

**Déformation Cosismique et Soulèvement de la Côte Associés
au Tremblement de Terre de ZEMOURI
(21 mai 2003, Mw 6.8)**

*Par Meghraoui, M. (1), Benhamouda, F. (2), Chemaï, B. (2), Cakir, Z. (1),
Ayadi, A. (3), S. Maouche, S. (3) et Aoudia, A. (4).*

(1) Institut de Physique du Globe, UMR 7516 Strasbourg
(2) Institut National de Cartographie et Télédétection, Alger
(3) Centre de Recherche en Astronomie Astrophysique et Géophysique, Alger
(4) Abdusalam International Centre for Theoretical Physics, Trieste

ملخص:

يعتبر زلزال منطقة زموري أعنف زلزال سجل في الأطلس التلي المركزي منذ سلسلة زلازل 1716 و 1717. الملاحظات الميدانية وكذا قياسات التسوية المتفق عليها والقياسات عن طريق GPS للارتفاع الساحلي قد مكنت من تحديد ميزات الزلزال وتأثيره على السطح بصفة أفضل.

بلغت النشاطات الكوسيسمولوجية العمودية معدل 0.5 م وهي تظهر فلتين موزعتين على طول الساحل و موازيتين لمخطط الانكسار. تظهر الملاحظات الميدانية (ميدان تكتوني) وكذا النتائج الزلزالية انشاقا كوسيسمولوجي مرتبط بانكسار معكوس. إن نماذج التفكيك بانكسار معكوس، المحصل عليها بإدراج القياسات الجيوديزية و التكتونية تظهر وجود انكسار معكوس ينبعث إلى البحر على بعد بضعة مئات من الأمتار من الساحل.

إن ارتباط الارتفاع الساحلي مع التجسيم يحدد أبعاد الانشقاق الكوسيسمولوجي وعلاقته مع النشاط الزلزالي الماضي و الحاضر. إن إبراز الميزات الزلزالية لزلزال 21 ماي 2003 و الزلزالية التكتونية لمتيجة هو أساسي لتقييم حقيقي للخطر الزلزالي لشمال الجزائر.

Résumé:

Le séisme de Zemmouri est le plus fort enregistré dans l'Atlas Tellien central depuis la séquence des séismes de 1716 et 1717. Des observations de terrain et des mesures de nivellement conventionnelles et par GPS du soulèvement côtier ont permis de mieux contraindre les caractéristiques du séisme et son impact en surface. Les mouvements cosismiques verticaux ont atteint une moyenne de 0.5 m et montrent deux lobes répartis le long de la cote et parallèles au plan de faille. Les observations de terrain (contexte tectonique) ainsi que les résultats sismologiques indiquent une rupture cosismique liée à une faille inverse. Les modèles de dislocation en faille inverse obtenus en intégrant les mesures géodésiques et tectoniques montrent la présence d'une faille inverse qui émerge en mer à quelques centaines de mètres de la côte. La corrélation du soulèvement côtier avec la modélisation détermine les dimensions de la rupture cosismique et sa relation avec l'activité sismique passée et récente. La mise en évidence des caractéristiques sismiques du séisme du 21 mai 2003 et sismotectonique de la Mitidja est primordiale pour une estimation réaliste de l'aléa et du risque sismique du Nord de l'Algérie.

Abstract :

The earthquake of Zemmouri is the strongest recorded in the central Tellian Atlas since the sequence of the earthquakes of 1716 and 1717. The observations of land and the conventional leveling measures and measures by GPS of the inshore uprising permitted to better determine the features of the earthquake and its impact in surface. The coseismic vertical movements reached an average of 0.5 m and showed two lobes distributed along the coast and parallel to the plan of fault. The observations of land (tectonic context) as well as the seismological results indicate a coseismic rupture related to an inverse fault. The models of dislocation in inverse fault obtained with integrating the geodesic and tectonic measures show the presence of an inverse fault that emerges in sea at a few hundreds of meters from the coast. The interrelationship of the inshore uprising with the modeling determines the measurements of the coseismic rupture and its relation with the past and recent seismic activity. The underscoring of the seismic features of the earthquake of May 21st, 2003 and sismotectonic of the Mitidja is primordial for a realistic evaluation of the seismic risk of the North of Algeria.

I-Introduction:

Un séisme majeur de magnitude $M_w = 6.8$ a affecté la région de Zemmouri le 21 mai 2003 à 18h 44mn (UT). Ce séisme a affecté la région Est d'Alger où les destructions ont été considérables dans les villes de Zemmouri, Boumerdes, Reghaia, Dellys et Bordj-Menaïel, l'intensité maximale I_0 atteignant largement X (European Macroseismic Scale). Le séisme a causé plus de 2300 victimes, 11450 blessés et plus de 180 000 constructions endommagées ou détruites, le coût total des pertes étant estimé à ~ 5 Milliard de dollars américains. Le choc principal a été ressenti jusqu'à 400 km de la zone épiscopentrale atteignant les villes de Biskra, Annaba et Oran. Un tsunami a été généré par le séisme vers le nord en Mer Méditerranée et les dégâts ont été observés dans les ports des Iles Baléares. Un retrait de la mer de plus de 200m par endroit le long de la côte a été observé dans la zone épiscopentrale. L'étendue des dégâts maximum alignée à environ N 80 E le long de la côte montrent que la zone de faille impliquée au cours du séisme serait en mer.

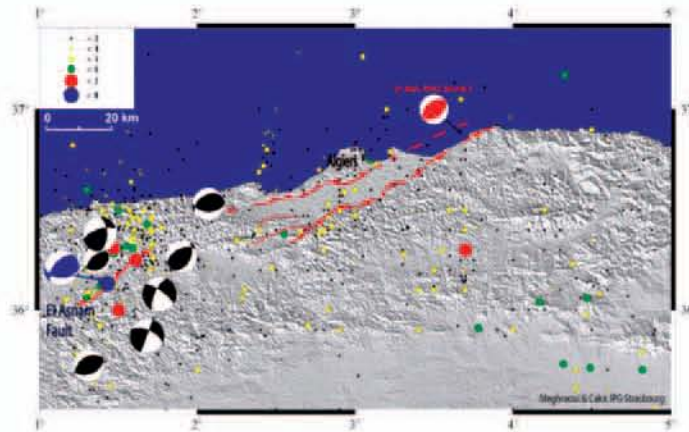


Figure 1: Morphotectonique de l'Atlas Tellien central et les séismes majeurs associés (Meghraoui, 1988). Les mécanismes sont ceux de Harvard, avec en bleu celui du séisme d'El Asnam du 10/10/1980 ($M_w 7.3$), et en rouge celui du 21 mai 2003.

La localisation épiscopentrale préliminaire situe le choc principal à $36,91^\circ N$ et $3,58^\circ E$, à 15 km au Nord de Zemmouri, cette localisation est approximative et doit être corrigée à l'aide du réseau sismologique local portable (Figure 1; Ayadi et al., 2003). Les centres sismologiques internationaux (NEIC, ETH Zurich, CSEM) estiment une magnitude $M_w = 6.8$ dérivée du moment sismique $M_0 = 1.83 \cdot 10^{26}$ dyne.cm. Le mécanisme au foyer calculé à partir de l'ensemble des stations internationales qui ont enregistré le choc principal, est en faille inverse avec deux plans orientés N 060. Cet événement sismique est donc lié à une rupture en faille inverse et a provoqué une déformation crustale qui a généré des effets de surface. Dans cet article, nous nous intéressons aux déformations en surface liées au séisme de Zemmouri. L'étude des caractéristiques sismotectoniques du séisme est primordiale car elle nous permet de mieux connaître la relation qui existe entre failles et tremblement de terre le long de la marge algérienne, et de la limite des plaques Afrique-Eurasie en Méditerranée occidentale. Nous décrirons ensuite les effets de surface et analyserons la déformation telle-que mesurée par GPS et nivellement géodésique le long de la côte et à l'intérieur des terres. Les paramètres sismiques et mesures de la dislocation cosismique nous permettent de modéliser le champ de déplacement le long de la rupture cosismique.

Nous discuterons enfin les implications de ce séisme sur l'évaluation de l'aléa et le risque sismique dans la région algéroise.

II-Sismicité historique et contexte sismotectonique:

La sismicité historique montre que le Nord de l'Algérie a été affecté par de nombreux séismes de fortes magnitudes : Alger le 02/01/1365 et le 03/02/1716 $I_0=X$ (Mercalli Modifié), Blida le 02/03/1825 $I_0=X$ (MM), Mouzaia le 02/01/1867 $I_0=IX$ (MM), Douera le 05/11/1924 $M=5.2$, Oued Djer le 31/10/1988 $M=5.6$, Mont Chenoua le 29/10/1989 $M=6.0$, Tipaza le 09/02/1990 $M=5.0$, Ain Benian le 04/09/1996 $M=5.3$ (Rothé, 1950 ; Roussel, 1973 ; Ambraseys et Vogt, 1988 ; Meghraoui, 1991 ; Benouar, 1993; Mokrane et al., 1994 ; Maouche et al., 1998 ; et Harbi et al. (sous presse).

Plus de 3000 répliques ont été générées par le séisme du 21 mai 2003, et dont plus de 3 répliques dépassent la magnitude $M_w = 5.5$. La réplique du 27/05/2003 a atteint la magnitude $M_w = 5.8$ ce qui témoigne de la persistance d'une activité importante et l'existence des aspérités à même de générer de forts séismes.

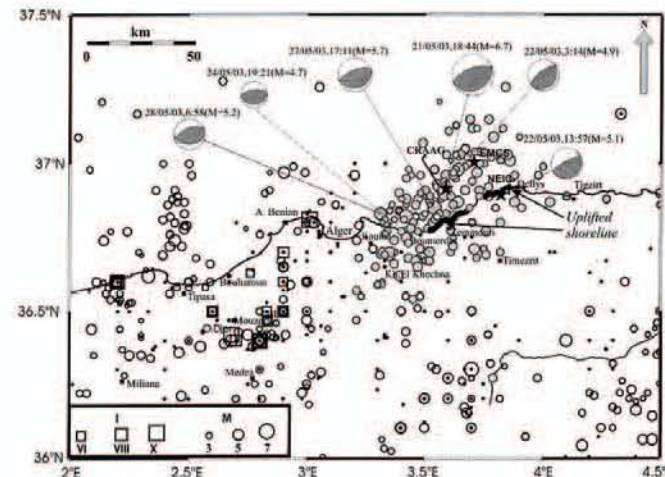


Figure 2: Répartition des répliques et mécanismes au foyer des chocs principaux liés au séisme du 21 mai 2003 (Ayadi et al., 2003 ; les étoiles représentent les différentes localisations des épiscopentres du séisme, voir aussi Figure 5). On peut noter la répartition oblique à la côte des répliques et la remarquable similarité des solutions focales

L'ensemble des répliques montre des mécanismes au foyer en faille inverse avec des plans de faille de direction approximative N50 à 70 E, comparable à celui du choc principal (Figure 2). La répartition des répliques de direction générale NE-SW indique la géométrie du plan de faille, oblique à la côte, qui rejoint le bord sud de la plaine de la Mitidja et en accord avec le schéma structural de l'Atlas Tellien.

En effet, l'Atlas Tellien appartient au système de pli-failles transpressif qui affecte le Nord de l'Algérie et qui longe la limite des plaques Afrique et Eurasie (Meghraoui et al., 1996). Des failles inverses actives liées à des plis affectent les dépôts récents du Quaternaire et absorbent les mouvements en compression dus à la convergence Afrique-Eurasie en Méditerranée occidentale (4 - 6 mm/an, Argus et al., 1989).

L'exemple le plus significatif de cette activité tectonique et sismotectonique est le séisme d'El Asnam du 10/10/1980 qui avec une magnitude $M_w = 7.3$ est lié à plus de 36 km de faille inverse visible en surface (Ouyed et al., 1981 ; King et Vita-Finzi, 1981).

Des recherches en tectonique active et paléosismologie sur le système de failles environnantes ont montré que sur un transect Nord-Sud qui coupe la faille d'El Asnam, l'Atlas Tellien peut absorber 2 à 3 mm/an de raccourcissement (Meghraoui et Doumaz, 1996). Plus proche d'Alger, le séisme de Tipaza du 29/10/1989 et de Mw 6.0 montre également un essaim de répliques orienté N 50 à 70 E et environ 4 km de faille en flexure du bord sud du Mont Chenoua (Meghraoui, 1991).

La plaine de la Mitidja est bordée au nord par le pli-faille du Sahel et au sud par le système de failles inverses qui limite au nord l'Atlas Blidéen (Meghraoui 1988). Ce système de failles marqué par une remarquable morphologie et un escarpement de faille composite qui affecte des terrains quaternaires récents, et soulève des terrasses alluviales pleistocène supérieur et Holocène, se continue vers le NE et traverse la côte au niveau de Boumerdes. En effet, la zone plane du bassin de la Mitidja de Blida jusqu'à Rouiba contraste avec la morphologie escarpée de la zone située à l'Est de Boumerdes. Les terrasses marines visibles sur un seul niveau entre Ain Taya et Boumerdes, montrent une structure en escalier à l'Est de Boumerdes vers Zemmouri el Bahri et jusqu'à Dellys ; cette répartition des terrasses marines et alluviales témoigne d'un soulèvement constant de la côte à l'Est de Boumerdes durant le Quaternaire récent (~ 125 000 ans). Ce soulèvement semble se faire à la faveur des mouvements successifs sur des failles inverses actives de direction N 50 à 70 E et à plongement sud. Il est probable que le séisme de Zemmouri du 21 mai 2003 soit lié à ce système de faille inverse (Figures 1 et 2).

III- La déformation cosismique et le soulèvement de la côte:

Des effets de surface tels que glissements de terrain, affaissements de falaise et trace de liquéfaction ont été observés entre Dellys et Bordj El Bahri, à la suite du séisme du 21 mai 2003. Des fissures et ruptures de terrain ont été observées notamment sur le bord des Oued Isser et Oued Sebaou, ainsi que le long de la côte entre Boumerdes et Bordj El Bahri. Leur origine gravitaire est probable.

En revanche, l'effet de surface le plus spectaculaire est le soulèvement de la côte entre Boumerdes et Dellys.

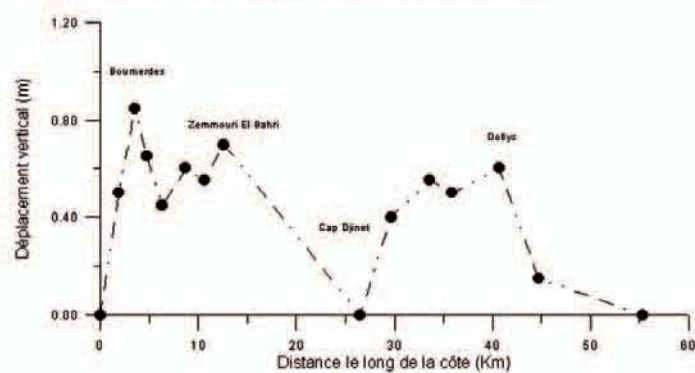


Figure 3 : Distribution du soulèvement côtier suite au séisme de Zemmouri. On note l'existence de 2 courbes probablement liées à la propagation de la rupture principale à partir de cap Djinet.

Dans le détail, ce soulèvement n'est pas uniforme car il atteint un maximum de 0.85 m le long de la côte au NE de Boumerdes (Figure 3). Ce soulèvement est nettement visible grâce à une bande blanchâtre qui correspond à des algues émergées et oxydées (Figure 4).



Figure 4 : Soulèvement d'un rocher près de Boumerdes marqué par l'émergence du niveau des algues et leur oxydation (bande blanchâtre).

A Zemmouri El Bahri, les quais du port de plaisance montrent un soulèvement net maximum de 0.70 m, corroborés par le témoignage des pêcheurs. A Cap Djinet, les installations de la centrale électrique qui débouche en mer ne semblent avoir subi aucun soulèvement. Par contre, plus à l'Est et jusqu'à Dellys, le soulèvement côtier atteint 0.6 m toujours marqué par l'émergence des algues.

Mesures GPS et nivellement : Grâce à la collaboration de l'Institut National de Cartographie et de Télédétection, des campagnes de mesures du nivellement par GPS et par méthode conventionnelle (théodolite) ont été effectuées immédiatement après le séisme du 21 mai 2003. Ces mesures qui tiennent compte des réseaux de premier et de second ordre sont en train d'être traitées. Les premiers résultats obtenus confirment le soulèvement du continent à la suite du séisme et montre des mouvements verticaux de l'ordre de 0.5 m à Zemmouri.

IV- Modélisation du mouvement cosismique:

Le soulèvement cosismique visible le long de la côte est le résultat d'une déformation qui affecte le continent mais dont le prolongement en mer est fort probable. La répartition des mouvements verticaux telle qu'illustrée sur le diagramme de la Figure 3 indique la proximité d'une rupture en surface située probablement à quelques centaines de mètres au large de la côte. La théorie de la dislocation cosismique montre que les déformations en surface peuvent être modélisées pour nous fournir les paramètres de failles en profondeur (géométrie, profondeur, déplacement sur la faille; Kanamori et Anderson, 1985 ; Okada, 1992).

Cette modélisation permet d'avoir en tout point d'un demi-espace, le champ de déplacement en surface associé à un déplacement sur le plan de faille.

En intégrant les données du soulèvement mesuré le long de la côte par GPS avec les observations de terrain et les données sismologiques (moment sismique et répartition des répliques), nous avons subdivisé le plan de rupture en plusieurs plans auxquels nous avons attribué une valeur du déplacement en profondeur. Sur le modèle de la figure 5, les courbes (en rouge) iso-déplacements en surface montre deux lobes des mouvements verticaux avec des valeurs comparables avec les déplacements mesurés le long de la côte.

La corrélation des déplacements mesurés avec le modèle indique l'existence d'un plan de faille orienté N 060 et localisé à quelques centaines de mètres au Nord de la côte.

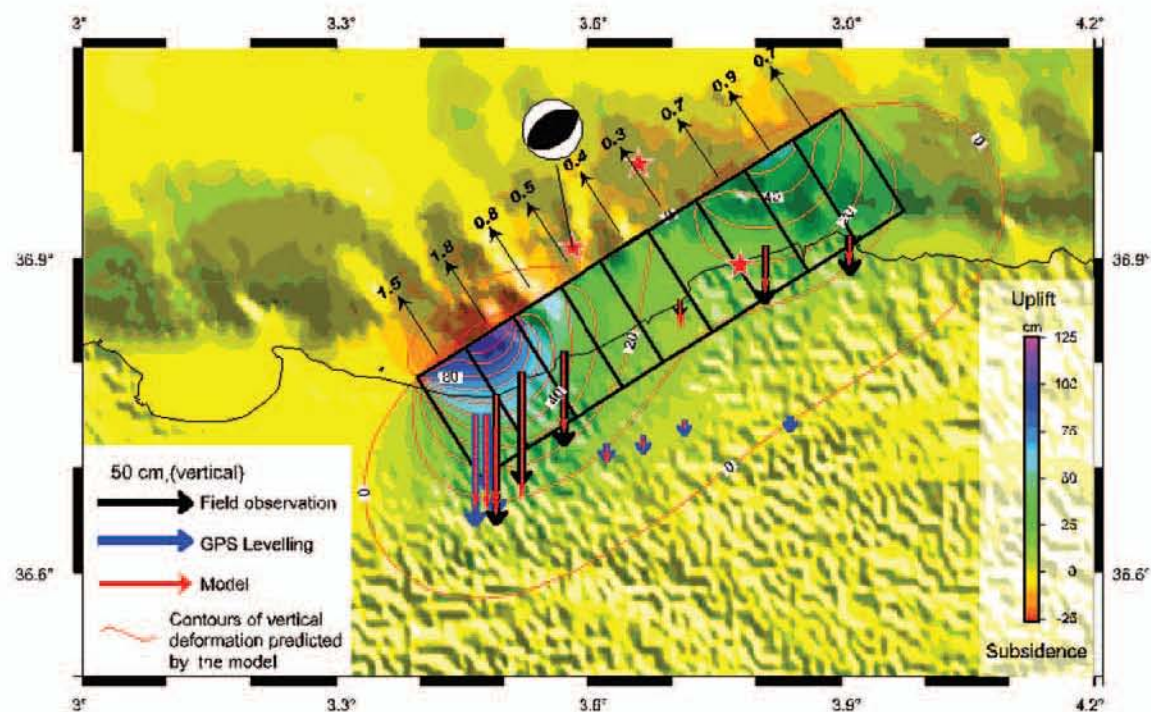


Figure 5: Modèle de dislocation tel que déduit des observations de terrain, des mesures GPS et de nivellement. Le champs des déplacements en surface (ligne rouge) modélisé à partir des valeurs à la source (valeurs en noir) pour chaque sous-plan de rupture, montre un accord remarquable avec les valeurs mesurées. L'émergence du plan de faille en bon accord avec le mécanisme focal, est par conséquent déterminée à quelques centaines de mètres au large de la côte.

V- Conclusion : Implications sur l'aléa sismique de la région d'Alger

Le séisme du 21 mai 2003 à Zemmouri est lié à une rupture en faille inverse de la croûte supérieure dans l'Atlas Tellien. Cette tectonique compressive est le résultat de la convergence des plaques Afrique et Eurasie en Méditerranée occidentale. La déformation cosismique et le soulèvement de la côte associé sont parmi les effets en surface apparus au cours de la séquence sismique. Le plan de rupture déterminé grâce à la modélisation de la dislocation cosismique obtenu à l'aide des mesures géodésiques, peut être corrélé avec le système de plan de faille inverse qui limite la bordure sud de la Mitidja. Ce plan de faille qui émerge en mer est complexe étant donné la distribution des déplacements verticaux montrant deux lobes de soulèvement maximum.

Les caractéristiques sismotectoniques de la zone épiscopale et les paramètres sismiques (moment sismique, longueur de la faille, déplacement moyen, mécanisme au foyer) reflètent le mode de déformation de cette portion de la chaîne tellienne et sa relation à la limite des plaques. La sismicité historique avec l'occurrence de la séquence de 1716 (3 séismes majeurs en février, mai et juin de la même année) corrélée à la sismicité instrumentale et la tectonique active montre un bassin de la Mitidja où la déformation active en raccourcissement se fait par section.

En effet, l'existence de segments de faille appartenant au système de pli-failles qui borde le bassin est illustré par la dernière séquence sismique du 21 mai 2003. Le choc principal, les répliques avec $M_w \geq 5.5$ et la répartition des mouvements verticaux illustrent la segmentation du plan de faille en deux sections distinctes qui ont probablement contrôlé la propagation de la rupture au cours du séisme.

Etant donné le nombre de failles inverses actives dans la région algéroise (Meghraoui, 1988) il est fort probable que le taux de raccourcissement dans la région épiscopale soit comparable à celle déterminé dans la région d'El Asnam (1.2 mm/an, Meghraoui et Doumaz, 1996). Cette vitesse de la déformation en compression implique une période moyenne de récurrence de l'ordre de 1000 ans pour des séismes de magnitude $M_w \geq 7$. Si cette hypothèse se vérifie, il est possible que la période de retour pour des séismes modérés à majeurs dans la région d'Alger soit réduite à quelques 2 ou 3 siècles (par segment de faille) pour pouvoir accommoder le taux de raccourcissement. L'évaluation de l'aléa et du risque sismique tenant compte de la magnitude maximum et de la longueur des failles actives qui bordent la Mitidja suggèrent une accélération maximum de 0.6 g (Aoudia et al., 2000). Si la période de retour doit tenir compte de l'activité de chaque segment de faille et notamment du segment de faille inverse de Blida, la probabilité d'occurrence d'un séisme modéré à fort ($M \geq 6.5$) dans les 50 années dépasse les 50%.

VI- Remerciements :

L'intervention immédiate pour les mesures géodésiques après le séisme a été possible avec le concours de l'Institut National de Cartographie et de Télédétection. L'étude du choc principal et des répliques a été le fruit d'une collaboration des chercheurs et techniciens du CRAAG. A. Aoudia a été soutenu par l'Abdusalam ICTP Directorate, OEA, SAND, Trieste (Italie). M. Meghraoui et Z. Cakir ont été soutenus par l'INSU (France). Nous remercions les autorités à Alger et Boumerdes ainsi que la protection civile pour leur aide précieuse sur le terrain et leur soutien logistique.

VII- Références Bibliographiques:

- [1] **Ambraseys N.N. and J. Vogt**, Material for the investigation of the seismicity of the region of Algiers, *European Earthq. Eng.*, 3, 16-29, 1988.
- [2] **Aoudia, A., F. Vaccari, P., Suhadolc and M. Meghraoui**, Seismogenic potential and earthquake hazard assessment in the Tell Atlas of Algeria, *J. of Seismol.* 4, 79-88, 2000.
- [3] **Argus D. F., R. G. Gordon, C. Demets, and S. Stein**, Closure of the Africa-Eurasia-North America plate motion circuit and tectonics of the Gloria fault, *J. Geophys. Res.*, 94, 5585-5602, 1989.
- [4] **Ayadi A. et 27 auteurs**, The Algerian earthquake of 21 May 2003, Mw 6.8: A large event near a capital city, *EOS, AGU Transactions*, in press, 2003.
- [5] **Benouar, D.**, Material for the investigation of the seismicity of Algeria and adjacent regions during the twentieth century, *Annali di Geofisica* 37, pp. 356, 1994.
- [6] **Harbi A., S. Maouche, A. Ayadi, D. Benouar, G. F. Panza, and H. Benhallou**, Seismicity and tectonic structures in the site of Algiers and its surroundings: a step towards microzonation, In: G. F. Panza, I. Paskaleva, C. Nunziata (eds), *Seismic ground motion in large urban areas*, Special issue of *Pageoph*, 161, n. 5/6, (in press for 2004).
- [7] **Kanamori, H. et Anderson, A.**, Theoretical basis of some empirical relations in seismology, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 65, 1073-1095, 1975.
- [8] **King, G. and C. Vita Finzi**, Active folding in the Algerian earthquake of 10 October 1980, *Nature* 292, 22-26, 1981.
- [9] **Maouche, S. D; Benouar, A. Harbi, H. Benhallou**, The Algiers (Algeria) earthquake of 4 September 1996, *Europ. Earth. Engi. J.*, XII, n°1, 1998.
- [10] **Meghraoui, M.**, Géologie des zones sismiques du nord de l'Algérie: Paléosismologie, tectonique active et synthèse sismotectonique; Thèse d'Etat, Univ. Orsay – Paris XI, pp. 356, 1988.
- [11] **Meghraoui, M.**, Blind reverse faulting system associated with the Mont Chenoua-Tipaza earthquake of 29 October 1989 (north-central Algeria), *Terra Nova*, 3, 84-93, 1991.
- [12] **Meghraoui, M., and F. Doumaz**, Earthquake-induced flooding and paleoseismicity of the El Asnam (Algeria) fault-related fold, *J. Geophys. Res.*, 101, 17617-17644, 1996.
- [13] **Mokrane A., A. Ait Messaoud, A. Sebai, A. Ayadi, M. Bezzeghoud and H. Benhallou**, Les séismes en Algérie de 1365 à 1992., CRAAG eds., Alger-Bouzaréah, pp. 277, 1994.
- [14] **Okada, Y.**, Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seism. Soc. Am.* 82, 1018-1040, 1992.
- [15] **Ouyed, M. et al., (1981)**, Seismotectonics of the El Asnam earthquake, *Nature* 292, 26-31.
- [16] **Rothé J.P.**, Les séismes de Kherrata et la sismicité de l'Algérie, *Bull. Serv. Cart. Geol. Algérie*, 4 ème série, Géophysique, n° 3, 1950.