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 MILA DU 07/08/2020

$(M_w = 4.9)$

Aspects Sismologique et Géotechnique

Octobre 2020

SOMMAIRE

I INTRODUCTION	3
II MISSION SISMOLOGIQUE	3
II-1 Enregistrements du mouvement sismique	3
II-2 Classification des sites des trois (03) stations	5
II-3 Modèle de prédiction du mouvement sismique	7
II-4 Prédiction du mouvement sismique dans la zone d'El Kherba	9
II-5 Comparaison des accélérations enregistrées avec les spectres des règles RPA99	10
III MISSION GEOTECHNIQUE	13
III-1 Glissement de terrain de Mila	13
III-2 Classification des sites du quartier El Kherba	17
IV CONCLUSIONS	20
Références	21

I INTRODUCTION

Un séisme de magnitude M_w =4.9 a ébranlé la wilaya de Mila le 07/08/2020 à 07 :15 :37. Selon le CRAAG, l'épicentre se situait à 2 Km sud-est de la localité de Hammala. A rappeler que la même région a été ébranlée par un séisme de magnitude 4.5 le 17/07/2020.

Vu la magnitude moyenne du séisme, Il n'y a pas eu d'apparition de faille en surface mais la secousse a provoqué quelques chutes de blocs sur la routes des gorges de Grarem mais surtout un glissement de terrain spectaculaire, de plusieurs hectares, dans la partie ouest de la ville de Mila au quartier El Kherba. Ce glissement a malheureusement endommagé plusieurs habitations.

Suite au séisme, le CGS a effectué plusieurs missions (Sismologie, Géotechnique) au niveau de la région la plus sinistrée. 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) (iv) la caractérisation des sites objet du glissement spectaculaire et développement d'une carte préliminaire de microzonage.

II MISSION SISMOLOGIQUE

Le séisme de Mila de magnitude M_w =4.9 est considéré comme un séisme faible à 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 croute 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 trente (30) Km par rapport à l'épicentre du séisme, le séisme de Mila a été enregistré par trois (03) stations installées et gérées par le CGS. Il s'agit des stations d'accélérographe installées en champ libre respectivement au niveau du barrage de Béni Haroun (station BBH, Rive gauche de la digue), dans la localité de Béni Hamdène (station BHN, Constantine), et dans la localité de Sidi Maarouf (station SDM, Jijel). Elles disposent 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 des séismes du 17/07/2020 (Station BBH) et du 07/08/2020 (stations BBH, BHN, SDM). Les traces temporelles sont illustrées dans les figures 1 et 2. On peut souligner les points suivants:

- Les accélérations horizontales maximales au sol (PGA) enregistrées par la station BBH qui se trouve à une distance hypocentrale d'environ 5 Km, sont importantes dans les deux directions E-O et N-S, elles atteignent la valeur de 0.23 g lors du séisme du 07/08/2020 (M_w=4.9). Il faut rappeler que la wilaya de Mila est classée dans la zone de sismicité moyenne IIa, avec une accélération de zone égale à 0.15g pour les ouvrages courants ou d'importance moyenne.
- L'accélération maximale verticale enregistrée par la station BBH a atteint 0.24 g dépassant légèrement l'accélération horizontale. C'est un phénomène champ proche qui montre l'importance de cette composante lorsque le site est situé à proximité du plan de faille.
- Les stations SDM et BHN qui se trouvent à des distances hypocentrales d'environ 16 et 27 Km respectivement (Champ intermédiaire et lointain pour M_w =4.9) présentent des accélérations relativement faibles à cause du phénomène d'atténuation. On peut souligner la présence d'un effet de site au niveau de la station BHN induisant une accélération plus importante par rapport à la station SDM pourtant située à une distance plus proche de l'épicentre. En effet, comme cela est montré ci-dessous (voir section classification des sites des stations), la station SDM est classée S2 et la station BHN est classée S3 selon les règles RPA99. Il est bien établi que les sols meubles amplifient beaucoup plus que les sols fermes particulièrement lors de séismes modérés (M_w <5.5).
- Loin du champ proche, la composante verticale est plus faible que les deux (02) composantes horizontales.

		Statio	on BBH	ł	Statio	on SDI	М	Statio	on BH	N
Séisme	Magnitude (M _w)	Accélération maximale au sol (PGA = PSA(T=0)) (cm/s ²))))					
		E-O	N-S	Ver	E- O	N- S	Ver	E- O	N- S	Ver
Séisme de Mila du 17/07/2020	4.5	177	146	89						
Séisme de Mila du 07/08/2020	4.9	234	232	236	27	28	20	33	42	32

 Tableau 1. Accélérations maximales au sol enregistrées dans les trois directions au niveau des trois (03) stations (BBH, BHN, SDM).



Figure 1. Accélération temporelles dans les trois directions enregistrées lors du séisme du 07/08/2020 (Mw=4.9) par les trois stations BBH, SDM et BHN.



Figure 2. Accélération temporelles dans les trois directions enregistrées lors du séisme du 17/07/2020 (Mw=4.5) par la station BBH.

II-2 Classification des sites des trois (03) 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 contenue fréquentiel haute fréquence et une amplitude plus faible, alors que sur un sol meuble, il est caractérisé par un contenue 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 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 cout 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 3) 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. Les principaux résultats de l'approche sont (i) la classification du site selon les codes et (ii) la fréquence fondamentale du site. La figure 3 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 entres 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 issues de l'intersection entre les 4 courbes.



Figure 3. Courbes cibles H/V pour les quatre (04) types de sol S1, S2, S3 et S4.

Tableau 2. Définition des plages de fréquences pour les 4 classes de sol.						
	Classe de sol	S1	S2	S 3	S4	
	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.

$$SI = \frac{R}{MQE} \tag{1}$$

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

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

où $C(\overline{H/V}, H/V) = E[(\overline{H/V})^*, H/V]$ 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.

La figure 4 montre la mesure des trois composantes (E-O, N-S, Ver) d'un bruit de fond au niveau de la station BBH. La durée de la mesure doit être d'au moins 15 minutes. Le calcul de l'indice de classification au niveau des trois stations indique que la station BBH est de classe S2 (Ferme), la station SDM est de classe S2 (Ferme) et la station BHN est de classe S3 (Meuble). La Figure 5 montre la comparaison entre les rapports spectraux mesurés (moyen et moyen+-écart type) avec les rapports spectraux cibles. Il y a lieu de remarquer la forte corrélation entre H/V mesuré et H/V cible pour les 03 stations.



Figure 4. Mesure de bruit de fond au niveau de la station BBH.



Figure 5. Comparaison entre H/V cible et H/V mesurée et classification des sites des 3 stations BBH, SDM et BHN en classe de sol S2, S2 et S3 respectivement.

II-3 Modèle de prédiction du mouvement sismique

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 :

$$\log_{10} PSA(f) = a(f) \cdot M_{w} + b(f) \cdot d - \log_{10} d + c_{1,2,3}(f) + \sigma(f)$$
(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 le fréquence en Hz, $\sigma(f)$ est l'écart type fonction de la fréquence.

La figure 6 montre la comparaison des spectres horizontaux enregistrés (en vert) avec les spectres prédis 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 stations BBH (à gauche), SDM (au milieu) et BHN (à droite). On remarque une bonne corrélation entre les enregistrements et les accélérations prédites. Les accélérations enregistrées étant à l'intérieures du fuseau de prédiction « moyenne-écart type / moyenne+écart type ». Les accélérations maximales au sol (PGA) enregistrées et prédites pour la station BBH sont du même ordre, 0.23g pour le séisme du 07/07/2020.

Ces résultats préliminaires soulignent l'importance des accélérations enregistrées au niveau du barrage de Béni Haroun, à comparer avec les accélérations de calcul du barrage lors de sa conception et réalisation. Ils démontrent la fiabilité du modèle de prédiction du mouvement sismique développé au CGS pour le contexte sismotectonique Algérien.



Figure 6. Comparaison entre les accélérations horizontales enregistrées au niveau des stations BBH (à gauche), SDM (a milieu)) et BHN (à droite) lors du séisme du 07/08/2020 et celles prédites par le modèle de prédiction.

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

La région d'El Kherba a enregistrée un glissement de terrain spectaculaire qui est à l'origine des dommages occasionnés aux habitations. Puisque le séisme du 07/08/2020 (M_w=4.9) était le facteur déclenchant du glissement, il est important de savoir le niveau de la sollicitation sismique qui a déclenché le glissement d'El Kherba. 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 qui aurait déclenché le glissement. Le modèle de prédiction du mouvement sismique est utilisé pour le scénario suivant :

- Magnitude M_w=4.9
- distance hypocentrale site El Kherba foyer du séisme est prise égale à 14 Km
- classe du site S4 (très meuble) (voir section II-2)

La figure 7 montre les spectres de réponse moyen et moyen +/- écart type prédis par le modèle. L'accélération maximale (PGA=PSA(T=0)) prédite peut atteindre 0.16 g. Ce niveau d'accélération, combiné avec la nature molle du terrain (très faible caractéristiques mécaniques), aurait été un facteur de déclenchement du glissement spectaculaire de la zone d'El Kherba. Le spectre moyen (en noir) est utilisé pour la simulation d'accélérogrammes synthétiques compatibles avec le spectre moyen prédit. La figure 8 montre quatre (04) accélérogrammes synthétiques (à gauche) générées pour la zone d'El Kherba, alors que les figures de droite montrent les spectres des quatre accélérogrammes compatibles avec le spectre prédit (en bleu). 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 connaissant la magnitude du séisme, la distance du site par rapport à la source sismique et la classe du sol.



Figure 7 : Prédiction de l'accélération sismique au niveau du site d'El Kherba.



Figure 8. Accélérogrammes synthétiques générées pour la zone d'El Kherba.

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

Pour le calcul des structures aux sollicitations sismiques, les règles parasismiques Algériennes proposent des niveaux d'accélérations par zone sismique (tableau 3) et une forme spectrale pour le spectre de réponse élastique donnée par les équations 5 à 8 (tableau 4).

Tableau 5. Coefficient u acceleration de zone A						
	Zone					
Groupe	Ι	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 3.	Coefficient	d'accélération	de zone A
------------	-------------	----------------	-----------

Tableau 4. Ordonnées du spectre de réponse élastique des RPA99-2003.

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

				(b)
Classe de sol	S1	S2	S3	S4
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 contenue fréquentiel. Dans ce cadre, la comparaison est faite avec les enregistrements de la station BBH installée sur un sol de classe S2 (Ferme). Le tableau 5 montre la comparaison entre les accélérations maximales. On remarque une différence entre les accélérations horizontales enregistrée et réglementaire. Cette différence est probablement due à l'effet de la proximité de la faille (distance hypocentrale d'environ 5 Km, c.-à-d. une distance R_{jb} presque nulle). Ce cas est traité par l'article 2.3 des règles RPA99 qui stipule qu'il faut éviter la proximité immédiate d'une faille reconnue active pour les ouvrages importants, et les ouvrages d'importance moyenne doivent faire l'objet d'un niveau de protection plus élevé.

	Accélérations (g)				
	Composante E-O	Composante Ver			
Enregistrées	0.234	0.232	0.236		
RPA99	0.	0.5 x Acc _{horizontale}			

Tableau 5. Comparaison entre les accélérations maximales enregistrées et réglementaires

La figure 9 montre la comparaison entre les spectres élastiques normalisés enregistré et réglementaire pour la classe de sol S2. On remarque un décalage net entre les deux plateaux (qui correspond à l'accélération maximale). Le spectre réglementaire présente un plateau situé entre $T_1=0.15s$ et $T_2=0.40s$, alors que les spectres enregistrée et prédit par le modèle de prédiction montrent un plateau vers les basses périodes entre 0.05s et 0.20s. Cette plage de période est propre aux séismes faibles à modérés comme celui de Mila ($M_w=4.9$). Cette situation induit une surestimation de l'action sismique dans une plage de période (haute) et une sous-estimation dans une autre plage (basse). Pour cette raison, les règles Européennes EC8 proposent deux plages de périodes : le type 1 pour les magnitudes supèrieures 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 9. Comparaison entre les spectres élastiques normalisés enregistré et réglementaire pour la classe de sol S2

III MISSION GEOTECHNIQUE

L'équipe géotechnique et dynamique des sols du Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique (CGS) a mené une mission de terrain pour d'une part délimiter la zone touchée par le glissement et rapporter les fissures apparues avec leurs orientations dans cette zone (mesures GPS) et d'autre part, mener une campagne de mesures géophysiques de types microtremors (bruits de fond) afin de caractériser ce site en termes de comportement dynamique (classe de site).

III-1 Généralités sur la géologie, géotechnique et hydrogéologie de la région :

La région de Mila fait parie de l'avant-pays de la chaine alpine d'Algérie nord orientale. Elle constitue une zone de charnière entre, au nord, le domaine interne allochtone, caractérisé par des nappes de charriages, à vergence sud, en relation avec une tectonique compressive et au Sud le domaine parautochtone où s'installe le bassin néogène post-nappes constantinois (Coiffait, 1992).

La ville de Mila se situe au cœur de ce bassin qui forme une vaste dépression de quelques quarantaines de Kilomètres de largeur et de 120km de longueur, correspondant à un remplissage d'une dépression par des dépôts néogènes. Ces dépôts mio-plio-quaternaire représentent la couverture d'un substratum formé de nappes de flysch et de formations telliennes généralement allochtones.

Selon les données géologiques, les formations lithologiques du bassin Néogène Constantinois sont essentiellement sédimentaires, dominés par des dépôts détritiques (sables, argiles, graviers et conglomérats), et évaporitiques (gypse), à ces dépôts détritiques et évaporitiques s'ajoutent des formations carbonatées, représentées par des calcaires lacustres.

Les dépôts accumulés durant le Moi-Pliocene montrent une grande hétérogénéité dans leur répartition spatiale et temporelle. Elles sont aussi caractérisées par une variabilité de facies et d'épaisseur.

Le zone de Mila présente des formations géologiques de nature argileuse et marneuse entrecoupées de minces passages sableux (10 à 20cm d'épaisseur), gypseux et des intercalations de conglomérats et de grès. Ces formations argilo-marneuses sont très plastiques, gonflantes.

Mila est entouré d'oueds, tel que Oued El Kebir à l'Est (Ouest de Grarem) et Oued Cotton, au Nord de la ville de Mila. Le climat de Mila est caractérisé par des précipitations assez importantes (600 mm en moyenne).

Aussi, de nombreuses sources ressurgissent près de Mila (exemple de la source de Marchau surplombant la ville de Mila à 4Km au Sud).

Plusieurs puits ont été visités afin de déterminer le niveau statique d'eau, sur quatre puits visités, ce niveau varie 3m à 7m.

III-2 Glissement de terrain de Mila

Les paramètres intrinsèques qui gouvernent les glissements sont reliés au climat, à la géologie, à la géomorphologie ou à l'hydrographie.

Les facteurs déclenchant essentiels peuvent être résumés à:

- Modification du régime hydraulique (saturation, pression interstitielles)
- Accélérations produites par les séismes

L'augmentation de la teneur en eau d'un terrain argileux-marneux est étroitement liée aux conditions météorologiques (précipitations importantes (intenses et/ou prolongées) ou enneigement important dont la fonte favorise la saturation) ou accidentelles (infiltrations (fuites dans les réseaux d'AEP, rupture de canalisations souterraines, lâchage d'eau,...) ou remontées de nappes phréatiques.

Il y a lieu de rappeler les glissements spectaculaires de Mila déclenchés après la vague d'enneigement exceptionnelle de 2004-2005 (enneigement d'une semaine répété trois fois durant cet hiver).

Ceci pour expliquer de manière catégorique que l'eau est l'élément moteur de déclenchement des glissements de terrain en pente. En zone sismique, et à cet élément moteur, s'ajoute l'excitation sismique qui est un déclencheur par excellence quant toutes les autres conditions sont présentes et l'équilibre est critique (topographie, géologie défavorable et présence d'eau).

Lors du séisme du 07/08/2020 (Mw=4.9), l'accélération produite par le séisme et amplifiée par la nature meuble du site a été un déclencheur des glissements observés.

La cinétique des mouvements de terrain dépend essentiellement de la topographie du site. Comme les pentes de la zone sont assez faibles (10-20%), les premiers mouvements avec apparition de fissures ont été observés par les habitants dans la partie amont (Sud) 15 minutes après le choc sismique (07H15mn). Le glissement avance vers le nord (sens des pentes) et les habitants du quartier Kandahar (autour des 240 logements dans la partie aval de la pente), 02 Km plus bas, n'ont observé les fissures et glissement qu'à partir de 22H00.

Sur site, les traces du glissement sont flagrantes et les conséquences sur toutes les maisons individuelles sont triviales. Pratiquement, toutes les constructions dans la zone qui a glissée ont subies des dommages sévères. Aussi, même les pylônes électriques, routes ont subis des dommages dans la partie basse de la zone de glissement.

Les fissures sont en général de deux familles, d'orientation E-O (perpendiculairement à la pente) et d'orientation N-S parallèles au sens de la pente et perpendiculaires aux premières et délimitant la zone qui a glissé à l'Est et à l'Ouest.

Toutes les fissures présentent des ouvertures allant de quelques centimètres à, plus de deux mètres. Les profondeurs apparentes de ces fissures varient de 30cm à plus de deux mètres. Ces fissures présentent en général des rejets importants pouvant atteindre 2.50m avec des orientations vers le nord en général mais parfois ce rejet apparait dans l'autre sens.



Photos: Quelques photos illustrant les fissures, les dommages dans les constructions, les routes et les équipements électriques

Afin de délimiter avec une bonne précision la zone qui a glissé, 255 points de mesures GPS ont été relevés après plusieurs sorties sur site (figure 10). Les limites de la zone glissée sont montrées dans les figures 10 et 11 avec plus de détails. Les positions exactes des différentes fissures apparues jusqu'à la date du 12/08/2020 vont être mentionnées dans cette carte ultérieurement.

Figure 10. Positions des points GPS et mesures H/V

Figure 11. Zone de glissement et illustration schématique du mécanisme et caractéristiques du glissement

III-3 Classification des sites du quartier El Kherba

La classification des sites de la zone d'étude est faite avec l'approche développée au CGS, qui propose des courbes H/V cibles pour chaque classe de sol et un indice de classification (voir section II-2). Les principaux résultats de l'approche sont (i) la classification du site selon les codes et (ii) la fréquence fondamentale du site. Ces résultats sont directement utilisables pour la cartographie des effets de site et représente ainsi un premier niveau de microzonation sismique et un outil d'aide à la décision. A cet effet, une première campagne de 45 mesures ponctuelle de bruit de fond a été effectuée juste après le séisme (figure 10) dans le quartier El Kherba en utilisant deux (02) stations de sismographes à trois composantes (02 horizontales et 01 verticale) tout en cernant la zone qui a glissée (figure 10).

Le calcul des rapports spectraux H/V et leurs classification est fait pour les 45 points de mesure avec un logiciel produit au CGS à cet effet. Il permet un calcul automatique avec un fichier d'entrée contenant les noms des 45 mesures, et un fichier de sortie contenant la classification des 45 sites et leurs fréquences fondamentales. Les résultats sont dressés dans le tableau 6. Le résultat de classification permet d'énumérer six (06) sites classés S2 (ferme), treize (13) sites classés S3 (meuble) et vingt six (26) sites classés S4 (très meuble). Les courbes H/V, leurs moyennes et moyennes +écart type sont montrées sur la figure 12 en rouge pour la classe de sol S2 (ferme), en bleu pour la classe de sol S3 (meuble) et en vert pour la classe de sol S4 (très meuble). Les courbes H/V cibles pour les 4 classes de sol sont montrées en magenta. Enfin, l'histogramme montre le nombre de sites par classe de sol. A partir des rapports spectraux moyens, on peut lire la fréquence moyenne pour chaque classe de sol qui sont de 3.8 Hz pour la classe de sol S2, 1.67 Hz pour la classe de sol S3 et 0.8 Hz pour la classe de sol S4.

La cartographie des résultats obtenus pour les 45 points de mesures est montrée sur la figure 13. Elle fait ressortir une classification du quartier El Kherba en deux grande zones, une zone classée S3 (en bleu) au nord et une zone (en vert, plus importante en termes de superficie)

classée S4 au sud. Quelques petites poches classées S3 et S2 apparaissent à l'intérieure de la zone S4. En termes de fréquence fondamentales des sites (tableau 2), la classe de sol S4 (en vert) est caractérisée par des fréquences variant entre 0.7 et 1.43 Hz, la classe de sol S3 (en bleu) par des fréquences variant entre 1.43 et 2.78 Hz, et la classe de sol S2 (en rouge) par des fréquences variant entre 2.78 et 5.75 Hz. Il ressort de la cartographie des résultats le caractère meuble à très meuble de l'ensemble de la zone étudiée du quartier El Kherba. D'un point de vue géotechnique, ce type de sols présentent des résistances plutôt faibles et sont propice aux phénomènes de glissement en présence de pente et de facteurs déclencheurs tels que les séismes et les pluies. D'un point de vue sismique, les sols de classes S3 et S4 sont les plus amplificateurs du mouvement sismique. En l'absence de station accélérométrique dans la zone d'El Kherba, le modèle de prédiction a permit d'estimer l'accélération au niveau de ce site lors du séisme de Mila (Mw=4.9) qui peut atteindre une valeur de 0.16g. Une valeur suffisante pour déclencher le glissement spectaculaire d'El Kherba.

Ces résultats préliminaires traduisent le nombre de points de mesures (45) et leurs distributions spatiales. Une autre campagne de mesure de bruit de fond avec un maillage plus séré et régulier de l'ensemble de la zone d'étude sera programmée.

		Fréquence			Fréquence
Point de		Fondamentale	Point de		Fondamentale
mesure	Classification	(Hz)	mesure	Classification	(Hz)
1	S4	0,77	24	S4	1,4
2	S4	1,1	25	S4	1,3
3	S4	1,1	26	S4	1,4
4	S4	0,71	27	S2	3,8
5	S4	0,9	28	S2	3,8
6	S4	0,71	29	S2	3,8
7	S4	0,71	30	S2	3,8
8	S4	1,2	31	S2	3,8
9	S4	0,8	32	S2	3,8
10	S4	0,77	33	S3	1,85
11	S4	0,8	34	S3	1,56
12	S4	0,77	35	S3	0,77
13	S4	0,77	36	S3	1,85
14	S4	0,77	37	S3	1,7
15	S4	0,8	38	S3	1,7
16	S4	0,77	39	S3	1,51
17	S4	0,77	40	S3	1,67
18	S4	0,77	41	S3	1,72
19	S4	0,77	42	S3	1,61
20	S4	0,83	43	S3	1,67
21	S4	1,4	44	S3	1,67
22	S4	1,4	45	S3	1,67
23	S4	1,3			

 Tableau 6. Classifications des sites et fréquences fondamentales obtenus pour les 45 points de mesures de bruit de fond.

Figure 12. Les rapports spectraux H/V, leurs moyennes et moyennes+écart type, comparés aux courbes H/V cibles pour les différentes classes de sol (S1, S2, S3, S4).

Figure 13. Classification des sites de la zone sinistrée d'El Kherba selon le schéma de classification des règles RPA99 (Sol Rocheux S1, Sol Ferme S2, Sol Meuble S3, Sol Très Meuble S4) et zonation en iso-fréquence.

IV CONCLUSIONS

Le séisme de Mila de magnitude M_w =4.9 a déclenché un glissement spectaculaire dans la région d'El Kherba. Ce glissement a provoqué des dommages importants sur les constructions individuelles. Ce rapport traite de deux aspects : la sismologie de l'ingénieur et la géotechnique. Les enregistrements sismiques, les campagnes de mesures in situ et les analyses effectuées ont permis de souligner les points suivants :

- En champ proche (D_{hypo}=5 Km), les accélérations sismiques horizontales enregistrées par la station BBH sont importantes, de l'ordre de 0.23 g. La composante verticale est légèrement supérieure à celle des deux (02) composantes horizontale. Cette composante verticale peut être préjudiciable quant à la sécurité des ouvrages
- En champ intermédiaire (D_{hypo}=14 Km) et lointain (D_{hypo}=26 Km), les accélérations sismiques horizontales enregistrées par les stations SDM et BHN respectivement sont plutôt faibles. Leurs composantes verticales sont inférieures aux composantes horizontales dans un rapport de 0.7.
- La classification des sites des 3 stations a permit de classer les stations BBH, SDM et BHN en classes de sol S2, S2 et S3 respectivement. Cette classification a permit d'expliquer pourquoi le niveau d'accélération de la station lointaine BHN est supérieure à celui de la station SDM plus proche.
- Le modèle de prédiction du mouvement sismique développé récemment par le Centre National de Recherche appliquée en Génie Parasismique (CGS) a permit de prédire ces niveaux d'accélérations
- La comparaison entre les accélérations enregistrées lors du séisme de Mila et réglementaires recommande d'aller vers une confrontation entre les accélérations enregistrées lors des séismes produits en Algérie et ailleurs (base de donné 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 Kherba, le modèle de prédiction du mouvement sismique est utilisé pour prédire le niveau d'accélération qui a enclenché le glissement spectaculaire. Ce niveau d'accélération peut atteindre 0.16g.
- Ce séisme a causé un glissement très important au niveau de la zone El Kherba, qui a été la cause principale des dommages observés au niveau des structures
- Une campagne de géophysique passive de 45 points de mesures de bruits de fond (microtremor) est réalisée par le Centre National de Recherche appliquée en Génie Parasismique (CGS)
- Le calcul des rapports spectraux H/V et leurs classification est fait pour les 45 points de mesure avec un logiciel produit au CGS à cet effet. Il permet un calcul automatique avec un fichier d'entrée contenant les noms des 45 mesures, et un fichier de sortie contenant la classification des 45 sites et leurs fréquences fondamentales. Ces résultats sont directement utilisables pour la cartographie des effets de site ce qui permet de produire un premier niveau de microzonation sismique et un outil d'aide à la décision

- La cartographie des résultats fait ressortir une classification du quartier El Kherba en deux grande zones, une zone classée S3 au nord et une zone (plus importante en termes de superficie) classée S4 au sud
- Les sols étudiés qui sont de caractère meuble à très meuble sont propices aux phénomènes de glissement en présence de pente et de facteurs déclencheurs tels que les séismes et les pluies. L'accélération prédite de l'ordre de 0.16g est suffisante pour déclencher le glissement spectaculaire d'El Kherba.
- Ce retour d'expérience renseigne sur l'intérêt de reconnaissance des sols susceptibles de recevoir les habitations. Le travail effectué permet de constater qu'un premier niveau de microzonation sismique est très utile pour la caractérisation des sites et peut être un outil d'aide à la décision.

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-tohorizontal (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 Remki Mustapha

Mission Géotechnique (Campagne mesures bruit de fond et mesures GPS)

Mezouar Nourredine Bencharif Raouf TebboucheYacine

Mission Sismologie (Campagne récupération des enregistrements sismiques)

Slimani Abdennasser Bouziane Djilali Benameur Mohamed Achemine Yasmine

Rapport élaboré par

Laouami Nasser Slimani Abdennasser Mezouar Nourredine