ANALYSE PROBABILISTE D'ALÉA SISMIQUE DANS LES MONTS DE BENI-CHOUGRANE: SPECTRE DE RÉPONSE (UHS)

Réception : 28/03/2025 Acceptation : 28/04/2025 Publication : 10/06/2025

S. REFAS [1], M. ZAGANE [2], A. BESSAIM [3], F. BENAOUM [4], N. BERKHEROUKH [5]

[1] Département de Génie Civil Laboratoire d'Etude des Structures et de Mécanique des Matériaux", Université Mustapha Stambouli, Mascara, Algérie- **s.reffes@univ-mascara.dz**

[2] Département d'agronomie, Université Mustapha Stambouli, Mascara, Algérie- **mansourzaagane@univ-mascara.dz**

[3]Département de Génie Civil Laboratoire d'Etude des Structures et de Mécanique des Matériaux", Université Mustapha Stambouli, Mascara, Algérie-**a.bessaim**@univ-mascara.dz

[4] Département de Génie Civil, Université Mustapha Stambouli, Mascara, Algérie- **fatima.benaoum@univ-mascara.dz**

[5] Département de Génie Civil Laboratoire d'Etude des Structures et de Mécanique des Matériaux", Université Mustapha Stambouli, Mascara, Algérie- n.berrekheroukh@univ-mascara.dz

Résumé - Ce travail a pour objectif d'évaluer l'aléa séismique dans les monts de Beni-Chougrane.
L'approche scientifique adoptée s'articule sur une évaluation déterministe de la magnitude et le calcul du spectre UHS (Uniforme Hazard Spectre) par l'intégration des données géométriques des failles tectoniques appliquées au cas des Monts de Beni-Chougrane.
L'intégration des données géométriques des failles actives dans les monts de Beni-Chougrane dans différents modèles permet d'obtenir des cartes d'aléa sismique obtenues en termes d'accélération spectrale ainsi que dans les spectres UHS, montrant des valeurs maximales de SA qui sont réparties dans la partie NW de la ville de Mascara. Pour un sol rocheux, ces valeurs varient entre 0,76 et 0,57 g respectivement pour des périodes de vibration de 0,2 et 0,3 secondes et qui correspondent à une période de retour de 475 ans.

Mots - clés : Évaluation de l'aléa séismique, Magnitude, accélération maximales des sols, accélération spectrale, Période de retour.

Abstract-
This work aims to assess the seismic hazard in the Beni-Chougrane Mountains.
The scientific approach adopted is based on a deterministic evaluation of the magnitude and the calculation of the UHS spectrum (Uniform Hazard Spectrum) by integrating the geometric data of the tectonic faults. We took the Beni-Chougrane Mountains as a case study.
The integration of the geometric data of the active faults in the Beni-Chougrane Mountains in different models makes it possible to obtain The seismic hazard maps obtained in terms of spectral acceleration as well as in the UHS spectra, show maximum values of SA which are distributed in the NW part of the city of Mascara. For a rocky soil, these values vary between 0.76 and 0.57 g respectively for vibration periods of 0.2 and 0.3 sec and which corresponds to a return period of 475 years..

Keywords: Assessment of seismic hazard, Magnitude, maximum ground acceleration, spectral acceleration, Return period.

Editée sous licence CC BY-NC-ND http://creativecommons.fr

1-Introduction

L'évaluation de l'aléa sismique et du risque de catastrophes en Algérie est une question importante sur le plan scientifique et politique.

L'aléa sismique étant relativement important en Algérie car lié à des magnitudes fortes à modérées, la vulnérabilité peut être élevée et la gestion intégrée des risques devient de ce fait un objectif décisif.

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.

Le premier zonage sismique en Algérie mis en application reposait essentiellement sur l'étude probabiliste d'aléa sismique réalisée par Mortgat et Shah en 1978, Réf. [1] et dont le catalogue utilisé couvre la période 1790-1975. Bezzeghoud et al.(1996), Réf. [2], ont publié une mise à jour de toutes ces cartes à partir du catalogue relatif à la sismicité algérienne compilé pour la période de **1365- 1992**. Sur cette carte, sept zones ont été définies. Il s'agit des zones aux intensités de XXI, X, IX, VIII, VII, VI et ≤V. Depuis, d'autres études plus détaillées, ont été réalisées pour différentes régions d'Algérie à l'exemple de Chlef (WCC (1984), Alger (CGS – Geomatrix,(1998),Réf. [3], et Oran (Bouhadad et al. (2004]),Réf. [4]. D'autres études ont concerné tout le territoire Algérien citant à titre d'exemple celle de Aoudia et al. (2000), Réf. [5] et Pelaez et al. (2003), [6] , Hamdache et al. (1998), Réf. [7]..

2- Les Monts de Béni-Chougrane

Les monts des Beni-Chougrane sont localisés dans la chaîne tellienne d'Algérie à environ 100 km au SW d'Oran. Cette chaîne a été modelée très jeune : en majeure partie durant le Pliocène et le Pléistocène Par conséquent, cette zone est le siège d'une activité néotectonique très importante, des failles inverses et des failles décrochantes actives y sont présentes [1]. On rencontre des plis limitrophes jalonnés en profondeur par des failles inverses. Ces plis marquent la transition entre des structures déformées de la chaîne et le sillon Sud (Plaine de Ghriss). Cette activité néotectonique engendre sans cesse une séismicité modérée à importante (figure 1). A cette situation séismique alarmante, s'ajoute une planification hiérarchique. En effet, des bâtiments de 10 étages et plus voient le jour ces derniers temps.

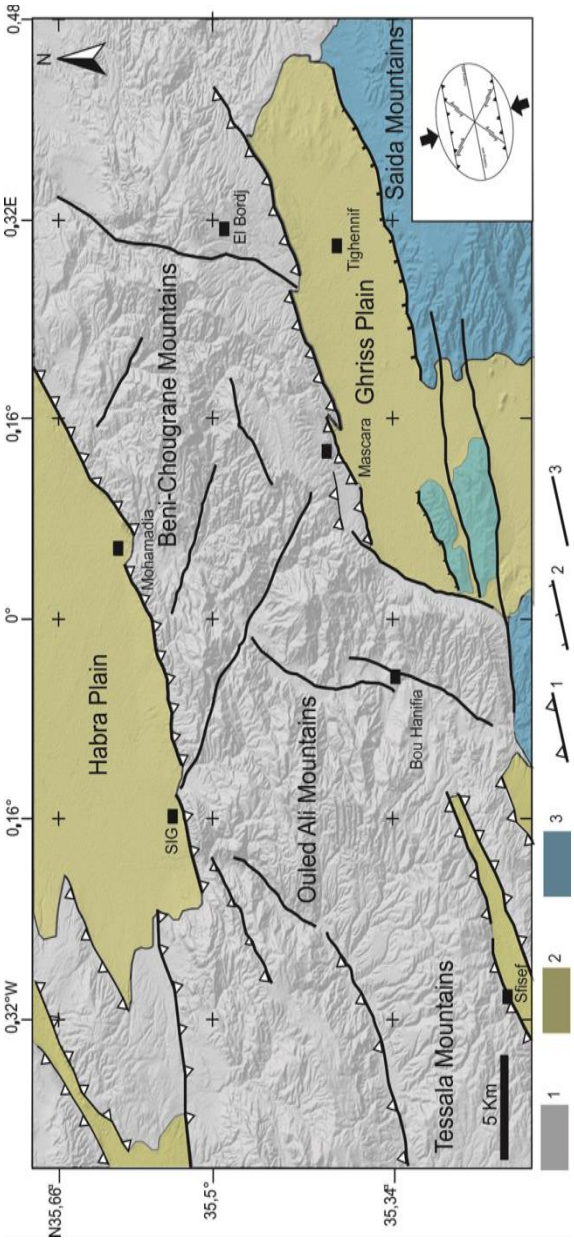


Figure. 1. Les failles tectoniques dans les Monts Beni-Chougrane
1) Zone montagneuse 2) Zone de Plaine
3) Monts de Saida
1) Faille Inverse 2) Faille Normale
3) Faille Décrochante

Editée sous licence CC BY-NC-ND http://creativecommons.fr

3- Séismicité historique

La sismicité historique montre des séismes de fortes intensités comme celui de mars 1819 (Io =X, MSK) ou du 22 novembre 1851(Io=VIII) ainsi que celui du 29 novembre 1887 (Io=X)

La période récente est caractérisée par une séismicité dévastatrice. En effet, et non loin de Mascara, la ville de Sig à quelques kilomètres au NW de Mascara a été également frappé, le 13 juillet 1967, par un tremblement de terre dont la magnitude a été évaluée à 6,1 (Io = VII-VIII). Cette région a été affectée, une seconde fois, par un séisme de magnitude 5,8 le 18 août 1994. Ce séisme serait associé à une faille d'une longueur d'environ 20 km de direction NE-SW. Plusieurs centres sismologiques (Global CMT, USGS, CRAAG) ont proposé différentes localisations de l'épicentre de ce séisme de 1994 dans les Beni Chougrane (Figure 2). Le moment sismique estimé est de 6,8×1017 N.m (Mw 5,8, Global CMT calculent un moment de sismique de 3.3 ×1017 N.m) à partir de l'analyse de la forme d'onde et de 5,6 ×1017 N.m à partir de l'analyse spectral correspondant respectivement à des magnitudes de moment (Mw) de 5,6 et 5,8. L'ensemble des mécanismes au foyer montrent que ce séisme est associé à une faille inverse de direction ENE-WSW (Global CMT ; Réf. [1]). Ce séisme qui a causé d'importants dégâts matériels et humains (171 morts et 654 maisons détruites et presque 2000 sans-abris) n'a cependant pas induit de traces de surface et seules quelques fissures et glissements de terrains ont été rapportés Réf. [1]

Tout récemment, un séisme de magnitude 4,4 s'est produit le 17 août 2005. Ce séisme a été localisé à l'extrémité Est des Monts des Beni-Chougrane, non loin de la zone épicentrale du séisme du 18 août 1994.

4- Contexte géologique

Les Monts des Beni-Chougrane sont constitués de formations géologiques très plissées avec un socle crétacé composé de marnes et des marnes-calcaires. Les recouvrements récents sont caractérisées par du gypse triasique et un sol salifère couvrant les terres du Miocène et un sol marneux et grèseux en contact avec le Crétacé ou le Miocène. Ces formations du Néogène, légèrement ridés, recouvrent actuellement presque entièrement la frontière Sud des montagnes de Beni-Chougrane

Les Monts de Beni-Chougrane sont disposés en rides cénozoïquse de plissement orientées ENE/WSW séparant ainsi deux ensembles structuraux appartenant au bassin du Bas Chelif. Il s'agit notamment du sillon Sud,

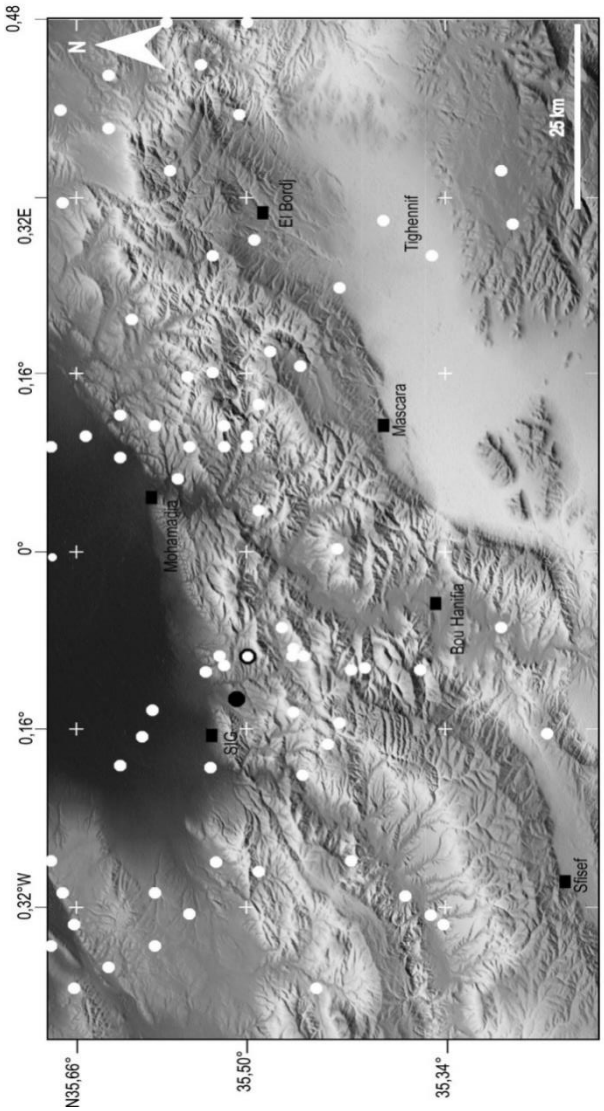


Figure.2 : Localisation des séismes dans la région des monts de Beni-Chougrane

représenté par la plaine de Ghriss et le sillon Nord représenté par la plaine de Habra (figure 3).

Cette ride correspond à un plissement avec un noyau crétacé très déformé. Ce noyau affleure vers l'Est. Cet affleurement devient de plus en plus important et affleure largement au centre de la zone de Beni-Chougrane au-delà de Djebel

Editée sous licence CC BY-NC-ND http://creativecommons.fr

Bouziri. La rive Sud des Monts du Beni-Chougrane est caractérisée par un recouvrement du Miocène supérieur disposé en forme synclinal moins redressé**.**

Cette structure est perturbée par des structures secondaires d'anticlinaux et synclinaux imbriqués au sein de la même structure. Il s'agit notamment de l'anticlinal de Bou Ziri, de Merda et les synclinaux de Dzkeria, Bel Ghribe, le synclinal perché de Gaada et celui de Sfisef.

L'ossature du Crétacé est largement recouverte par des formations récentes d'âge cénozoïque. L'oued Mekkera laisse apparaître une fenêtre très restreinte de cette ossature.

Il s'agit d'une chaine alignée WSW/ENE. Cette zone du Tell a été modelée durant le Cénozoïque post nappes.

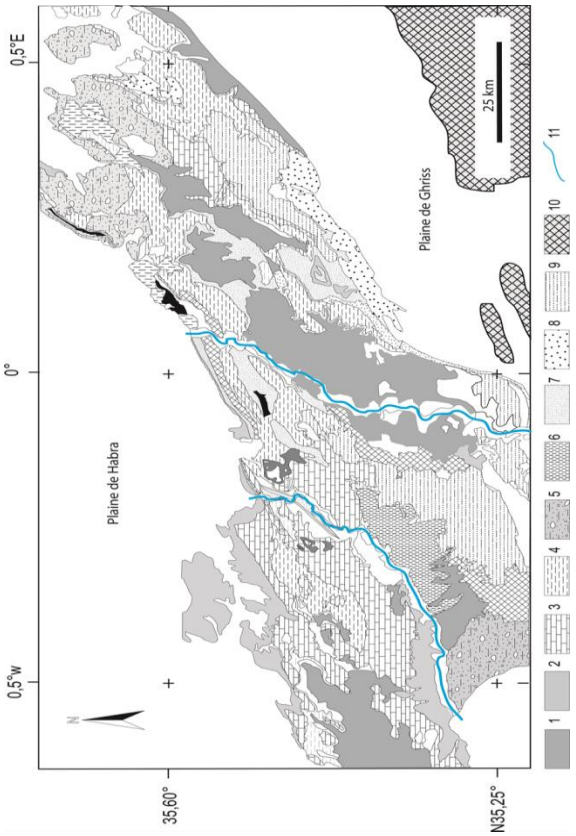


Figure 3 : Cadre géologique du Mont de Béni-Chougrane
1)formations anté-nappes; 2) grès continental et limon à Hélix ; 3) calcaire à Lithothamniée ; 4) bleu marne ;5) conglomérat et grès, 6) calcaire lacustre ; 7) bleu marne; 8) grès marin ; 9)formation de grès El bordj ; 10)calcaires jurassiques ; 11) cours d'eau.

5- Spectre d'aléa uniforme

Une nouvelle évaluation de l'aléa sismique à partir d'une approche probabiliste a été réalisée pour l'Algérie, Pelàez et al. 2006, Réf. [8] . Cette nouvelle évaluation est basée sur la méthodologie dite "spatially-smoothed seismicity". Cette approche permet la combinaison des méthodes probabilistes dites paramétriques et non-paramétriques. De plus, elle est la plus adaptée et la mieux indiquée pour modéliser la sismicité dite "diffuse", ou encore à modéliser la sismicité dont il n'est pas simple ou assez complexe de l'associer à des structures géologiques. Initialement, cette approche a été proposée et développée dans les travaux de Frankel (1995) et Frankel et al. (1996). Ces nouvelles valeurs de l'aléa sismique ont été publiées en termes d'accélération de pointe moyenne du mouvement du sol (PGA)

(Pelàez et al. 2003, 2005), d'accélération spectrale (SA), et en termes Uniform Hazard spectral (UHS) (Pelàez et al. 2006), Réf. [8].
Ce travail présente l'évaluation de l'aléa sismique en terme d'accélération spectrale (SA) dans la région de Béni-Chougrane en utilisant la méthode probabiliste (Probabilistic Seismic Hazard Assesment PSHA) . En général, les résultats attendus de l'étude d'aléa sismique sont de fournir les accélérations maximales pour une période de retour donnée. On s'intéresse au développement de spectre à risque uniforme (UHS), outil nécessaire pour tout calcul d'ouvrages tenant en compte les sources sismiques aussi bien du champ proche que du champ lointain. De tels spectres fournissent les accélérations spectrales pour une gamme de période de structures et pour un niveau de risque uniforme (100 ans et 475 ans). L'analyse des incertitudes effectuée montre l'importance du choix des lois d'atténuation à utiliser.
Le fichier des données que nous avons utilisé pour notre étude est issu des données obtenues par l'approche déterministe appliquée sur plusieurs failles actives (73 failles) répertoriées sur les monts de Béni-Chougrane. Fig. 1

Les spectres d'aléa uniforme sont obtenus à partir du traitement des amplitudes spectrales associées à certaines valeurs de probabilité de non-dépassement et ce, pour plusieurs fréquences. Le taux d'amortissement critique (ξ) est en général pris avec une valeur égale à 5%. En se basant sur le modèle sismo-tectonique

Editée sous licence CC BY-NC-ND http://creativecommons.fr

décrit dans l'article et en appliquant la loi d'atténuation d'Ambraseys et al.(2006) Réf. [12], nous avons développé un spectre à risque uniforme pour les périodes de retour 100 et 475 ans.
La relation d'atténuation du mouvement du sol, mise au point par Ambraseys et al. (1996),Réf. [12], a été utilisé dans le cadre de ce travail du fait que ces auteurs ont établi cette relation en incorporant plusieurs séismes ayant eu lieu en Algérie comme le séisme de Tipaza du (29 Octobre 1989, Ms=5.7). Nous considérons qu'en absence de modèle spécifique pour l'Algérie, cette relation reste la plus fiable.
Nous avons, par la suite, déterminé les cartes d'aléa pour une période de retour de 100 ans et 475 ans, en termes de SA pour la faille inverse n°34 ou la magnitude est maximal (M=7,25) et pour un sol rocheux (Vs > 750 m/s), correspondant au type de (sol A) dans l'Eurocode 8 (CE8, 1998) et (S1) (site rocheux) dans le code parasismique Algérien (RPA-99), avec un amortissement de 5% et pour différentes périodes (T).

3-Calcul de l'accélération spectrale par la loi d'Ambraseys (1996)

Cette relation est utilisée pour estimer la réponse horizontale en termes d'accélération spectral pour un amortissement (ξ) de 5% et pour une période (T) qui varie entre 0,1s et 2 s. Cette relation a été utilisée pour la région d'Europe et les régions adjacentes pour les séismes peu profonds (h <30 km) pour 157 évènements de magnitude entre 4 et 7,9 pour la période 1972-1994 pour une distance épicentrale entre 0 et 212 km, Réf. [11]
Pour les conditions du sol :
a) sol rocheux (Vs > 750m/s) ;
b) sol ferme (Vs = 360–750 m/s) ;
c) sol meuble (Vs = 180–360 m/s) ;
Vs : vitesse moyenne de l'onde S sur les 30 premiers mètres du site :

$$\mathrm{Log}(y) = C_1 + C_2 M + C_4 \mathrm{Log}(r) + C_A S_A + C_S S_S \pm \sigma \quad (1)$$

$$r = \sqrt{d^2 + h_0^2} \quad (2)$$

C1, C2, C4, CA, CS, h_0 et σ : coefficients donnés selon la période ;
Y : l'accélération Spectral en (g) ;
M : magnitude ;
d : distance (km) ;
S_A, S_S : variables pour les différentes classes de
$S_A = 1$ et $S_S = 0$ pour un sol ferme ;
$S_A = 0$ et $S_S = 1$ pour un sol meuble ;
σ : déviation standard de logarithme de Y.

4- Interprétation des résultats

On a calculé les valeurs de SA pour un sol rocheux (vs>750m/s), qui correspond à un sol type S1 dans le code parasismique algérien RPA99 version 2003 pour un amortissement de 5% et pour les différente périodes 0,1s a 2s. Nous avons ensuite déterminé les cartes d'aléa sous forme d'iso-valeurs en termes de SA pour une période de retour de 100 ans (Figure 4) et 475 ans (Figure 5).
Les cartes d'aléa pour la période de retour de 475 ans (Figure 5) montrent que les valeurs maximales sont obtenues encore une fois dans la partie NW de la ville de Mascara à proximité des événements historiques notamment celui du 1967.
La valeur maximale de SA varie entre 0,57g et 0,76g respectivement pour des périodes d'oscillation 0.3 s et 0.2 s et auxquels correspond une période de retour 475 ans. Ces valeurs de SA calculées sur la base de la sismicité déterministe sont plus importantes que celles obtenues par Hamdache (2012), [10] et Pelaez (2006), [8] pour une période de retour de 475 ans et une période 0,2 s qui sont respectivement 0,369g et 0, 39g pour la région de Mascara.
En effet, ces valeurs sont importantes dans les Monts de Beni-Chougrane car la géométrie des failles tectoniques conditionne la séismicité notamment la magnitude. Par conséquent, plus la faille est longue plus l'énergie libérée est importante. Les valeurs de magnitude obtenues sont plus ou moins cohérentes car la région de Beni-Chougrane se trouve sur le front Sud du domaine externe. La séismicité obtenue à partir

Editée sous licence CC BY-NC-ND http://creativecommons.fr

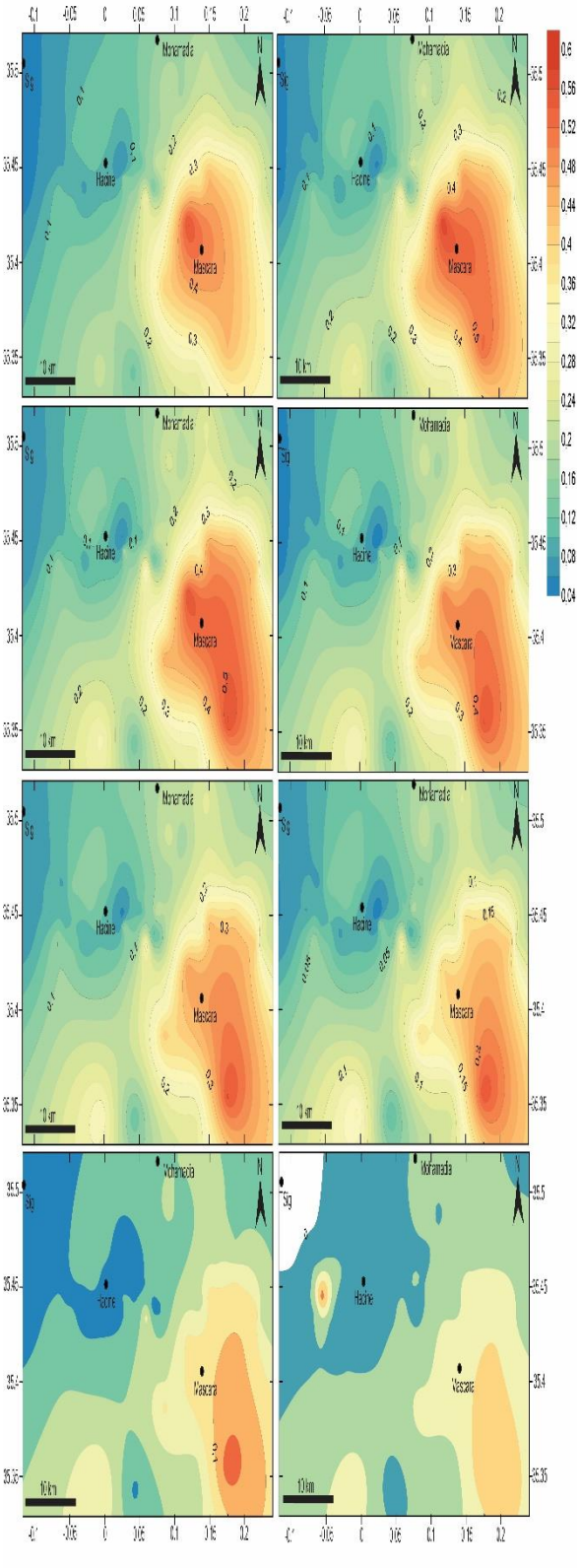


Figure 4 : Valeurs probabilistes de SA pour un sol rocheux, un amortissement de 5% pour une période de retour de 100 ans pour les périodes 0,1s, 0,2s, 0,3s, 0,4s, 0,5s, 1s, 1,5s, 2s.

des données de failles est comparable avec celle obtenue suite au séisme d'El Asnam dont la magnitude était de 7,3 sur l'échelle de Richter. Les valeurs de SA sont comme suit : 0,9g Pelaez (2006), [8] et 0,86g Hamdache (2012), [10]

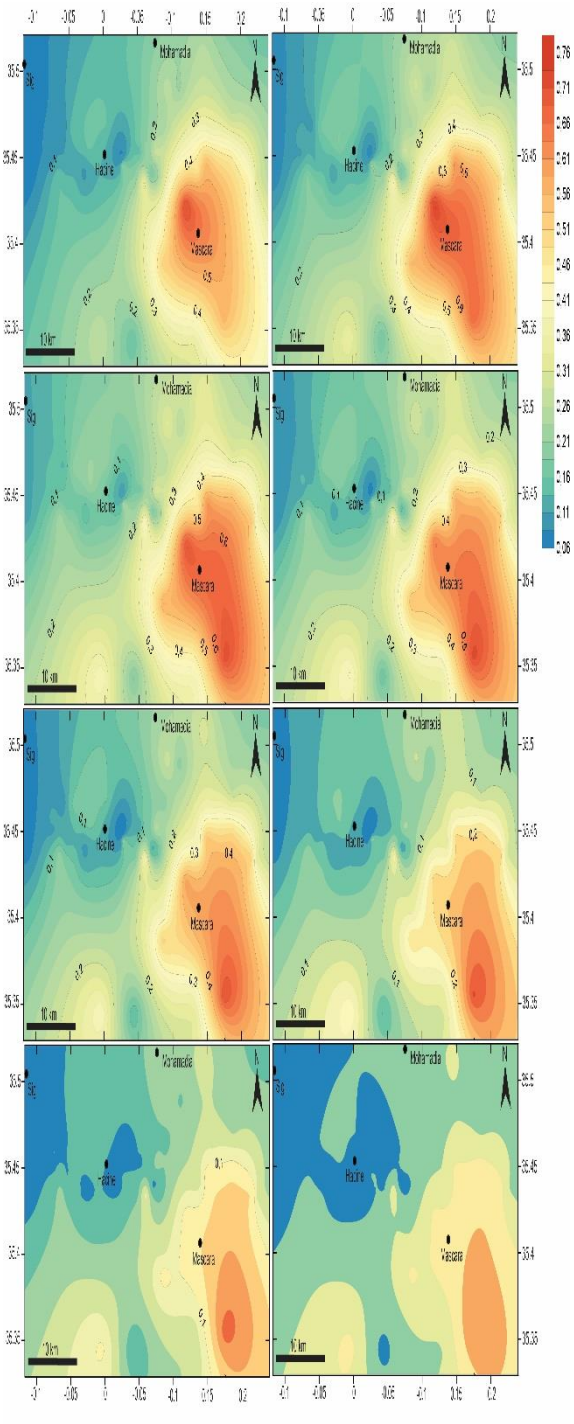


Figure 5 : Valeurs probabilistes de SA pour un sol rocheux, un amortissement de 5% pour une période de retour de 475 ans pour les périodes 0,1s, 0,2s, 0,3s, 0,4s, 0,5s, 1s, 1,5s, 2s

Editée sous licence CC BY-NC-ND http://creativecommons.fr

5- Conclusion

A l'échelle de l'Ouest Algérien, les valeurs obtenues dans la région de Mascara sont plus ou moins comparables mais avec une légère différence surtout dans la région d'Oran où les valeurs sont de l'ordre de 0,28g (Hamdache, 2012) et 0,30g (Pelaez, 2006).

Les valeurs obtenues du SA sont en bon accord avec la sismicité historique connue dans la région d'étude au cours de son histoire sismique et en parfaite concordance comparé avec notre évaluation des risques sismiques en termes de PGA.

Il est intéressant de souligner que des similitudes évidentes apparaissent avec les mêmes contrastes avec des cartes d'aléa sismique pour les deux périodes de retour choisies, 100 ans et 475 ans. Toutefois, les valeurs sont totalement différentes.

En plus, la forme des iso-lignes étant similaire pour les différentes périodes de retour, il semble qu'une caractéristique commune des cartes se retrouve dans la direction de la forme allongée en accord avec le champ de contraintes régionales (Meghraoui et al. 2013), [13]. Nous observons des bandes claires avec une orientation NNW-SSE (actuel), avec une diminution des valeurs SA vers le Nord et qui correspond aux noyaux dans les risques sont principaux. Ces valeurs diminuent plus rapidement vers le S-E, en direction de l'Atlas Saharien. Nous pouvons également observer pour des périodes supérieures à 1,0 s à 1,5 s, que l'aléa sismique en terme de SA est principalement dû à une densité des évènements sismiques.

Références bibliographiques

[1] Bezzeghoud, M., & Buforn, E.. Source parameters of the 1992 Melilla (Spain, MW= 4.8), 1994 Alhoceima (Morocco, MW= 5.8), and 1994 Mascara (Algeria, MW= 5.7) earthquakes and seismo-tectonic implications. Bulletin of the Seismological Society of America, **89(2**), 359-372. (1999)

[2] Mortgat, C.P., Shah, H.C.,Seismic hazard analysis of Algeria, technical report, the John A. Blume Earthquake Engineering Center, California, pp. 97. (1978).

[3] Géomatrix: Évaluation de l'aléa sismique et étude de micro-zonage sismique de la wilaya de Ain Temouchent -Algérie- rapport technique. (2003)

[4] Bouhadad, Y., Nour, A., Slimani, A., Laouami, N., & Belhai, D., The Boumerdès (Algeria) earthquake of May 21, 2003 (M W= 6.8): Ground deformation and intensity. Journal of seismology, **8(4),** 497-506. (2004).

[5] Aoudia, A., Vaccari, F., Suhadolc, P., Meghraoui, M.. Seismogenic potential and earthquake hazard assessment in the Tell Atlas of Algeria. J. Seismol. **4**, 79– 98.(2000)

[6] Pelaez, J. A., Hamdache, M., & C²asado, C. L., Updating the probabilistic seismic hazard values of northern Algeria with the 21 May 2003 M 6.8 Algiers earthquake included pure and applied geophysics, **162(11**), 2163-2177. . (2005)

[7] Pelaez, J.A., Hamdache, M., & Casado, C. L and Talbi, A., Probabilistic seismic hazard assessment for northern Algeria in terms of PGA, SA, UHS, and deaggregation. CSEM / EMSC newsletter, December 2009. . (2009).

[8] Pelaez, J.A., Hamdache, M., Seismic Hazard in Terms of Spectral Accelerations and Uniform Hazard Spectra in Northern Algeria {**163},** {119-135},,(2006)

[9] Hamdache, M., Seismic Hazard Estimation in Northern Algeria. Natural Hazards 119-144. (1998)

[10] Hamdache M., Ground-Motion Hazard Values for Northern Algeria} {**169**},{711-723},(2012)

[11] Ambraseys, N. N., & Vogt, J. Material for the investigation of the seismicity of the region of Algiers. European Earthquake Engineering, **3**, 16-29. (1988).

[12] Ambraseys, N.N., Simpson, K.A., and Bommer, J.J., Prediction of horizontal response spectra in Europe, Earthquake Eng. Struct. Dyn. **25**, 371–400. . (1996),

Editée sous licence CC BY-NC-ND http://creativecommons.fr

[13] Meghraoui, M., & Pondrelli, S. (2013). Active faulting and transpression tectonics along the plate boundary in North Africa. Annals of Geophysics, 55(5).

Editée sous licence CC BY-NC-ND http://creativecommons.fr