

ANALYSE PROBABILISTE D'ALÉA SISMIQUE EN ALGÉRIE : SPECTRE DE RÉPONSE (UHS) ET CHOIX DU SCÉNARIO

PROBABILISTIC SEISMIC HAZARD ANALYSIS FOR ALGERIA: RESPONSE SPECTRUM (UHS) AND SCENARIO SELECTION

Réception : 19/10/2018

Acceptation : 26/11/2018

Publication : 08/01/2019

GHERBOUDJ Faouzi¹, LAOUAMI Nasser²

¹Maître de Recherche (B) fgherboudj@cgs-dz.org & ²Directeur de Recherche n_laouami@hotmail.com - Centre national de recherche appliquée en génie parasismique, CGS, Alger, Algérie,

Résumé - L'étude de l'aléa sismique et la définition de la force sismique représentent la première étape dans le calcul et la conception parasismique des structures. Dans cet article, en premier lieu, la méthode de calcul probabiliste PSHA est présentée brièvement. Ensuite, une application de cette méthode pour un site rocheux situé à Alger est menée. Les résultats obtenus sont présentés ici sous forme de courbes d'aléa sismique, spectres de réponse et scénario sismique (magnitude et distance). Le spectre de réponse obtenu (UHS) est comparé avec le spectre réglementaire défini dans le règlement parasismique. Bien que le spectre de réponse calculé dans cette étude soit en conformité avec le spectre réglementaire pour les courtes périodes en termes d'amplitude et de contenu fréquentiel, il paraît clairement que le spectre réglementaire surestime significativement la réponse pour les structures flexibles (période fondamentale supérieure à 1,5 s). Une mise à jour du spectre réglementaire pour les longues périodes est nécessaire dans les futures révisions du RPA

Mots - clés : Aléa sismique, PSHA, GMPE, Spectre de Réponse, UHS, Désagrégation

Abstract - The study of seismic hazard and the definition of design seismic forces represent the first step in the seismic design of structures. In this article, in the first step, the PSHA probabilistic calculation method is presented briefly. Then, an application of this method for a rock site located in Algiers is conducted. The results obtained are presented here in the form of seismic hazard curves, response spectra and seismic scenario (magnitude and distance). The resulting response spectrum (UHS) is compared with the design spectrum defined in the seismic code. Although the response spectrum calculated in this study conforms well with the regulatory spectrum for short periods in terms of amplitude and frequency content, it is clear that the regulatory spectrum significantly overestimates the response for flexible structures (higher fundamental period to 1,5 s). An update of the regulatory spectrum for longer periods is required in future revisions to the RPA.

Keywords: Seismic hazard, PSHA, GMPE, response spectrum, UHS, Deaggregation



1-Introduction

L'Algérie a connu plusieurs séismes destructeurs dans son Histoire. Durant le dernier siècle, le séisme le plus violent est celui d'El Asnam (Chlef actuellement) de magnitude Ms 7,3. Il a causé plus de 2000 morts et la destruction quasi-totale de la ville de Chlef située à moins de 15 Km de l'épicentre. Le gouvernement algérien a décidé donc de mettre en place le règlement parasismique de construction dans sa première version appelée RPA 81. Depuis, plusieurs modifications et mises à jour de ce règlement ont été effectuées conjointement avec l'évolution des connaissances en aléa sismique et génie parasismique (RPA 83, RPA 88, RPA 99 et RPA 99 version 2003 suite au séisme de Boumerdès en 2003).

La prévention du risque sismique dans la plupart des codes parasismiques implique donc en premier lieu l'établissement d'un zonage sismique sur la base des résultats du calcul de l'aléa sismique. La force sismique à considérer dans le calcul des structures est définie pour chaque zone par le pic d'accélération (PGA) et le spectre de réponse ou les accélérogrammes.

En effet, deux approches existent dans la littérature pour le calcul de l'aléa sismique : l'approche probabiliste et l'approche déterministe. La première consiste à calculer la probabilité de dépassement de chaque niveau d'intensité sismique pour un site spécifique en considérant toutes les sources sismiques qui existent dans la région, l'occurrence des séismes est souvent modélisée par un processus de Poisson ainsi que l'occurrence des accélérations (ou l'occurrence d'une accélération supérieure à un niveau cible). La probabilité de dépassement est donc calculée sur la base du modèle de Poisson. Le résultat final est exprimé sous forme de courbe d'aléa sismique, carte d'aléa et spectre de réponse de type UHS (Uniform Hazard Spectrum) correspondant à toutes les sources sismiques actives. En revanche, l'approche déterministe consiste en la sélection d'une seule source (une faille bien caractérisée par sa magnitude maximale et sa distance par rapport au site) qui provoque une intensité sismique

maximale au niveau du site choisi pour la construction.

Le premier zonage sismique en Algérie mis en application reposait essentiellement sur l'étude probabiliste d'aléa sismique réalisée par (Mortgat et Shah [1]) dont le catalogue utilisé couvre la période 1790-1975. Bezzeghoud et al., [2] ont publié une mise à jour de toutes ces cartes à partir d'un catalogue de la sismicité algérienne compilé pour la période de 1365-1992. Dans cette carte sept zones ont été définies, il s'agit des zones aux intensités de X-XI, X, IX, VIII, VII, VI et $\leq V$. Depuis, d'autres études plus détaillées, ont été réalisées pour différentes régions d'Algérie à l'exemple de Chlef (WCC [3]), Alger (CGS – Geomatrix, [4]), Oran (Bouhadad et al., [10,11]). D'autres études ont concerné tout le territoire telles que (Hamdache et al., [6], Aoudia et al., [7], Pelaez et al., [8,9]).

Dans les deux méthodes probabiliste et déterministe, l'étude de l'aléa sismique repose sur deux éléments principaux : 1) le modèle sismotectonique qui définit la sismicité pour les différentes sources et les failles actives ; 2) le modèle de propagation des ondes sismiques générées de l'hypocentre jusqu'au site de l'étude. Dans cette étude, le modèle de sismicité utilisé est basé sur un catalogue de sismicité récent et disponible sur le Net (Hamdache et al., [12,9]). Ce dernier est mis à jour manuellement pour couvrir la sismicité allant jusqu'à 2017. Le zonage sismotectonique adopté est celui défini par Aoudia et al., [7] avec quelques modifications apportées pour tenir compte de la sismicité. Par ailleurs, trois équations de prédiction du mouvement du sol GMPEs (loi d'atténuation) sont choisies pour modéliser la propagation des ondes. Il s'agit des modèles d'Akkar et al., [15], Boore et al., [17] et Laouami et al., [18]. Les résultats finaux du calcul, obtenus pour un site rocheux à Alger, sont présentés sous forme de courbes d'aléa et spectres de réponse et comparés avec le spectre réglementaire issu des RPA 99 (version 2003) [19].

2-Méthode d'analyse probabiliste de l'aléa sismique (PSHA)

2.1-Formulation mathématique

L'analyse probabiliste de l'aléa sismique consiste à déterminer les probabilités de dépassement de chaque niveau d'intensité sismique pour une période de temps donnée (la durée de vie de l'ouvrage par exemple). L'intensité sismique la plus utilisée dans les études probabilistes est le pic d'accélération ; mais la vitesse, le déplacement ou d'autres paramètres peuvent également être utilisés pour représenter le mouvement sismique.

Pour une accélération cible donnée A^* , la probabilité annuelle de dépassement de cette accélération cible est calculée comme suit (Cornell, [13]) :

$$\lambda_{A^*} =$$

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i \int_{m=M_{min}}^{M_{max}} \int_r P[A > A^* | m, r] f_{Mi}(m) f_{Ri}(r) dm dr$$

(1) λ_{A^*} est le taux annuel de séismes de magnitude supérieure ou égale à la magnitude minimale choisie M_{min} pour la zone source i . $f_{Mi}(m)$ et $f_{Ri}(r)$ sont respectivement les fonctions de densité de probabilité en magnitude et distance. $P[A > A^* | m, r]$ est la probabilité qu'un séisme de magnitude m à la distance r du site engendre une accélération supérieure à A^* . Cette probabilité est calculée à partir d'une équation de propagation des ondes sismiques GMPes (figure 1).

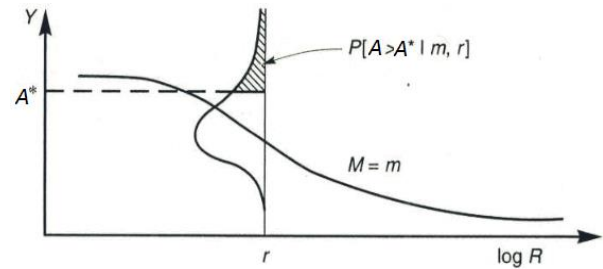


Figure 1 : Probabilité de dépassement de mouvement fort en fonction de la magnitude et de la distance

Figure 1: Exceedance probability of ground motion given magnitude and distance

2.2-Modèle sismotectonique

Le pays est situé sur la plaque africaine qui est en perpétuelle collision avec la plaque eurasiatique avec un taux de rapprochement de l'ordre de 5 mm/an. Cette géodynamique est à l'origine d'une sismicité importante diffusée dans la partie nord du pays. Plusieurs séismes destructeurs ont eu lieu dans cette région durant le dernier siècle, les plus violents sont les séismes d'El Asnam le 10/10/1980 et de Boumerdès le 21/05/2003.

Afin d'analyser l'aléa sismique, un modèle sismotectonique pour la région d'étude doit être développé à la lumière des études géologique, sismologique et historique. Ce modèle serait capable de prédire la distribution spatio-temporelle des séismes dans la région en fonction de leur taille (magnitude). Les sources sismiques dans le modèle peuvent être représentées de deux manières : soit par une faille sismique bien identifiée ou bien par une zone surfacique pour la sismicité diffuse. L'occurrence des séismes pour chaque source sismique est caractérisée par sa loi de récurrence appelée loi de Gutenberg Richter.

La figure 2 montre la distribution de la sismicité et les zones de source utilisées dans cette étude. Ce zonage est adapté à partir du modèle proposé par Aoudia et al., [7]. Ces zones sont modélisées comme étant des zones surfaciques dans lesquelles la sismicité se produit selon le modèle de Poisson. Cette hypothèse amène de nombreuses études probabilistes à « nettoyer » le catalogue de sismicité des répliques. Hamdache et al., [12] a proposé un catalogue « nettoyé » sans répliques et contenant donc uniquement les chocs principaux de magnitude supérieure à quatre ($M_w > 4$) et qui s'étend de l'an 856 à 2008. Ce catalogue est complété manuellement dans cette étude par des événements indépendants de magnitude $M > 4$ jusqu'à 2017 afin de mener le calcul d'aléa PSHA. Le logiciel Wizmap II est utilisé dans cette étude pour l'analyse de la sismicité([http://wizmap-](http://wizmap-ii.software.informer.com/)

[ii.software.informer.com/](http://wizmap-ii.software.informer.com/)). Les valeurs a et b de la loi de Gutenberg Richter [12] servant à calculer les taux annuels d'occurrence des séismes sont calculées. Ainsi, la valeur b est estimée pour chaque magnitude sur une période de temps appelée « date de complétude » où le catalogue est exhaustif pour cette magnitude. La valeur de b est calculée d'abord pour toute la région tellienne avec la prise en compte des magnitudes $M > 4$ en raison de la non-homogénéité temporelle et spatiale du catalogue. La figure 3 montre une valeur b égale à 0,68. Cette dernière est comparable avec celles calculées par d'autres auteurs (Hamdache, [12]; López Casado et al.,[14]). Ensuite, la valeur de a est calculée pour chaque zone sismique. Les valeurs des paramètres de sismicité calculés, pour les zones sources définies, sont récapitulées dans le tableau 1.

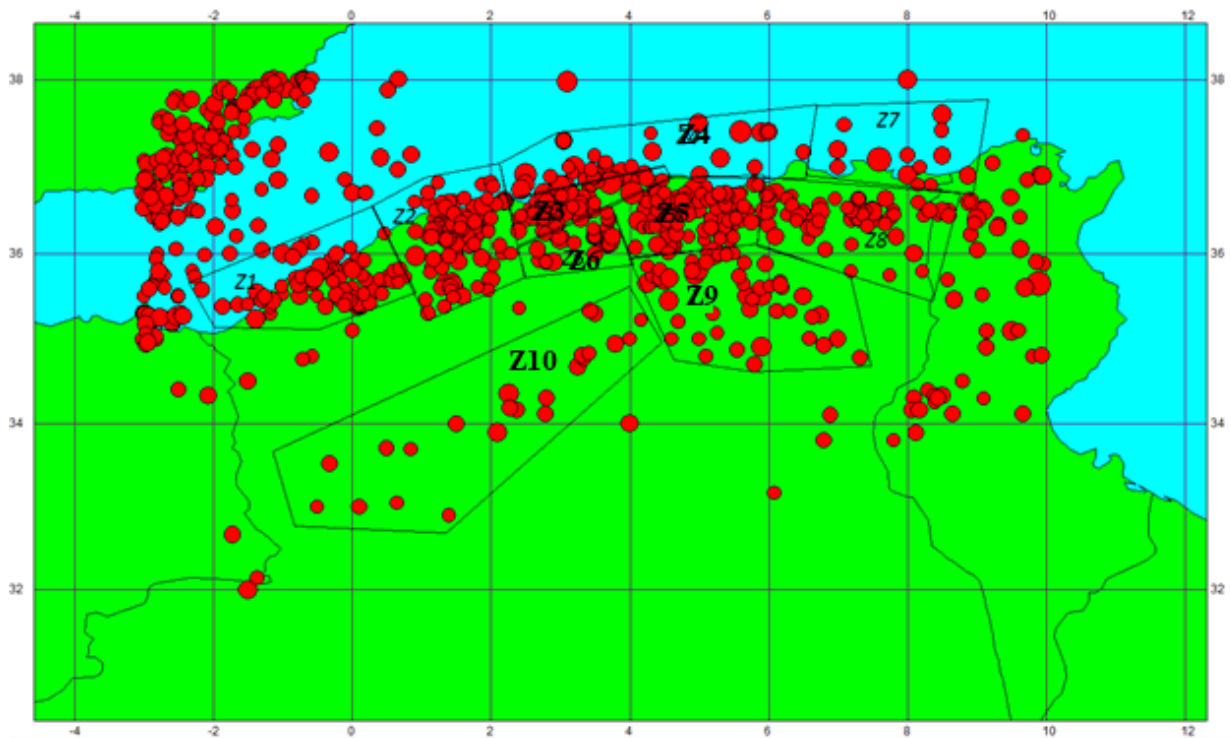


Figure 2 : Zonage sismique (Aoudia et al., [7])

Figure 2: Seismic Zoning (Aoudia & al., [7])

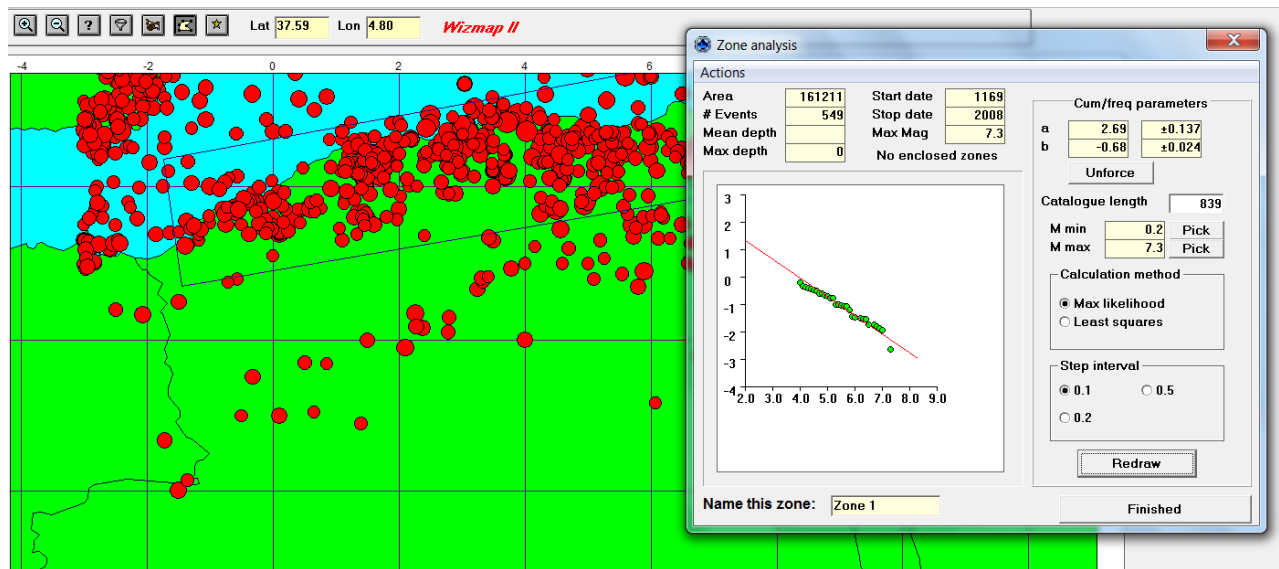


Figure 3 : Calcul de la val3 : de b pour tout le Nord algérien.

Figure 3: b value computation for the North of Algeria

Tableau 1 : les valeurs de a et b calculées pour toutes les zones sismiques.

Table 1: a and b values computed for each seismic zone.

	a	b	$\lambda(M_{min}=4)$	M_{max}
Z1	2.46	0.68±0.05	0.55±0.05	7.0±0.5
Z2	2.34	0.68±0.05	0.41±0.05	7.3±0.5
Z3	2.33	0.68±0.05	0.41±0.05	7.3±0.5
Z4	1.79	0.68±0.05	0.12±0.05	6.4±0.5
Z5	1.14	0.68±0.05	0.026±0.05	6.4±0.5
Z6	2.15	0.68±0.05	0.27±0.05	7.0±0.5
Z7	1.55	0.68±0.05	0.067±0.05	7.0±0.5
Z8	1.86	0.68±0.05	0.14±0.05	5.8±0.5
Z9	2.4	0.68±0.05	0.48±0.05	6.8±0.5
Z10	2.08	0.68±0.05	0.23±0.05	5.8±0.5

Des lignes sources sismiques (failles) peuvent être définies dans le modèle sismotectonique. En effet, plusieurs failles actives ou supposées actives sont mises en évidence par des travaux de recherches publiées dans la littérature. Cependant, une étude détaillée sur chaque faille est nécessaire afin d'estimer son taux d'activité. Pour cela, nous avons

considéré uniquement les zones de surface ce qui pourrait sous-estimer l'aléa sismique dans les sites proches de ces failles. Une étude spécifique est nécessaire pour les sites stratégiques avec prise en compte des failles actives dans le modèle des zones sismiques.

2.3-Sélection des équations de prédiction du mouvement fort (GMPMs)

Trois équations récentes de prédiction des mouvements du sol ont été choisies pour calculer l'accélération maximale et les accélérations spectrales (PGA et PSA). Ces modèles sont ceux développés par Laouami et al., [18], Boore et al., [17], Akkar et al., [15].

La relation d'Akkar et al., [15] est une mise à jour de la relation d'Akkar et al., [16]. Elle a été développée à partir d'une base de données composée de 1041 enregistrements et de 221 séismes de type crustal de la région européenne, le Moyen-Orient et les deux rives méditerranéennes. La distance à la surface R_{jb} est utilisée. Boore et al., [17] présentent une équation empirique pour des séismes peu

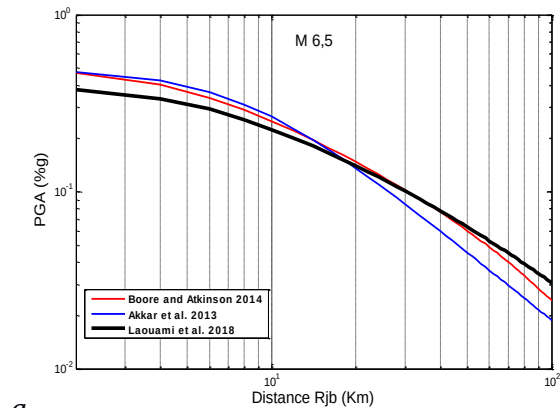
profonds pour la prédiction du PGA, PGV et PSA. Elle est développée avec l'utilisation de la base des données PEER (NGA- West2). L'effet du site dans cette loi est pris en compte en fonction de la vitesse moyenne des ondes de cisaillement de la partie supérieure du sol (profondeur 30m : V_{s30}). L'équation de Laouami et al., [18] a été développée récemment sur la base d'une banque de données contenant 1391 enregistrements et 153 séismes de type crustal avec plus de 700 signaux enregistrés en Algérie et le reste en zone euro-méditerranéenne, ce qui justifie largement son utilisation dans le

contexte algérien. La distance utilisée est la distance hypo-centrale. Le mécanisme inverse qui correspond à la plupart des séismes algériens a été utilisé. L'effet de site dans cette loi est pris en compte en fonction du type de sol (rocher, ferme et meuble). Le tableau 2 récapitule les différentes équations avec leurs caractéristiques et domaine de validité. La figure 4 montre la comparaison entre les 3 modèles en termes de : a) variation du PGA avec la distance, et b) variation du PSA avec la période pour un scénario ($M_w=6.5$, $R_{jb}=20$ Km).

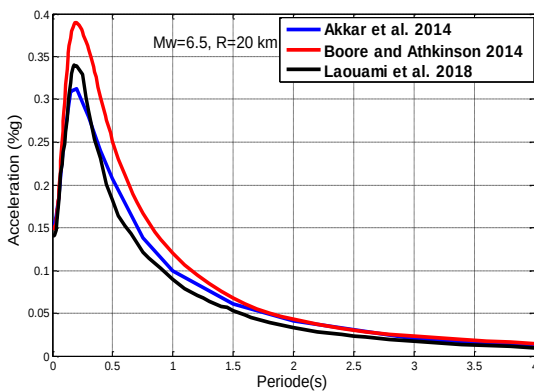
Tableau 2 : Caractéristiques des trois équations GMPEs utilisées

Table 2: Characteristics of selected GMPEs for this study

	Database	M	M	R(km)	période	Classification des sols	Mécanisme de faille
Akkar et al. (2013)	Europe, Moyen-Orient et région méditerranéenne	M_w	5.0-7.6	R_{jb}	0.05-3.0s	Fonction continue de $V_{s30m/s}$.	N, R, S
Boore et al. (2014)	Worldwide	M_w	4.2-7.9	R_{jb}	0.01-10.0s	Fonction continue de $V_{s30m/s}$.	N, R, S
Laouami et al. (2018)	Algérie et Euro-Méditerranée	M_w	3.0 – 7.4	R hypo	0.02-4.0s	$V_{s30} < 360$ Meuble à très meuble $360 \leq V_{s30} < 760$ Ferme $V_{s30} \geq 760m/s$ Rocher	R



a



b

Figure 4 : Comparaison entre les équations de prédictions du mouvement fort (GMPEs) choisies dans cette étude : a) PGA ($M_w 6.5$) et b) spectre de réponse ($M_w 6.5$, $R 20$ km).

Figure 4: Comparison of ground motion equations selected in this study: a) PGA ($M_w 6.5$) and b) response spectrum ($M_w 6.5$, $R 20$ km).

2.4-Constitution de l'arbre logique

L'aléa sismique pour le site choisi dans la région d'Alger est calculé en préparant un fichier input (entrée) qui contient toutes les caractéristiques des zones de surface définies précédemment ainsi que les trois équations de prédictions GMPEs. Le calcul de l'aléa sismique est le domaine des incertitudes par excellence. La prise en compte de ces incertitudes est possible grâce à l'utilisation de l'arbre logique. En effet, l'arbre logique permet de mener le calcul d'aléa correspondant à tous les choix possibles des paramètres alternatifs du modèle à

savoir le choix des équations GMPEs, la valeur de b , magnitude maximale M_{max} , magnitude minimale M_{min} .

Ainsi, un poids de 0.4 est attribué à l'équation de Laouami et al., [18], les deux autres lois ont un poids de 0.3 pour chaque équation. La figure 5 montre l'arbre logique adopté dans cette étude.

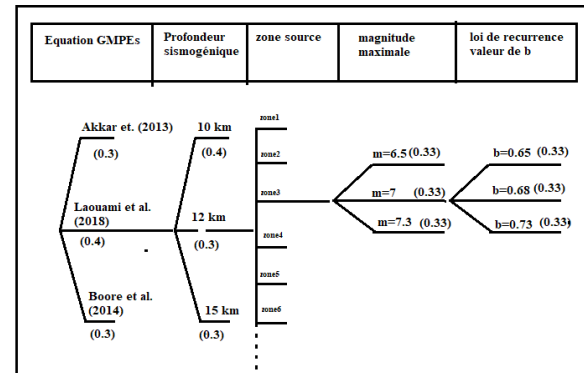


Figure 5 : Arbre logique élaboré pour PSHA.

Figure 5 : Logic tree elaborated for PSHA

3-Application et discussion des résultats

3.1-Courbes d'aléa sismique

Les courbes d'aléa sont généralement calculées pour le PGA. Elles donnent la probabilité annuelle de dépassement pour chaque niveau d'intensité sismique (PGA, PSA), le modèle de Poisson est considéré pour le calcul de la probabilité de dépassement pour chaque fréquence d'occurrence (l'inverse de la période de retour). Nous avons choisi un site situé à Alger de coordonnée 3,04E et 36,75N et considéré comme un site rocheux dont la vitesse de cisaillement dans les premiers trente mètres (V_{s30}) est supérieure à 800 m/s. Les pics d'accélération (PGA) sont obtenus pour chaque probabilité annuelle de dépassement (figure 6a). Une valeur moyenne de $PGA = 0,24g$ est obtenue pour une période de retour de 475 ans, ce qui correspond à une probabilité de dépassement de 10% en une période de 50 ans. Le tableau 3 montre les valeurs obtenues pour chaque période de retour. La dispersion des résultats (figure 6b.) autour de la courbe

moyenne montre l'importance des incertitudes liée aux paramètres pris en compte dans l'arbre logique. Pour une période de retour de 1000 ans par exemple, l'accélération obtenue varie entre 0.26 et 0.38g. L'analyse en détail de l'origine de ces incertitudes est d'une grande importance afin de réduire la dispersion des résultats pour une meilleure caractérisation du risque sismique en Algérie.

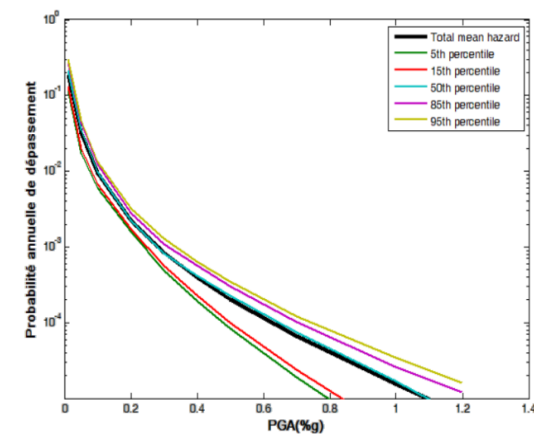
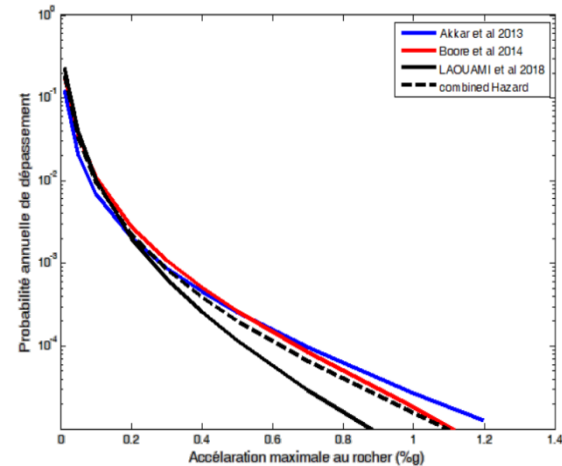
L'incertitude liée au choix de l'équation de prédiction GMPE dans le calcul d'aléa est prise en compte dans cette analyse. La figure 6a montre les courbes d'aléa obtenues pour chaque équation. Les courbes tracées mettent en évidence une faible dispersion des équations d'atténuation choisies jusqu'à une période de retour $T = 2000$ ans (probabilité annuelle de dépassement = 0.0005). L'incertitude épistémique dans le choix de ces équations GMPEs (figure4) n'influe pas significativement sur le résultat obtenu jusqu'à une période de retour de 2000 ans. Pour les périodes de retour supérieures à 2000 ans, la dispersion des résultats augmente. Une analyse des incertitudes détaillée pour les grandes périodes de retour est nécessaire afin de comprendre l'impact de chaque élément défini dans l'arbre logique sur le résultat final.

Tableau 3 : Valeurs d'accélération PGA pour les différentes périodes de retour

Table 3: Obtained PGA values for different return period

Période de retour (ans)	PGA (%g)
100	0.11
200	0.16
475	0.24
975	0.32
2475	0.41

a.)



b.)

Figure 6 : Courbe d'aléa sismique pour un site rocheux à Alger : a) effet des différents GMPE's ; b) dispersion des résultats due aux incertitudes épistémiques.

Figure 6: Hazard curves for rock site: a) different GMPEs; b) dispersion of results due to epistemic uncertainty

3.2-Choix du Scénario (Désagrégation)

Les résultats obtenus par la méthode PSHA sous forme de courbe d'aléa sismique correspondent à toutes les sources sismiques définies dans le modèle sismotectonique. Or, les Ingénieurs ont souvent besoin de scénarii sismiques en termes de magnitude et distance pour choisir les accélérographes dans le calcul non-linéaire des structures. Ainsi, choisir un

séisme pour un scénario raisonnable dans les études de risque urbain est une étape indispensable. Le scénario raisonnable choisi peut être obtenu avec la technique de désagrégation pour chaque période de retour. Cette technique permet de calculer l'impact de chaque couple magnitude-distance sur la probabilité de dépassement de chaque niveau d'intensité sismique.

L'analyse de désagrégation est effectuée pour la valeur de $PGA=0.24g$ qui correspond à une période de retour de 475 ans. La figure 7 montre les résultats obtenus. Une distribution uniforme pour les séismes en champs proche caractérise l'aléa sismique pour le PGA. Les séismes de distance entre 5 et 25 km et les magnitudes de 5 à 6.5 dominent l'aléa sismique à Alger. Le séisme moyen obtenu pour cette analyse est celui ayant ($M_u=6.0$, $R_u=25$ km). Il correspond à une période de retour de 475 ans.

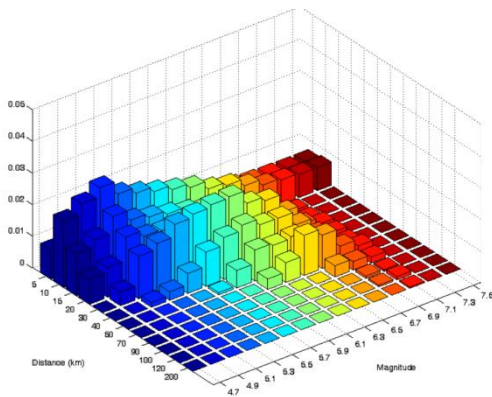


Figure 7 : Désagrégation du PGA pour une PR de 475 ans ($M_u=6.0$, $R_u=25$ km)

Figure 7: PGA deaggregation for 475 years RP ($M_u=6.0$, $R_u=25$ km)

3.3-Spectre de réponse (Uniform Hazard Spectrum UHS)

Le spectre de réponse est largement utilisé par les Ingénieurs pour considérer la force sismique dans le calcul dynamique des structures par la méthode modale spectrale. En effet, les spectres de réponse réglementaires sont élaborés généralement sur la base d'un calcul probabiliste pour une période de retour de 475 ans. Dans

cette étude, le spectre de réponse appelé UHS (Uniform Hazard Spectrum) est calculé par la méthode PSHA pour les différentes périodes de retour (figure 9). Les spectres obtenus pour la période de retour $T=475$ ans et $T=975$ ans sont comparés avec le spectre réglementaire défini dans les RPA 2003 (figure 10). La comparaison fait ressortir une bonne concordance en termes de contenu fréquentiel. Le spectre à $T=475$ ans présente des amplitudes inférieures par rapport au spectre réglementaire. La non-prise en compte des failles sismiques actives peut expliquer cette différence. L'analyse de plusieurs scénarii et une confrontation avec la base de données accélérométriques algérienne sont nécessaires pour une mise à jour du spectre réglementaire dans les prochaines révisions du règlement.

La figure 10 montre également une comparaison du spectre UHS calculé (475 et 975 ans) avec le spectre de réponse des enregistrements du séisme de Boumerdès du 21/05/2003 ($M_w 6.8$) au niveau de la station accélérométrique de Keddara située à environ 20 km de l'hypocentre. On remarque une bonne similitude entre le spectre UHS et le spectre de réponse des enregistrements de Keddara dans la range de période des structures de 0,1s à 2s. L'amplitude spectrale moyenne de l'UHS qui semble être sous-estimée par rapport au spectre des enregistrements de la station de Keddara pour les basses périodes s'explique par la magnitude du séisme de Boumerdès ($M_w=6.8$) supérieure à celle du scénario sismique obtenu par la désagrégation (figure 7). Cependant, pour les longues périodes (structures flexibles), il est clair que les enregistrements de Keddara donnent des réponses maximales inférieures aux valeurs obtenues par l'UHS. Une attention particulière pour le choix des accélérogrammes dans l'analyse non linéaire des structures doit être faite en fonction du type de la structure et du niveau de risque décidé.

4-Conclusion

Les résultats de l'analyse PSHA pour un site rocheux situé à Alger sont présentés dans cet article sous forme de courbes d'aléa pour le PGA. L'analyse de désagrégation est menée afin de définir les différents scénari sismiques possibles en termes de magnitude et distance (**M** et **R**) correspondant à la période de retour de 475 ans. Ces résultats montrent en général que le risque sismique à Alger, en terme d'accélération, est de l'ordre de 0,25g pour 475ans, 0,3g pour 1000ans et 0,38g pour 2500 ans. Le scénario moyen issu de la désagrégation est de l'ordre de $\mu = 6.2$ à une distance de $R=25$ km entre le site et l'hypocentre du futur séisme. Une dispersion des résultats obtenus autour de la valeur moyenne semble être importante et cela est dû à l'importance des incertitudes liée à plusieurs paramètres à savoir : la magnitude minimale M_{min} , magnitude maximale M_{max} et le choix de l'équation de prédiction GMPE.

En plus, le spectre de réponse de type UHS est calculé dans cette étude. Il a été comparé avec le spectre réglementaire défini dans le règlement parasismique. Bien que le spectre de réponse calculé dans cette étude soit conforme avec le spectre réglementaire pour les courtes périodes, il paraît clairement que le spectre réglementaire surestime significativement les accélérations pour les structures flexibles (période fondamentale supérieure à 1,5 s. En comparant le spectre de réponse UHS avec celui de l'enregistrement du séisme de Boumerdès à Keddara ($M=6.8$, 20 km), on peut constater clairement qu'il y a une sous-estimation des accélérations dans les hautes fréquences. Cela pourrait être expliqué par la taille importante du séisme et la proximité de la station de l'hypocentre. Cette différence a été observée dans plusieurs cas de séismes forts dans les zones épicentrales [20].

Le choix des accélérogrammes dans les analyses non linéaires est une étape clé. Les résultats de désagrégation peuvent aider les Ingénieurs à choisir les magnitudes et distance à retenir. Ce scénario dépend aussi bien du niveau

de risque de l'analyse que du type de structure (rigide ou flexible).

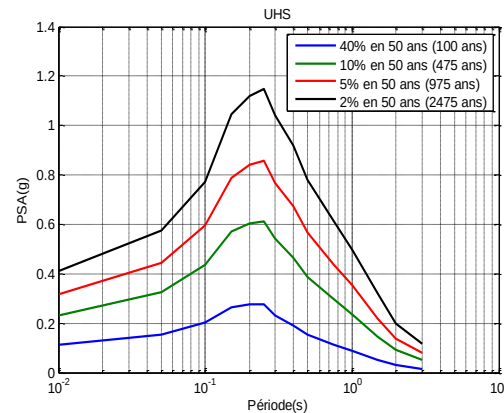


Figure 9 : Spectre de réponse (UHS) pour les différents périodes de retour (100, 475, 975 et 2475 ans)

Figure 9: response spectrum (UHS) for 100, 475, 975 and 2475 years return period.

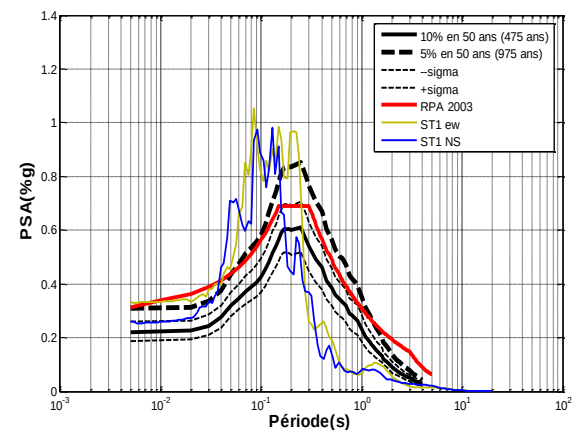


Figure 10 : Comparaison du spectre à risque uniforme avec le spectre réglementaire (RPA2003) et les spectres enregistrés par la station de Keddara lors du séisme de Boumerdès ($M_w=6.8$) du 21/05/2003.

Figure 10: Comparison of UHS with spectrum design code (RPA2003) and spectrum of recorded motions of $M_w=6.8$ earthquake at Keddara station.

Références bibliographiques

- [1] Mortgat CP, Shah H.C., (1978) Seismic hazard analysis of Algeria. Technical report, the John A Blume Earthquake Engineering Center, California, p 97
- [2] Bezzeghoud M., Ayadi A., Sebaï A., Aït Messaoud M., Mokrane A. and Benhallou H., (1996), *Seismicity of Algeria between 1365 and 1989: Map of Maximum Observed Intensities (MOI)*. Avances en Geofísica y Geodesia, Ministeria de Obras Publicas, Transportes y medio Ambiente, volumen num. 1.
- [3] Woodward Clyde consultants (WCC) (1984) Microzonation sismique de la région de Ech-chelif. Technical report V1, p 145
- [4] Geomatrix, CGS (1998) *Probabilistic seismic hazard assessment in the Algiers region*. Technical report, p 68
- [5] Benouar D., (1994), Materials for the investigation of the seismicity of Algeria and adjacent regions during the twentieth century. Ann Geofis XVII(4):459–860
- [6] Hamdache M., Bezzeghoud M., Mokrane A., (1998), *Estimation of seismic hazard parameters in the northern part of Algeria*. Pure Appl. Geophys 151:101-117.
- [7] Aoudia, A., Vaccari, F., Suhadolc, P., Meghraoui, M., *Seismogenic potential and earthquake hazard assessment in the Tell Atlas of Algeria* ». Journal of Seismology (2000) 4, 79-98
- [8] Peláez, J.A., Hamdache, M. and Lopez C, C., 2003. Seismic hazard in Northern Algeria using spatially smoothed seismicity. Results for peak ground acceleration. Tectonophysics. 372, 105-119.
- [9] Peláez, J.A., Hamdache, M., and López C, C., (2005). Updating the probabilistic seismic hazard values of northern Algeria with the 21 May 2003 M 6.8 Algiers earthquake included. Pure Appl. Geophys. 162, 2163-2177.
- [10] Bouhadad, Y. & Laouami N., 2002. *Earthquake hazard assessment in the Oran region (northwest Algeria)*. Journal natural hazard, 26, 3, 227-243.
- [11] Bouhadad, Y.; Nour, A., Slimani, A., Laouami, N.; Belhai, D., 2004. *The Boumerdès (Algeria) earthquake of May 21, 2003 MW=6.8): Ground deformation and intensity*. J. of Seismology, 8, 497-506.
- [12] Hamdache, M., Pelaez J.A., Talbi, A., and Lopez Casado, C., (2010). A unified catalog of main earthquakes for Northern Algeria from A.D. 856 to 2008. Seism. Res. Lett. 81, 732-739.
- [13] Cornell, C. A., 1968, *Engineering seismic risk analysis*. Bull. seismol. Soc. Am., 58, 1583- 1606.
- [14] Lopez C, C., Molina, S., Giner, J.J. and Delgado, J., 2000. Magnitude-Intensity relationships in the Ibero-Magrebhian region. Nat. Hazards 22, 269-294
- [15] Akkar. S., Sandikaya M. A., Bommer, J, J. (2013) *Empirical ground-motion models for point- and extended-source crustal earthquake scenarios in Europe and the Middle East*
- [16] Akkar S, Bommer J.J., (2010) *Empirical equations for the Prediction of PGA, PGV, and Spectral Accelerations in Europe, the Mediterranean Region, and the Middle East*. Seismological Research Letters 81:195–206.
- [17] Boore, D. M., Stewart J. P., Sayhane E. and Atkinson G. M., (2014), *NGA-West 2 equation for prediction PGA, PGV and 5% damped PSA for shallow crustal earthquakes*, Earthquake Spectra. Vol 30, p 1057-1085
- [18] Laouami, N., Sliman N., Larbes S., (2018) Ground motion prediction equation for Algeria and surrounding region using site classification based H/V spectral ratio. Bulletin Earthquake Engineering (2018) 16:2653–2684. doi.org/10.1007/s10518-018-0310-3.
- [19] RPA-99, 2003. Règles Parasismiques Algériennes 1999 (version 2003). Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique, (CGS). Alger
- [20] Iunio I., Giorgio M., Pasquale C., (2018). The peak over the design threshold in strong earthquakes Bulletin of Earthquake Engineering. DOI:10.1007/s10518-018-0503-9