irsn.fr/FR/connaissances/Installations_nucleaires/La_surete_Nucleaire/risque_sismique_installations_nucleaires/Pages/4Qu_est_ce_qu_un_effet_de_site.aspx#.Xk5zMChKjIU) (20/6/2020)

[14]<https://sites.google.com/site/quakemanagerwiki/record-manager/spectra/what-is-a-response-spectrum> (20/6/2020)