

# **LE SÉISME ( $M_w = 5$ ) DE LAALAM (KABYLIE, ALGÉRIE) DU 20 MARS 2006 : PROSPECTIONS GÉOLOGIQUES ET GÉOPHYSIQUES (BRUIT VIBRATOIRE AMBIANT) ET CORRÉLATIONS AVEC LES DOMMAGES.**

**Djamel MACHANE\***, **Bertrand GUILLIER\*\***, **Jean-Luc CHATELAIN\*\***, **Jean-Pierre BOUILLIN\*\***, **Hamid HADDOUM\*\*\***, **Mehdi Amine GUEMACHE\*\*\*\***, **Souad ZETOUTOU\***, **Sahra AOURARI\***, **Leila DJADIA\*\*\*\*** et **Zaki BENELHADJ\*\***

## **RÉSUMÉ**

Les investigations géologiques et géophysiques (H/V-bruit de fond) réalisées dans le village de Laalam (wilaya de Béjaïa) au lendemain du séisme de Laalam du 20 mars 2006 ( $M_w=5.0$ , USGS) ont permis de démontrer l'absence d'effets de site en relation avec les dégâts observés sur les constructions. Les dégâts et les pertes humaines (4 morts, 68 blessés) s'expliquent par la vulnérabilité du bâti et la proximité de l'épicentre, soit directement (secousses sismiques), soit indirectement, par les effets induits. Les effets induits se sont manifestés par des fissures au niveau des sols et des routes, des chutes de blocs et un glissement de terrain réactivé par le séisme. Toutefois, les fissures n'expriment pas en surface la faille ayant engendré le séisme, en raison de la magnitude modérée du séisme. Cette étude conforte l'importance qui doit être accordée aux études sur les effets induits par les séismes modérés, et pose le problème important, des dommages que continuent de causer même les séismes faibles à modérés se produisant en Algérie, de la mise en évidence et de la cartographie des failles aveugles.

**Mots clés** - Séisme de Laalam - Effets de site - H/V - Bruit de fond - Effets induits - Faille aveugle - Algérie.

\* Département Aléa Sismique, Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique (CGS), 1 Rue Kaddour Rahim, BP. 252, Hussein-Dey, Alger, Algérie. dmachane@cgs-dz.org

\*\* Maison des Géosciences LGIT, LGCA, IRD : UR157 – CNRS : UMR5559 – LCPC – OSUG – Université de Savoie – Université Joseph Fourier - Grenoble I, France.

\*\*\* Département de Géologie, Faculté des Sciences de la Terre, de Géographie et de l'Aménagement du Territoire (FSTGAT) - USTHB, BP. 32, El Alia 16111, Bab Ezzouar, Alger, Algérie.

\*\*\*\* Département de Géophysique, Centre de Recherche en Astronomie, Astrophysique et Géophysique (CRAAG), BP. 63, Route de l'Observatoire, 16340 Bouzaréah, Alger, Algérie.

- *Manuscrit déposé le 28 Juin 2008, accepté après révision le 16 Juillet 2008.*

## THE 20 MARCH 2006 EARTHQUAKE OF LAALAM (KABYLIA, ALGERIA) ( $M_w=5$ ): GEOLOGICAL AND GEOPHYSICAL PROSPECTIONS (AMBIENT VIBRATION NOISE) AND CORRELATIONS WITH DAMAGES.

### ABSTRACT

Geological and geophysical (ambient vibrations) prospections conducted after the moderate Laalam earthquake ( $M_w = 5$ , USGS), demonstrate that structure destructions following this event are not related to site effects. Nevertheless, damages and human losses (4 dead, 68 injured) may be explained by vulnerable habitations and the epicenter proximity, either directly (ground shaking) or indirectly, by induced effects. Induced effects are constituted of soil and road cracks, rock falls, and a landslide reactivated by the earthquake. However, the surficial cracks are not expressing the fault on the surface, because of the moderate magnitude of the event. This study is comforting the need of moderate earthquake induced effects and raises the important problem of damages caused by low to moderate earthquakes in Algeria and buried fault location and mapping.

**Key words** - Laalam earthquake - Site effects - H/V - Ambient vibrations - Induced effects - Buried fault - Algeria.

### I. INTRODUCTION

Le 20 mars 2006, à 20 h 44 GMT, un séisme modéré a ébranlé Laalam, situé entre Béjaia et Jijel (fig. 1). Sa magnitude varie, selon les organismes, entre 3,6 et 5,8 : USGS 5.0 ( $M_w$ ), IGN 5.1 ( $M_b$  et  $M_w$ ), INGV 5.2 ( $M_b$  et  $M_w$ ), ETHZ 5.3 ( $M_b$  et  $M_w$ ), CRAAG 5.8 ( $M_l$ ), Allemagne 4.5 ( $M_b$ ) et 3.6 ( $M_s$ ). Une accélération maximale (PGA) de 0.18 g a été enregistrée par la station de Ziama, sur un site ferme, dans la direction E-W (Laouami et *al.*, 2006).

L'épicentre du séisme est localisé dans les monts des Babors appartenant aux zones externes de l'orogène alpin algérien, près du village de Laalam, petite localité sise dans les montagnes (entre 600 et 700 m d'altitude), surplombant la baie de Béjaia (fig. 1). Quelques constructions bâties essentiellement sur des terrains marneux de cette localité et de ses environs immédiats ont subi des dégâts et quatre personnes sont décédées suite à ce séisme. Les mécanismes au foyer des différents organismes internationaux de sismologie sont quelques peu différents, mais indiquent une faille à jeu principalement décrochant.

Nous étudierons les relations entre les dégâts et, d'une part, le comportement dynamique local du sol (effets de sites), et d'autre part les effets induits par ce séisme (instabilité de terrain, chutes de blocs, fissures dans le sol). Cette étude est basée sur les résultats d'une intervention post-sismique (22 - 25 mars) de prospection géologique et d'enregistrement du bruit de fond sur 6 sites, réalisée conjointement par des chercheurs du Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique CGS (Alger) et de l'Institut de Recherche pour le Développement IRD (France) basé en Algérie.

### II. PRINCIPAUX TRAITS GÉOLOGIQUES ET TECTONIQUES RÉGIONAUX

#### II.1. Géologie

La région épicertrale fait partie des Babors orientaux (Vila, 1980; Obert, 1984). La chaîne des Babors, dans laquelle se trouve la localité de Laalam, s'étend depuis la vallée de la Soummam à l'Est d'Akhou jusqu'au massif de la Petite

LE SÉISME ( $M_w = 5$ ) DE LA LAALAM (KABYLIE, ALGÉRIE) DU 20 MARS 2006 : PROSPECTIONS GÉOLOGIQUES ET GÉOPHYSIQUES (BRUIT VIBRATOIRE AMBIANT) ET CORRÉLATIONS AVEC LES DOMMAGES.

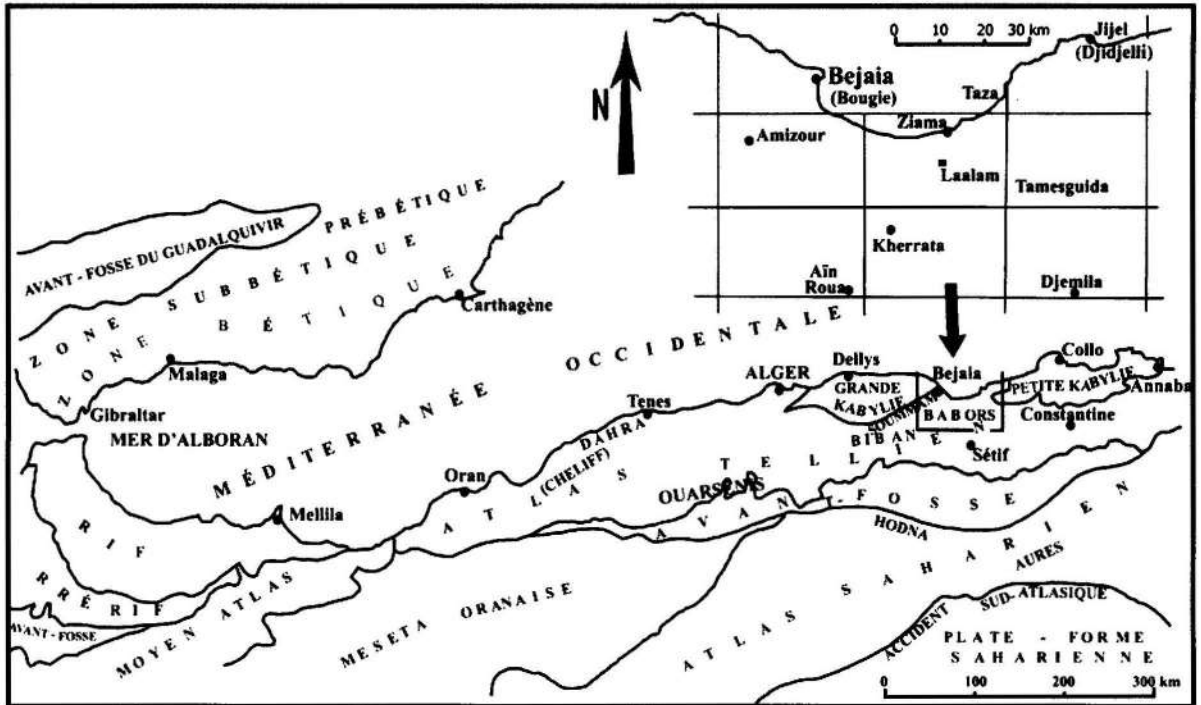


Fig. 1 - Carte de localisation de la région épiscopentrale et du village de Laalam

**Location map of the epicentral zone and Laalam village**

Kabylie au méridien de Jijel à l'est (fig. 2). Cette zone est structurée en unités tectoniques différentes : soit, du nord au sud, les unités Brek - Gouraya et Draa El Arba - Erraguène, Babors - Beni Ouartilane (nomenclature Leikine et *al.*, 1975). Les terrains carbonatés (dolomies massives, calcaires et marnes) d'âge jurassique et crétacé y prédominent.

Les séries des unités baboriennes débutent par un Trias marno-gypseux, schisteux et gréseux connu dans l'unité de Brek - Gouraya (Coutelle, 1982; Obert, 1984). Le Jurassique comprend des dolomies et des calcaires, des niveaux conglomératiques (dans l'unité de Brek - Gouraya) et des pélites. Le Crétacé inférieur est formé de calcaires pélitiques, de pélites plus ou moins schisteux et de conglomérats avec des grès dans l'unité Brek - Gouraya. Le Crétacé supérieur comporte des calcaires marneux et des marnes avec des conglomérats

fréquents dans les unités septentrionales (Brek - Gouraya). Le Paléogène est développé surtout dans la partie méridionale, où le Paléocène est marno-pélitique et l'Eocène calcaire puis marneux. Le Néogène est composé de calcaires biodétritiques, scellant le contact unité Brek / unité d'Erraguène, recouverts par des calcaires marneux, des marnes détritiques puis des marnes rouges continentales du Tortonien.

## II.2. Tectonique

L'édifice structural des Babors est constitué d'unités charriées, préalablement plissées, se différenciant chacune par sa stratigraphie et sa tectonique (fig. 2).

Nous avons vu que sur la transversale de Ziana Mansouria-Sétif, qui englobe la zone épiscopentrale, l'édifice structural est composé de (fig. 3) :

D. MACHANE, B. GUILLIER, J.-L. CHATELAIN, J.-P. BOUILLIN, H. HADDOUM, M. A. GUEMACHE, S. ZETOUTOU, S. AOURARI, L. DJADIA. ET Z. BENELHADJ



Fig. 2 - Schéma structural de la région des Babors (Obert, 1984). Notez les failles orientées selon la direction NE-SW  
 Structural sketch of the Babors region (Obert, 1984). Note that faults are oriented in the NE-SW direction

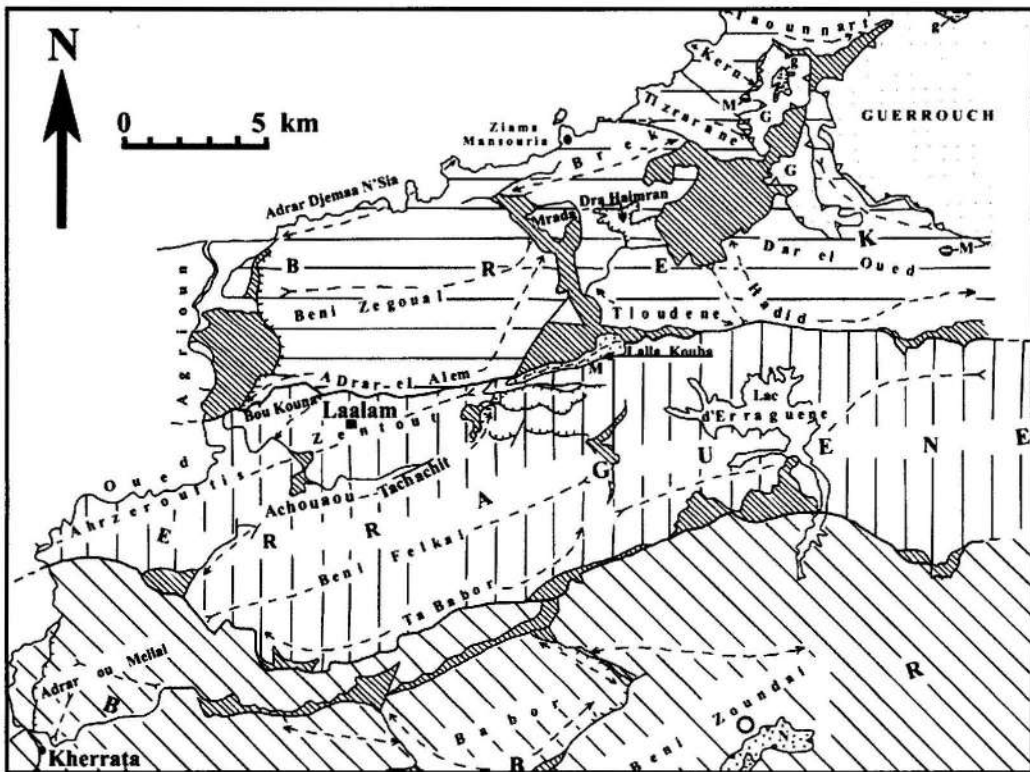


Fig. 3 - Unités et sous-unités des Babors orientaux (Obert, 1984). Notez que le village de Laalam se trouve dans l'unité d'Erraguène  
 Oriental Babors units and sub-units (Obert, 1984). Note that Laalam village is located in the Erraguène unit

LE SÉISME ( $M_w = 5$ ) DE LA LAALAM (KABYLIE, ALGÉRIE) DU 20 MARS 2006 : PROSPECTIONS GÉOLOGIQUES ET GÉOPHYSIQUES (BRUIT VIBRATOIRE AMBIANT) ET CORRÉLATIONS AVEC LES DOMMAGES.

- l'unité Breck-Gouraya est la plus déformée de tout le domaine. Cette unité est caractérisée par des plis importants déversés et couchés vers le nord (Draa Haimran). Les plis sont affectés par des cisaillements liés au jeu d'un accident décrochant sénestre (Obert, 1984);

- l'unité Draa El Arb- Erraguène, dont fait partie la région de Laalam, est chevauchée par la précédente;

- l'unité Babor-Béni Ourtilane (Leikine, 1971; Obert, 1984) appelée aussi nappe de Djemila par Vila et *al.* (1975).

Les structures cassantes qui prédominent sont :

- des décrochements de direction E-W;

- des décrochements transverses présentant un réseau conjugué, de directions NE-SW sénestres et NNW-SSE à NW-SE dextres, et à rejet modeste (Glaçon 1967);

- des failles verticales à sub-verticales orientées N-S à NNE-SSW, comme la faille de Mahfouda de direction N-S dans l'unité Babors - Beni Ourtilane et la faille d'Adrar El Alem dans l'unité Erraguène (Coutelle, 1982).

L'essentiel de la tectonique alpine serait acquis à l'Eocène (Vila, 1980; Coutelle, 1982; Hassissène, 1989), mais la plus ancienne discordance visible sur un contact chevauchant est celle, d'âge probablement burdigalien, décrite par Obert (1981) à Lalla Kouba. Dès le Jurassique, le domaine des Babors a été marqué par des déformations transverses d'axe d'orientation N-S, suivies par des plissements E-W durant le Crétacé. La phase fini-albienne est accompagnée d'évènements magmatiques. L'écaillage des unités baboriennes et leur décollement vers le sud se sont produits à l'Eocène, suivis de retroécaillages de moindre importance et de coulissage sénestre (Obert, 1984).

La tectonique récente est marquée par une importante phase de fracturation (réseau serré de failles verticales à jeu vertical ou décrochant), dont il semble que les tremblements de terre locaux soient la continuation actuelle (Coutelle, 1982).

Hassissène (1989) a défini une phase intrapliocène, voire pléistocène à actuelle marquée par une famille de failles verticales N-S à NNE-SSW (de direction N010-N025) et des décrochements E-W dextres, NE-SW sénestres et NNW-SSE à NW-SE dextres.

Un accident majeur de direction NE-SW, dit «faille des Babors» (Leikine, 1971), repris par Wildi (1983), cartographié par Obert (1984), sépare les Babors orientaux des Babors occidentaux. Ce décrochement se manifeste dans les Babors par un alignement NE-SW de décrochements mineurs au djebel Breck, à l'Adrar El Alem, décalé de 3 km vers le SW, et par les décrochements de Tendet et de l'Iril Bouzin plus à l'ouest.

Ces accidents coulissants semblent être d'âge récent (post-langhien) ou réactivés, et certains de ces décrochements reprennent le contact frontal de l'unité Brek-Gouraya. Obert (1981) leur associe un âge beaucoup plus ancien (jurassique), et une réactivation durant les phases alpines ultérieures, voire les phases néotectoniques.

### III. SISMICITÉ DE LA RÉGION DES BABORS

La région affectée par le séisme du 20 mars 2006 a connu depuis 1946 plusieurs séismes modérés à forts, superficiels de magnitude  $\leq 6.5$ , avec une intensité maximale pouvant atteindre X (tabl. I). La carte de distribution de la sismicité instrumentale (fig. 4) montre dans la région des Babors une sismicité diffuse. Un événement majeur et destructeur, d'une magnitude évaluée à 7.5 (Mokrane et *al.*, 1994), a

D. MACHANE, B. GUILLIER, J.-L. CHATELAIN, J.-P. BOUILLIN, H. HADDOUM, M. A. GUEMACHE, S. ZETOUTOU, S. AOURARI, L. DJADIA. ET Z. BENELHADJ

**Tableau I - Liste des séismes (sismicité instrumentale) ( $M \geq 5$  ou  $I \geq 5$ ) de la région des Babors (Mokrane et al., 1994; Benouar, 1994; Boudiaf, 1996; Harbi, 2001)**

***Earthquakes list (instrumental seismicity) ( $M \geq 5$  or  $I \geq 5$ ) of the Babors region (Mokrane et al., 1994 ; Benouar, 1994 ; Boudiaf, 1996 ; Harbi, 2001)***

Date	Coordonnées		Magnitude	Intensité	Profondeur (km)	Région
12/02/1946	35.75N	4.95E	6.5	VIII-IX		
07/02/1949	36.50N	5.25E	5	VIII	14	Kherrata
28/03/1952	35.90N	4.90E	4.1	IV-V		
29/08/1953	35.80N	5.40E	6,5	VIII-X		
12/12/1954	36.50N	4.80E	4.6	VI	6	Seddouk
31/05/1956	36.50N	4.80E	6	V	17	El Mattan
27/10/1957	36.70N	4.80E		VI-VIII	6	
24/05/1959	36.12N	4.51E	5	VIII		Mansourah
26/02/1960	36.20N	5.40E	3	VI		Sétif
14/07/1960	37.00N	4.75E				
04/09/1963	36.00N	5.20E	6		10	
12/02/1964	35.75N	4.95E		VIII-IX		
14/04/1965	36.36N	5.20E	4	VII	10	Akbou
15/11/1965	36.50N	4.50E	4	VII	5	
05/04/1967	35.75N	4.75E	4	VI-VII		
25/02/1968	36.55N	5.31E	5.9	VII	20	Z. Mansouria
24/11/1973	36.10N	4.40E		VII	15	
28/01/1974	36.10N	4.50E	5			
28/06/1974	36.49N	5.28E	5	V		
29/06/1974	36.40N	5.20E	5			Oued Marsa
13/07/1974	35.80N	4.90E	5			
28/07/1974	36.57N	5.26E	5		20	Kherrata
29/07/1974	36.52N	5.21E	5			Oued Marsa
09/11/1974	36.77N	5.14E	4.1	VIII		Kherrata
11/07/1975	36.25N	5.35E	4.1	V	7	
26/05/1978	36.61N	5.01E	3	V		Amizour
26/05/1978				V		Seddouk
31/01/1979	36.16N	5.08E		V		
25/11/1980	36.07N	4.70E		IV		
26/11/1980	36.00N	4.78E		V		
06/01/1981	36.63N	4.80E		V		
03/07/1985				V		Amoucha
21/10/1985	36.40N	5.17E		V		
24/04/1987	36.62N	5.49E	4.1		10	Kherrata
20/09/1992	36.50N	5.32E	4	V		
10/11/2000	36.43N	4.90E	5.7	VII	5	B. Quartilane

LE SÉISME ( $M_w = 5$ ) DE LA LAALAM (KABYLIE, ALGÉRIE) DU 20 MARS 2006 : PROSPECTIONS GÉOLOGIQUES ET GÉOPHYSIQUES (BRUIT VIBRATOIRE AMBIANT) ET CORRÉLATIONS AVEC LES DOMMAGES.

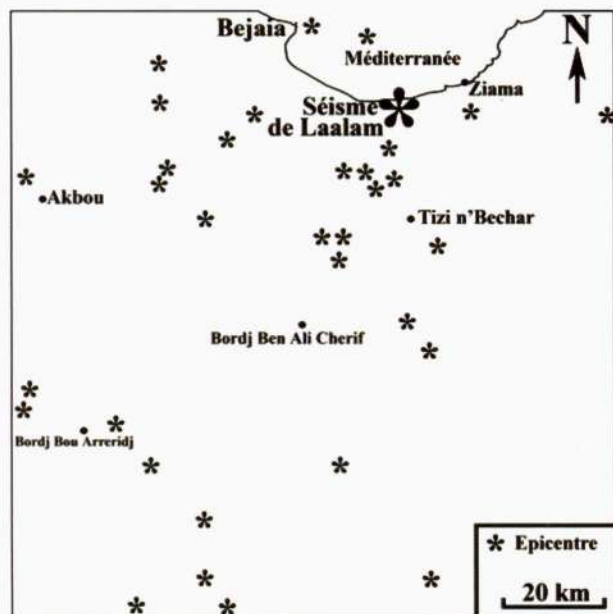


Fig. 4 – Carte montrant la distribution de la sismicité dans la région des Babors

*Seismicity distribution map in the Babors region*

marqué le secteur proche de la région étudiée le 22 août 1856, ressenti avec une intensité X dans la région de Jijel. Ce séisme a provoqué un raz-de-marée (tsunami) le long des côtes de Jijel, la Calle, Nice (France) et S<sup>t</sup> Pierre de Sardaigne (Italie). Le choc principal a détruit plus de la moitié des habitations de Jijel, et les localités environnantes ont subi de sérieux dégâts.

#### IV. ANALYSE DES MÉCANISMES AU FOYER DU SÉISME DE LAALAM

Les mécanismes au foyer du choc principal calculés par trois organismes internationaux, donnent des solutions focales quelque peu différentes (fig. 5). Néanmoins, ils s'accordent sur un mécanisme en faille décrochante, avec une très légère composante inverse. Les deux plans nodaux ont respectivement une direction NW-SE et NE-SW à E-W.

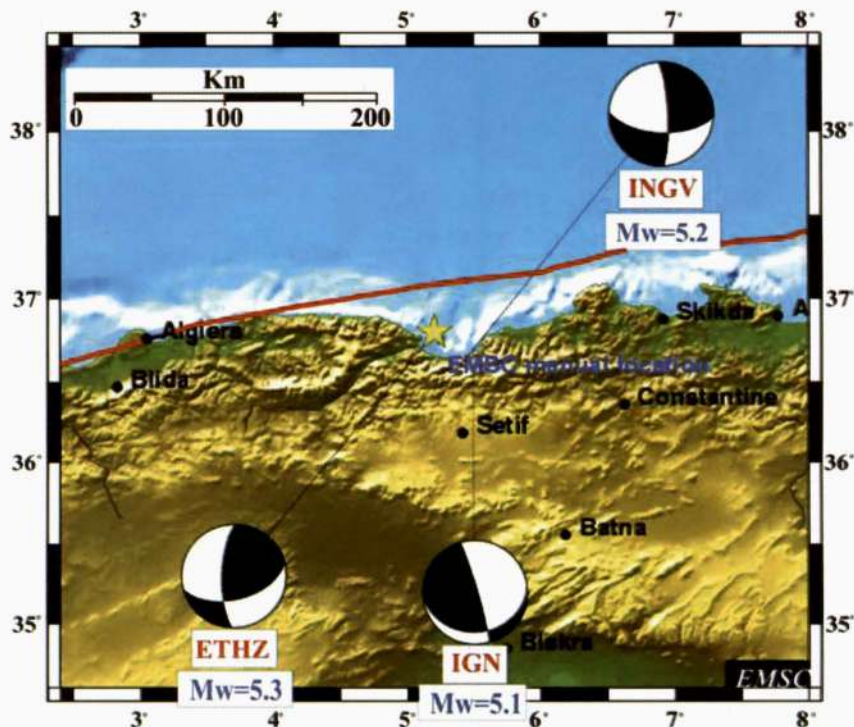


Fig. 5 - Mécanismes au foyer du séisme de Laalam du 20 mars 2006 de l'IGN, l'INGG et l'ETHZ (coordonnées 5°.33 et 36°.68, CSEM, 2006)

*Focal mechanisms of the 20 march 2006 Laalam earthquake from IGN, INGG and ETHZ (coordinates 5.33° and 36.68, CSEM, 2006)*

D. MACHANE, B. GUILLIER, J.-L. CHATELAIN, J.-P. BOUILLIN, H. HADDOUM, M. A. GUEMACHE, S. ZETOUTOU, S. AOURARI, L. DJADIA. ET Z. BENELHADI

Pour l'IGN, les plans nodaux sont orientés N344 et N86 avec des pendages respectivement de 85E et 23S, donnant un décrochement sénestre pour le plan N86 et dextre pour N344. Toutefois, la faille N86 à pendage très faible ne représente pas un décrochement. Pour l'INGV, les plans nodaux sont orientés N357 et N93 avec des pendages respectivement de 80E et 61S, donnant un décrochement dextre pour N93 et sénestre pour N357. Pour l'ETHZ, les plans nodaux sont orientés N330 et N68 avec des pendages de 69W et 69S. La solution focale donne un décrochement dextre pour le plan N68 et sénestre pour N330.

Durant les trois dernières décennies, toutes les failles ayant engendré des séismes en Algérie septentrionale présentent une direction globale-ment NE-SW à ENE-WSW : El Asnam, 1980 (Nabelek, 1985); Constantine, 1985 (Bounif et *al.*, 1987); Chenoua, 1989 (Meghraoui, 1991); Mascara, 1994 (Benouar et *al.*, 1994); Aïn El Benian, 1996 (Maouche et *al.*, 1998); Aïn Témouchent, 1999 (Yelles-Chaouche et *al.*, 2004); Beni Ouartilane, 2000 (Bouhadad et *al.*, 2003); Boumerdès, 2003 (Deverchere et *al.*, 2005). La contrainte tectonique régionale actuelle connue en Algérie est orientée NW-SE à N-S (Meghraoui et *al.*, 1996). D'un point de vue géologique, les accidents les plus exprimés sont majoritairement orientés NE-SW (fig. 2).

Il n'est donc pas possible de trancher pour un plan de faille tiré des mécanismes au foyer en relation avec la géologie de la région vu que toutes les directions des plans de ces mécanismes sont présentes sur le terrain, et que la faille ayant engendré le séisme ne s'est pas exprimée en surface. Néanmoins, la solution N68 proposée par l'ETHZ donne une possibilité de plan orienté NE-SW ou ENE-WSW, en accord avec les failles ayant engendré les séismes antérieurs cités plus haut, et en accord également avec un grand linéament de direction N65, visible sur la

carte topographique et aussi sur l'image Google Earth, dans le secteur de Laalam et le long duquel ont été choisis les sites d'enregistrement post-sismique. Ce linéament pourrait correspondre à une faille légèrement courbe, qui décale la topographie de plusieurs mètres, avec un compartiment abaissé au NNW. Il faut noter qu'un réseau mobile de sismographes a été installé par le CGS (Laouami et *al.*, 2006). L'analyse des enregistrements permettra la caractérisation du plan de faille.

## V. INTERVENTION POST-SISMIQUE : PROSPECTIONS GÉOLOGIQUE ET GÉOPHYSIQUE

L'intervention post-sismique a concerné deux volets :

- une prospection géologique au niveau de la localité de Laalam pour mettre en évidence de possibles effets géologiques induits par le séisme, et éventuellement la faille ayant engendré le séisme;
- une prospection géophysique du sol basée sur l'enregistrement du bruit de fond sur 6 sites, afin de mettre en évidence d'éventuels effets de site (méthode H/V). Lors de cette intervention, quelques répliques du séisme de Laalam ont été enregistrées.

### V.1. Prospection géologique

Des effets induits par le séisme ont pu être mis en évidence, essentiellement des fissures, un glissement de terrain et des chutes de blocs. Même s'ils sont beaucoup moins importants que ceux observés, par exemple, lors du séisme de Boumerdès en 2003 (Machane et *al.*, 2004; Machane et *al.*, 2008), il n'en demeure pas moins qu'ils sont responsables de la majorité des dégâts occasionnés aux habitations dans Laalam.



LE SÉISME ( $M_w = 5$ ) DE LA LAALAM (KABYLIE, ALGÉRIE) DU 20 MARS 2006 : PROSPECTIONS GÉOLOGIQUES ET GÉOPHYSIQUES (BRUIT VIBRATOIRE AMBIANT) ET CORRÉLATIONS AVEC LES DOMMAGES.

### *Fissures*

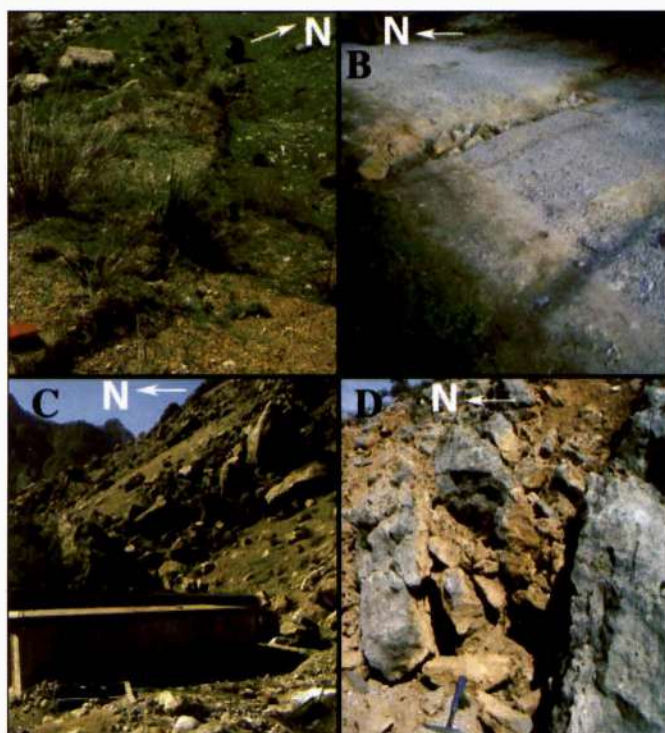
De nombreuses fissures du sol ont été cartographiées (fig. 6A et 6B, voir localisation sur la figure 8). Elles ont des directions NNE-SSW, NNW-SSE et ENE-WSW, avec une dominante de la direction ENE-WSW (autour de N070), qui est aussi la plus représentative, dont l'une, a pu être suivie sur plusieurs dizaines de mètres. Par endroits, ces fissures montrent un léger déplacement dextre, aussi observé sur le plan N68 du mécanisme au foyer de l'ETHZ, qui, rappelons-le, montre la même direction que la plupart des failles (inverses ou décrochantes) sismiques algériennes ayant généré des séismes ces trois dernières décennies. Il est très probable que la faille ayant engendré le séisme de Laalam soit aveugle, étant donné qu'aucune expression en surface n'a pu être observée. Il est indéniable que la majorité des failles affectant les Babors ont une direction NE et qu'elles sont récentes

(Plio-Quaternaire), avec toutefois un déplacement sénestre (Obert, 1984; Hassissène, 1989), en contradiction, donc, avec les observations de déplacement dextre des fissures. Ces contradictions seraient-elles le reflet d'une inversion tectonique ? Il n'existe toutefois, à notre connaissance, pas d'éléments suffisant pour pousser plus avant cette hypothèse.

### *Glissement de terrain – Chutes de blocs*

L'effet induit le plus important est un glissement de terrain réactivé par le séisme dans un contexte favorable du site traduit par une lithologie argilo-marneuse à schisteuse, une pente relativement forte et une concentration de sources d'eau aux écoulements ubiquistes.

Les vibrations sismiques ont aussi provoqué des chutes de blocs (fig. 6C et 6D, voir



**Fig. 6 - Photos montrant des fissures sur le sol (A) et sur la route (B) ainsi que des chutes de blocs (C et D) suite au séisme de Laalam**

***Photographies showing cracks on the ground (A) and on a road (B) as well as block falls (C and D) induced by the Laalam earthquake***

D. MACHANE, B. GUILLIER, J.-L. CHATELAIN, J.-P. BOUILLIN, H. HADDOUM, M. A. GUEMACHE, S. ZETOUTOU, S. AOURARI, L. DJADIA. ET Z. BENELHADI

localisations sur la figure 8), qui ont affecté les régions montagneuses créant en certains endroits, de grands risques pour les habitations situées en contrebas et bâties sur les terrains argileux et schisteux du Crétacé.

Des résurgences et des apparitions de sources d'eau se sont produites, parfois au détriment d'autres qui ont été asséchées ou ont changé de direction d'écoulement.

## V.2. Comportement du sol

Le but de la prospection géophysique était de déterminer si, dans la région de Laalam, les destructions pouvaient être liées à des effets de site, comme cela a été montré, par exemple, par Guéguen *et al.* (2000) après un séisme modéré en Équateur. Pour cela, la fréquence de résonance du sol a été étudiée à l'aide d'enregistrements du bruit vibratoire ambiant et de la méthode des rapports spectraux H/V.

Trois effets affectent le signal sismique (amplitude, longueur d'onde et contenu fréquentiel) :

- les effets de source, liés à la taille, la géométrie et au mode de rupture de la faille;
- les effets de propagation des ondes depuis la source jusqu'en surface;
- les effets de site, liés aux modifications du mouvement du sol par la structure proche de la surface.

Le terme «effet de site» englobe tous les effets qui, au voisinage du site considéré, viennent perturber le comportement du champ d'onde (et donc le mouvement du sol) qui va plus ou moins s'amplifier et se prolonger dans le temps. À cause d'une géologie et/ou une géométrie particulière, le mouvement du sol induit par une sollicitation sismique peut être amplifié et prolongé dans le temps.

Dans le cas d'une structure 1D, une couche sédimentaire stratifiée horizontalement surmontant un substratum, l'effet de site est principalement dû au contraste d'impédance (de vitesse des ondes S) entre un milieu meuble (remplissage sédimentaire) surmontant un milieu compétent (substratum), qui produit deux effets :

- une augmentation de l'amplitude du mouvement du sol par rapport au mouvement incident à la base des dépôts peu consolidés ;
- un effet de résonance dû à des phénomènes de réverbérations verticales du champ d'ondes incident dans le milieu peu consolidé où les ondes se trouvent piégées.

La technique H/V-bruit de fond a été proposée par Nogoshi et Igarashi (1971), puis développée par Nakamura (1989). Cette méthode consiste à enregistrer les vibrations du sol causées par des sources de bruit autres que des séismes, naturelles (marées, pluie, vent...) et anthropiques (véhicules, trains, piétons, machines industrielles...). Cette technique et l'étude du bruit de fond sont développées plus en détail par Bonnefoy-Claudet *et al.* (2006), Chatelain *et al.* (2007) et Bard (2008).

L'expérience montre que le rapport H/V est étonnamment stable dans le temps (e.g. Guillier *et al.*, 2007), et que :

- le rapport H/V est généralement plat et oscille autour de 1, sur les sites rocheux ;
- ce rapport présente un pic bien marqué, centré sur la fréquence de résonance d'un site sédimentaire.

Le bruit de fond a été enregistré à l'aide d'une station CityShark™ (Chatelain *et al.*, 2000) connectée à un sismomètre Lennartz™ 5-secondes (fig. 7). Des enregistrements de 15 minutes ont été réalisés sur six sites (fig. 8). Les sites 5 et 6

LE SÉISME ( $M_w = 5$ ) DE LA LAALAM (KABYLIE, ALGÉRIE) DU 20 MARS 2006 : PROSPECTIONS GÉOLOGIQUES ET GÉOPHYSIQUES (BRUIT VIBRATOIRE AMBIANT) ET CORRÉLATIONS AVEC LES DOMMAGES.

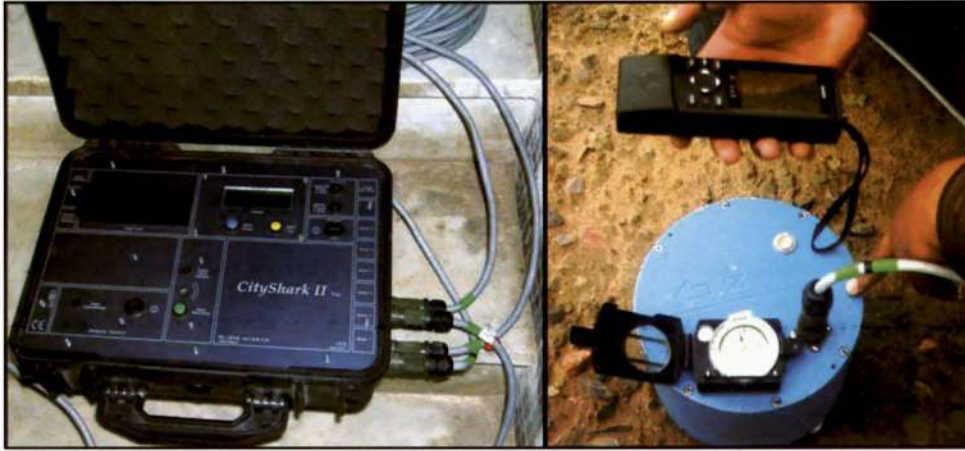


Fig. 7 - Photos du matériel utilisé pour les enregistrements de bruit de fond : station Cityshark™ (gauche) et sismomètre Lennartz™ 5-secondes (droite)

*Photographies showing the equipment used for ambient noise recordings: Cityshark™ station (left) and Lennartz™ seismometer 5-seconds (right)*

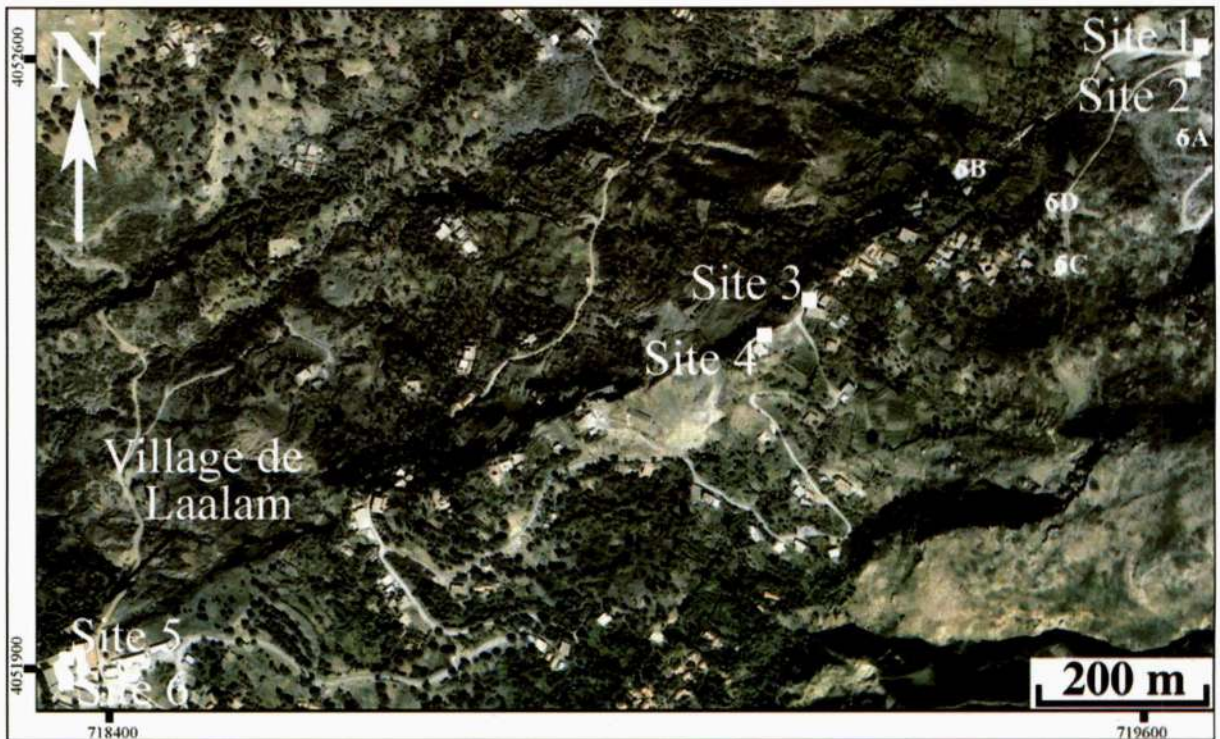


Fig. 8 - Localisation des sites d'enregistrement de bruit de fond (coordonnées UTM, WG S84)

*Sites ambient noise recording locations (UTM, WGS 84 coordinates)*

D. MACHANE, B. GUILLIER, J.-L. CHATELAIN, J.-P. BOUILLIN, H. HADDOUM, M. A. GUEMACHE, S. ZETOUTOU, S. AOURARI, L. DJADIA. ET Z. BENELHADJ

sont situés dans le centre du village de Laalam où l'on relève la majorité des dégâts, qui ont consisté le plus souvent en la destruction de vieilles maisons très vulnérables. Les autres sites sont situés en dehors de la zone de forte urbanisation, au NE de Laalam. Les rapports spectraux H/V ont été calculés avec le logiciel Geopsy (<http://www.geopsy.org/>) développé en marge du programme européen de recherche SESAME (SESAME, 2004). L'algorithme de fonctionnement du programme Geopsy est comme suit :

- sélection des trois composantes (vertical V, nord-sud N et est-ouest E) d'un signal;
- choix de la durée des fenêtres à prendre en compte qui dépend de la fréquence du phénomène à observer;
- recherche des Ni fenêtres stationnaires simultanément sur les trois composantes, par un critère d'anti-trigger LTA/STA;
- calcul des spectres de chaque composante Sv (Ni), Sn (Ni) et Se (Ni) sur chacune des Ni fenêtres par une transformée de Fourier;
- lissage des spectres (pour chaque Ni fenêtre) avec une fenêtre glissante dont la forme et la largeur dépendent de la fréquence;
- calcul de la moyenne quadratique des spectres horizontaux lissés Sh (Ni) (composantes nord-sud et est-ouest) pour chaque fenêtre;
- calcul des rapports spectraux H/V (Ni) pour chaque fenêtre;
- calcul de la moyenne géométrique du rapport spectral H/V sur toutes les fenêtres;
- détermination de la fréquence F h/v du (des) pic (s) de la courbe H/V.

Les résultats montrent que, globalement, les 6 courbes H/V ne présentent pas de pic net, et

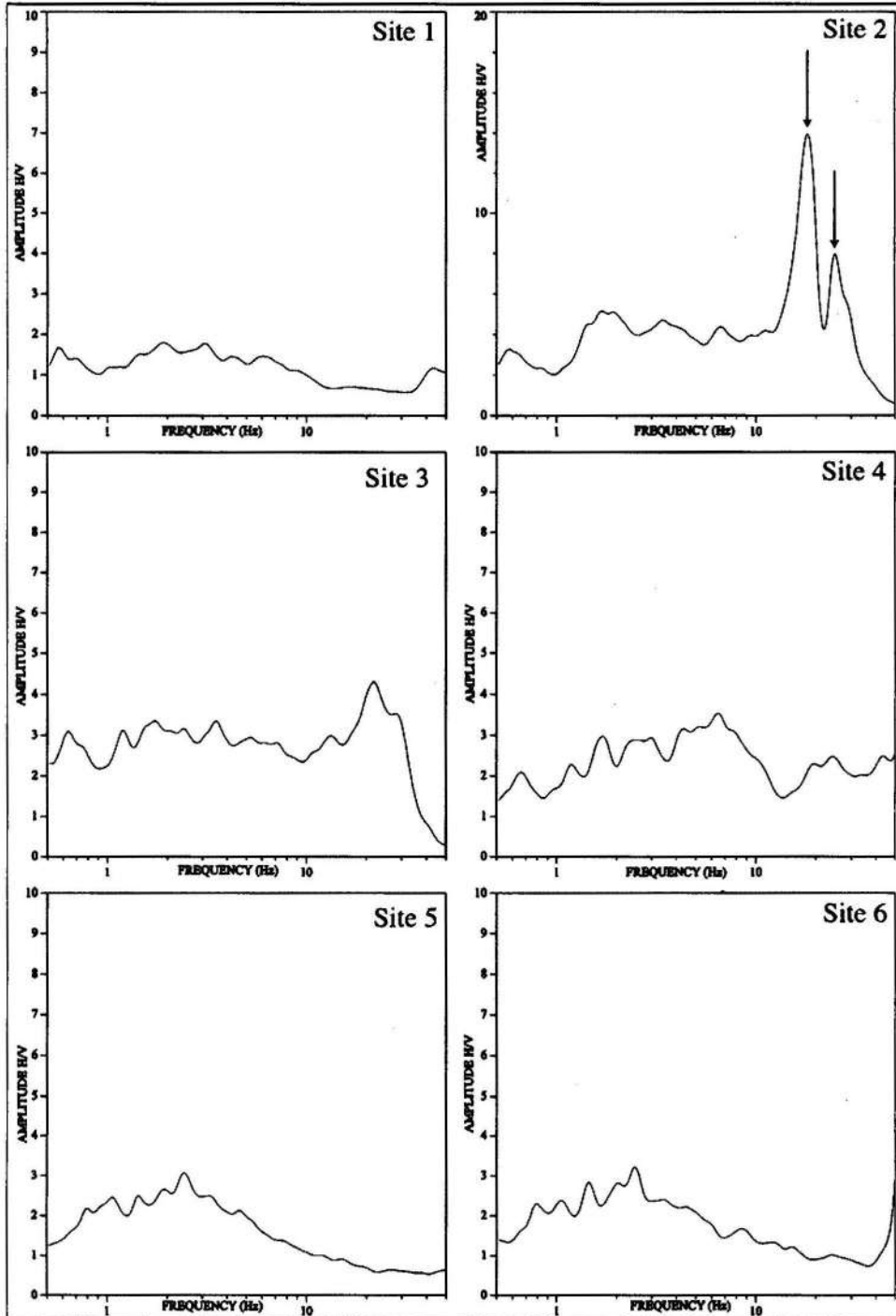
parfois les pics sont faibles en amplitude (bombement ou bump; Guillier et al., 2005), à l'exception de celle du site 2 qui présente deux pics très nets à 15 et 25 Hz (fig. 9). Ces pics reflètent une couche sédimentaire très peu épaisse. Il n'y a donc pas d'amplification sismique ou d'effet de site à Laalam en relation avec les constructions. Étant donné qu'une construction d'un étage vibre (vibration empirique) à une fréquence fondamentale d'environ 10 Hz et qu'une de 3 étages vibre à environ 3.5 Hz, correspondant aux types de constructions de Laalam, l'absence de pic dans les courbes H/V implique que les destructions ne sont nullement liées à un effet de site proprement dit. Il en est de même pour ce qui est de l'effet topographique, vu que même si l'on ne peut exclure la présence de cet effet, il n'en demeure pas moins qu'il n'a également, tout comme l'effet de site proprement dit, aucune influence sur les constructions présentes à Laalam.

La courbe H/V obtenue à partir de l'enregistrement du site 2, effectué sur une route, présente de fortes amplifications vers 15 et 25 Hz reflétant la présence d'une couche superficielle correspondant aux remblais liés à la construction de la route, sans aucune implication sur le comportement des bâtiments.

### V.3. Enregistrement des répliques du séisme

Les enregistrements de bruit de fond ont permis l'enregistrement de plus d'une centaine de répliques de faible magnitude  $M_l (<2)$  en une journée avec des codas de 5 à 10 secondes (fig. 10). Il est possible d'estimer la distance hypocentrale des répliques aux sites d'enregistrement (voir localisation, fig. 8) en utilisant les différences des temps d'arrivée des ondes S et P (S-P) des répliques sur les sites. En émettant l'hypothèse que les répliques se produisent sur la faille principale, il est alors possible d'obtenir une distance approximative de la faille aux sites.

LE SÉISME ( $M_w = 5$ ) DE LA LAALAM (KABYLIE, ALGÉRIE) DU 20 MARS 2006 : PROSPECTIONS GÉOLOGIQUES ET GÉOPHYSIQUES (BRUIT VIBRATOIRE AMBIANT) ET CORRÉLATIONS AVEC LES DOMMAGES.



**Fig. 9** - Courbes H/V obtenues à partir d'enregistrements du bruit ambiant sur six sites de Laalam. Seul le site 2 présente deux pics nets, de fréquences  $>10$  Hz, ne pouvant pas de ce fait être liés aux dégâts dans les constructions ( $< 4$  étages)

**H/V curves from ambient vibration recordings performed at 6 sites in Laalam. Only site 2 shows 2 peaks, with frequencies  $>10$  Hz, which therefore cannot be linked to buildings damages ( $< 4$  floors)**

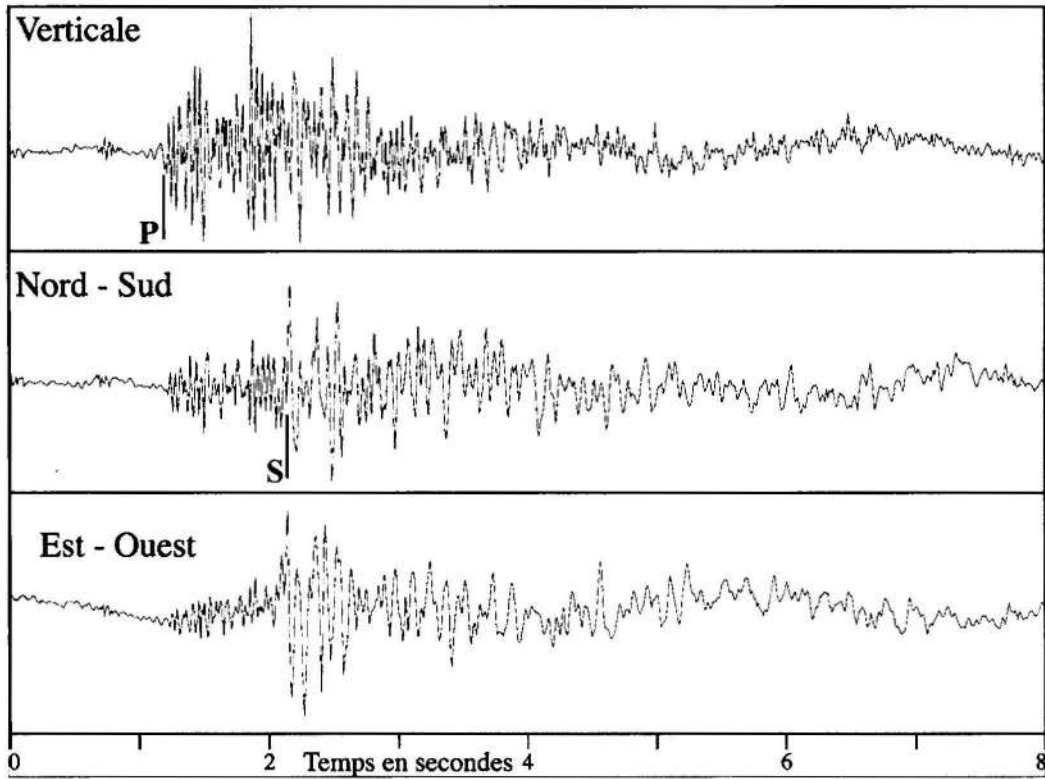


Fig. 10 - Exemple d'enregistrement d'une réplique du séisme sur le site 1, sur les trois composantes du sismomètre

*Example of aftershock recording at site 1, on the three components of the seismometer*

Globalement, les S-P des répliques sont comprises entre 0.25 et 1 seconde, soit une distance hypocentrale approximative de 2 à 8 km, ce qui implique que la faille sur laquelle s'est produit le séisme est située à proximité du village de Laalam et qu'elle est proche de la surface.

En l'absence d'éléments complémentaires, il est impossible de mieux préciser la position de la faille ayant provoqué ce séisme.

## VI. CONCLUSION

Le séisme de Laalam, bien que de magnitude modérée ( $M_w = 5$ ), a causé des dégâts conséquents dans cette localité.

Les résultats H/V-bruit de fond montrent qu'il n'y a pas eu d'amplification sismique locale au

niveau du sol, dans le domaine fréquentiel correspondant à celui des constructions. Ces destructions ne sont donc pas liées à des effets de site. La présence d'effets de site, aurait pu donner une accélération (ou intensité) plus forte, ce qui aurait généré encore plus de dégâts pour les constructions. Fort heureusement, ce ne fut pas le cas.

En revanche, les différences de temps d'arrivées S-P des répliques sont relativement faibles (0.25 à 1 seconde), indiquant que la faille qui a engendré le séisme est proche de Laalam (2 à 8 km) et que le séisme est superficiel. Il n'est toutefois pas possible de mieux préciser sa position avec les éléments disponibles, tant du point de vue géophysique que géologique (faille aveugle). Les vibrations provoquées par la proximité de l'épicentre ont été une des causes des destructions. Non pas parce que ces vibrations étaient

LE SÉISME ( $M_w = 5$ ) DE LA LAALAM (KABYLIE, ALGÉRIE) DU 20 MARS 2006 : PROSPECTIONS GÉOLOGIQUES ET GÉOPHYSIQUES (BRUIT VIBRATOIRE AMBIANT) ET CORRÉLATIONS AVEC LES DOMMAGES.

fortes, mais parce que les constructions sont très vulnérables.

Les effets induits, tels que fissures au niveau des sols et des routes, chutes de blocs et un glissement de terrain réactivé et accéléré par le séisme, sont la seconde cause des dégâts. Là aussi, l'importance des effets induits peut être directement reliée à la proximité de l'épicentre, ce qui conforte l'importance qui doit être accordée aux études sur les effets induits par les séismes modérés, qui n'ont pratiquement jamais été réalisées en Algérie. Pour ce qui est de l'effet topographique, même si l'on ne peut exclure son existence, il n'est nullement la cause des destructions.

Finalement, cette étude pose le problème important de la mise en évidence de la cartographie des failles aveugles en Algérie. Toutefois, la mise en évidence de telles failles ne peut se faire qu'à travers des études plus lourdes impliquant l'utilisation conjointe de techniques de géophysique appliquée (sismique, électrique, gravimétrie, interférométrie radar...) et de géologie (paléosismicité, morphotectonique...), ce qui n'est jamais aisé à mettre en œuvre.

### BIBLIOGRAPHIE

- BARD, P.Y. 2008.** The H/V technique: capabilities and limitations based on the results of the SESAME project. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 1570-761X 1573-1456.
- BENOUAR, D. 1994.** The seismicity of Algeria and Adjacent Regions During the Twentieth Century. *PhD. thesis, Imperial College of Science, Technology and Medicine, University of London*. 712 p.
- BENOUAR, D., AODIA, A., MAOUCHE, S. AND MEGHRAOUI, M. 1994.** The 18 August 1994 Mascara (Algeria) earthquake - *A quick-look report, Terra Nova*, 6 (6), pp. 634-638 doi: 10.1111/j.1365-3121.
- BONNEFOY-CLAUDET, S., COTTON, F. AND BARD, P.Y. 2006.** The nature of noise wavefield and its applications for site affects studies. A literature review. *Earth-Science Review*, 79, 3-4, pp. 205-227.
- BOUDIAF, A. 1996.** Etude sismotectonique de la région d'Alger et de la Kabylie: utilisation des modèles numériques de terrain (MNT) et de la télédétection pour la reconnaissance des structures tectoniques actives: contribution à l'évaluation de l'aléa sismique. *Thèse de doctorat, Université Montpellier II, Montpellier, France*, 274p.
- BOUHADAD, Y., NOUR, A., LAOUAMI, N. AND BELHAI, D. 2003.** The Beni-Ouartilane-Tachaouaft fault and seismotectonic aspects of the Babors region (NE of Algeria). *Journal of Seismology*, 7: pp. 79-88.
- BOUNIF, A., HAESSLER, H. AND MEGHRAOUI, M. 1987.** The Constantine (North east Algeria) earthquake of October 27, 1985: surface ruptures and aftershock study. *Earth and Planetary Science Letters*, volume 85, issue 4, pp. 451-460.
- CHATELAIN, J.-L., GUÉGUEN, P., GUILLIER, B., FRÉCHET, J., BONDOUX, F., SARRAULT, J., SULPICE, P. AND NEUVILLE, J.-M. 2000.** CityShark: A user-friendly Instrument Dedicated to Ambient Noise (Microtremor) Recording for Site and Building Response Studies. *Seismological Research Letters*, vol. 71, num. 6, pp. 698-703.
- CHATELAIN, J.-L., GUILLIER, B., CARA, F., DUVAL, A.-M., ATAKAN, K., BARD, P.-Y. AND THE WP02 SESAME TEAM. 2007.** Evaluation of the influence of experimental conditions on H/V results from ambient noise recordings. *Bull. of Earthquake Engineering*, doi: 10.1007/s10518-007-9040-7, 6, 1, pp. 33-74.
- COUTELLE, A. 1982.** Géologie du SE de la Grande Kabylie et des Babors d'Akbou. *Thèse Doctorat, Université Paris VI, 1979, Edition 1982*. 567p.
- CSEM/EMSC. 2006.** Centre Sismologique Euro-Méditerranéen. <http://www.emsc-csem.org/index.php?page=home>.
- DEVERCHÈRE, J., YELLES, K., DOMZIG, A., MERCIER DE LEPINAY, B., BOUILLIN, J.-P., GAULLIER, V., BRACENE, R., CALAIS, E., SAVOYE, B., KHERROUBI, A., LE ROY, P., PAUC, H. AND DAN, G. 2005.** Active thrust faulting offshore Boumerdes, Algeria, and its relations to the 2003 Mw 6.9 earthquake. *Geophysical Research Letters*, Vol. 32, L04311, doi: 10.1029/2004GL021646.

D. MACHANE, B. GUILLIER, J.-L. CHATELAIN, J.-P. BOUILLIN, H. HADDOUM, M. A. GUEMACHE, S. ZETOUTOU, S. AOURARI, L. DJADIA. ET Z. BENELHADJ

- GLAÇON, J. 1967. Recherches sur la géologie et les gîtes métallifères du Tell sétifien (Algérie). *Bull. du Serv. Géol. d'Algérie*, Nouv. Sér., n°32. 674p.
- GUÉGUEN, PH., CHATELAIN, J.-L., GUILLIER, B. AND YEPES, H. 2000. An indication of the soil topmost layer response in Quito (Ecuador) using H/V spectral ratio, *Soil Dynamics And Earthquake Engineering*, 19, pp. 127-133.
- GUILLIER, B., CHATELAIN, J.-L., HELLEL, M., MACHANE, D., MEZOUER, N., BEN SALEM, R. AND OUBAICHE, E. H. 2005. Smooth bumps in H/V curves over a broad area from single-station ambient noise recordings are meaningful and reveal the importance of Q in array processing: The Boumerdes (Algeria) case. *Geophysical Research Letters*, Vol. 32, N°. 24, L24306. 10.1029/2005GL023726.
- GUILLIER, B., CHATELAIN, J.-L., BONNEFOY-CLAUDET, S. AND HAGHSHENAS, E. 2007. Use of ambient noise: from spectral amplitude variability to H/V stability *Journal of Earthquake Engineering*, 11, 6, 925-942, doi: 10.1080/13632460701457249.
- HARBI, A. 2001. Analyse de la sismicité et mise en évidence d'accidents actifs dans le Nord- Est algérien. *Thèse de Magister, F.S.T.G.A.T/ USTHB, Alger*. 201p.
- HASSISSENE, M. 1989. Etude géologique du Djebel Arbalou-Gouraya : éléments occidentaux du domaine des Babors (région de Béjaïa). *Thèse Magister, USTHB*, 96 p.
- LAOUMI, N., SLIMANI, A., BOUHADAD, Y., CHIKH, M., LARBES, S. ET HADDOUCHE, D. 2006. Rapport préliminaire sur la caractérisation du séisme de Laalam (choc principal du 20/03/2006). *Rapport interne inédit*.
- LEIKINE, M. 1971. Etude géologique des Babors occidentaux (Algérie). *Thèse Doctorat, Paris*, 536 p.
- LEIKINE, M., OBERT, D. ET BELLIER, J.-P. 1975. Intégration des Babors aux nappes telliennes, existence d'un métamorphisme anté-nappe. *Bull. Soc. Géol. Fr.* 17, pp. 764-772.
- MACHANE, D., BOUHADAD, Y., OUBAICHE, E.H., HELLEL, M., AMROUCHE, F., ABBES, K., MESSAOUDI, M. ET CHEIKHLOUNIS, G. 2004. Les effets géologiques induits par le séisme de Boumerdès (Algérie) du 21 mai 2003 (Mw=6.8). *Mémoire du Service Géologique d'Algérie*, n° 12, pp. 133-146.
- MACHANE, D., BOUHADAD, Y., CHEIKHLOUNIS, G., CHATELAIN, J.-L., OUBAICHE, E. H., ABBES, K., GUILLIER, B. AND BENSALAM, R. 2008. Examples of geomorphologic and geological hazards in Algeria. *Natural Hazards*, 45: 295-308. DOI 10.1007/s11069-007-9167-5.
- MAOUCHE, S., BENOUAR, D., HARBI, A. AND BENHALLOU, H. 1998. The Algiers (Algeria) Earthquake of 4 September 1996. *European Earthquake Engineering*, N° 1, pp. 51-55.
- MEGHRAOUI, M. 1991. Blind reverse faulting system associated with the Mont Chenoua-Tipaza earthquake of 29 October 1989 (north-central Algeria). *Terra Nova*, 3 (1), 84-92 doi:10.1111/j.1365-3121.
- MEGHRAOUI, M., MOREL, J.-L., ANDRIEUX, J. AND DAHMANI, M. 1996. Tectonique plio-quadernaire de la chaîne tello-rifaine et de la mer d'Alboran; une zone complexe de convergence continent-continent. *Bulletin de la Société Géologique de France*, v. 167, n°. 1, pp. 141-157.
- MOKRANE, A., AIT MESSAOUD, A., SEBAI, A., MENIA, N., AYADI, A. AND BEZZEGHOUD, M. 1994. Les séismes en Algérie de 1365 à 1992. *Alger Publication du CRAAG/ Département : Etude et Surveillances sismiques, ESS, Alger - Bouzaréah*, 227p.
- NABELEK, J. 1985. Geometry and mechanism of faulting of the 1980 El Asnam, Algeria, earthquake from inversion of teleseismic body waves and comparison with field observations. *Journal of Geophysical Research*, Volume 90, Issue B15, pp. 12713-12728.
- NAKAMURA, Y. 1989. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Quarterly Report. Railway Technic Research Institute*, 30-10, 25-30.



LE SÉISME ( $M_w = 5$ ) DE LA LAALAM (KABYLIE, ALGÉRIE) DU 20 MARS 2006 : PROSPECTIONS GÉOLOGIQUES ET GÉOPHYSIQUES (BRUIT VIBRATOIRE AMBIANT) ET CORRÉLATIONS AVEC LES DOMMAGES.

- NOGOSHI, M. AND IGARASHI, T. 1971.** On the amplitude characteristics of microtremors. *Journal of Seismological Society, Japan*.
- OBERT, D. 1981.** Etude géologique des Babors orientaux (domaine tellien, Algérie). *Thèse Université de Paris VI*, 635p.
- OBERT, D. 1984.** Importance de la paléotectonique dans l'orogénèse tellienne des Babors. *Revue de Géologie Dynamique et de Géographie Physique*, pp. 99-117.
- SESAME. 2004.** Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio. Technique on ambient vibrations. Measurements, Processing and interpretation. Proj. No. EVG1-CT-2000-00026 *SESAME*. 62 p.
- VILA, J.-M., SIGAL, J., COIFFAIT, P.-E., LAHONDERE, J.-C. ET QUINIF, Y. 1975.** Sur l'allochtone du Tell sétifien : la fenêtre de la koudiat Touachra et la nappe de Djemila. *Bulletin de la Société Géologique de France, (7)*. XVII. N°6, pp. 1172-1175.
- VILA, J.-M. 1980.** La chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins algéro-tunisiens. *Thèse Doctorat, Université Paris VI*, 665 p.
- WILDI, W. 1983.** La chaîne tello-rifaine (Algérie, Maroc, Tunisie) : structure, stratigraphie et évolution du Trias au Miocène. *Revue de Géologie Dynamique et de Géographie Physique*, 24 : pp. 201-297.
- YELLES-CHAOUCHE, A. K., DJELLIT, H., BELDJOUDI, H., BEZZEGHOUD, M. AND BUFORN, E. 2004.** The Ain Temouchent (Algeria) Earth quake of December 22 nd 1999. *Pure and Applied Geophysics*, Volume 161, N° 3. 10.1007/s00024-003-2465-2. pp. 607-621.