

EFFET DU MODÈLE DE LA PROFONDEUR DE SOL SUR LES SPECTRES DE RÉPONSE ET SUR LE COEFFICIENT D'AMPLIFICATION/ATTÉNUATION : APPLICATIONS AUX CAS DES SITES DE LA VILLE D'ALGER

HADID Mohamed¹, BENSEKIRIFA Hamza²

Hadid_mohamed2003@yahoo.fr

¹ Professeur, Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics, ENSTP

² Post-graduant, Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics, ENSTP

Résumé : L'objectif de ce travail est de mettre en exergue l'importance de la profondeur de sol considérée dans le calcul sismique d'un profil de sol et par conséquent dans la classification des sites. Dans ce contexte, nous développons une procédure d'évaluation des spectres de réponse en tenant compte des effets de site et ce, en utilisant la méthode des matrices de rigidités élaborée par Rajapakse et Senjuntichai (1995) pour l'évaluation de la réponse dynamique de sols élastiques. Cette étude est illustrée à travers le calcul des spectres de réponse de 26 sites localisés dans la ville d'Alger sollicités par le séisme de Boumerdes du 21 mai 2003. Les vitesses de cisaillement moyennes de ces sites seront calculées selon quatre modèles définis par la profondeur de profil de sol prise dans le calcul de spectre de réponse ainsi que pour les calculs des relations entre les accélérations maximales du rocher et les accélérations maximales à la surface des sites. Les spectres de réponse calculés selon ces quatre modèles sont comparés avec leurs homologues obtenus par le RPA99/2003 et l'UBC97.

Mots-Clefs : effets de site, fonction d'amplification, spectre de réponse, méthode des matrices de rigidités, RPA99/2003, classification des sites.

1. Introduction:

L'effet des conditions locales d'un site sur l'amplification des sols a été depuis longtemps identifié (Seed et Idriss, 1982). Les tremblements de terre destructifs les plus remarquables tels que Mexico 1985, Loma Prieta 1989, Boumerdes 2003 (Laouami et al., 2006, Meslem et al., 2010) ont montrés que ces conditions ont une influence importante sur la réponse du sol. Ils ont démontré que la topographie, la géologie et la nature des sols sont des facteurs principaux qui l'influencent. Ces événements sismiques soulignent le besoin de caractériser l'effet des conditions locales sur l'amplification des mouvements du sol.

Des études sur la réponse sismique ont été réalisées au cours des trente dernières années. Borchardt (1994) a développé des facteurs d'amplification de courtes et longues périodes basés sur la vitesse de cisaillement moyenne mesurée sur les 30 m de profondeur. Seed et al. (1984) ont développé une méthode de classification géotechnique du site basée sur la vitesse des ondes de cisaillement en fonction de la profondeur. Seed et al. (1984) ont alors développé des facteurs d'amplification des sites pour tenir compte des effets de site. Le travail de ces chercheurs avec celui de Dobry (Dobry et al., 2000) a été incorporé au code de bâtiment UBC (Unified Building Code). Le règlement parasismique algérien (RPA99/2003), en matière d'amplification de sol dans son volet contenu fréquentiel seulement (l'amplification en terme d'amplitude n'est pas considérée), est basé sur une classification des sites selon leurs vitesses de cisaillement moyenne mesurées sur une profondeur de 20 m.

Dans ce contexte, le problème majeur à résoudre par les ingénieurs et les géotechniciens dans les régions de forte sismicité est d'évaluer la réponse sismique ou la réponse spectrale d'un site constitué d'un profil de sol dont les caractéristiques mécaniques et physiques varient avec la profondeur.

Ainsi, l'objectif de ce travail est de mettre en exergue l'importance de la profondeur de sol considérée dans le calcul sismique d'un profil de sol et par conséquence dans la classification des sites. Cette étude est illustrée à travers une application de la méthode des matrices de rigidité aux calculs des spectres de réponse de 26 sites localisés dans la ville d'Alger sollicités par le séisme de Boumerdes du 21 mai 2003. Les vitesses de cisaillement moyennes de ces sites seront calculées selon quatre modèles définis par la profondeur de profil de sol prise dans

le calcul de spectre de réponse ainsi que pour les calculs des relations entre les accélérations maximales du rocher et les accélérations maximales à la surface des sites. Ainsi, les spectres de réponse calculés selon ces quatre modèles sont comparés avec leurs homologues obtenus par le RPA99/2003 et l'UBC97.

2. Définition de l'excitation sismique

2.1. Généralités

L'Algérie est située entre deux plaques tectoniques : la plaque eurasienne et la plaque africaine. Le séisme du 21 mai 2003 est lié à un contexte tectonique compressif créé par la remontée nord-ouest de la plaque africaine contre la plaque eurasienne, la vitesse de raccourcissement entre les deux plaques est estimée entre 5 et 6 mm/an dans la région d'Alger.

2.2. Simulation du mouvement sismique à la base

Plusieurs modèles stochastiques de génération numérique d'accélération du sol ont été proposés et appliqués aux problèmes de structures. Parmi ces modèles, ceux de Kanai-Tajimi et Ruiz et Penzien introduisent la méthode de représentation spectrale qui peut être facilement programmée pour la simulation numérique.

Pour calculer l'accélération au rocher, nous avons suivi les étapes suivantes :

- à partir de la banque de données du CGS, des enregistrements sur site sont prises comme référence pour définir l'input sismique. Dans ce travail, nous avons utilisé l'accélérogramme enregistré lors du séisme du 21 mai 2003 de Boumerdes, il s'agit de celui enregistré à une station à proximité du barrage de Keddara ;
- la durée significative de ce signal est calculée : la durée d'un séisme est définie comme étant le temps nécessaire pour passer du niveau 5% d'énergie au niveau 95% du tracé d'Husid. Le tracé d'Husid est donné par la formule suivante :

$$h(t) = \frac{\int_0^t [a(t)]^2 dt}{\int_0^T [a(t)]^2 dt} \quad (1)$$

où $a(t)$ est l'input sismique ;

- la partie forte de ce signal est prise pour le calcul de son spectre de Fourier ;
- à partir de ce dernier, nous avons calculé la fonction de densité spectrale de puissance que nous calibrons par une représentation analytique.

Dans cette étude, l'input sismique est modélisé, en premier lieu, comme étant un processus stationnaire $\ddot{x}_{sta}(t)$ par le biais de sa fonction densité spectrale de puissance, $S_{\ddot{x}\ddot{x}}(\omega)$ décrivant la répartition de l'énergie moyenne du processus.

$S_{\ddot{x}\ddot{x}}(\omega)$ est liée d'une façon directe au spectre d'amplitude de Fourier d'accélérogramme $X(\omega)$, qui est la décomposition fréquentielle du signal, par :

$$S_{\ddot{x}\ddot{x}}(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{2\pi}{T} E \left[\left| \bar{X}(\omega, T) \right|^2 \right] \quad (2)$$

• cette densité spectrale de puissance va servir de référence pour le calcul probabiliste d'échantillons de mouvements sismiques stationnaires.

Le processus stationnaire $\ddot{x}_{sta}(t)$ s'exprime par :

$$\ddot{x}_{sta}(t) = 2 \cdot \sum_{i=1}^N \sqrt{S_{\ddot{x}_{sta}}(\omega_i) \cdot \Delta\omega} \cdot \cos(\omega_i t + \phi_i) \quad (3)$$

où $\Delta\omega$ est l'incrément fréquentiel.

• ces derniers seront corrigés via des fonctions de fenêtrage pour devenir représentatifs de la réalité, c'est à dire non stationnaires :

$$\ddot{x}_g(t) = A(t) \cdot \ddot{x}_{sta}(t) \quad (4)$$

avec :

$$A(t) = \begin{cases} (t/t_1)^2 & 0 \leq t \leq t_1 = 6.25 \text{ sec} \\ 1 & t_1 < t \leq t_2 = 16.5 \text{ sec} \\ \exp[0.6 \cdot (t - t_2)] & t_2 < t \leq t_3 = 30 \text{ sec} \end{cases} \quad (5)$$

3. Définition des sites

Plusieurs sites dans la région d'Alger sont considérés dans cette étude. Le choix a été fait sur vingt six profils (26) disponibles définissant toute la région d'Alger.

3.1. Classification des sites selon RPA99/2003 et UBC97

En utilisant leurs vitesses d'ondes de cisaillement, les vingt six sites disponibles sont classifiés selon le code américain de bâtiment UBC97 et le règlement parasismique Algérien RPA99/2003.

3.2. Définition des modèles de profil de sol

La réponse sismique d'un site dépend très fortement de la variation de ces propriétés mécaniques et physiques en fonction de la profondeur du sol.

Pour mettre en évidence l'importance de la profondeur du sol dans les calculs des spectres de réponse, nous avons considéré quatre modèles de profil de sol avec des profondeurs différentes :

Modèle I : Profil de sol avec sa profondeur réelle.

Modèle II : Profil de sol avec une profondeur égale à 20m (profondeur prise en considération dans la classification selon le RPA2003).

Modèle III : Profil de sol avec une profondeur égale à 30m (profondeur prise en considération dans la classification selon UBC97).

Modèle IV : Profil de sol avec une profondeur variable jusqu'à la marne surconsolidée (la marne est considérée comme le substratum caractérisant la zone algéroise).

Les vitesses de cisaillement moyennes des 26 profils de sol selon les quatre modèles sont représentées dans le tableau 1 (Rapport LNHC).

Profil	Lieu	V _s (m/s)				Classification selon RPA	Classification selon UBC	Formation
		Modèle I	Modèle II	Modèle III	Modèle IV			
1	Ain benian	420	443	420	420	S ₂	S _C	Sable+Grès+marne bleue
2	Ain benian	643	475	585	280	S ₂	S _C	Sable+Facès sableux+Argile
3	Dely brahim	187	187	244	187	S ₄	S ₀	Marne bleue
4	Bab El Oued	756	680	795	412	S ₂	S ₈	Terrasse / pente colluviale
5	El Biar	300	344	390	300	S ₃	S _C	#
6	Bouzarea	648	570	856	378	S ₂	S ₈	#
7	Alger centre	330	247	330	247	S ₃	S ₀	Argile + Facès sableux
8	El Hamma	514	336	388	362	S ₃	S _C	Argile sableuse+ marne bleue
9	El Hamma	550	476	517	300	S ₂	S _C	Alluvion ancien+ Argile sableuse+
10	Hussin dey	605	624	620	575	S ₂	S _C	Roche marine+argile+Grès
11	Bachdjara	586	392	418	431	S ₃	S _C	Alluvion ancien+ Facès sableux
12	Bir khadem	406	440	457	406	S ₃	S _C	Grès
13	Baraki	316	303	340	316	S ₃	S ₀	Grès friable
14	Djasser kasantina	370	250	325	370	S ₃	S ₀	Sable +facès+grès
15	Bachdjara	230	228	232	230	S ₃	S ₀	Alluvion ancien+ Facès sableux
16	El Harrach	421	220	265	266	S ₃	S ₀	Sable + Facès sableux+grès
17	Dar El Beida	450	277	312	315	S ₃	S ₀	Argile+ Facès sableux+ grès
18	Mohamadia	401	310	338	401	S ₃	S ₀	Argile sableux+ marne
19	Mohamadia	571	598	588	500	S ₂	S _C	marine+facès+grès+marn e
20	Dar El Beida	262	243	284	262	S ₃	S ₀	Argile +grès
21	Bab Ezzouar	356	201	224	356	S ₃	S ₀	#
22	Rouiba	456	268	346	272	S ₃	S ₀	Argile sableux +facès sableux
23	Dar El Beida	371	273	316	371	S ₃	S ₀	#
24	Bordj el Dahr	354	332	361	354	S ₃	S _C	Terrasse marine +marne bleue
25	Bordj el Kiffan	440	393	425	440	S ₃	S _C	Sable + facès sableux
26	Marsa	791	805	848	500	S ₁	S ₈	Roche dure

Tableau 1: Identification des profils de sol utilisés

3.3. Propriétés dynamiques des profils de sol

Les propriétés dynamiques du sol en termes de module de cisaillement et d'amortissement pour les deux types de sol à savoir le sol sableux et le sol argileux sont définis dans les figures 1 et 2.

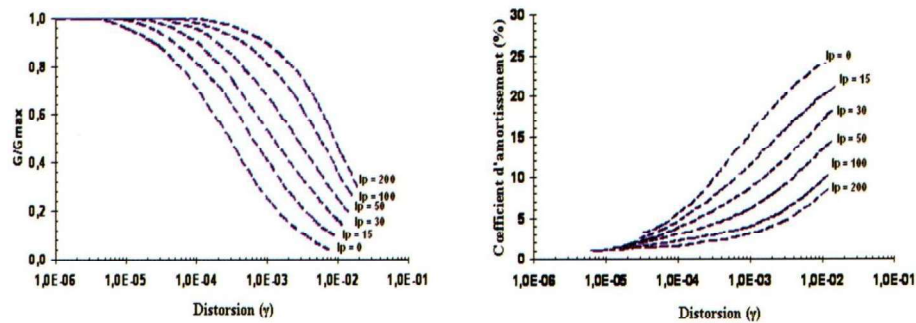


Figure 1 : Propriétés dynamiques d'argiles (d'après Vucetic et Dobry 1991)

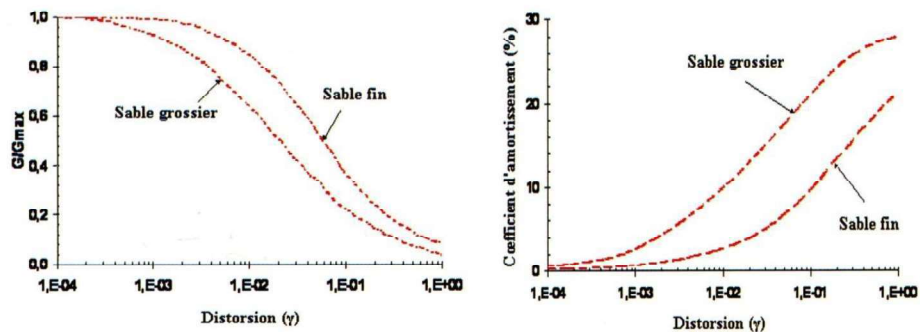


Figure 2 : Propriétés dynamiques des sables (d'après Seed et al. 1986)

4. Résultats et interprétations

4.1 Effet du modèle de la profondeur de sol sur les spectres de réponse

4.1.1 Spectre de réponse au rocher

Le spectre de réponse moyenne (Hadid et al., 2010) calculé à la roche pour cent simulations en utilisant le modèle Kanai-Tajimi est pris comme une référence pour le calcul de la réponse sismique à la surface de sol en champ libre (Figure 3 et Figure 4).

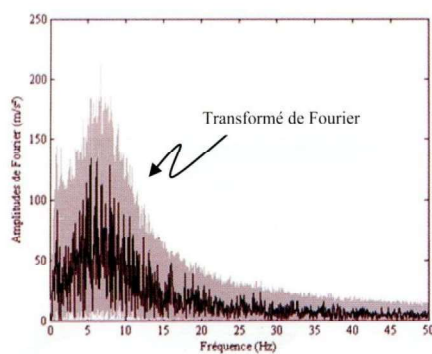


Figure 3 : Spectre de Fourier moyen pour cent (100) échantillons de simulation

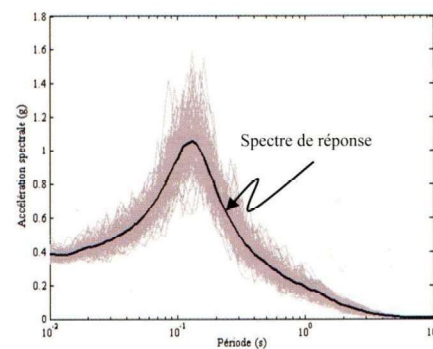


Figure 4 : Spectre de réponse moyen pour cent (100) échantillons de simulation

4.1.2. Comparaison des spectres de réponse moyens avec le RPA99/2003 et l'UBC97

Les spectres de réponse recommandés dans le règlement algérien et le règlement américain du bâtiment (figure 5) sont comparés aux spectres de réponse moyens calculés dans cette étude pour chaque site et ce, selon sa classification (S1, S2, S3 ou S4).

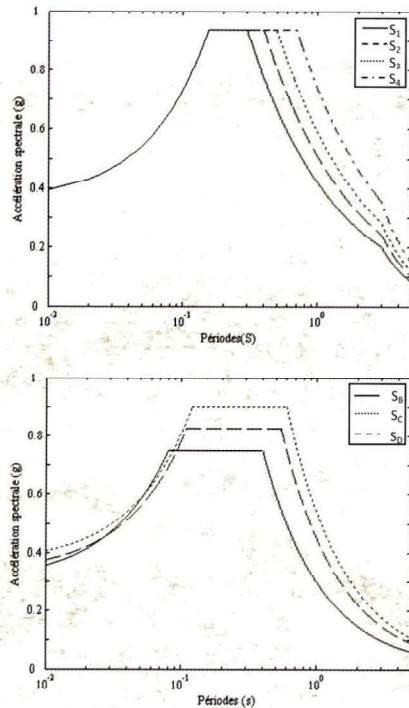
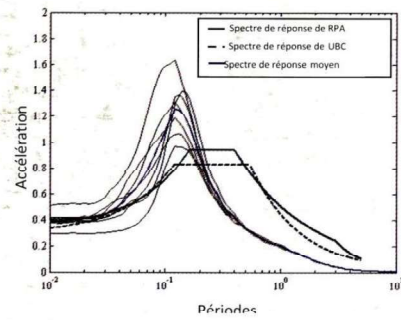
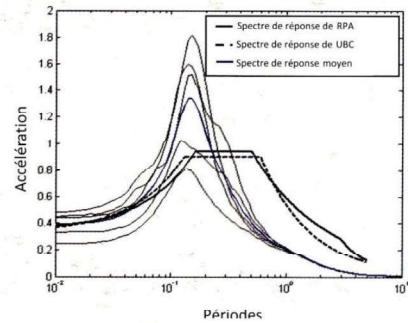


Figure 5. Spectres de réponse élastique normalisée utilisés dans cette étude : (a) : RPA99/2003 ; (b) : UBC97

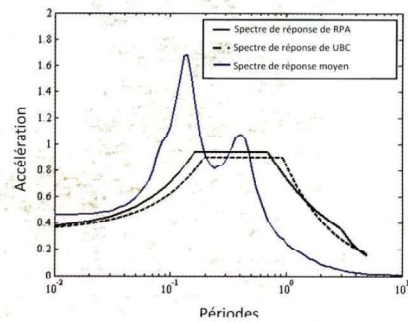
Ces spectres de réponses moyens sont calculés d'une part, pour les 26 cas de sites considérés et d'autre part, pour les quatre modèles de la profondeur de sol. Il est bien de noter que le nombre de spectres de réponses qui a été calculé est égal à 10 400 fois (100 excitations sismiques X 26 sites X 4 modèles). Ces spectres de réponses moyens pour chaque modèle et pour chaque site sont présentés dans les figures de 6 à 10.



(a)

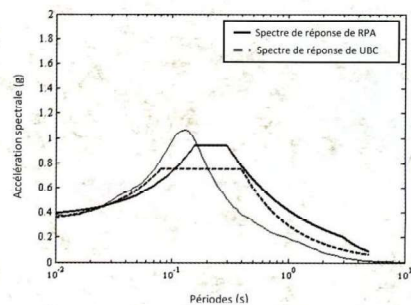


(b)

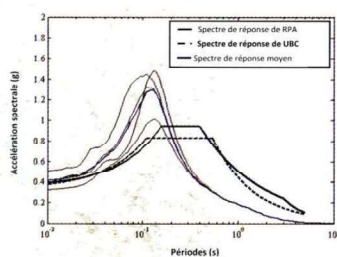


(c)

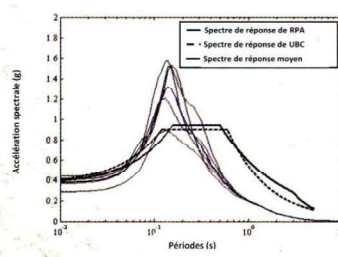
Figure 6. Comparaison entre les spectres de RPA et UBC avec les spectres de réponse calculés à la surface en considérant le 1er Modèle : (a) : Site ferme, (b) : Site meuble, (c) : Site très meuble.



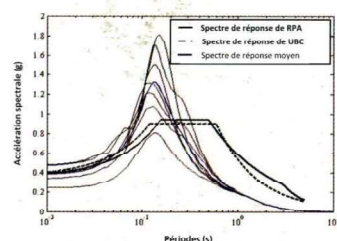
(a)



(b)

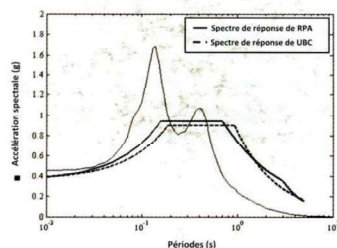


(c)

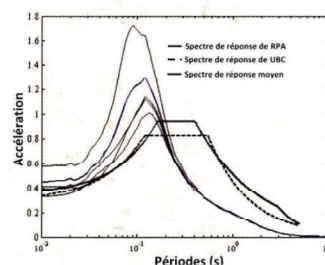


(c)

Figure 8. Comparaison entre les spectres de RPA et UBC avec les spectres de réponse calculés à la surface en considérant le IIIème modèle : (a) : Site rocheux, (b) : Site ferme, (c) : Site meuble,

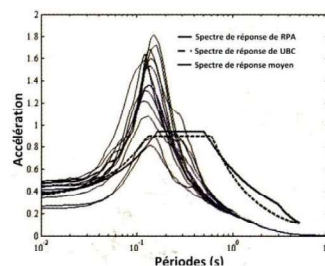


(d)

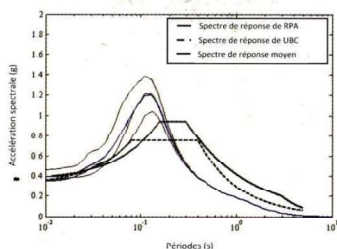


(a)

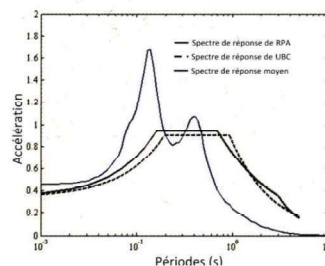
Figure 7. Comparaison entre les spectres de RPA et UBC avec les spectres de réponse calculés à la surface en considérant le IIème modèle ; (a): Site rocheux, (b): Site ferme, (c): Site meuble, (d): Site très meuble



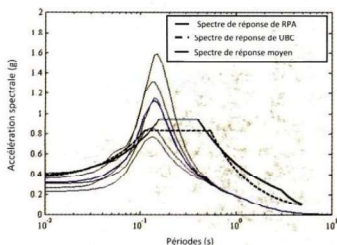
(b)



(a)



(c)



(b)

Figure 9. Comparaison entre les spectres de RPA et UBC avec les spectres de réponse calculés à la surface en considérant le IVème Modèle ; (a) : Site ferme, (b) : Site meuble, (c) : Site très meuble

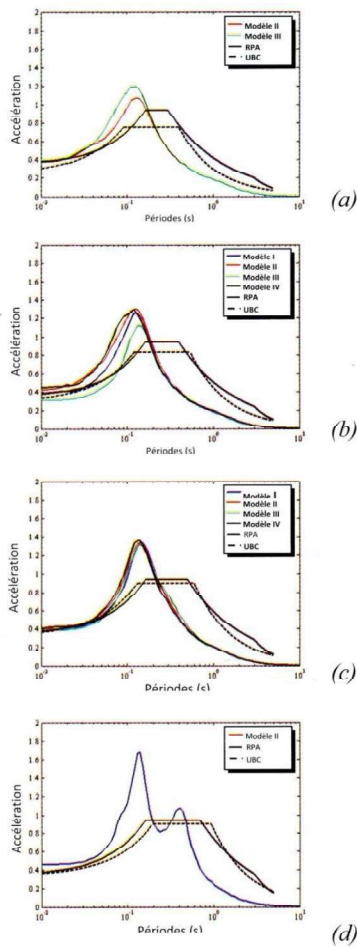


Figure 10. Comparaison entre les spectres de RPA et UBC avec les spectres de réponse calculés à la surface : (a) : Site rocheux, (b) : Site ferme, (c) : Site meuble, (d) : Site très meuble.

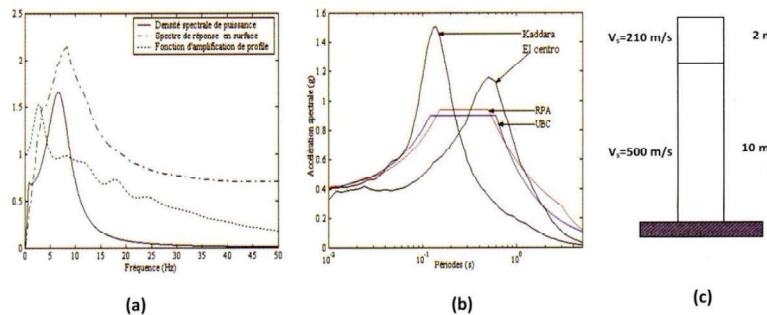


Figure 11 : Effet de contenu fréquentiel sur l'amplification d'un site donné

Discussion

Dans la figure 10, nous observons que l'effet du modèle de la profondeur de sol peut être important pour les sites rocheux et fermes (figures 10a et 10b). Par contre, pour les sites meubles, l'effet de la profondeur de sol peut être négligé (figure 10c). La non-disponibilité d'un nombre important de données concernant les sites meubles, ne nous permet pas d'avancer de conclusion.

Aussi, les figures allant de 6 à 10, montrent que les sites étudiés, quelque soit leur classification, montre un pouvoir amplificateur important sur une plage de période relativement importante.

Néanmoins, cette amplification est décalée vers les périodes inférieures par rapport aux spectres de réponse du RPA99 et de l'UBC97. Pour expliquer ce décalage, nous avons traité un exemple représenté dans la figure 11, montrant l'effet de contenu fréquentiel du signal sismique sur l'amplification de sol d'un site donné. A partir de cet exemple, nous pouvons expliquer que le décalage d'amplification vers les périodes inférieures est dû principalement au fait que l'excitation sismique utilisée dans cette étude est riche en fréquences (foyer sismique superficiel). Une excitation sismique de type EL Centro (champ lointain) nous donne par contre une amplification décalée vers les périodes supérieures par rapport aux spectres de réponse du RPA99 et UBC97.

Enfin, on peut déduire que l'amplification est un phénomène observé dans tous nos sites, et par conséquent, une réévaluation de notre réglementation RPA99/2003 en termes d'amplification devra être réalisée afin de tenir compte de l'effet de site important.

4.2. Effet du modèle de la profondeur de sol sur la relation entre les accélérations maximales de rocher et les accélérations maximales à la surface des sites

Pour quantifier l'état d'amplification/atténuation du sol, des courbes représentatives sont développées à partir de plusieurs événements sismiques et reliant les accélérations maximales enregistrées sur site avec les accélérations maximales enregistrées sur le substratum rocheux.

Les figures 12 et 13 montrent la variation du coefficient d'amplification/atténuation en fonction du site et en fonction du modèle de la profondeur du sol considéré.

Après analyse des résultats, nous pouvons déduire les points suivants :

- les sols rocheux ont une allure droite quel que soit le modèle utilisé et proche au médiateur. Ce résultat est expliqué par le fait que les sols rocheux ont un comportement linéaire et ont une amplification très faible.
- pour les sols fermes, on peut déduire que plus la profondeur du profil est grande plus l'atténuation est grande et vis-versa. Ceci peut être expliqué par le décalage de la fréquence propre du profil de sol vers les fréquences inférieures en s'éloignant de la fréquence centrale du signal sismique considéré.
- les sols meubles et très meubles présentent généralement des amplifications et ce phénomène est dû à la diminution de la vitesse de propagation des ondes S au sein des sols meubles.
- le modèle I représente un profil de sol avec une profondeur réelle avec des amplifications pour le site S2 ainsi qu'une amplification pour les sites S3 et S4 et ce pour des accélérations inférieures à 0.3 g. Ce modèle est généralement similaire au modèle de Seed et Idriss.
- le modèle II assure, dans tous les cas de figures, une amplification de sol due principalement à l'épaisseur faible de 20 m du dépôt du sol considéré.
- le modèle III (épaisseur de 30 m) montre une amplification relativement faible et par conséquent le dimensionnement des ouvrages implantés dans des sites fermes, meubles et très meubles en utilisant ce modèle est moins coûteux.
- le modèle IV assure, dans tous les cas de figures, une amplification de sol due au contraste de rigidité important entre le dépôt de sol pris

en considération et le substratum marneux surconsolidé de vitesse d'onde de cisaillement de 700 m/s.

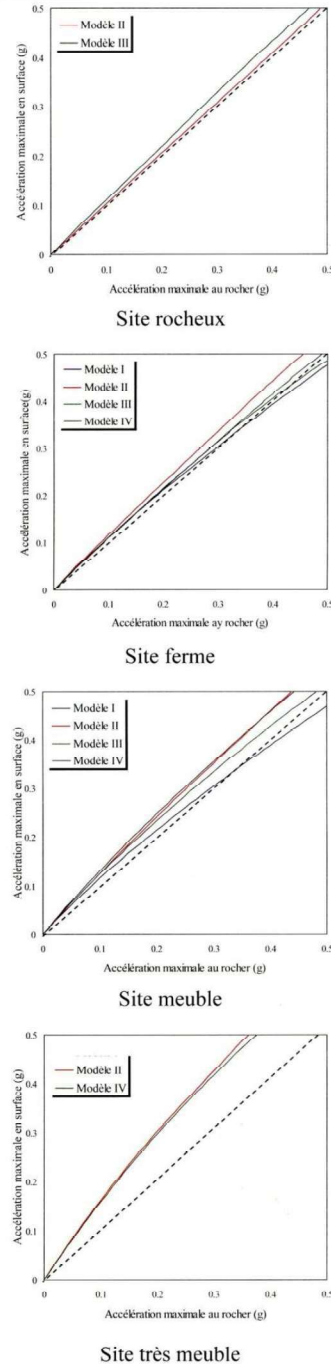
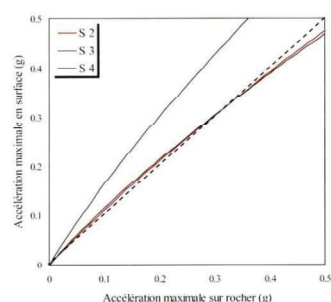
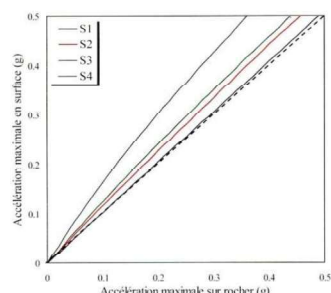


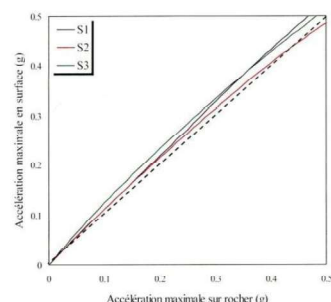
Figure 12 : Relation entre les accélérations maximales au rocher et les accélérations maximales à la surface des sites



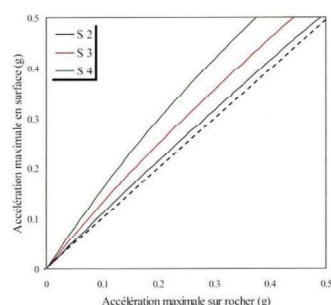
Modèle I (Profil réel)



Modèle II (Classification de RPA)



Modèle III (Classification de UBC)



Modèle IV (en considérant la profondeur jusqu'à la marne surconsolidée)

Figure 13 : Relation entre les accélérations maximales au rocher et les accélérations maximales à la surface des sites selon le modèle utilisé

5. Conclusion

Nous avons appliqué la méthode des matrices de rigidité à plusieurs sites de la ville d'Alger montrant la nécessité de tenir en compte l'effet de site dans les calculs sismiques des structures. Ainsi, nous avons étudié l'effet du modèle de la profondeur sur les spectres de réponse et sur la relation entre les accélérations maximales de rocher et les accélérations maximales à la surface des sites. Les principales conclusions tirées de ce travail de recherche sont brièvement décrites ci-dessous :

- l'effet du modèle de la profondeur de sol peut être important pour les sites rocheux et fermes. Par contre, pour les sites meubles, l'effet de la profondeur de sol peut être négligé ;
- les sites étudiés (quelque soit leur classification), montrent un pouvoir amplificateur important sur une plage de période relativement importante. Néanmoins, cette amplification est décalée vers les périodes inférieures par rapport aux spectres de réponse du RPA99 et UBC97. Ce décalage est dû principalement au fait que l'excitation sismique utilisée dans cette étude est riche en contenu fréquentiel (foyer sismique superficiel) ;
- la comparaison entre les modèles II, III et IV par rapport au modèle I, nous a permis de déduire que le modèle III défini par sa profondeur de 30 m est le plus réaliste. Ainsi, nous pouvons conclure que la prise en compte d'une profondeur de sol de 30 m dans le calcul des spectres de réponse ainsi que dans le calcul des accélérations maximales à la surface de sol est nécessaire et suffisante, d'une part pour un résultat pratiquement acceptables et d'autre part pour un coût d'investigation géotechnique relativement plus faible ;
- enfin, on peut conclure que l'amplification est un phénomène observé dans tous nos sites, et par conséquence, une réévaluation de notre réglementation RPA99/2003 en termes d'amplification devra être faite pour tenir en compte l'effet de site important.

Ainsi, nous pouvons recommander sur la base de cette étude de :

- utiliser un profil de sol avec une profondeur égale à 30 m au lieu d'une profondeur de 20 m prise en considération dans la classification de site selon RPA99/2003 ;

- modifier le spectre de réponse de RPA99/2003 en le décalant vers les périodes inférieures ;
 - intégrer dans le spectre de RPA99/2003 l'effet amplificateur de site à travers l'utilisation des coefficients de site.
- nal of Geotechnical Engineering, ASCE, vol. 112 NO. 11, pp. 1016-1032.
- UBC 97. Uniform Building Code, International Conference of Building Officials Whittier. California, 1997, 1997 Edition.

6. Références

Borcherdt, R. D. (1994). "Estimates of Site-Dependent Response Spectra for Design (Methodology and Justification)." *Earthquake Spectra*, Vol. 10(4), pp. 617-653.

Dobry, R., Borcherdt, R. D., Crouse, C. B., Idriss, I. M., Joyner, W. B., Martin, G. R., Power, M. S., Rinne, E. E., and Seed, R. B. (2000). "New site coefficients and site classification system used in recent building seismic code provisions.", *Earthquake Spectra*, 16(1), 41-67.

M. Hadid, M.Y. Mahdia & H. Bensekirifa. Effect Of Physical And Geotechnical Porous Media Properties On Response Spectra, 14 European Conference on earthquake Engineering, 2010, Macedonia.

Laouami N., Slimani A., Bouhadad Y., Chatelin J. L. and Nour A.. 2006. Evidence for fault-related directionality and localized site effects from strong motion recordings of the 2003 Boumerdes (Algeria) earthquake: consequences on damage distribution and the Algerian seismic code. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. Vol. 26, pp 991-1003.

Meslem A., Fumio Yamazaki, M.EERI, Yoshihisa Maruyama, Djillali Benouar, Nasser Laouami, and Nassima Benkaci. 2010. Site-Response Characteristics Evaluated from Strong Motion Records of the 2003 Boumerdes, Algeria, Earthquake. *Earthquake Spectra*, Volume 26, No. 3, pages 803-823, 2010.

Rajapakse. R. K. N. D & Senjuntichai. T(1995). "Dynamic response of a multi-layered poroelastic medium". *Earthquake Engineering and Structural Dynamic*. 24. 703-722.

RPA99/ 2003. Règles parasismiques Algériennes. Centre National de Recherche Appliqué en Génie Parasismique : DTR B C 2 48.

Seed, H. B., Wong, R. T., Idriss, I. M., and Tokimatsu, K. (1984). "Moduli and damping factors for dynamic analyses of cohesionless soils," *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, vol. 112 NO. 11, pp. 1016-1032.