

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة السكن و التعمير و المدينة

MINISTERE DE L'HABITAT DE L'URBANISME ET DE LA VILLE

المركز الوطني للبحث المطبق في هندسة مقاومة الزلازل

CENTRE NATIONAL DE RECHERCHE APPLIQUEE EN GENIE PARASISMIQUE

(CGS)



Rue KADDOUR RAHIM prolongée (face à la poste)

BP 252 Hussein-Dey – 16040 ALGER

Tél : +213 (0)23 77.58.15 à 18

Fax : +213 (0)23 77.23.23

E-mail : cgsd@cgs-dz.org www.cgs-dz.org

SEISME DE SKIKDA DU 22/11/2020

($M_w=5.2$)

Aspect Sismologique

Décembre 2020

SOMMAIRE

I INTRODUCTION	3
II MISSION SISMOLOGIQUE	3
II-1 Enregistrements du mouvement sismique	3
II-2 Classification des sites des stations	6
II-3 Modèle de prédiction du mouvement sismique	7
II-4 Prédiction du mouvement sismique dans la zone d'El Harrouch	9
II-5 Comparaison des accélérations enregistrées avec les spectres des règles RPA99	10
III CONCLUSIONS	13
Références	14

I INTRODUCTION

Un séisme de magnitude $M_w=5.2$ a ébranlé la wilaya de Skikda le 22/11/2020 à 04 :53 :09. Selon le CRAAG, l'épicentre se situait à 12 Km sud-ouest de la localité d'El Harrouch, wilaya de Skikda. Le choc principal a été suivi de plusieurs répliques de magnitudes M3.9 à 06 :17, M3.9 à 12.10, M3.4 le 23/11/2020 à 11 :55 et M3.0 le 24/11/2020 à 10 :14.

Vu la magnitude moyenne du séisme, Il n'y a pas eu d'apparition de faille en surface, cependant la secousse a été ressentie dans la wilaya de Skikda et les wilayas limitrophes.

Suite au séisme, le CGS a effectué une première mission de terrain pour constater les éventuelles conséquences du séisme. Fort heureusement, le séisme n'a pas provoqué des pertes humaines, et très peu de dégâts légers sont causés aux bâtiments. D'autres missions ont eu lieu pour la récupération des données accélérométriques enregistrées par le réseau d'accélérographes régional. Les objectifs de ces missions sont : (i) la caractérisation du séisme à partir des données expérimentales enregistrées par le réseau national d'accélérographes géré par le CGS, (ii) tester la performance du modèle de prédiction du mouvement sismique développé récemment au CGS, (ii) la caractérisation des sites des stations, (iii) confrontation des données enregistrées et prédites avec les recommandations réglementaires (RPA99-version 2003).

II MISSION SISMOLOGIQUE

Le séisme de Skikda de magnitude $M_w=5.2$ est considéré comme un séisme moyen. Si la magnitude est le paramètre qui permet de quantifier l'énergie émise par le séisme au niveau du foyer, l'accélération du mouvement sismique, induite par la propagation des différentes ondes sismiques à travers la croûte terrestre, reste le paramètre le plus important pour l'ingénieur pour mesurer la force sismique en tout point de la surface du sol. Cette accélération dépend de la magnitude du séisme, de la distance du site considéré au foyer sismique (distance hypocentrale), et de la classe du site (Rocheux S1, Ferme S2, Meuble S3, Très Meuble S4 selon les règles RPA99).

Dans une première étape, le traitement des données enregistrées permettront de quantifier l'accélération produite par le séisme dans les domaines temporel et fréquentiel. Dans la deuxième étape, une confrontation est effectuée entre les accélérations enregistrées et celles prédites par le modèle de prédiction développé récemment au CGS (Laouami et al. 2018), afin de tester la performance de ce dernier.

II-1 Enregistrements du mouvement sismique

Dans un rayon de quatre vingt dix (90) Km par rapport à l'épicentre du séisme, le séisme de Skikda a été enregistré par six (06) stations installées et gérées par le CGS. Il s'agit des stations d'accélérographe installées en champ libre respectivement au niveau des sites : CTC, Ain Abid, et Beni Hamidene à Constantine, El Marsa à Skikda, Boucheghouf à Guelma et Jijel. Chaque station dispose de 03 capteurs d'accélération dans les 03 directions (02 horizontales E-O, N-S, et 01 verticale Ver).

Dans le tableau 1, sont présentées les accélérations maximales enregistrées dans les trois directions lors du choc principal M5.2 du 22/11/2020. Les traces temporelles sont illustrées dans la figure 1. L'accélération maximale, égale à 42 cm/s² (0.04g), est enregistrée au niveau de la station de Beni Hamidene située à une distance de 25 Km de l'épicentre du séisme sur un sol de classe S3 (voir section II-2) . Elle décroît en général avec l'augmentation de la distance à cause de l'atténuation géométrique et matérielle.

Tableau 1. Accélérations maximales au sol enregistrées dans les trois directions au niveau des six (06) stations.

SITE	STA	Wilaya	Distance Epicentrale (Km)	PGA (EW)	PGA (NS)	PGA (VERT)	SC
Beni Hamidene	BHN	Constantine	25	42	36	11	S3
Constantine (CTC)	CTC	Constantine	38	16	15	7	S3
Ain Abid	ABID	Constantine	49	14	12	5	S1
El Marsa	MRSA	Skikda	61	14	12	3	S1
Boucheghouf	BCHG	Guelma	90	4	3	2	S2
Jijel	JIJ	Jijel	90	3	3	1.5	S2

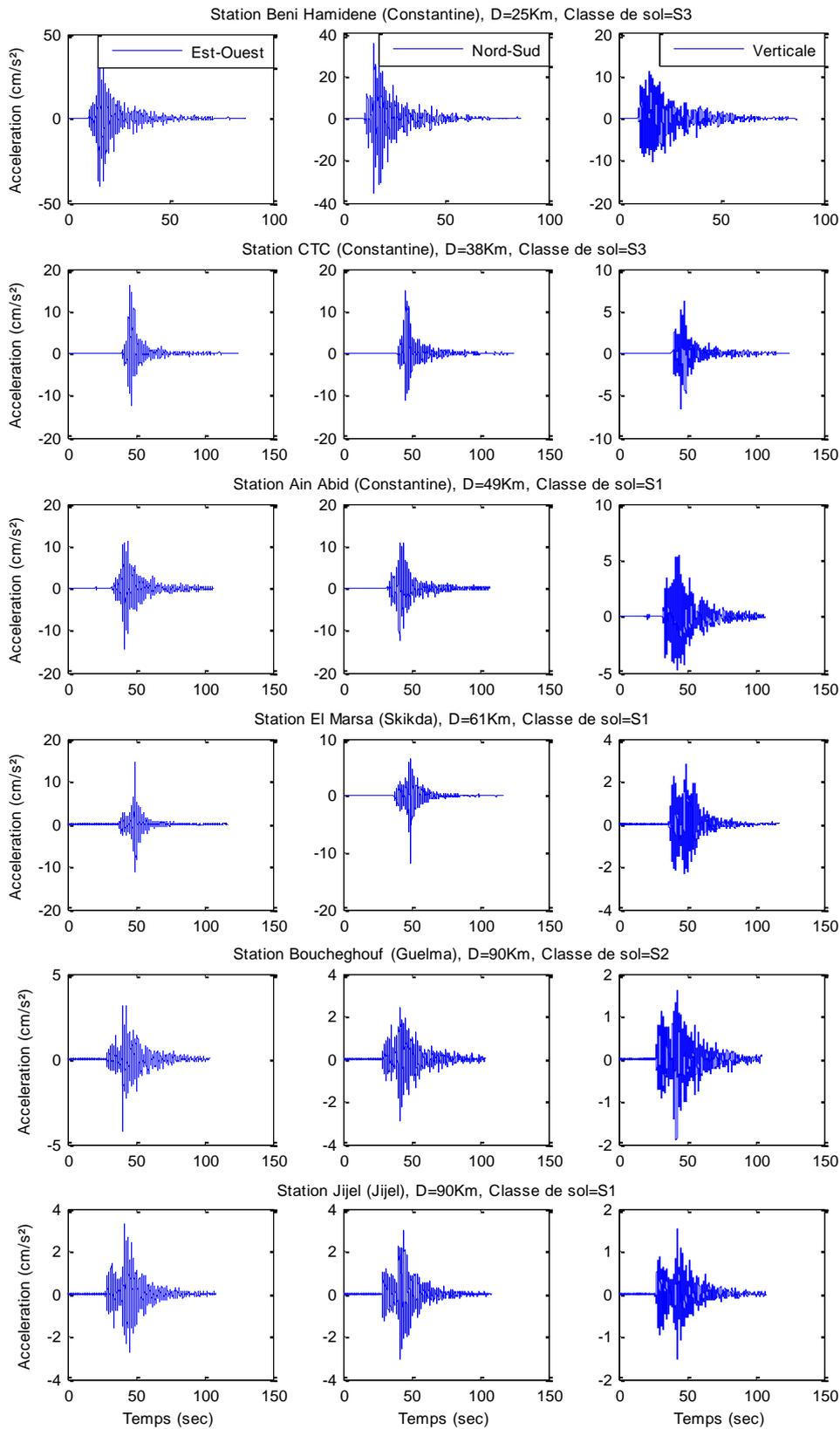


Figure 1. Accélérations temporelles enregistrées dans les trois (03) directions (Est-Ouest à gauche, Nord-Sud au milieu et verticale à droite) lors du séisme M5.2 de Skikda du 22/11/2020 par les six (06) stations du réseau régional du CGS

II-2 Classification des sites des six (06) stations

La classification des sites est une étape primordiale pour l'estimation des effets de site. Les règles RPA99 proposent quatre (04) classes de site S1 (Rocher), S2 (Ferme), S3 (Meuble) et S4 (Très Meuble). L'importance de cette classification repose sur le fait que la nature du sol influe significativement sur le mouvement sismique. En effet, sur sol rocheux le mouvement sismique est caractérisé par un contenu fréquentiel haute fréquence et une amplitude plus faible, alors que sur un sol meuble, il est caractérisé par un contenu fréquentiel basse fréquence et une amplitude élevée. Cette classification requiert la connaissance des vitesses des ondes de cisaillement, ou bien d'autres paramètres géotechniques (N_{SPT} , résistance de pointe, pression limite ...etc.) sur une profondeur moyenne de 30 m. Cette information est généralement peu disponible à cette profondeur à cause du coût des essais géotechnique et géophysiques. D'autres approches alternatives basées sur la mesure du bruit de fond utilisé pour le calcul des rapports spectraux H/V sont utilisées à moindre coût et donnent des résultats satisfaisant. Pour la classification des sites des trois stations, on utilise l'approche développée par Laouami (2018b, 2020), qui propose des courbes H/V cibles (Figure 2) pour chaque classe de sol et un indice de classification qui est basé sur le calcul de la corrélation entre les courbes H/V cible et H/V mesurée à partir du bruit de fond ou du signal sismique. Les principaux résultats de l'approche sont (i) la classification du site selon les codes et (ii) la fréquence fondamentale du site. La figure 2 montre les courbes cibles H/V pour les quatre (04) types de sol S1, S2, S3 et S4. On peut remarquer que chaque classe de sol est caractérisée par une plage de fréquence et un niveau d'amplification, et que les intersections entre les 4 courbes délimitent les frontières en termes de fréquences entre les 4 classes de sol. Le tableau 2 montre les plages de fréquence pour les 4 classes de sol.

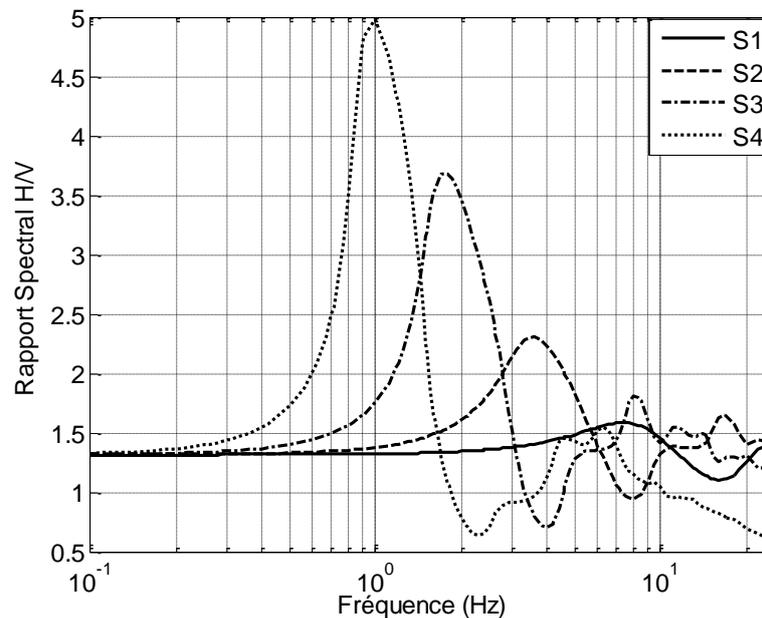


Figure 2. Courbes cibles H/V pour les quatre (04) types de sol S1, S2, S3 et S4.

Tableau 2. Intervalles de fréquence pour les 4 classes de sol.

Classe de sol	SC-A	SC-B	SC-C	SC-D
fréquence (Hz)	>5.75	2.78 – 5.75	1.43 – 2.78	< 1.43

L'indice de classification SI (équation 1) est le rapport du coefficient de corrélation R (équation 2) qui mesure la similarité entre H/V cible et H/V mesurée et l'erreur moyenne

quadratique MQE (équation 3) qui mesure est la différence d'amplitude entre H/V cible et H/V mesurée.

$$SI = \frac{R}{MQE} \quad (1)$$

$$R = \frac{c(\overline{H/V}(f), H/V(f))}{\sqrt{c(\overline{H/V}(f), \overline{H/V}(f)) \cdot c(H/V(f), H/V(f))}} \quad (2)$$

$$MQE = \frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^N (\overline{H/V}(f_i) - H/V(f_i))^2 \right] \quad (3)$$

où $C(\overline{H/V}, H/V) = E[(\overline{H/V})^* \cdot H/V]$ est covariance entre $\overline{H/V}$ cible et H/V mesurée, E est la moyenne mathématique, f is the frequeest la fréquence en Hz, et N est le nombre total de fréquences.

Pour le calcul des rapports spectraux H/V mesurés, on a utilisé les signaux sismiques au lieu du bruit de fond. Le calcul de l'indice de classification au niveau des six (06) stations fourni le résultat de classification des six (06) stations dans le tableau 3.

Tableau 3. Classification des six (06) stations accélérométriques qui ont enregistré le séisme de Skikda du 22/11/2020

Station	Classification selon	Fréquence
	RPA99/2003	prédominante (Hz)
BHN	S3	1,7
CTC	S3	2
ABID	S1	6,2
MRSA	S1	5,8
BCHG	S2	3,45
JIJ	S2	3

II-3 Modèle de prédiction du mouvement sismique et comparaison avec les accélérations enregistrées

Le Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique (CGS) dispose depuis 2018 de modèles de prédiction de mouvements sismiques horizontal (Laouami et al., 2018a) et vertical (Laouami, 2019) développés à partir d'une base de données de mouvements forts Algérienne et Euro Méditerranéenne contenant plus de 1600 enregistrements dont l'ensemble des séismes survenus en Algérie depuis le séisme d'El Asnam en 1980 jusqu'à 2016. Ce modèle, propre au contexte sismotectonique Algérien, permet de prédire le mouvement sismique (Accélération, vitesse, Spectre de réponse) au niveau d'un site donné connaissant la magnitude (donnée par les organismes de sismologie), la distance hypocentrale entre la faille sismique et le site considéré, et la classification du site (S1 rocher, S2 ferme, S3 meuble, S4 très meuble). Ce dernier paramètre peut être obtenu en utilisant une simple mesure de bruit de fond (Microtremor) à l'aide d'un sismographe et en utilisant la nouvelle approche de classification à partir des mesures de bruit de fond. Cet outil de prédiction, le premier pour l'Algérie, est une donnée de base pour le calcul de l'aléa sismique et l'élaboration de la carte de zonage sismique de l'Algérie.

Le modèle est donné par l'expression suivante :

$$\log_{10} \text{PSA}(f) = a(f) \cdot M_w + b(f) \cdot d - \log_{10} d + c_{1,2,3}(f) + \sigma(f) \quad (4)$$

PSA est l'accélération spectrale (spectre de réponse), M_w est la magnitude moment, d est la distance hypocentrale en Km, $c_{1,2,3}$ sont des coefficients fonction de la fréquence tel que c_1 indique le rocher, c_2 le sol ferme et c_3 le sol meuble, f est la fréquence en Hz, $\sigma(f)$ est l'écart type fonction de la fréquence.

La figure 3 montre la comparaison des spectres horizontaux enregistrés (en vert) avec les spectres prédits moyen (en noir : 50% de non dépassement), moyen +01 écart type (en rouge: 85% de non dépassement) et moyen - 01 écart type (en bleu: 15% de non dépassement), pour les six (06) stations (sub-graphes 1 à 6). De cette comparaison, on remarque une bonne corrélation entre les enregistrements et les accélérations prédites pour les 04 stations Beni Hamidene, CTC-Constantine, Ain Abid, et El Marsa située dans un rayon de 61 Km. Une surestimation des accélérations dans les basses périodes au niveau des stations de Boucheghouf et Jijel qui sont situées à une distance de 90 Km de l'épicentre et enregistrant de très faible accélérations (0.004g), inférieures au seuil minimum requis en génie parasismique.

Le sub-graph 7 montre la comparaison entre l'accélération temporelle enregistrée (en rouge) et l'accélération simulée (en bleu) au niveau de la station de Béni Hamidene, alors que le subgraph 8 montre la comparaison entre le spectre enregistré (en rouge) et le spectre prédit (en bleu) au niveau de la même station. La simulation de l'accélération synthétique est faite en utilisant la théorie des vibrations aléatoires des structures (Response Spectrum Compatible Acceleration, Dynamics of Structures, Clough and Penzien). Le spectre prédit au niveau de la station de Béni Hamidene est utilisé pour la simulation de l'accélération synthétique au niveau de la même station. Le subgraph 7 montre que l'accélération simulée (la phase forte du signal) au niveau de la station de Beni Hamidene est bien corrélée avec l'accélération enregistrée.

Ces résultats démontrent la fiabilité du modèle de prédiction du mouvement sismique développé au CGS pour le contexte sismotectonique Algérien. En l'absence d'enregistrements, c'est un outil robuste permettant de prédire et simuler les accélérations sismiques pour différents scénarios sismiques. Dans la section suivante, on présente la prédiction du spectre d'accélération et la simulation de l'accélération synthétique associée au niveau de la zone d'El Harrouch.

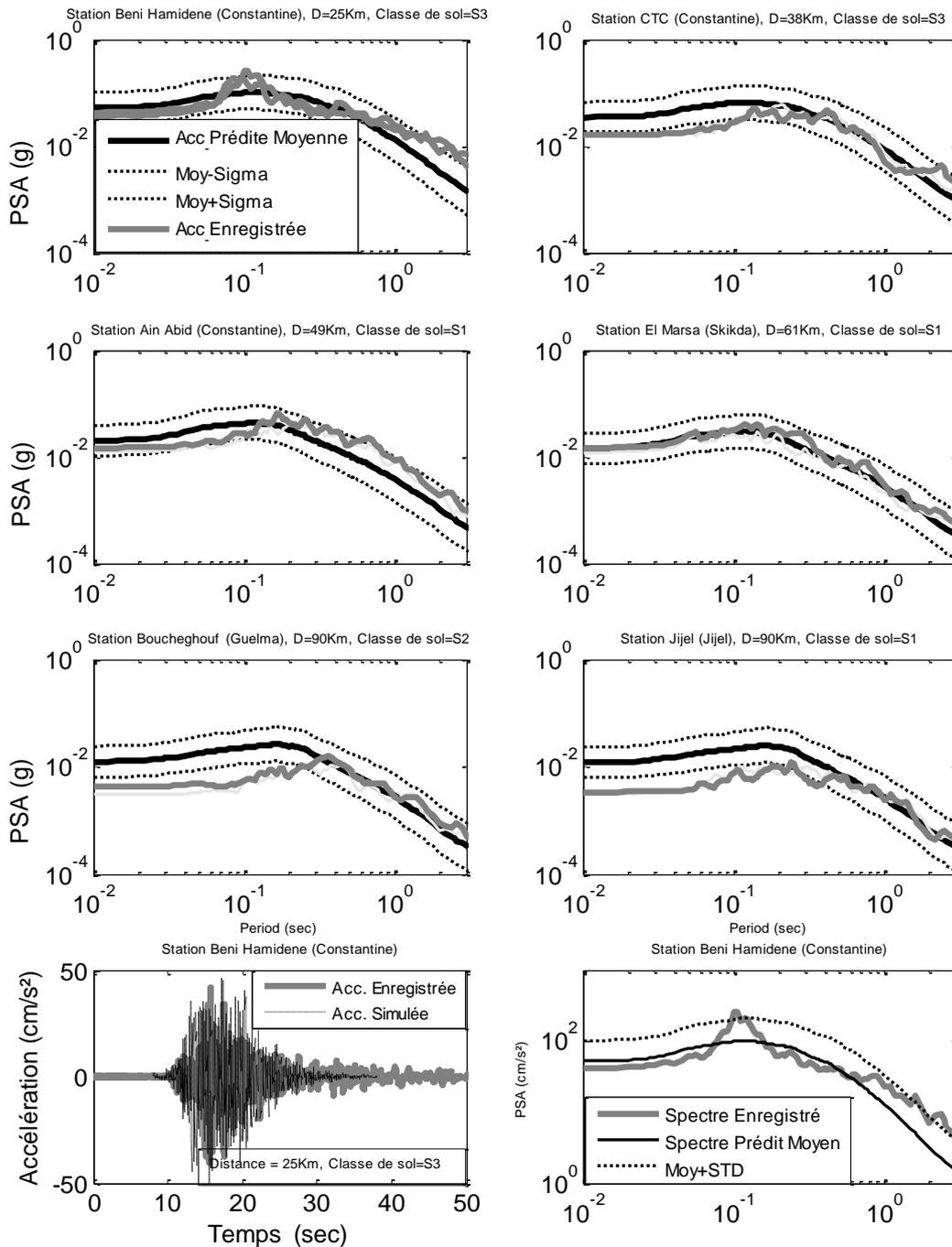


Figure 3. Comparaison entre les accélérations horizontales enregistrées au niveau des six (06) stations et prédites par le modèle de prédiction.

II-4 Prédiction du mouvement sismique dans la zone d'El Harrouch

La région d'El Harrouch étant la plus proche zone affectée par le séisme et située selon le CRAAG à 12 Km de l'épicentre du séisme du 22/11/2020 ($M_w=5.2$). Fort heureusement, le séisme n'a pas provoqué des pertes humaines, et très peu de dégâts légers sont causés aux bâtiments. Il est important de savoir le niveau de la sollicitation sismique dans cette région. Le site étant dépourvue de station accélérométrique, l'utilisation de modèle de prédiction, qui a permis de bien prédire les accélérations enregistrées, devient indispensable pour l'estimation de l'accélération sismique dans cette zone. Le modèle de prédiction est utilisé pour le scénario suivant :

- Magnitude $M_w=5.2$
- Distance hypocentrale site El Harrouche – foyer du séisme est prise égale à 12 Km (selon le CRAAG)
- Classe du site : S1 (Rocher)

La figure 4 montre les spectres de réponse moyen et moyen +/- écart type prédit par le modèle. L'accélération maximale (PGA=PSA(T=0)) moyenne prédite est de l'ordre de 0.08 g, ce qui explique le peu de dégâts enregistrés dans la région d'El Harrouche. La prédiction montre que ce niveau d'accélération peut atteindre 0.15 g lors de séismes futures (voir l'enveloppe donnée par la courbe rouge en pointillée). Le spectre moyen (en noir) est utilisé pour la simulation d'accélérogrammes synthétiques compatibles avec le spectre moyen prédit. La figure 4 montre l'accélérogramme synthétique (à droite) générée pour la zone d'El Harrouch. Il faut préciser que la durée de la phase forte des accélérogrammes synthétiques est déterminée en utilisant le Modele de Bommer et al (BSSA, 2009) "Empirical Equations for the Prediction of the Significant, Bracketed and Uniform Duration of Earthquake Ground Motion" qui permet d'estimer cette durée en fonction de la magnitude du séisme, la distance du site par rapport à la source sismique et la classe du sol.

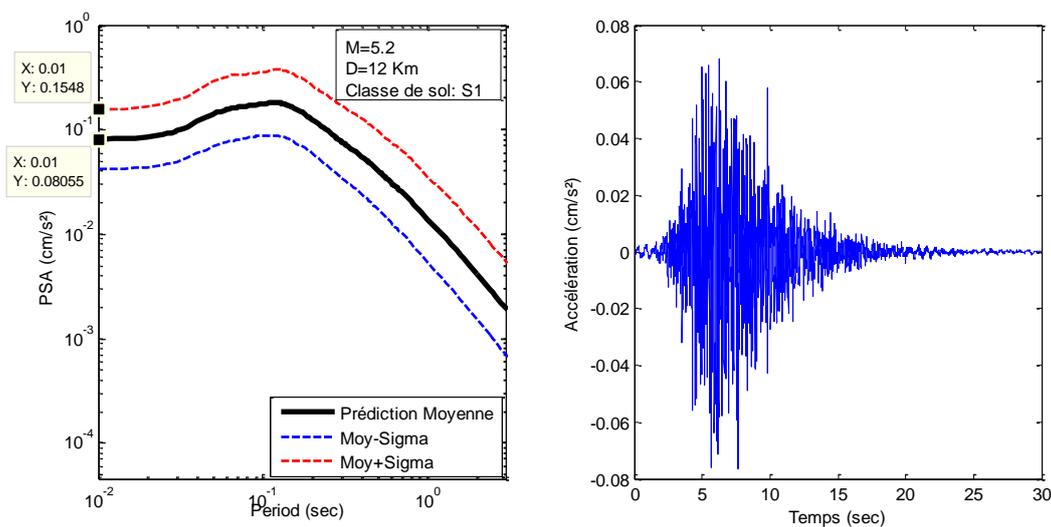


Figure 4. Prédiction du spectre d'accélération (à gauche) et simulation de l'accélération synthétique (à droite) au niveau de la zone d'El Harrouch (au rocher).

II-5 Comparaison des accélérations enregistrées avec les spectres des règles RPA99/2003

Pour le calcul des structures aux sollicitations sismiques, les règles parasismiques Algériennes proposent des niveaux d'accélération par zone sismique (tableau 4) et une forme spectrale pour le spectre de réponse élastique donnée par les équations 5 à 8 (tableau 5).

Tableau 4. Coefficient d'accélération de zone A

Groupe	Zone			
	I	IIa	IIb	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	0.10	0.14	0.18

Tableau 5. Ordonnées du spectre de réponse élastique des RPA99-2003.

$$S_a(\%g) = \begin{cases} 1.25A \left(1 + \frac{T}{T_1} (2.5\eta - 1) \right) & 0 \leq T < T_1 & (5) \\ 2.5\eta(1.25A) & T_1 \leq T < T_2 & (6) \\ 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{T_2}{T} \right)^{2/3} & T_2 \leq T < 3s & (7) \\ 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{T_2}{3} \right)^{2/3} \left(\frac{3}{T} \right)^{5/3} & T > 3s & (8) \end{cases} \quad (a)$$

	S1	S2	S3	S4
Classe de sol				
T1 (sec)	0.15	0.15	0.15	0.15
T2 (sec)	0.30	0.40	0.50	0.70

Il est d'usage de comparer en cas de séisme, les accélérations enregistrées avec les dispositions réglementaires. Deux paramètres sont considérés lors de cette comparaison, l'accélération maximale qui traduit l'amplitude du mouvement sismique et la forme spectrale du spectre de réponse élastique qui traduit le contenu fréquentiel. Dans ce cadre, la comparaison est faite avec les enregistrements de la station Beni Hamidene installée sur un sol de classe S3 (Meuble), ayant enregistré l'accélération maximale. Située à 25 Km de l'épicentre, cette station a enregistré une accélération de l'ordre de 0.04 g bien inférieure à celle recommandée par les règles RPA99/2003 qui est égale à 0.15g correspondant à la zone sismique IIa et au groupe d'usage 2. Cependant, si on considère la zone d'El Harrouch qui se trouve à 12 Km de l'épicentre (selon le CRAAG), l'accélération prédite moyenne est de l'ordre de 0.08 g mais peut atteindre 0.15 g si on considère une probabilité de non dépassement de 85%, c'est-à-dire de l'ordre de ce qui est recommandé par les règles RPA99/2003 pour le rocher.

La figure 5 montre la comparaison entre les spectres élastiques normalisés enregistré et réglementaire pour la classe de sol S3. On remarque un décalage entre les deux plateaux (qui correspond à l'accélération maximale constante). Le spectre réglementaire présente un plateau situé entre $T_1=0.15s$ et $T_2=0.50s$ pour la classe de sol S3, alors que les spectres enregistré et prédit par le modèle de prédiction montrent un plateau qui glisse vers les basses périodes entre 0.06s et 0.30s. Cette plage de période est propre aux séismes faibles à modérés comme ceux de Mila ($M_w=4.9$) et Skikda ($M_w=5.2$). Cette situation induit une surestimation de l'action sismique dans une plage de période (haute). Pour cette raison, les règles Européennes EC8 proposent deux catégories de magnitudes: le type 1 pour les magnitudes supérieures à 5.5 et le type 2 pour les magnitudes inférieures à 5.5. Un travail dans ce sens est actuellement en cours au CGS (Projet de recherche) dont l'objectif essentiel est de définir deux types de spectres : un pour la zone I et IIa qui représentent une sismicité faible à modéré, et un autre pour les zones IIb et III qui représentent une sismicité modéré à forte.

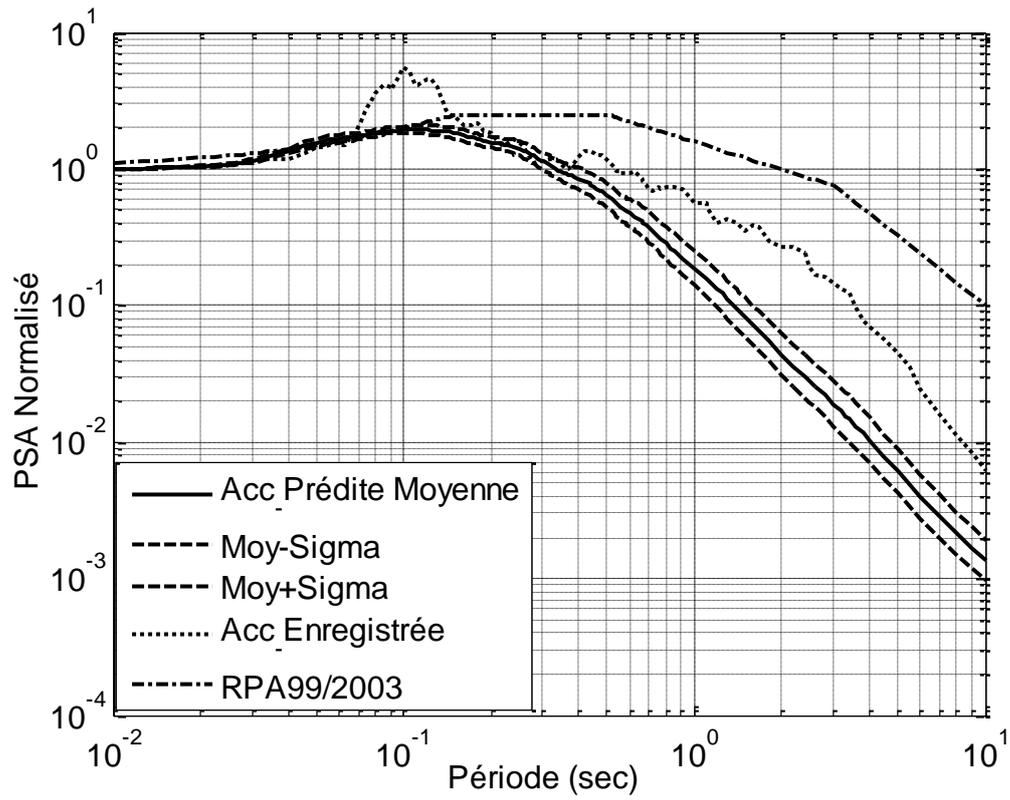


Figure 5. Comparaison entre les spectres élastiques normalisés prédit, enregistré, et réglementaire pour la classe de sol S3 au niveau de la station de Beni Hamidene.

III CONCLUSIONS

Le séisme de Skikda de magnitude $M_w=5.2$ est un séisme modéré qui n'a pas provoqué des pertes humaines et très peu de dommages légers aux structures dans les zones proches de l'épicentre. Ce rapport traite essentiellement de l'analyse des enregistrements sismiques des données enregistrées par le réseau accélérométrique du CGS, la performance du modèle de prédiction développé récemment au CGS, la caractérisation des sites des stations, et la comparaison avec les accélérations recommandée par les règles RPA99/2003. Les analyses effectuées ont permis de souligner les points suivants :

- Dans un rayon de quatre vingt dix (90) Km par rapport à l'épicentre du séisme, le séisme de Skikda a été enregistré par six (06) stations installées et gérées par le CGS
- L'accélération maximale, égale à 42 cm/s^2 (0.04g), est enregistrée au niveau de la station de Beni Hamidene située à une distance de 25 Km de l'épicentre du séisme sur un sol de classe S3.
- La classification des sites des 06 stations a permis de classer les stations Beni Hamidene et CTC- Constantine en classe de sol S3, Ain Abid et El Marsa en classe de sol S2, Boucheghouf et Jijel en classe de sol S1.
- Le modèle de prédiction du mouvement sismique développé récemment par le Centre National de Recherche appliquée en Génie Parasismique (CGS) a permis de prédire les niveaux d'accélérations enregistrées au niveau de 04 stations dans un rayon de 60 Km. Les 02 autres situées à 90 Km ont enregistrées des accélérations très faibles (0.004g) sans intérêt en génie parasismique.
- La comparaison entre les accélérations enregistrées lors du séisme de Skikda et réglementaires recommande d'aller vers une confrontation entre les accélérations enregistrées lors des séismes produits en Algérie et ailleurs (base de données accélérométriques mise en place au CGS) et les spectres réglementaires pour permettre une révision basée sur les connaissances les plus récentes
- En l'absence de station accélérométrique dans la zone d'El Harrouch, le modèle de prédiction du mouvement sismique est utilisé pour prédire le niveau d'accélération dans cette zone proche de l'épicentre. L'accélération maximale ($PGA=PSA(T=0)$) moyenne prédite est de l'ordre de 0.08 g, ce qui explique le peu de dégâts enregistrés dans la région d'El Harrouche. La prédiction montre que ce niveau d'accélération peut atteindre 0.15 g lors de séismes futures.
- Le spectre moyen prédit est utilisé pour la simulation d'accélérogrammes synthétiques compatibles dans la zone d'El Harrouche.
- Ces résultats démontrent la fiabilité du modèle de prédiction du mouvement sismique développé au CGS pour le contexte sismotectonique Algérien. En l'absence d'enregistrements, c'est un outil robuste permettant de prédire et simuler les accélérations sismiques pour différents scénarios sismiques.

Références

- Julian J. Bommer, Peter J. Stafford, and John E. Alarcón (2009) "Empirical Equations for the Prediction of the Significant, Bracketed, and Uniform Duration of Earthquake Ground Motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 99, No. 6, pp. 3217–3233, doi: 10.1785/0120080298.
- Eurocode 8, Design of Structures for Earthquake Resistance—Part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings. EN 1998-1: 2004. Comite Europeen de Normalisation, Brussels, 2004
- Nasser Laouami, Abdennasser Slimani, Said Larbes, 2018a, Ground motion prediction equations for Algeria and surrounding region using site classification based. H/V spectral ratio. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 16:2653–2684. doi.org/10.1007/s10518-018-0310-3.
- Nasser Laouami, Mohamed Hadid, Noureddine Mezouar. 2018b. Proposal of an empirical site classification method based on target simulated horizontal over vertical spectral ratio. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 16:5843–5874, doi.org/10.1007/s10518-018-0420-y.
- Nasser Laouami. 2019. Vertical ground motion prediction equations and vertical-to-horizontal (V/H) ratios of PGA and PSA for Algeria and surrounding region. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 17:3637–3660, doi.org/10.1007/s10518-019-00635-y.
- Nasser Laouami. 2020. Proposal for a new sie classification tool using microtremor data. *Bulletin of Earthquake Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s10518-020-00882-4>.
- RPA. Règles Parasismiques Algériennes 1999 Version 2003. Centre National de Recherche appliquée en Génie Parasismique (CGS).

Mission post-séisme effectuée par

Bechtoula Hakim
Laouami Nasser
Bouhadad Youcef

Mission Sismologie (Récupération des données accélérométriques)

Haddouche Djamel
Mokhtari Mustapha
Achemine Yasmine
Larbes Said

Elaboration du rapport

Laouami Nasser
Slimani Abdennasser