

Le séisme de Mila du 07/08/2020 (Nord-Est algérien) : essai d'interprétation de l'activité sismique et des effets induits au niveau de la colline d'El Kherba

The Mila earthquake of 07/08/2020 (Algerian Northeast): interpretation of the seismic activity and the effects induced on the El Kherba hill

Ahmed BOUGHERARA^{*1}, Ramdane MARMİ², Moussa BOULAAKAK³, Kamel BOUFAA⁴

^{1*} Laboratoire LASTERNE, Université Constantine 1, bougherara.ahmed@umc.edu.dz

² Marmi Ramdane Laboratoire Géologie et Environnement, Université Constantine 1, ramdanemarmi@gmail.com

³ Faculté des Sciences de la Terre, Université Constantine 1, boularak_moussa@yahoo.fr

⁴ Faculté des Sciences de la Terre, Université Constantine 1, kboufaa@hotmail.com

Manuscrit reçu le 13 mars 2023 et accepté le 28 août 2023

Article publié selon les termes et les conditions de la licence Creative Commons CC-BY 4.0

Résumé

La vulnérabilité du site de la ville de Mila aux mouvements de masse est une contrainte majeure devant son développement urbain. Son héritage morphologique explique largement sa dynamique actuelle. Les grandes coulées quaternaires, issues du démantèlement du flanc nord de Marechau, ont dévié l'oued Mila vers l'ouest pour s'enfoncer sous forme d'arc de cercle et dégager la colline d'El Kherba. La massivité de cette dernière a permis l'installation d'une série de ravins (paléo-vallons) parallèles, inégalement creusés. Faute de soutirage efficace, ces derniers ont été comblés. La surface de contact entre la roche en place et le matériau de comblement est restée une semelle de glissement potentielle. Aussi, la fréquence et l'intensité des séismes (probablement en partie induits) sont loin d'être négligeables. En effet, après l'envahissement du site par une urbanisation rapide et massive, les effets induits des derniers séismes ont été probablement amplifiés d'où les dégâts observés.

Mots clés : héritage morphologique, activité sismique, effets induits, El Kherba, Mila, Bassin de Constantine.

Summary

The vulnerability of the site of the city of Mila to mass movements is a major constraint to its urban development. Its morphological heritage largely explains its current dynamics. The large Quaternary flows, resulting from the dismantling of the northern flank of Marechau, have deviated the wadi Mila westwards to sink in the form of an arc and clear the hill of El Kherba. The massiveness of the latter allowed the development of a series of parallel gullies (paleo valleys), unevenly dug. Due to the lack of effective extraction, these gullies were filled in by erosion waste material. The contact surface between the bedrock and the fill material

remained a potential failure surface. The frequency and intensity of the (probably partly induced) earthquakes are far from negligible. Indeed, after the invasion of the site by a rapid and massive urbanization, the induced effects of the last earthquakes were probably amplified, hence the damage observed.

Keywords: morphological heritage, seismic activity, induced effects, El Kherba, Mila and Constantine Basin.

1. Introduction

Les magnitudes et les fréquences des séismes dans le Nord algérien justifient la classification de cette région comme terre à haut risque. Par l'ampleur de leurs dégâts, les séismes d'Echlef de 1980 dans L'Ouest algérien et de Boumerdès de 2003, ont certainement beaucoup contribué dans la prise de conscience du risque sismique en Algérie.

Le présent travail s'intéresse au Nord-est de l'Algérie qui est une région moins active et où on enregistre des séismes de magnitudes moins élevées que ceux d'Echlef et de l'algérois. Seulement, les dégâts enregistrés lors du séisme de Mila nous rappellent qu'il ne faut pas perdre de vue le risque sismique que présente la région du Nord-est de l'Algérie (Beldjoudi H., 2011 ; Abacha I., 2015 et Harbi *et al.*, 2003).

La recrudescence de l'activité sismique, clairement établie, dans le bassin de Mila (2003-2020) est souvent liée à la rénovation du réseau de surveillance, seulement cette même période coïncide avec les phases de remplissage du grand barrage de Béni Haroun.

En effet, deux secousses telluriques (secousse principale et première réplique) enregistrées le 07/08/2020 à Mila ont provoqué l'effondrement total de deux maisons dans la vieille ville et d'une habitation composée de 4 étages dans le quartier El Kherba. Le bilan préliminaire fait état de l'inspection de 275 constructions, parmi lesquelles 90 ont été classées dans la catégorie rouge (dont 66 à la cité El Kherba, 24 dans le vieux Mila) et 160 à la catégorie orange (dont 67 à El Kherba et 93 au vieux Mila). Il est indéniable que les conditions morpho-géologiques sont largement responsables de la vulnérabilité du site de la ville de Mila et de ses environs. Aussi, la sismicité induite ne peut être écartée et le suivi de l'activité sismique des régions qui ont accueilli des aménagements hydrauliques importants s'impose (Dahm *et al.* 2013).

2. Situation géographique

Mila est une ville du Nord-Est de l'Algérie. Chef-lieu de wilaya depuis 1984, elle est située à une cinquantaine de kilomètres à l'ouest de Constantine, en plein domaine tellien (bassin de Mila). La ville est composée de plusieurs secteurs historiques et compte environ 63 000 habitants selon le recensement de 2008. À partir de 1984, la ville a connu un dynamisme démographique remarquable. Les taux d'accroissement annuel enregistrés sont souvent

supérieures aux moyennes nationales. Les anciennes mechtas (hameaux) situées dans un rayon de 2 km de la ville sont devenues des quartiers de la ville. Ainsi, plusieurs quartiers ont une forte concentration de constructions illicites. Le quartier d'El-Kherba a été construit récemment sur les hauteurs de la ville (colline d'El Kherba), sur des terrains connus par leur vulnérabilité aux mouvements de masse (Fig.1).

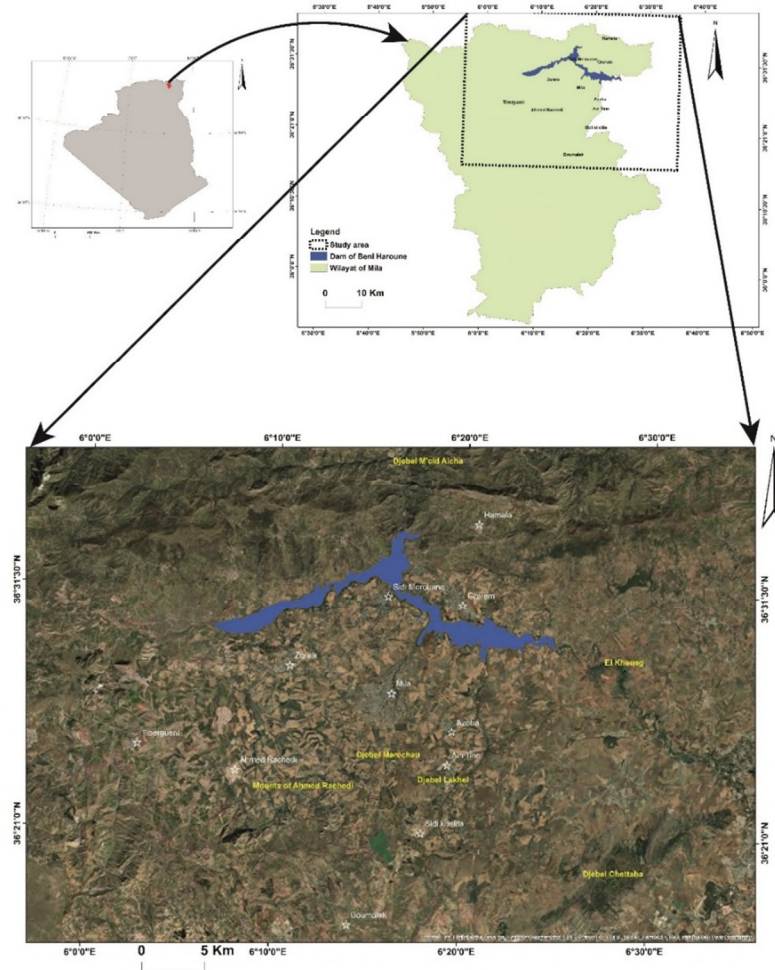


Fig. 1 : situation géographique de la zone d'étude

3. Matériels et méthodes

3.1. Matériels

Dans ce travail, nous avons utilisé essentiellement les enregistrements de l'activité sismique du site IRIS (Incorporated Research Institutions for Seismology) qui n'affiche que les événements enregistrés par le réseau national à partir de 1970 (Bouhadad *et al.*, 2010). Les photographies aériennes n° 14 et 15 échelle 1/20 000ème, mission 1972, feuille de Constantine, nous ont permis d'observer le site avant son urbanisation et de déceler les indices de vulnérabilité qui ont favorisé les effets induits du séisme du 07/08/2020 qui affectent la zone aujourd'hui urbanisée ((Bouden-Romdhane et Mechler, 2002). Les images

satellitaires (optiques et radar) sont utilisées pour l'étude diachronique de la caractérisation de la surface et l'identification de certains linéaments ((Azimi C. et al, 1996)). Les observations de terrain nous ont aidés à déduire les relations héritage morphologique-déformations du sol-dommages affectant les constructions (Boullé *et al.*, 1997).

3.2. Méthodes

En raison des effets induits considérables d'un séisme de magnitude de 4,9 sur l'échelle de Richter (Mehdi *et al.*, 2010), la prise en compte du cadre morpho-structural et l'héritage morphologique pour saisir l'ampleur et la logique de la répartition des dégâts s'avère indispensable (Hallal N. *et al.*, 2015). Seulement, les conditions de travail sur le terrain, au lendemain du séisme, au milieu d'une population traumatisée, n'ont pas permis les investigations approfondies souhaitées. De ce fait, nous nous sommes contentés d'observations de la zone d'El Kherba, du nord d'Ain Tinn et de quelques excavations ouvertes à l'intérieur du tissu urbain (Harp *et al.*, 2011 ; Machane *et al.*, 2008).

En effet, la démarche préconisée dans ce travail est basée sur l'approche morpho-géologique dans l'explication des mouvements de terrain qui ont affecté les flancs de la colline lors du séisme du 07/08/2020 (Pothérat *et al.* 2009). Certains mouvements de masse représentatifs ont été investigués en détail afin de préciser la typologie ainsi que le rôle des processus sous-jacents (Rachid Bougdal, *et al.*, 2013 ; Papathanassiou, 2012). Les paléo-vallons qui caractérisent les flancs de la colline, montrant un remplissage hétérogène sur toutes leurs longueurs, sont le siège des mouvements de terrain les plus spectaculaires.

La démarche consiste en l'utilisation de critères qui nous permettent de caractériser chaque mouvement de terrain en tenant compte de son site, son type, son ampleur, sa profondeur et son déplacement. Ainsi, nous estimons que la démarche adoptée pourrait représenter un apport non négligeable dans la compréhension des effets induits et leur rôle dans l'évolution morpho-structurale des versants de la colline d'El Kherba et des zones limitrophes (Sakkas et Lagios, 2017).

Ainsi, nous considérons que les effets induits qui affectent les versants sont un élément déterminant dans le processus de façonnement des paysages de la région. Ils se manifestent sous des formes très variées rarement identifiées et analysées dans leur contexte morpho-structural (Firtana-Elcomert et Kocaoğlu, 2021).

4. Le cadre morpho-géologique

La zone d'étude se situe dans le bassin sédimentaire de Mila (Vila, 1980). C'est un bassin néogène (post-nappes), constituant la partie occidentale du bassin de Constantine (Fig.2.a).

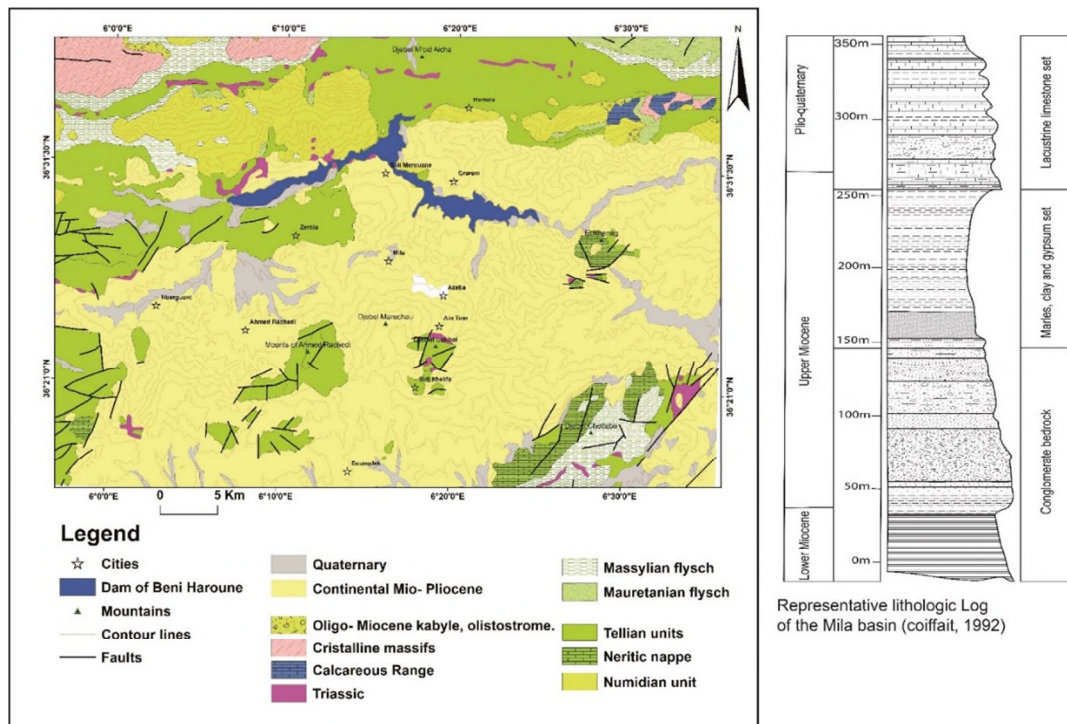


Fig. 2: a – le bassin néogène de Mila, b- Log lithologique du bassin

Le bassin se caractérise par un remplissage à prédominance argileuse, se rapportant au Miocène moyen à supérieur (Vila, 1977). Il renferme des conglomerats à la base, suivi par un ensemble marneux avec la présence de gypse et de lits grésos-sableux représentant les paléochenaux et des calcaires lacustres pliocènes au sommet (Coiffait, 1992) (Fig.2.b). Ce remplissage à prédominance argileuse est incisé par l’oued Rhumel dont le lit devient le niveau de base local, avec une dénivelée qui atteint les 1000 mètres. Ces conditions morphotectoniques (néotectonique) et climatiques (début du Quaternaire) sont très favorables à une géodynamique externe caractérisée par des mouvements gravitaires et une érosion régressive assez active (Marmi et al, 2017) (Fig.3).

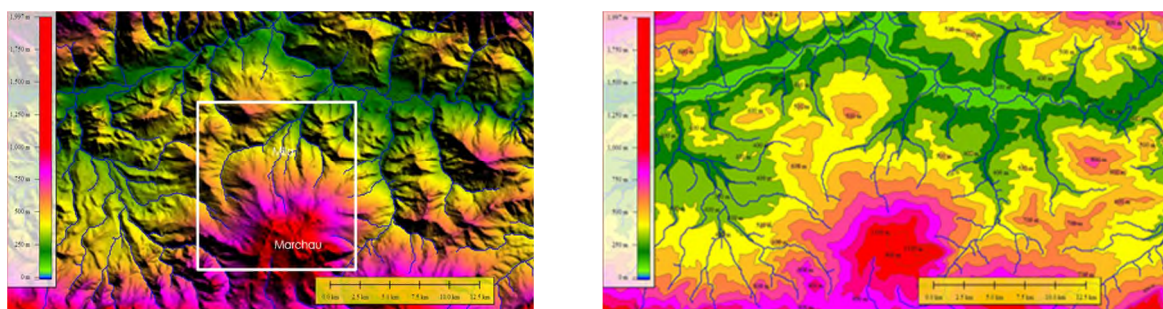


Fig. 3.a et b : Aspects géomorphologiques favorables à l’érosion hydrique

Le flanc constituant le site de la ville de Mila est dominé au sud par le Djebel Marechau (calcaires lacustres d’âge pliocène) qui a subi un démantèlement intense. L’accident (néotectonique) de direction globale E-W, affectant ces calcaires (Fig.4.a) et la gélification

sont à l'origine de la dislocation des barres calcaires (Aspect chaotique des calcaires pliocènes) qui ont alimenté en blocs les coulées quaternaires (Yelles-Chaouche *et al.* 2006). Ainsi, les premières coulées qui prennent naissance aux pieds des escarpements et couvrent la quasi-totalité du site de la ville, emballent les blocs démantelés (Marmi *et al.*, 2017). De ce fait, le réseau hydrographique du sous bassin versant d'oued Mila est très contrarié par ces mouvements de masse et peine à atteindre le pied du Djebel Marechau (Fig.4.b).

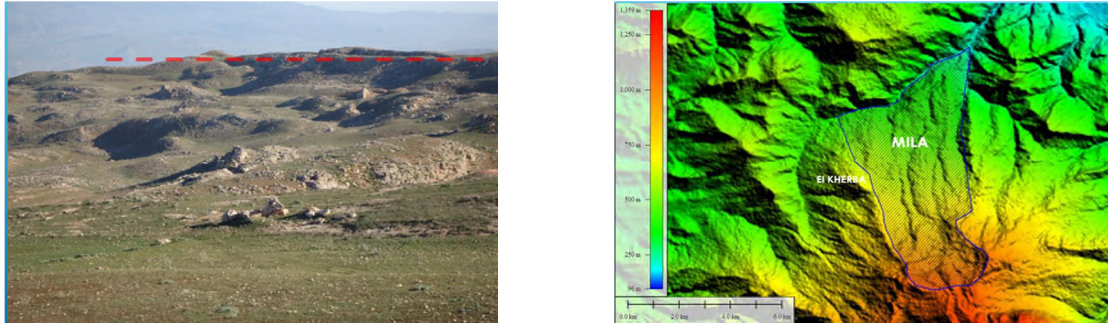


Fig. 4: a- aspect chaotique des calcaires lacustres. b- ennoyage du versant constituant le site de la ville

Ainsi, l'héritage morphologique se caractérise par la juxtaposition de grandes coulées qui partent de la niche d'arrachement affectant le sommet du Djebel Marechau et dévalent son flanc provoquant l'ennoyage du site de la ville de Mila. La colline d'El Kherba, plus élevée que le niveau du flux à l'origine des coulées, est épargnée (Fig.4.b).

5. Activité sismique

D'après les données disponibles qui sont très fragmentaires et lacunaires (IRIS), nous constatons que l'activité sismique dans la région est restée faible à très faible jusqu'au début des années 2000 où nous constatons une augmentation importante et subite de la fréquence et de l'intensité des séismes dans le bassin de Mila. La coïncidence de cette date avec la mise en eau du barrage de Béni Haroun mais aussi avec la date d'achèvement de rénovation du réseau de surveillance de l'activité sismique (Abacha, 2015 ; Domzig *et al.*, 2006 ; Harbi *et al.* , 2003) ne permet pas de lier cette recrudescence de l'activité sismique uniquement à la mise en eau de cette infrastructure hydraulique grandiose (Bommer, 2022).

5.1. La mise en eau du barrage de Beni Haroun

L'ANBT (Agence Nationale des Barrages et des Transferts) a entamé la mise en eau du barrage de Béni Haroun en 2003. Le remplissage de la retenue est réalisé en trois étapes : une première phase (2003-2006), où les réserves n'ont pas atteint les 300 hm³. Une seconde étape (2006-2010), a permis le passage du volume de 300 à 600 hm³. Enfin la dernière phase, à partir de 2010, où les réserves ont atteint la capacité maximale (960 hm³), avec un premier déversement enregistré en mars 2012 (Boulaïbal et Mebarki, 2013).

5.2. Analyse statistique des enregistrements sismiques entre 1970 et 2021

Pour une meilleure appréciation de l'activité sismique de la zone de Mila (partie ouest du bassin de Constantine), nous avons isolé une fenêtre centrée sur le lac du barrage de Béni Haroun coïncidant au Sud et au Nord avec les limites du bassin de Mila (limites structurales). À partir des données disponibles au niveau du site IRIS (1970-2021), nous avons scindé la série en deux périodes : la période d'avant la mise en eau du barrage Béni Haroun (1970-2003), et la période allant du début de la mise en eau jusqu'aujourd'hui (2003-2021).

L'analyse statistique des données du site IRIS montre que le nombre de séismes de 1970 à 2003 (32 ans) n'atteint que 04 séismes pour la zone de Mila et ses environs (Tableau n°1).

Alors qu'il dépasse les 99 séismes durant la période 2003-2021 (17 ans). La première période (1970- 2003) se caractérise donc par un nombre très faible de secousses avec des magnitudes allant de 3.1 à 4.1 (Fig.5).

Tableau n°1 : Liste des séismes enregistrés dans la zone d'étude (IRIS 1970-2021)

Année	Mois	Jour	Heure UTC	Mag	Lat	Lon	Pr(km)	Année	Mois	Jour	Heure UTC	Mag	Lat	Lon	Pr(km)	Année	Mois	Jour	Heure UTC	Mag	Lat	Lon	Pr(km)
2020	8	7	11:13:34	4.5	36.5786	6.3109	10.0	2010	11	12	07:04:38	2.1	36.6110	6.1470	0.0	2008	8	23	20:23:36	2.2	36.5070	6.5230	0.0
2020	8	7	06:15:37	4.9	36.5503	6.2709	10.0	2010	10	6	21:20:40	2.3	36.3770	6.3840	0.0	2008	7	1	18:59:38	2.0	36.3180	6.338	0.0
2020	7	17	08:12:44	4.6	36.4620	6.2391	10.0	2010	10	6	02:21:57	2.5	36.3820	6.358	0.0	2008	6	23	09:06:25	2.5	36.5170	6.1650	0.0
2012	7	13	05:24:44	1.9	36.3060	6.2940	0.0	2010	9	27	00:35:37	2.6	36.5090	6.5380	0.0	2008	6	23	05:23:30	2.2	36.3660	6.375	0.0
2012	7	12	19:07:05	2.2	36.3700	6.499	0.0	2010	9	16	13:54:05	2.5	36.5190	6.2830	0.0	2008	6	4	12:30:26	2.5	36.3860	6.4240	0.0
2012	7	1	12:32:31	2.7	36.5440	6.3120	0.0	2010	9	14	06:10:08	2.6	36.4810	6.275	0.0	2008	6	3	11:21:16	2.4	36.3630	6.4050	0.0
2012	6	14	13:45:49	2.5	36.2800	6.4470	0.0	2010	8	23	22:48:57	2.6	36.3360	6.4120	0.0	2008	6	3	00:09:54	2.3	36.4370	6.4270	0.0
2012	6	9	07:39:28	2.4	36.5920	6.2220	0.0	2010	8	23	07:50:54	2.6	36.3300	6.4280	0.0	2008	6	2	22:13:46	2.1	36.3940	6.415	0.0
2012	6	9	07:36:19	3.1	36.577	6.239	0.0	2010	8	23	05:15:53	2.4	36.3430	6.3340	0.0	2008	6	2	17:53:56	2.0	36.5330	6.378	0.0
2012	6	8	08:05:26	2.3	36.5930	6.2290	0.0	2010	8	22	23:18:21	4.1	36.3628	6.3826	2.0	2008	6	2	17:36:13	4.5	36.5357	6.498	5.7
2012	6	8	07:39:12	2.7	36.6070	6.2420	0.0	2010	8	3	13:03:54	2.6	36.5400	6.3310	0.0	2008	1	2	19:55:48	3.4	36.5730	6.2480	0.0
2012	5	12	11:03:42	2.3	36.5130	6.178	0.0	2010	7	1	15:00:34	2.0	36.5090	6.572	0.0	2007	12	5	02:34:20	3.2	36.278	6.3943	11.4
2012	5	12	07:38:13	2.6	36.5460	6.2540	0.0	2010	5	20	03:15:09	3.0	36.5830	5.9400	0.0	2007	9	14	13:08:01	2.6	36.3400	6.318	0.0
2012	5	10	20:57:12	2.2	36.4930	6.1830	0.0	2010	4	16	11:48:18	2.3	36.5150	6.3140	0.0	2007	8	19	01:48:39	2.8	36.4250	6.357	0.0
2012	5	8	10:05:01	2.5	36.2970	5.9480	0.0	2010	4	16	10:43:49	2.5	36.5190	6.257	0.0	2007	8	18	16:58:40	2.7	36.5440	6.499	0.0
2012	3	20	07:38:30	3.2	36.6050	6.3510	0.0	2010	4	10	02:09:04	3.2	36.4000	6.3500	0.0	2007	8	17	11:44:31	2.9	36.2830	6.316	0.0
2012	2	25	20:28:26	2.4	36.4850	6.1840	0.0	2010	3	5	15:26:43	3.2	36.6100	6.5030	0.0	2006	9	13	08:40:25	2.6	36.2850	6.1520	0.0
2012	2	15	18:46:44	2.2	36.5040	6.178	0.0	2010	1	11	11:06:41	2.8	36.6260	6.268	0.0	2006	7	9	03:29:32	3.2	36.5510	6.1950	0.0
2012	1	13	11:57:51	2.3	36.5660	6.4230	0.0	2009	11	25	13:34:55	2.8	36.2880	6.374	0.0	2006	6	17	10:45:36	2.9	36.6000	6.3600	0.0
2012	1	12	05:52:45	1.8	36.2830	6.1180	0.0	2009	10	24	02:26:18	2.7	36.5010	6.456	0.0	2006	6	15	21:15:02	2.7	36.3410	6.573	0.0
2012	1	2	20:26:05	3.1	36.5340	6.276	0.0	2009	8	29	14:51:20	2.9	36.5210	6.3070	0.0	2006	5	28	09:59:22	3.0	36.5560	6.1580	0.0
2012	1	2	19:26:10	2.4	36.4450	6.2920	0.0	2009	7	29	10:07:19	2.1	36.499	6.2520	0.0	2006	4	26	08:25:52	3.9	36.5219	6.4246	10.0
2011	7	17	02:42:13	2.5	36.4960	6.2020	0.0	2009	7	23	14:21:52	2.0	36.6190	6.2250	0.0	2006	4	20	21:35:45	2.9	36.4820	6.1800	0.0
2011	7	17	00:37:55	3.2	36.499	6.178	0.0	2009	6	8	14:01:31	1.8	36.3300	6.3530	0.0	2005	12	18	22:15:59	4.1	36.4969	6.2324	10.0
2011	4	1	23:43:52	2.7	36.5220	6.2240	0.0	2009	5	27	00:51:36	2.8	36.3530	6.482	0.0	2005	9	28	14:32:32	3.0	36.4980	6.1080	0.0
2011	3	12	02:12:09	2.0	36.3580	6.256	0.0	2009	5	25	18:44:53	2.1	36.6070	6.489	0.0	2005	6	18	00:10:23	3.0	36.5320	6.2280	0.0
2011	2	19	10:19:00	2.2	36.5110	6.1540	0.0	2009	5	22	23:47:08	2.4	36.4350	6.487	0.0	2005	5	29	23:42:44	3.0	36.6087	6.1096	10.0
2011	1	25	16:57:07	2.2	36.3980	6.4640	0.0	2009	5	19	12:47:43	2.0	36.2880	6.46	0.0	2005	5	18	04:45:10	3.0	36.4490	6.2430	0.0
2011	1	23	22:00:48	2.5	36.4980	6.2120	0.0	2008	12	24	15:41:42	2.3	36.5130	6.578	0.0	2005	5	17	12:24:11	3.0	36.5450	6.2100	0.0
2011	1	23	06:33:57	2.5	36.5030	6.2250	0.0	2008	11	9	05:30:16	1.7	36.3160	6.3940	0.0	2005	1	17	13:17:58	2.7	36.586	6.4710	0.0
2011	1	21	12:09:46	2.5	36.5230	6.2340	0.0	2008	11	4	21:11:33	2.3	36.565	6.582	0.0	2004	4	12	02:43:18	2.4	36.5970	6.279	10.0
2011	1	11	10:55:58	2.7	36.6220	6.4070	0.0	2008	11	4	20:37:02	2.5	36.5940	6.5830	0.0	2002	6	29	07:26:29	4.0	36.4175	6.1926	0.0
2010	12	19	14:52:17	2.2	36.6380	6.5500	0.0	2008	11	4	17:31:20	2.3	36.5940	6.458	0.0	1995	1	17	19:08:45	3.1	36.5552	6.2488	10.0
2010	11	30	10:43:45	2.8	36.5830	6.4420	0.0	2008	10	12	21:22:30	2.7	36.3380	5.9600	0.0	1978	8	23	02:56:49	4.0	36.4610	6.1673	33
2010	11	12	07:04:38	2.1	36.6110	6.1470	0.0	2008	10	12	20:45:25	2.9	36.3360	6.2960	0.0	1973	7	9	14:20:06	4.1	36.6330	6.2689	0.0

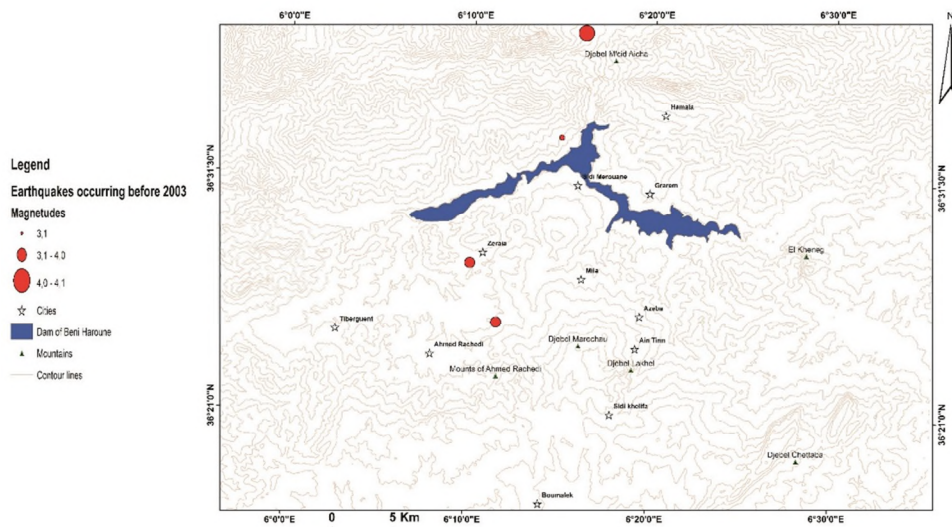


Fig. 5 : séismes enregistrés (4) dans la zone de Mila entre le 01/01/1970 et 01/01/2003.

La deuxième période (2003-2021) montre une augmentation importante et subite des secousses, enregistrant plus de 99 événements avec des magnitudes oscillant entre 1.7 et 4.9 (Fig.6). Le plus grand nombre de secousses est enregistré entre 2008 et 2012 (76 secousses). Cette période correspond à la dernière phase de remplissage du barrage (Choudhury *et al.*, 2013). Cependant, après cette crise sismique (probablement induite), la période 2012-2020 est marquée, selon le site IRIS, par une absence d'activité sismique.

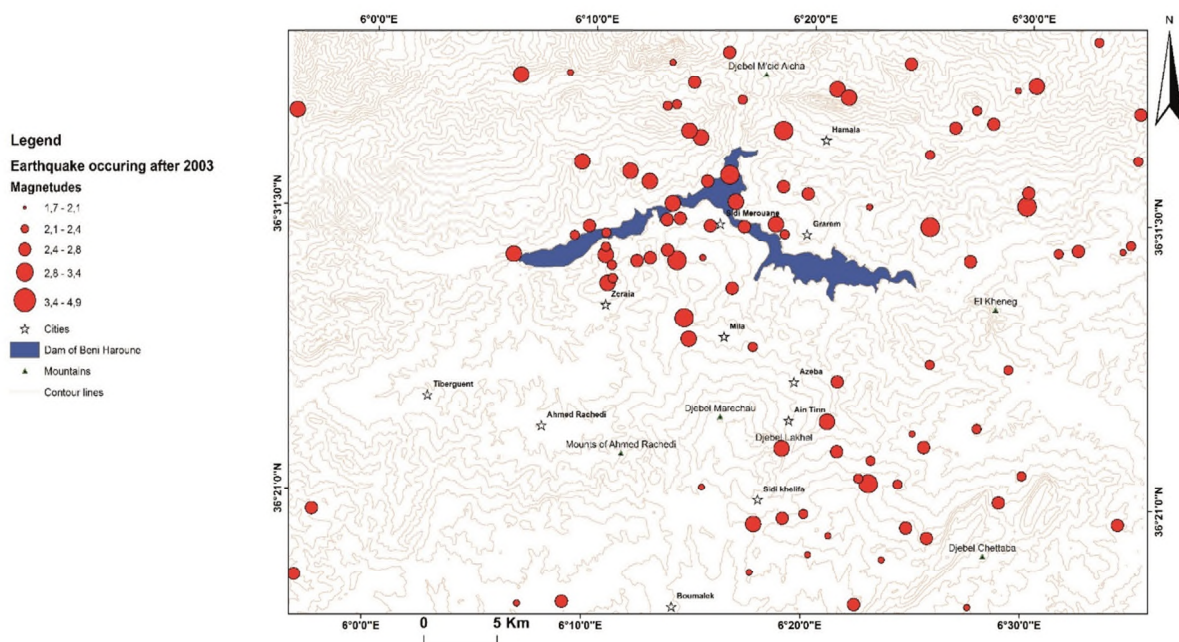


Fig. 6 : Séismes enregistrés (99) dans la zone de Mila entre le 01/01/2003 et 20/08/20213

Les chercheurs utilisant les données du CRAAG (Centre de Recherche en Astronomie Astrophysique et Géophysique) interprètent cette différence entre les deux périodes par le

niveau de développement du réseau de surveillance. Ils considèrent que durant la première période, le réseau fonctionnait avec peu de stations et n'a pu enregistrer que peu de secousses. Par contre, durant la deuxième période, l'installation d'un nombre important de stations ainsi qu'une bonne maintenance des installations a permis à toutes les stations de fonctionner correctement à partir de 2000. (Abacha, 2015). Nous constatons que cette interprétation écarte totalement la possibilité d'une sismicité induite alors que la dernière phase de remplissage du barrage coïncide avec le paroxysme de l'activité sismique (2008-2012) (Tableau n°1).

6. Résultats

6.1. Relation sismo-tectonique

La répartition des épicentres et d'indices morphologiques montre la prédominance de deux directions (Fig.7) : la première, d'orientation Sud-Ouest-Nord-Est ; elle part de l'embouchure d'Oued Endja, au niveau du lac du barrage dans sa partie sud, et se prolonge en direction de l'agglomération de Hamala, dans sa partie Nord. La deuxième, de direction Sud-Est-Nord-Ouest, elle s'étire de l'Est de Sidi Khelifa pour atteindre la localité de Terrai Bainen, suivant la direction Ain Tinn, Mila (El Kherba) et Zeghaïa. Ainsi, les deux orientations se croisent à l'embouchure de l'oued Endja, au niveau du lac du barrage de Béni Haroun (fig.7). Ce croisement, nœud de failles, pourrait avoir un effet sur la répartition des dégâts dans le bassin de Mila ((Harbi *et al.* 2003 ; BRGM, 2001 ; Zhou *et al.*, 2014).

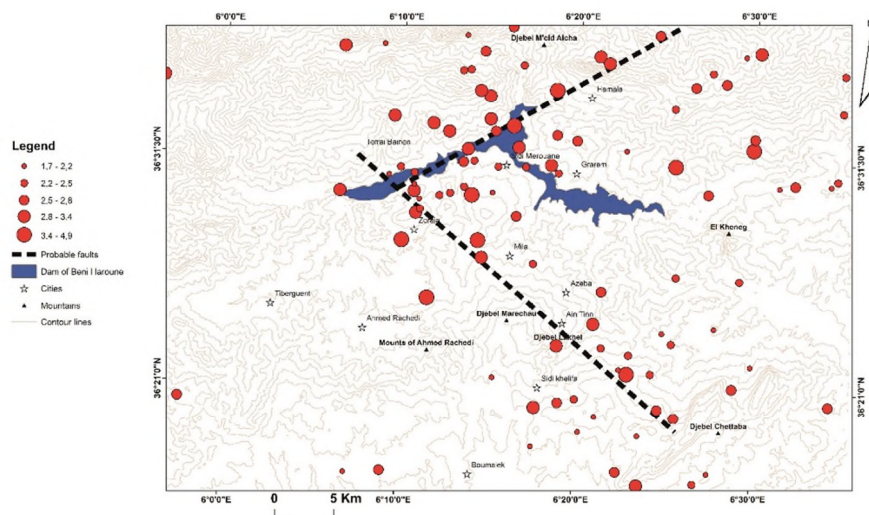


Fig. 7 : Épicentres des séismes de la période (1970-2021) et les failles reconstituées.

6.2. Des infiltrations des eaux de pompage à l'origine d'une crise sismique induite

Le transfert des eaux, du barrage de Béni Haroun vers le barrage réservoir d'Oued Kaïm, passe par un tunnel à travers Djebel Lakhel. Ce dernier est situé à la limite sud du Bassin, au Sud-Est de la ville de Mila (Vila, 1977). Ce Djebel est affecté par plusieurs failles d'orientations différentes et se caractérise par une karstification très développée (Vila, 1980).

Les énormes fuites survenues fin novembre 2007 (des millions de m³), à partir de la conduite, se sont engouffrées dans des failles ouvertes pour provoquer, pendant plusieurs jours, une série de secousses (1200 secousses) de faibles à très faibles magnitudes (Kwiatek, *et al.* 2010 ; Brudzinski *et al.* 2019). Ces secousses ont engendré des dégâts mineurs, notamment à Ain Tinn, où de nombreuses maisons ont été fissurées. L'activité sismique, qui a débuté après une semaine de pompage, a montré une diminution importante du nombre de secousse après l'arrêt du pompage (Abacha, 2015). Cette constatation confirme le lien direct des secousses avec le pompage (sismicité induite). Cette crise sismique induite n'est enregistrée qu'à l'échelle locale.

6.3. La vulnérabilité du site de la ville de Mila

Dans la présentation de la zone d'étude, nous avons essayé d'expliquer l'origine de la vulnérabilité du site de la ville de Mila en se basant sur l'analyse de son héritage morphologique (Keefner, 1984). Dans cette optique, nous considérons deux unités morphologiques distinctes : à l'Est le grand couloir des coulées boueuses et à l'Ouest, la colline d'El Kharba. (Fig.8).

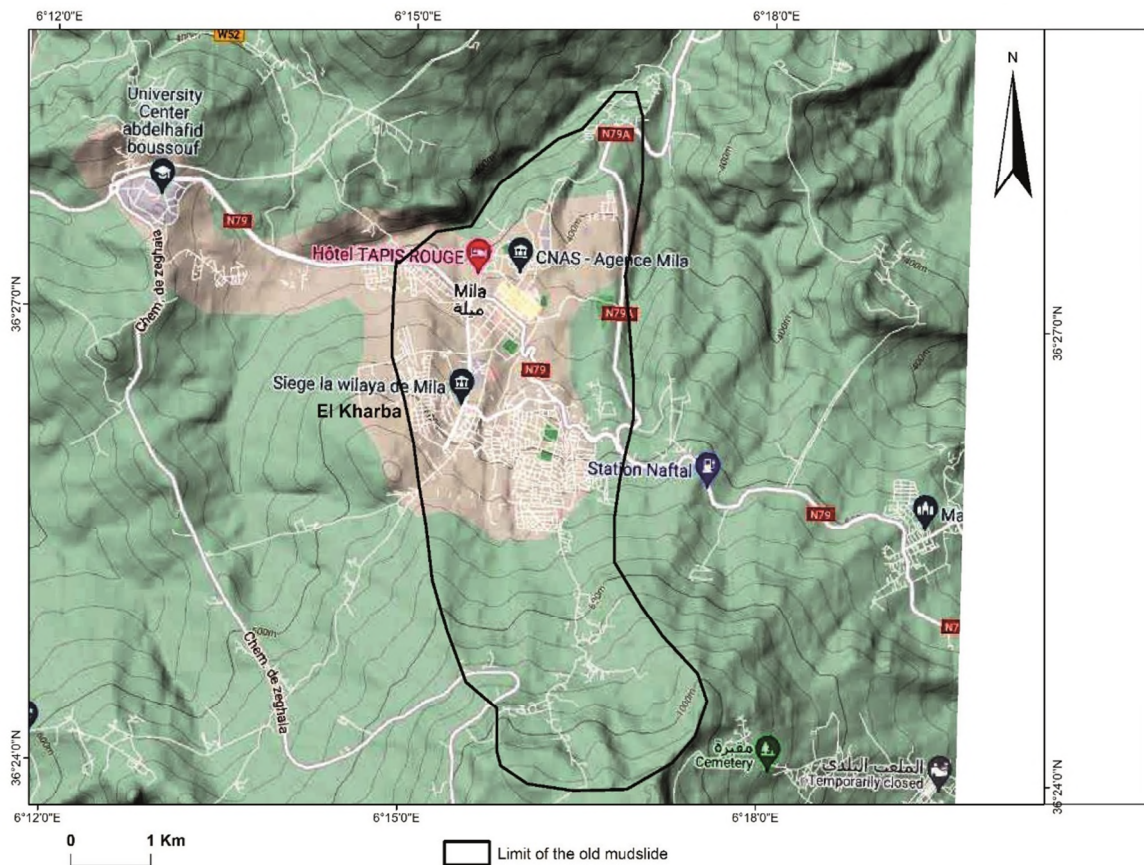


Fig. 8 : Carte du site de Mila

Lors de notre première sortie de reconnaissance de terrain, nous avons remarqué la spécificité de la colline (Lo *et al.*, 2016) qui ne s'intègre pas dans la dynamique des versants dominés par

le plateau de Marechau (1100m). Sa morphologie s'explique par la déviation de l'oued Mila par les coulées de blocs provenant du démantèlement du flanc nord de Marechau d'où son enfoncement sous forme d'un arc de cercle qui donne aux flancs ouest et nord-ouest de la colline l'aspect arrondi (Fig.9). Par contre, le flanc Est montre une limite rectiligne marquée par le tracé d'une Chabet (photo aérienne, mission 1972), aujourd'hui « effacée » par l'urbanisation. Son altitude qui atteint les 700m, lui donne une certaine massivité malgré sa constitution de matériaux meubles. De ce fait, ces versants sont souvent instables dont la dynamique (mouvements de masse) a été conditionnée essentiellement par le creusement de l'oued Mila (Fig.9).

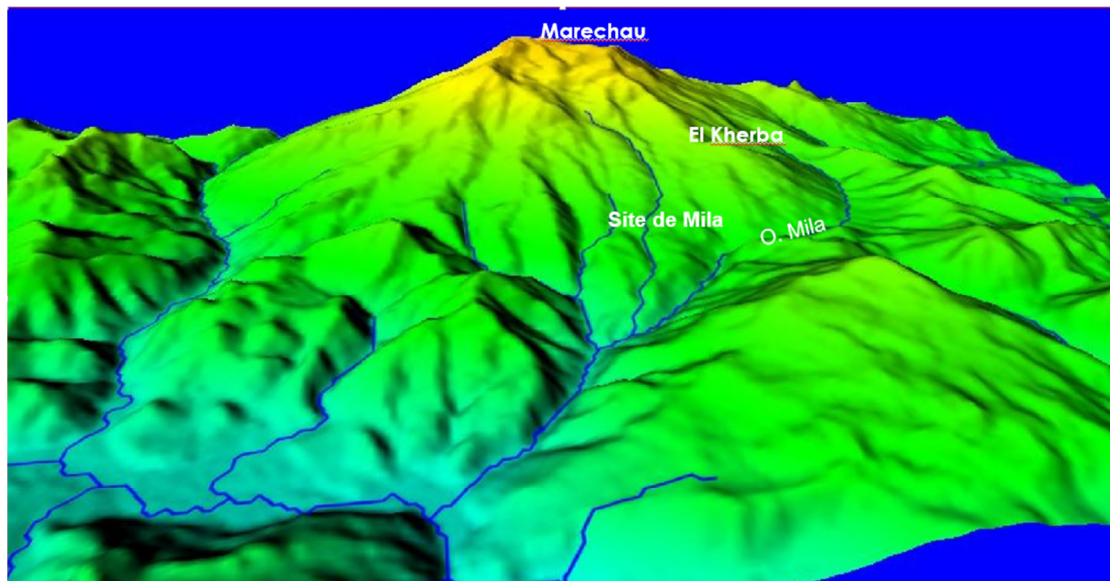


Fig. 9 : La déviation de l'oued Mila vers l'ouest et son enfoncement sous forme d'arc de cercle pour dégager la colline d'El Kherba.

6.4. Le séisme du 07/08/2020 : des effets induits considérables pour une magnitude moyenne

La secousse tellurique et sa première réplique, de magnitudes 4.9 et 4.5, enregistrées respectivement à 11:13:34 et 18:15:37, le 07 août 2020, sont des séismes moyens à l'échelle nationale, mais considérés parmi les plus forts dans le bassin de Mila. Cependant, les dégâts enregistrés sont considérables, mais leurs effets macrosismiques sont difficilement interprétables (Shengwen *et al.* 2009 ; Chang *et al.* 2021). En effet, les dégâts au niveau de l'épicentre (Hamala) et dans le secteur de la rive droite du Rhumel restent négligeables. Par contre, dans différents secteurs de la rive gauche, les effets induits sont considérables, particulièrement au niveau de la partie aval de l'oued Koton (Nord-Est de Mila) où les crevasses sont visibles sur plus 500 mètres, avec des ouvertures dépassant par endroits les 1,50m (Fig.10).



Fig. 10 : Crevaces affectant le zone de Retba (Nord de Azzaba-Lotfi) induites par le séisme du 7 Août 2020

Au niveau d'El Kherba, des cisaillements affectent le sol (Basharat *et al.* 2021) sur des centaines de mètres (les plus longues fissures sont dans le sens de la pente). Ces effets induits affectent essentiellement le haut paléo-vallon (Fig.11).

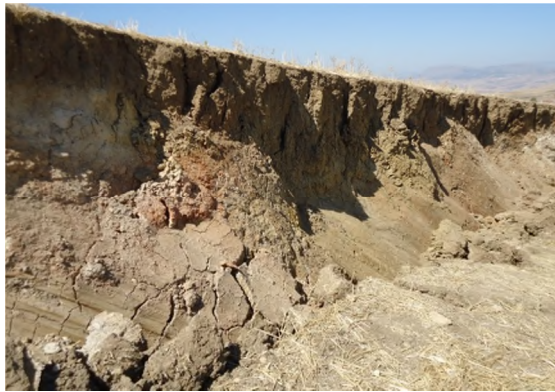


Fig. 11 : a- Cisaillement parallèle à la ligne de partage des eaux du haut paléo-vallon.
b- Glissements en escalier (en paquets), haut paléo-vallon.

Aussi, des centaines de constructions sont endommagées dont certaines sont totalement effondrées notamment dans la vieille ville et dans le quartier d'El Kherba (Fig.12).



Fig. 12 : a- Maison effondrée située dans la continuité du long cisaillement.
b- basculement de la construction provoquant la déformation de la chaussée.

Néanmoins, la prise en compte de l'effet du croisement (nœud) des deux failles (probables) déduites (Fig.07) peut être une explication à ce paradoxe qui fait que les séismes du 07.08.2020 se localisent dans les environs de l'agglomération de Hamala, sur la rive droite, mais leurs effets induits se situent plutôt sur la rive gauche ; notamment, au niveau de Zéghaia, de Mila (El Kherba) et au niveau de Azzaba Lotfi (Retba). Cependant, l'absence d'études tectonique et surtout néotectonique et géomorphologique détaillées sur le bassin de Mila (Bahrouni *et al.*, 2014), ne permet pas d'avancer une explication incontestable à cette répartition des dommages à l'échelle du bassin de Mila (Kubo and Nishikawa, 2020; Wang and Mao, 2021).

6.5. Effets induits au niveau de la colline d'El Kherba

Le séisme du 07/08/2020 de Mila, de magnitude relativement forte (4,9) par rapport à l'histoire sismique de la région (Tebbouche 2022), a eu localement des effets induits considérables (probablement phénomènes locaux d'amplification et vulnérabilité des sites), et donc présentant localement une intensité élevée (VIII à IX). Ces dégâts importants sont d'abord liés à la faible profondeur du séisme (6,3 km). Aussi, la lecture des documents photographiques (photographies aériennes 1972, images satellitales 2020) permet de déceler un linéament (faille) que nous pouvons considérer comme un tronçon de la faille active probable de Sidi Khelifa-Terrai Bainen) qui peut amplifier les ondes sismiques au niveau du flanc de la colline d'El Kherba (Fig.13). En outre, ces deux séismes interviennent trois semaines après une secousse tellurique de magnitude 4,6 et de 10 km de profondeur qui a été enregistrée au niveau d'El Kerba (Chang *et al.* 2021). Suite à cette secousse des lézardes ont été signalées dans plusieurs maisons dans les communes de Terai Bainen, Bouhatem et même à Oued Athmania.

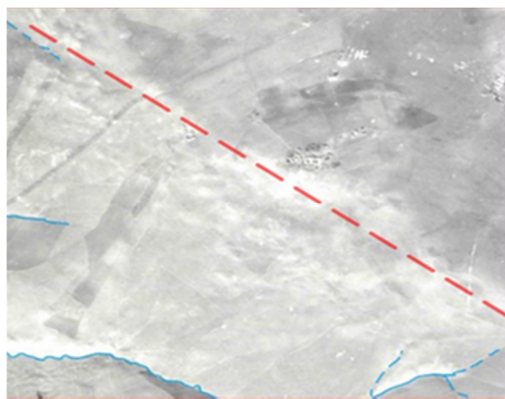


Fig. 13 : Linéament d'orientation Sud-est/ Nord-ouest (tronçon de la faille active probable de Sidi Khelifa-Terrai Bainen).

Ces mêmes documents nous permettent de reconstituer la paléo-morphologie (paléo-vallon) à l'origine de la fragilité actuelle des flancs de la colline d'El Kherba et particulièrement ceux d'orientation Ouest et Nord-Ouest (Fig.14).

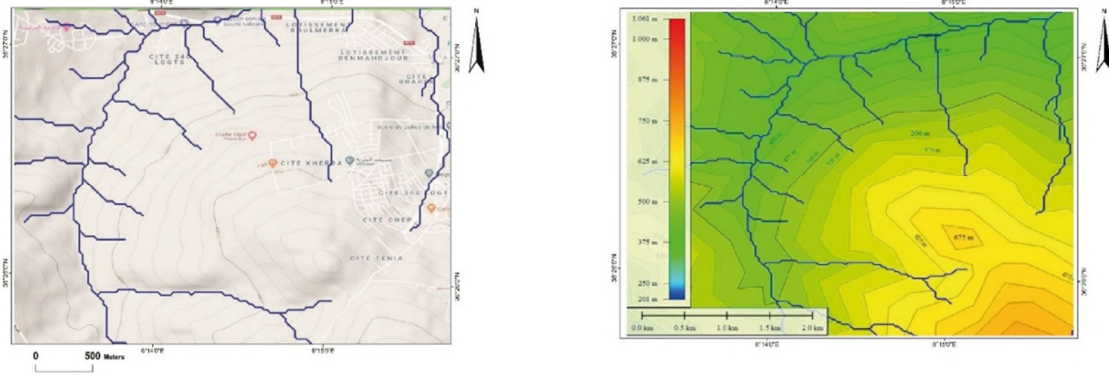


Fig. 14 : a- Situation de la cité d'El Kherba au milieu du paléo-vallon.

b- Image radar du site d'El Kherba avec réseau hydrographique et courbes de niveau permettant de délimiter le sous bassin et/ou le paléo-vallon.

En effet, le traitement des images radar (DEM, résolution 30m), permet de montrer les paléo-vallons qui lacéraient autrefois les flancs de la colline, aujourd'hui comblés par des formations superficielles (argileuses) qui peuvent atteindre plusieurs mètres d'épaisseur (2 à 3 mètres par endroit) et drainés par un réseau hydrographique (volontairement exagéré sur l'image) qui n'arrive pas à dépasser le stade du ruissellement concentré (Fig.14 et 15).

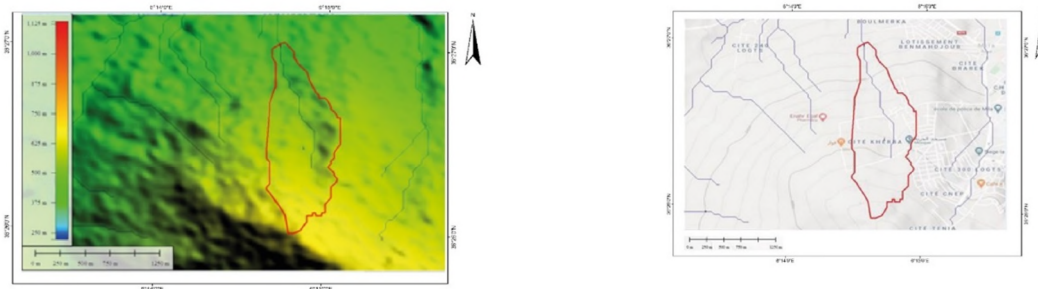


Fig. 15 : Limites du paléo-vallon et de l'actuel sous bassin, a- sur image radar, b- sur plan topographique

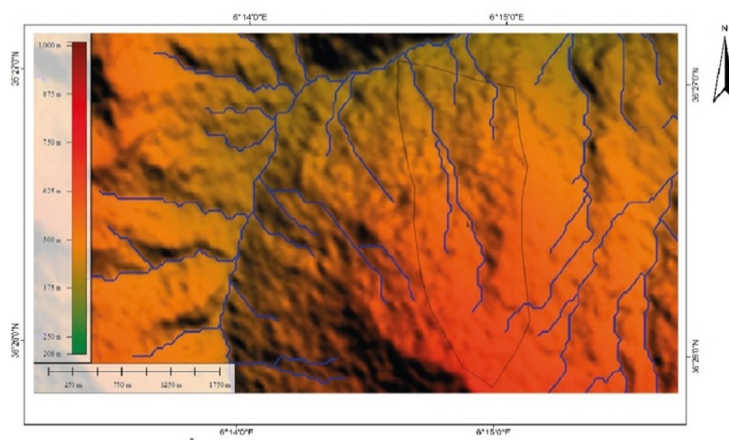


Fig. 16 : Zone du sous bassin affectée par le séisme

Il est indéniable que cet héritage morphologique (paléo-vallons) conditionne aujourd'hui la vulnérabilité de ces sites (Chang *et al.* 2021). La lecture de l'image radar permet de déceler une grande hétérogénéité dans la répartition de l'épaisseur (2 à 3 mètres) des formations superficielles. Ces dernières se caractérisent par une perméabilité suffisante pour empêcher toute concentration de ruissellement. Cette situation peut engendrer une saturation des sols durant la saison humide, d'où le risque de déclenchement de mouvements de masse. Cependant, il est établi que la surface de contact formation superficielles-roche en place sous-jacente constitue toujours une semelle de glissement potentielle. Aussi, la surface du paléo-vallon montre des zones perturbées soit par des mouvements de masse ou par des failles actives. Ainsi, ces paléo-vallons constituent un héritage morphologique très vulnérable. L'urbanisation rapide et massive de ces sites n'a fait qu'accentuer leur instabilité. Cet équilibre précaire a été rompu lors du séisme du 07.08.2020.

En effet, tous les cisaillements longitudinaux suivent les limites des paléo-vallons en se situant sur la ligne de partage des eaux du sous bassin. Les niches d'arrachements délimitant les paquets glissés (glissements en escalier), occupent le fond (centre) du paléo-vallon avec des déchirures souvent perpendiculaires à la pente de la surface.

Ces arrachements peuvent changer d'ampleur et d'orientation avec le type et la densité des constructions. Par ailleurs, il est fort probable que la dissymétrie des paléo-vallons peut influencer aussi le type et l'ampleur des dégâts. Aussi, les images radar des flancs de la colline, montrent une juxtaposition de plusieurs paléo-vallons qui n'ont pas subi les effets induits enregistrés au niveau du paléo-vallon de la cité d'El Kherba (Fig.15).

Enfin, ce séisme aurait pu survenir en période humide, après saturation du sol. Dans ces conditions les mouvements de masse pourraient se généraliser sur tout le flanc de la colline.

7. Discussions

La non disponibilité des données relatives à l'activité sismique effective dans le bassin de Mila reste l'handicap majeur de ce travail. La série lacunaire (1970-2021) du site IRIS utilisée, montre essentiellement les secousses, de magnitude égale ou supérieure à 1.7, (3.1 pour la période avant 2000) survenues pendant le fonctionnement des stations. Les données des stations locales (sismographes liés au projet de Béni Haroun), sensibles aux magnitudes les plus faibles, restent inaccessibles.

Le séisme du 07/08/2020 et sa première réplique de magnitudes respectivement de 4.9 et 4.5 se localisent sur la rive droite mais leurs dégâts se situent plutôt sur la rive gauche, à 18 km (El Kherba et Retba) à vol d'oiseau de la zone épiscopale. Cette situation ne confirme pas la relation amplitude du mouvement du sol enregistrée par des instruments sismologiques-intensité habituellement admise d'où l'intérêt de la démarche adoptée dans ce travail. En effet, l'évolution morpho-structurale récente et actuelle de la zone d'étude (bassin de Mila) et son héritage morphologique ont largement conditionné la répartition des effets induits.

Or, il est établi qu'à partir des paramètres de mouvements du sol, il est possible de prédire des intensités (des dégâts) et donc de dresser des cartes utilisables pour la mise en place des secours et des mesures d'atténuation (Wald *et al.*, 1999a ; 1999b). En effet, ce paramètre est souvent considéré comme étant le plus adapté à rendre compte du potentiel destructeur d'un séisme. Seulement, dans cette zone d'étude, l'ampleur et la répartition des dégâts constatés (intensité), ne reflètent pas les mesures instrumentales du mouvement du sol (Jukim et Petrovski, 1980).

Les destructions et les effets induits (glissements de terrain, fissuration du sol, cisaillements, décollements en masse, ou autres types de déformations,) engendrés par le séisme, sont dus aux propriétés évoquées des formations géologiques et à l'héritage morphologique du site. Ainsi, les relations entre la secousse et ses effets induits sont souvent très complexes et difficilement prévisibles en se basant sur un seul paramètre (Kárník et Algermíssen, 1980) (Petrovski, 1980).

Dans ce cas, l'intensité nous informe sur la force du séisme et surtout elle nous indique le degré de vulnérabilité des différentes unités morphologiques (sites) constituant la zone d'étude. (UNESCO, 1980). Il n'est pas exclu que ces effets induits (glissements et longs cisaillements) sont aussi le produit de la contribution du mouvement du tronçon de la faille active Sidi khlifa-Bainan (Petrovski, 1980).

Par ailleurs, la sismicité induite provoquée par la fuite d'un volume d'eau important de la conduite assurant le transfert entre le barrage de Béni Haroun et le barrage réservoir de l'Oued Kaïm, est probablement le premier cas observé en Algérie. Le nombre important de secousses (1200 secousses) et la faible magnitude qui caractérisent ces séismes correspondent à la description de la sismicité induite observée à travers le monde (Gough 1980 ; Rothé, 1970, 1973).

Cette situation s'est probablement reproduite lors de la mise en eau du barrage de Béni Haroun, d'autant plus que le substrat de la retenue du barrage est constitué en partie par des roches calcaires fracturées qui ont subi une imperméabilisation par injection de milliers de mètres linéaires de béton.

En raison de leurs foyers, situés à moins de 7 kilomètres de profondeur, le séisme du 7/8/2020 et sa réplique, respectivement de 4.9 et 4.5 ont causé des dégâts importants (Gough, 1980). Plusieurs travaux mentionnent la recrudescence de l'activité sismique à la suite du remplissage des grands barrages (Rothé, 1970, 73). Seulement, on ignore à partir de quelles dimensions minimales, un barrage peut provoquer des séismes. Rothé (1970) pense que la hauteur de la colonne d'eau derrière la digue a plus d'importance que le volume de la retenue et que l'activité sismique est la plus nette lorsque la profondeur de la retenue dépasse 100 mètres. D'autres recherches signalent, dans cet ordre d'idée, qu'un grand lac-réservoir (100 m de profondeur et 1 km³ de volume) risque de provoquer des séismes.

Néanmoins, les travaux récents insistent sur le fait que les barrages ne sont pas à l'origine des contraintes tectoniques qui générèrent les séismes, mais augmentent la contrainte verticale (contrainte additionnelle) sur des failles normales. Aussi, sous la pression de l'eau du barrage la perméabilité en grand (fissurale) est grandement facilitée (Gough, 1980). Cependant, le rythme du remplissage du barrage peut déclencher ou accentuer l'activité sismique, notamment lors de l'atteinte du niveau maximum.

En effet, la recrudescence de l'activité sismique lors des phases de remplissage du barrage de Béni Haroun et notamment durant la phase terminale n'est, à notre avis, pas une simple coïncidence (Rothé, 1970, 1973). Aussi, la période d'accalmie (8 ans) après la fin du remplissage (2012-2020) est une deuxième coïncidence qu'il ne faut négliger. (Adams et Ahmed, 1969).

Par ailleurs, la reprise de l'activité sismique à partir de 2020, se caractérise par des séismes (3 séismes) de magnitudes supérieures à 4.5 jamais enregistrés, avant la mise en eau du barrage, dans le bassin de Mila. Est-ce une nouvelle configuration de contraintes, engendrée par le poids du volume d'eau emmagasiné (960 hm³), et qui a nécessité un nouvel équilibre de la croûte (microplaques) dans le bassin de Mila ?

Dans ce travail, nous considérons que le bassin de Constantine (unité structurale), présentant des conditions morpho-structurales homogènes, comme unité sismogénique issue d'une évolution mio-plio-quaternaire où la néotectonique a joué un rôle non négligeable dans la configuration actuelle du bassin (Kárník et Algermissen, 1980). Ainsi, la réalisation d'une étude similaire (activité sismique et effets induits) dans la partie extrême Est du bassin de Constantine, qui n'a pas accueilli d'infrastructures hydrauliques importantes, permettra de confirmer ou d'infirmer le rôle des grands aménagements hydrauliques dans l'accroissement de la fréquence et des magnitudes des séismes dans la région.

8. Conclusion

Cette contribution à la connaissance de l'aléa sismique et à la réduction du risque sismique dans le bassin de Mila montre l'indispensable intégration de l'aléa sismique dans la dynamique des versants. L'évolution morpho-tectonique des versants est devenue une réalité. Ainsi, la prise en compte de ce géorisque dans les différentes opérations d'aménagement est devenue une évidence. La crise sismique qui a affecté la zone du djebel Lakhel est venue s'ajouter à l'activité sismique considérée comme naturelle. En effet, cette crise a confirmé l'existence du phénomène de sismicité induite (généralisé par l'activité humaine) dans le bassin de Mila. Néanmoins, l'activité sismique est probablement en partie aussi induite par la mise en eau du barrage de Béni Haroun. La magnitude enregistrée (4.9) reste parmi les plus fortes enregistrées dans le bassin de Mila. Faute d'études néotectonique et géomorphologique détaillées, l'interprétation de la répartition des séismes et des dégâts observés manquera d'arguments incontestables. Néanmoins, l'héritage morphologique reste l'élément fondamental qui conditionne la vulnérabilité du site et par conséquent la dynamique actuelle

(mouvements de masse) et l'effet induits des séismes. Ainsi, et selon l'activité sismique enregistrée ces dernières années, le risque sismique reste élevé à très élevé particulièrement pour les flancs Nord, Ouest et Nord-ouest de la colline d'El Kherba.

Bibliographie

Abacha I. (2015) - Étude de la sismicité de la région Nord-Est de l'Algérie. Thèse de doctorat de Sciences, départ. Physique, option : Sismologie ; Université Ferhat Abbas-Sétif (Algérie).

Adams, R. et Ahmed, A. (1969): Seismic Effects at Mangla Dam, Pakistan. *Nature* 222, 1153–1155 <https://doi.org/10.1038/2221153a0>

Agence Japonaise de Coopération Internationale (2006) - Étude de Microzonage Sismique de la Wilaya d'Alger. Rapport Final, Volume IV. Rapport Principal

Azimi C, Desvareux P (1996) Quelques aspects de la prévision des mouvements de terrain. *Rev Fr Géotech* 76:63–75

Bahrouni, N., Bouaziz, S., Soumaya, A. (2014) - Neotectonic and seismotectonic investigation of seismically active regions in Tunisia: a multidisciplinary approach. *J Seismol* 18, 235–256 <https://doi.org/10.1007/s10950-013-9395-y>

Basharat M., Riaz M., Jan M., Xu Chong, Riaza S. (2021) review of landslides related to the 2005 Kashmir Earthquake: implication and future challenges. *Geology, Environmental Science. Natural Hazards*.

Beldjoudi H. (2011): Etude de la sismicité du nord algerien. Doctorat en sciences de la terre et de l'univers. Option géophysique. Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen.

Bommer, J.J. (2022): Earthquake hazard and risk analysis for natural and induced seismicity: towards objective assessments in the face of uncertainty. *Bull Earthquake Eng* 20, 2825–3069 <https://doi.org/10.1007/s10518-022-01357-4>

BRGM (2001) Synthèse des méthodes morpho-structurales utilisées pour l'analyse des failles actives

Bouden-Romdhane N. & Mechler P. (2002) Seismic site effect, (evaluation methods: application to the city of Tunis. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* volume 61, pages269–281 (2002)

Bougdal R., Larriere A., Pincet B., Panet M. & Bentabet A. (2013) Landslides in the Bélouizdad district, Constantine, Algeria. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* volume 72, pages189–202 (2013)

Bouhadad, Y. Benhamouche, A. Bourenane, H. Ait Ouali, A. Chikh M. & Guessoum, N. (2010) The Laalam (Algeria) damaging landslide triggered by a moderate earthquake (Mw = 5.2). *Natural Hazards* volume 54, pages261–272 (2010)

Boulahbal, S., Mebarki A. (2013) : Bilan Et Fonctionnement Hydrologique Du Barrage De Béni Haroun (Oued Kébir-Rhumel, Algérie Orientale), 5ème Colloque International Ressources en eau et Développement Durable : Alger, ENSH Blida.

Boullé P, Vrolijk L, Palm E (1997) Vulnerability reduction for sustainable urban development. *J Conting Crisis Manag* 5:179–188

Bounif, M.A., 1990. Étude sismotectonique en Algérie du nord : contribution à l'étude d'un tronçon de la chaîne tellienne à partir des répliques du séisme de Constantine du 27/10/1985. Mémoire de Magister, USTHB, Alger, 155p.

Chang M., Cui P., Xu L. and Zhou Y. (2021) The spatial distribution characteristics of coseismic landslides triggered by the Ms7.0 Lushan earthquake and Ms7.0 Jiuzhaigou earthquake in southwest China. *Environ Sci Pollut Res Int*. 2021 avril;28(16):20549-20569. doi : 10.1007/s11356-020-11826-5

Coiffait Ph.-E. (1992) : Un bassin post-nappes dans son cadre structural : l'exemple du bassin de Constantine (Algérie nord orientale).Thèse ès Sciences, Université H. Poincaré, Nancy I, France, 502 p.

Dahm, T., Becker, D., Bishoff, M., Cesca, S., Dost, B., Fritschen, R., Hainzl, S., Klose, C. D., Kühn, D.,Lasocki, S., Meier, T., Ohrnberger, M., Rivalta, E., Wegler, U., Husen, S. (2013): Recommendation for the discrimination of human-related and natural seismicity. - *Journal of Seismology*, 17, 1, 197-202 DOI: 10.1007/s10950-012-9295-6

Domzig A. (2006) Déformation active et récente, et structuration tectono-sédimentaire de la marge sous-marine algérienne, Thèse de Doctorat, Université de Bretagne Occidentale

Gough, D.I. (1980) : Sismicité provoquée. Colloque international sur la sismicité provoquée, septembre 1975 à Banff, Alberta (Canada).

Hallal N, Bougdal R (2015) Sismicité dans la ville du Béjaïa et effet des séismes sur les glissements de terrain, Colloque international: seismic risk and induced effects in the Maghreb region, commemoration of the Constantine earthquake. Université Ferhat Abbas, Sétif

Harbi, A., Maouch, S., and Benhallou, Hadj., 2003. Re-appraisal of seismicity and sismotectonics in the north-eastern Algeria Part II: 20th century seismicity and sismotectonics analysis. *Journal of Seismology* 7: 221–234.

Harp EL, Keefer DK, Sato HP, Yagi H (2011) Landslide inventories: the essential part of seismic landslide hazard analyses. *Eng Geol* 122(1–2):9–2

Karolin Firtana-Elcomert & Argun Kocaoğlu (2021) Investigation of fault-zone induced site effect in the İzmit basin, Turkey. *Acta Geophysica* volume 69, pages2069–2083 (2021)

Kárník V. et Algermissen S. T. (1980) : Zonage sismique, in la protection contre le risque sismique, UNESCO.

Kubo, H., Nishikawa, T. (2020). Relationship of preseismic, coseismic, and postseismic fault ruptures of two large interplate aftershocks of the 2011 Tohoku earthquake with slow-earthquake activity. *Sci Rep* 10, 12044 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-68692-x>

Kwiatak G., Bohnhoff M., Dresen G., Schulze A., Schulte T., Zimmermann G., & Huenges E. (2010) Microseismicity induced during fluid-injection: A case study from the geothermal site at Groß Schönebeck, North German Basin. *Acta Geophysica* volume 58, pages995–1020

Linkimer, Lepolt (2008): Relationship between peak ground acceleration and modified Mercalli intensity in Costa Rica, *Revista Geológica de América Central*, num. 38, 2008, pp. 81-94

Machane D, Bouhadad Y, Cheikhounis G, Chatelain J-L, Oubaiche EH, Abbes K, Guillier B, Bensalem R (2008) Examples of geomorphologic and geological hazards in Algeria. *Nat Hazards* 45:295–308. doi:10.1007/s11069-007-9167-5

Marmi R., Bougherara A., Boularak M. et Boufaa K. (2017) : Identification et explication des mouvements de terrain affectant le site de la ville de Mila (Algérie nord-orientale) : approche morpho-géologique. Communication orale au 4e colloque de l'AFGP, Ville durable: milieu physique et gouvernance territoriale, Tanger les 3, 4 et 5 Octobre 2017.

Mehdi A. Guemache, Djamel Machane, Hamoud Beldjoudi, Sofiane Gharbi, Leila Djadia, Sihem Benahmed & Hayet Ymmel (2010) On a damaging earthquake-induced landslide in the Algerian Alps: the March 20, 2006 Laâlam landslide (Babors chain, northeast Algeria), triggered by the Kherrata earthquake (M_w = 5.3). *Natural Hazards* volume 54, pages273–288 (2010)

Michael R. Brudzinski, Maria Kozłowska (2019) Seismicity induced by hydraulic fracturing and wastewater disposal in the Appalachian Basin, USA: a review. *Acta Geophysica* volume 67, pages351–364 (2019)

Papathanassiou George (2012) Estimating slope failure potential in an earthquake prone area: a case study at Skolis Mountain, NW Peloponnesus, Greece. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* volume 71, pages187–194 (2012)

Petrovski Jukim T. (1980) Cartographie de détail des zones sismiques (microzonage) et problèmes connexes, in la protection contre le risque sismique, UNESCO.

Pothérat P. & Effendiantz L. (2009) Large-scale Neotectonic slope movements: a case study from Séchilienne (Isère, France). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* volume 68, Article number: 567 (2009).

Rothé J.P (1970): Seismes artificiels, *Tectonophysics*, Volume 9, Nos 2–3, Pages 215-238, [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(70\)90018-1](https://doi.org/10.1016/0040-1951(70)90018-1)

Swapnamita Choudhury, Param K. Gautam & Ajay Paul (2013) Seismicity and reservoir induced crustal motion study around the Tehri Dam, India. *Acta Geophysica* volume 61, pages 923–934 (2013).

Tebbouche M.Y., Ait Benamar D., Hassan H., Bencharif R., Machane D., Aghiles Meziani A., Nemer Z.(2022) Characterization of El Kherba landslide triggered by the August 07, 2020, M_w = 4.9 Mila earthquake (Algeria) based on post-event field observations and ambient noise analysis. *Environmental Earth Sciences* (2022) 81:46

UNESCO (1980) La protection contre le risque sismique.

Vassilis Sakkas & Evangelos Lagios (2017) Ground deformation effects from the ~M6 earthquakes (2014–2015) on Cephalonia–Ithaca Islands (Western Greece) deduced by GPS observations. *Acta Geophysica* volume 65, pages 207–222 (2017).

Vila J-M (1980) La chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins algéro-tunisiens, Thèse Doctorat, Université Paris VI, 665 p

Vila, J.M., 1977. La carte géologique (1/200 000) de Constantine et sa notice, réalisée en 1977 et publiée par le Ministère de l'industrie et de l'énergie, direction des mines et de la géologie, service de la carte géologique de l'Algérie.

TriNet "ShakeMaps": Rapid Generation of Peak Ground Motion and Intensity Maps for Earthquakes in Southern California.

Wald, David J. EERI M., Quitoriano Vincent, Heaton Thomas H., Kanamori Hiroo, Scrivner Craig W. and Worden C. Bruce (1999a) Relationships between Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity, and Modified Mercalli Intensity in California, *Earthquake Spectra*, 15 (3). USGS Publications Warehouse.

Wald, David J., Quitoriano, Vincent, Heaton, Thomas H., Kanamori, Hiroo, Scrivner, Craig W., Worden et C. Bruce (1999b) TriNet "ShakeMaps": Rapid Generation of Peak Ground Motion and Intensity Maps for Earthquakes in Southern California. *Earthquake Spectra*, 15 (3). pp. 537-555. doi: 10.1193/1.1586057

Wang X, Mao H. (2021) Spatio-temporal evolution of post-seismic landslides and debris flows: 2017 Ms 7.0 Jiuzhaigou earthquake. *Environ Sci Pollut Res Int.* 2022 Mar;29(11):15681-15702. doi: <https://doi.org/0.1007/s11356-021-16789-9>

Yelles-Chaouche, A.K., Boudiaf, A., Djellit, H and Bracène, R. (2006) La tectonique active de la région nord algérienne. *Comptes Rendus Géosciences.* 338, 126–139.

Zhao B, Wang YS, Luo YH, Li J, Zhang X, Shen T. (2018) Landslides and dam damage resulting from the Jiuzhaigou earthquake (8 August 2017), Sichuan, China. *R. Soc. Open sci.* 5171418171418 <https://doi.org/10.1098/rsos.171418>

Zhou Q, Jiang Y-F, Wu G, Chen G-G (2014) Distribution of coseismic landslides in Lushan earthquake and discussion on related problems. *Seismol Geology* 36(2):344–357.