

PARTENARIAT HUBERT CURIEN « TASSILI »

Ministère des Affaires
Etrangères

CMEP TASSILI
Comité Mixte d'Evaluation et de
Prospective de la coopération
scientifique franco-algérienne

Ministère de l'Enseignement
Supérieur et de la Recherche

BILAN FINAL **ANNEES 2004 A 2007** (13 pages)

Fiche n° 1

Partenaires engagés et bilan scientifique

Projet	Discipline : Sciences de la Terre	
Numéro : 041MDU619	Titre : Etude de la déformation active du nord de l'Algérie - Contribution à l'évaluation du risque sismique et gravitaire	
Etablissements		Responsables
En France : Université de Bretagne Occidentale (UBO) - Laboratoire : Domaines océaniques UMR6538 (CNRS UMR 6538) <u>Partenaires</u> : Université de Nice-Sophia Antipolis – Géosciences Azur (CNRS UMR 6526)- Université de Reims - Université de Perpignan (LEGEM)		DEVERCHERE Jacques, UBO-IUEM
En Algérie : Centre de Recherche en Astronomie, Astrophysique et Géophysique (C.R.A.A.G.) <u>Partenaires</u> : Université Houari Boumédiène (USTHB), Alger – SONATRACH, Boumerdès		YELLES-CHAOUCHE Karim, CRAAG

1/ Noms des enseignants-chercheurs et chercheurs engagés dans l'accord

	France	Algérie
Professeurs	DEVERCHERE Jacques CALAIS Eric (actuellement Professeur associé à l'Université de Purdue, Indiana, Etats-Unis)	AIT OUALI Rachid, Professeur USTHB YELLES-CHAOUCHE Abdelkarim, Directeur CRAAG
Autres catégories	CAPRON Alexis, Etudiant Master 2, UBO DELOUIS Bertrand, Maître de conférences U. Nice DOMZIG Anne, Doctorante UBO GAULLIER Virginie, Maître de conférences U. Perpignan LARROQUE Christophe, Maître de conférences U. Reims LE ROY Pascal, Maître de conférences UBO	BELDJOUDI Hamoud, CRAAG, inscrit en thèse d'Etat BOUDIAF Azzedine, chercheur associé CRAAG KHERRoubi Aziz, CRAAG, inscrit en thèse d'Etat LAMMALI Kamel , ingénieur CRAAG MAHSAS Abdelhakim, Assistant CRAAG MATOUGUI Rachid, Chargé de Cours USTHB DJADID Faouzi, Etudiant en Magistère, USTHB BRACENE Rabah, ingénieur SONATRACH
C.N.R.S.	COURBOULEX Françoise, CR1 CNRS DESCHAMPS Anne, DR1 CNRS	
Total	10	10

2/ Publications (joindre en annexe une copie de la première page des articles) 6 (voir liste complète à la suite : Fiche N°3)

	Nombre
Publications dans des revues internationales	5
Publications dans des revues nationales	1

3/ Noms des étudiants ayant soutenu un DEA/Master ou une thèse au cours de l'accord-programme (si nécessaire joindre une annexe en précisant DEA/Master, thèse française, thèse de doctorat d'Etat algérienne, thèse de Magister)

	France	Algérie
Noms des thésards ou Master 2	DAN Gabriela, thèse de doctorat, Brest, février 2007 DOMZIG Anne, thèse de doctorat, Brest, décembre 2006 ANDRIEU Yannick, Master 2, Perpignan, juin 2005 CAPRON Alexis, Master 2, Brest, juin 2006 LE ROY Charlotte, Master 2, Grenoble, juillet 2004	2 Thèses de doctorat algérienne en cours : Mr Kherroubi et Mr Beldjoudi avec soutenance prévue en 2008
Total	5 (dont 2 thèses de doctorat soutenues)	2 thèses de doctorat en cours

Numéro du projet :
041 MDU619

Fiche n°2

Utilisation des moyens

1/ Missions seniors (responsables de projets et enseignants chercheurs)

Noms des missionnaires	Fonction	Nombre de séjours	Durée des séjours
France/Algérie DEVERCHERE Jacques	Coordinateur	3	14 j. au total
Algérie/France AIT OUALI Rachid		3	04 : 15j ; 06: 8j + 7j
BRACENE Rabah		3	04 : 21j; 06: 8j + 7j
BOUDIAF Azzedine		2	06-07 : 1 m +15j
MAHSAS Abdelakhim		1	05 : 1 mois
MATOUGUI Rachid, USTHB		1	06 : 15 j
YELLES-CHAOUICHE Karim	Coordinateur	3	04-06-07 : 3 x 7j
Total		16	5,5 mois environ

2/ Missions juniors (doctorants, ingénieurs, étudiants algériens en France)

Noms des missionnaires	Fonction	Nombre de séjours	Durée des séjours
BELDJOUDI Hamoud, CRAAG		3	3 mois
DJADID Faouzi, USTHB		2	2 mois
KHERROUBI Abdelaziz, CRAAG		7	8 mois
Total		12	13 mois

3/ Colloques et séminaires organisés (Titre, lieu, date, coût approximatif)

- Séminaire fin 2003 à l'Université de Perpignan pour la préparation de la demande de nouvelle campagne MARADJA 2 qui s'est déroulée en octobre-décembre 2005.

4/ Matériel acquis (joindre annexe si nécessaire)

- Pour la partie française :
Rien

- Pour la partie algérienne :
Livres – supports informatiques (dont un PC portable) pour le stockage et le traitement des données acquises

Résultats et productions scientifiques

1/ Résumé des résultats scientifiques obtenus (*mettre en évidence les articles et communications et l'implication des DEA/masters, thèses, magisters, doctorats en 2 pages maximum*)

Ce projet visait à apporter des éléments nouveaux permettant de contraindre quantitativement la déformation active dans le nord de l'Algérie afin de contribuer à la **réduction du risque sismique**. Les **objectifs initiaux** étaient déclinés ainsi:

(1) **Contribution à la cinématique de la plaque Afrique** : Il s'agissait de participer à déterminer la cinématique de la plaque Afrique par des mesures géodésiques GPS en Algérie.

(2) **Cinématique des déformations actives dans le domaine méditerranéen** : Il s'agissait de mieux déterminer la part de la convergence Afrique-Europe prise en compte par de la déformation active et potentiellement sismogène en Afrique du Nord, en particulier en Algérie du nord.

(3) **Distribution spatiale de la déformation actuelle au travers des structures actives en Algérie (terre et mer)** : il s'agissait d'imager les structures actives là où elles sont les moins connues, c'est-à-dire en mer le long de la marge ;

(4) **Vitesses de glissement, récurrences sismiques et risques associés aux grandes failles** : Le but était de reprendre certaines données instrumentales afin de déterminer les paramètres de la source là où le risque associé aux grandes failles actives en Algérie est particulièrement aigu (Oran, Alger et Constantine), le but étant aussi d'y mesurer directement l'accumulation de déformation sur les principales failles actives.

Ce projet est né avant l'occurrence du grand séisme de Boumerdès du 21 mai 2003 (magnitude 6.9) : Il est clair qu'une part importante de l'activité du groupe a en conséquence porté sur cet événement majeur. Enfin il faut rappeler que ce projet de travail s'est aussi basé sur des actions déjà financées dans le cadre d'autres programmes: (1) pour la géophysique marine: campagne océanographique MARADJA, programmée avant le séisme de 2003 et exécutée avant le début du CMEP; (2) pour la géodésie GPS: récepteurs GPS acquis en cours de contrat par le CRAAG (20 GPS achetés en 2005); (3) pour la sismologie: réseaux sismologiques large bande péri-méditerranéens (ORFEUS) et Action Concertée Incitative Algérie (INSU-Ministère Français de la Recherche); (4) pour l'imagerie satellitale: images ASTER à haute résolution au sol acquises en cours de contrat, et Modèles Numériques de Terrain SRTM à 90 mètres.

Outre les développements scientifiques déjà concrétisés (voir les articles publiés et l'Annexe 2 qui témoignent d'une prise en charge partagée entre partenaires de l'exploitation des résultats scientifiques, et aussi le bref compte-rendu ci-après), ces échanges ont permis un transfert important en savoir-faire entre scientifiques seniors dans les 2 sens, mais également au bénéfice des juniors algériens. Ils se sont également concrétisés par plus de 40 communications scientifiques en commun, dont les ¾ dans le cadre de congrès internationaux (voir liste en Annexe 1).

Les principaux domaines où les chercheurs ont pu interagir via la formation sont les suivants:

- **En sismologie : Hamoud Beldjoudi (CRAAG)**: Mr Beldjoudi a effectué trois séjours d'un mois chacun au laboratoire Géosciences Azur de Nice durant la période du projet. L'objectif de ses séjours était de se former aux techniques de modélisation de la source sismique développée et utilisées à Géosciences Azur, avec notamment la modélisation des formes d'onde à distance télé-sismique (réseau mondial) et à distance proche (stations algériennes). Mr Beldjoudi a en outre participé au traitement des données de sismicité enregistrée par les OBS larguées durant la campagne à la mer MARADJA. Depuis, Mr Beldjoudi applique sur place en Algérie les méthodes auxquelles il s'est formé à Nice, avec en particulier la modélisation de répliques du séisme de Boumerdes de 2007 et de séismes modérés récents enregistrés par le tout nouveau réseau large bande algérien.
- **En géodésie : Abdelakhim Mashas (CRAAG)** : La remesure d'un réseau GPS installé par le CRAAG dans la région de Thénia et mesuré 2 mois avant le séisme de Boumerdès (21 mai

2003) a permis de contraindre la localisation et la géométrie de la rupture du séisme. Les résultats GPS sont en accord avec une faille inverse de pendage 42°S, dont la projection en surface se trouve à environ 6 km au large de la côte. Le glissement n'a pas atteint la surface dans la partie ouest de la rupture. Suite au séisme, un réseau de 6 stations GPS semi-permanentes a été installé dans la région épiscopale. Les résultats GPS montrent un déplacement post-sismique de 4 cm en 2.5 ans, avec une dépendance temporelle logarithmique. Ces résultats permettent de montrer que la déformation post-sismique est accommodée par du glissement relativement superficiel (0 à 5 km) sur le plan de rupture cosismique, juste au-dessus de la zone de rupture. Ils suggèrent que le glissement post-sismique est contrôlé par les variations de contraintes cosismiques et pourrait se manifester par le plissement de sédiments en pied de marge. A. Mashas a participé à toutes les étapes de ce travail en bénéficiant de l'encadrement d'Eric Calais. Celui-ci ayant été nommé professeur aux Etats-Unis, une difficulté importante a été que le programme CMEP TASSILI n'a pas pu financer ses séjours, si bien que ceux-ci n'apparaissent pas dans le bilan des échanges, sauf celui de 2005, à l'occasion d'un séjour en France d'Eric Calais (les autres missions ont eu lieu aux Etats-Unis et ont dû être financés par d'autres projets).

- **En géophysique marine : Abdelaziz Kherroubi (CRAAG):** Une phase primordiale a été l'acquisition des données en mer : A. Kherroubi a participé directement aux 2 campagnes en mer MARADJA (août-septembre 2003) et MARADJA 2 (octobre-décembre 2005) à bord du Suroît et à de nombreux congrès (EGU Vienne, AGU San Francisco) pour représenter le travail du groupe. Le traitement des données bathymétriques par le logiciel CARAIBES a ensuite été une phase importante de travail ayant justifié 2 séjours en 2004. La suite du travail a ensuite consisté à développer l'interprétation des profils sismiques HR et Chirp des 2 campagnes pour la mise en évidence et la quantification de la déformation récente sous-marine, lors de 5 séjours en 2005, 2006 et 2007 à Brest ou Nice, en concertation avec A. Domzig, alors en thèse à Brest, et B. Mercier de Lépinay, qui a assuré le traitement des lignes sismiques HR. Des résultats importants (notamment sur la zone d'Annaba) sont mis en évidence sous forme d'une note soumise en premier auteur par A. Kherroubi. Depuis, A. Kherroubi applique sur place en Algérie les méthodes auxquelles il s'est formé, notamment le traitement bathymétrique et l'analyse des profils sismiques.
- **En sédimentologie marine : Faouzi Djadid (USTHB):** Deux visites ont permis de se former (notamment à l'Ifremer, centre de Brest) aux techniques d'analyse des carottes prélevées lors des campagnes à la mer de 2003 et 2005. En raison de la lourdeur de la tâche analytique et des difficultés de coordination scientifique entre les partenaires présents dans des centres éloignés (Perpignan, Brest, Alger), il n'a pas encore été possible de valoriser ce travail directement dans des publications où figurent les partenaires algériens sur cette approche marine. Néanmoins, l'apport de ces données en terme d'enregistrement des variations climatiques et eustatiques, de dynamique sédimentaire sur le fond, et de paléosismologie sous-marine, est crucial, et un transfert de savoir-faire a pu avoir lieu grâce au Programme TASSILI.

2/ Liste des publications

- Delouis B., M. Vallée, M. Meghraoui, E. Calais, S. Maouche, K. Lammali, A. Mahsas, P. Briole, F. Benhamouda, and K. Yelles, 2004. Slip distribution of the 2003 Boumerdes Zemmouri earthquake Algeria from teleseismic, GPS and coastal uplift data, *Geophys. Res. Letters* 31, L18607 doi 10.1029/2004GL020687.
- Déverchère J., Yelles K., Domzig A., Mercier de Lépinay B., Bouillin J.P., Gaullier V., Bracène 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*, 32, L04311, doi:10.1029/2004GL021646.
- Domzig A., Le Roy C., Yelles K., Déverchère J., Bouillin J-P., Bracène R., Mercier de Lépinay B., Le Roy P., Calais E., Kherroubi A., Gaullier V., Savoye B., and Pauc H., 2006. Searching for the Africa-Eurasia Miocene boundary offshore western Algeria (MARADJA'03 cruise), *C.R. Geoscience, Académie des Sciences*, Paris, 338, 80–91, doi:10.1016/j.crte.2005.11.009.
- Kherroubi, A., J. Déverchère, A.K. Yelles, B. Mercier de Lépinay, A. Domzig, A. Cattaneo, R. Bracène, V. Gaullier, & D. Graindorge, Recent and active deformation pattern off the easternmost Algerian margin, Western Mediterranean Sea: New evidence for contractional tectonic reactivation, Soumis en août 2007 à Marine Geology, Special Issue on EUROMARGINS.

- Mahsas M., K. Lammali, K. Yelles, E. Calais, A. M. Freed, and P. Briole, 2008. Shallow afterslip following the 2003 May 21, $M_w = 6.9$ Boumerdes earthquake, Algeria, *Geophysical Journal International*, 172(1), 155–166, doi:10.1111/j.1365-246X.2007.03594.x
- MEDIMAP GROUP (Loubrieu B., Mascle J., Marani M., Zitellini N., Canals M., Acosta J., Comas M., Gracia E., Berné S., Droz L., Déverchère J., Mouscardes P., Chamot-Rooke N., Le Pichon X., et Yelles K.), 2005. Morpho-bathymetry of the Mediterranean Sea (Western Mediterranean, map at 1 / 2 000 000), *CIESM / IFREMER Spec. Publ., Atlases and Maps*, ISBN 2-84433-147-5.
- Yelles K., K. Lammali, A. Mahsas, E. Calais, P. Briole, 2004. Coseismic deformation of the May 21, 2003, $M_w:6.8$ boumerdes earthquake, Algeria from GPS measurements. *Geophys. Res. Letters*, 31, L13610, doi:10.1029/2004GL0119884

3/ Liste des D.E.A./Masters et/ou thèses soutenus

- Master 2 :

- **Yannick ANDRIEU** (tuteur: P. Giresse, Perpignan): "*Origine des minéraux lourds de la marge algérienne, marqueurs des processus sédimentaires*", Stage de Master 2 Pro-Géosciences, LEGEM (E.A. 3678), Université de Perpignan, juin 2005.
- **Alexis CAPRON** (tuteur: J. Déverchère; co-tuteur: Pascal LE ROY, Brest): "*Les marqueurs détritiques de la Crise de salinité Messinienne au large d'Alger*" - Stage de Master 2 SML-Géosciences Océan, UBO-IUEM, Université de Brest, juin 2006.
- **Charlotte LE ROY** (tuteur: J-P. Bouillin) : "*Analyse morphologique de la marge algérienne (Alger – Oran) dans son cadre géologique – Exploitation des données bathymétriques et sismiques de la campagne MARADJA*", Stage de Master 2 Recherche, Université Joseph Fourier, OSUG, Grenoble, juin 2004.

- Thèses de doctorat :

- **Gabriela DAN** (Directeurs principaux : Nabil Sultan et Bruno Savoye, IFREMER): "*Processus gravitaires et évaluation de la stabilité des pentes : Approche géologique et géotechnique – Application à la marge algérienne et à l'effondrement de l'aéroport de Nice en 1979*" - Thèse de Doctorat, Université de Brest, IFREMER-IUEM, soutenue le 9 mai 2007.
- **Anne DOMZIG** (Directeur : J. Déverchère): "*Déformation active et récente, et structuration tectono-sédimentaire de la marge sous-marine algérienne*" - Thèse de Doctorat, Université de Brest, IUEM, soutenue le 4 décembre 2006.

4/ Liste des colloques et/ou séminaires organisés

- Séminaire de 2 jours en décembre 2003 à Perpignan pour la préparation de la demande de nouvelle campagne MARADJA 2 qui s'est déroulée en octobre-décembre 2005.
- Séminaire de 2 jours en décembre 2007 à Boumerdes, Division Exploration de Sonatrach, pour une synthèse des travaux, puis la justification et la préparation du projet de sismique lourde active-passive et terre-mer intitulé SPIRAL (Sismique Profonde et Investigations Régionales en Algérie).

5/ Retombées industrielles et économiques (brevets, contrats, etc.)

Les études menées et les résultats obtenus ont permis de jeter les bases d'un projet d'étude de sismique lourde terre-mer entre le CRAAG, la SONATRACH, l'IFREMER et l'UBO-IUEM (Projet SPIRAL), qui est en cours de négociation et qui devrait aboutir en juin 2008 à la signature d'un contrat important à frais partagés entre la société SONATRACH et les partenaires français.

6/ Informations ou commentaires que vous jugez utiles sur votre accord-programme (changement de responsable, composition des équipes, nouvelles coordonnées...) et/ou sur son fonctionnement (se limiter si possible à une page)

- La politique des visas imposée par la France a grandement pénalisé les échanges scientifiques des partenaires, en compliquant considérablement les démarches et en retardant le déroulement des travaux, en dépit des efforts d'EGIDE et du Service Scientifique de l'Ambassade de France ;
- Le fait d'imposer aux missionnaires algériens de s'arrêter à Paris pour retirer leurs indemnités de séjour a constitué une contrainte importante, sachant que les travaux en commun se déroulaient loin de Paris (Brest ou Nice) : une importante perte de temps en a résulté. Toute la science française ne s'effectue pas à Paris !
- L'avenir de la formation de haut niveau entre la France et l'Algérie passe à l'évidence par une intensification des échanges des scientifiques juniors et la mise en place de séjours longs dans les laboratoires, incluant des formations spécialisées sous forme de cours suivis dans les Masters et les Ecoles Doctorales. C'est notamment le cas pour les disciplines de la géophysique et la géologie marine, dont un besoin croissant d'expertise se manifeste, dans le cadre de programmes d'aménagement du territoire, de gestion de ressources marines et de risques naturels. Ce CMEP a été à notre sens un succès, en dépit des difficultés mentionnées, car il permet de stimuler l'expertise en ces domaines cruciaux qui concernent au premier chef l'Algérie.

ANNEXE 1 : Liste (non exhaustive) des communications entre 2004 et 2007 par les partenaires du CMEP 041 MDU619

2004

- DAN, G., and the MARADJA Scientific Party, 2004. Links between tectonic and sedimentary processes on the Algerian slope and basin from high-resolution seismics and swath bathymetry, ESF EUROMARGINS Conference, ESF Standing Committee for Life and Environmental Sciences (LESC), Palau de les Heures, Barcelona, Spain, 11-14 November (abstract, talk).
- DELOUIS B., MEGHRAOUI M., CALAIS E., VALLEE M., MAOUCHE S., LAMALLI K., MAHSAS A., BRIOLE P., BENHAMOUDA F., and YELLES K., 2004. Slip distribution of the Mw 6.9 Algeria earthquake of May 21, 2003 constrained by teleseismic and ground displacement data, EGU First General Assembly, Nice, France, 25 - 30 April, Geophysical Research Abstracts (CD-Rom), Volume 6, ISSN : 1029-7006, Abstract Number : EGU04-A-02477.
- DEVERCHERE J., YELLES K., MERCIER DE LEPINAY B., BOUILLIN J.P., GAULLIER V., PAUC H., SAVOYE B., CALAIS E., DOMZIG A., LE ROY P., BRACENE R., KHERROUBI A., 2004. Premier examen détaillé de la morphologie et de la structure superficielle sous-marine de la marge Ouest-Algérienne: Campagne Maradja, 37th CIESM Congress, 7-11 June 2004, Barcelona, Spain, Rapp. Comm. Int. Mer Médit., 37, p. 21.
- DEVERCHERE J., YELLES K., BOUILLIN J.P., MERCIER DE LEPINAY B., DOMZIG A., BRACENE R., SAVOYE B., DAN G., GAULLIER V., PAUC H., LE ROY P., KHERROUBI A., CALAIS E., SAGE F., 2004. Résultats principaux de la campagne MARADJA 2003 et projets scientifiques sur la marge algérienne, Séminaire de la Sonatrach, Division Recherche et Développement, 11-12 mai 2004, Boumerdès, Algérie.
- DEVERCHERE J., et l'Equipe Scientifique MARADJA, 2004. Premier schéma structural de la déformation active de la marge algérienne dans le secteur du séisme du 21 mai 2003 de Boumerdès et la région d'Alger, Journée Scientifique de la section "Sismologie et physique de l'intérieur de la Terre" du Comité National Français de Géodésie et de Géophysique (CNFGG), « Risque sismique dans l'Ouest Méditerranéen », Institut de Physique du Globe de Paris, 8 janvier 2004.
- DEVERCHERE J., YELLES K., & the MARADJA Scientific Party, 2004. Active thrust faulting offshore Boumerdes, Algeria, and its relations to the 2003 Mw 6.9 earthquake, ESF EUROMARGINS Conference, ESF Standing Committee for Life and Environmental Sciences (LESC), Palau de les Heures, Barcelona, Spain, 11-14 November (abstract, talk).
- DOMZIG, A., YELLES K., DEVERCHERE J., and the MARADJA Team, 2004. New, active faults revealed off Algiers area (Boumerdes and Khair-Al-Din) from seismic and swath bathymetric data (MARADJA 2003 cruise). EGU First General Assembly, Nice, France, 25 - 30 April, Geophysical Research Abstracts (CD-Rom), Volume 6, ISSN : 1029-7006, Abstract Number : EGU04-A-04252.
- GAULLIER V., SAVOYE B., DOMZIG A., DEVERCHERE J., DAN G., and the MARADJA Team (Bouillin J-P., Bracène R., Calais E., Kherroubi A., Mercier de Lépinay B., Le Roy P., Pauc H., Savoye B., Yelles A. K.), 2004. Depositional patterns off Algeria from echo-character mapping (MARADJA 2003 cruise): possible links with the recent and historical earthquakes. 37th CIESM Congress, 7-11 June, Barcelona, Spain (Poster), Rapp. Comm. Int. Mer Médit., 37, p. 32.
- GAULLIER V., SAVOYE B., DOMZIG A., DEVERCHERE J., and the MARADJA Scientific Party, 2004. Depositional patterns off Algeria from echo-character mapping (MARADJA 2003 cruise): Possible links with the recent and historical earthquakes. EGU First General Assembly, Nice, France, 25 - 30 April, Geophysical Research Abstracts (CD-Rom), Volume 6, ISSN : 1029-7006, Abstract Number : EGU04-A-06232.
- GIRESSE P., and the MARADJA Team, 2004. Gravity-induced transport on the Algerian margin. EGU First General Assembly, Nice, France, 25 - 30 April, Geophysical Research Abstracts (CD-Rom), Volume 6, ISSN : 1029-7006, Abstract Number : EGU04-A-06793.
- GIRESSE P., PAUC H., DEVERCHERE J., SAVOYE B., and the MARADJA scientific party, Gravity-induced transport on the Algerian margin, EGU 1st meeting, Nice, France, 25-30 april 2004.
- YELLES A.K., DEVERCHERE J., DJELLIT H., KHERROUBI A., LAMMALI K., BELDJOUDI H., SEMMANE F., MAHSASA A., and the Maradja team, 2004. The Boumerdes earthquake of May 21, 2003, Mw 6.8 (Maradja survey), European Seismological Commission (ESC), XXIX General Assembly, Potsdam, Germany, 12-17 September 2004.

2005

- DAN G., SAVOYE B., CATTANEO A., GAULLIER V., GIRESSE P., PAUC H., DOMZIG A., DEVERCHERE J., and YELLES K., 2005. Morphologie de la marge algérienne : interaction entre la tectonique et les phénomènes gravitaires. 10ème Congrès Français de Sédimentologie (ASF), Presqu'île de Giens, 11-13 octobre 2005, Livre des résumés, p.74.
- DOMZIG A., YELLES K., DEVERCHERE J., BOUILLIN J-P., and the MARADJA Team, 2005. From Alboran to Algerian margins: Geology and active faults (Maradja Cruise), PICASSO-EUROARRAY Workshop (Poster), Granada, Spain, June 27-28.
- DOMZIG, A., LE ROY, C., YELLES, K., BOUILLIN, J.P., DEVERCHERE, J., BRACENE, R., MERCIER DE LEPINAY, B., and the MARADJA Team, 2005. Geological limits evidenced offshore Algeria from new swath bathymetry and seismic data (MARADJA cruise). EGU General Assembly, Vienna, Austria, 24 - 29 April, Geophysical Research Abstracts (CD-Rom), Volume 7, ISSN : 1029-7006, Abstract Number : EGU05-A-03372.
- GAULLIER V., and the MARADJA Scientific Party, 2005. Combined Salt-Related Thin-Skinned Tectonics and Crustal Tectonics in The Deep-Water SW Mediterranean: Evidence from The MARADJA Cruise, Offshore Algeria. AAPG International Conference and Exhibition, September 11-14, Paris, France.
- GAULLIER V., and the MARADJA team, 2005. The sedimentary and tectonic consequences of the Messinian salinity crisis on the Algerian margin, southwestern Mediterranean. EGU General Assembly, Vienna, Austria, 24 - 29 April, Geophysical Research Abstracts (CD-Rom), Volume 7, ISSN : 1029-7006, Abstract Number : EGU05-A-09984.
- GIRESSE P., and the MARADJA team, 2005. Sediment accumulation rates and gravity-induced processes evidenced offshore Algerian from coring results (MARADJA cruise). EGU General Assembly, Vienna, Austria, 24 - 29 April, Geophysical Research Abstracts (CD-Rom), Volume 7, ISSN : 1029-7006, Abstract Number : EGU05-A-07849.

- SAVOYE B., CATTANEO A., DAN G., DEVERCHERE J., et GAULLIER V., 2005. Examen des ruptures de câbles observées au large d'Alger lors du séisme de Boumerdès en mai 2003. 10ème Congrès Français de Sédimentologie (ASF), Presqu'île de Giens, 11-13 octobre 2005, Livre des résumés, p. 271.
- YELLES A.K., DEVERCHERE J., BOUDIAF A., and the Maradja Team, 2005. Le séisme de Boumerdès du 21 Mai 2003 (Résultats de la campagne Maradja), 2005. Journée postsismique sur le séisme de Boumerdès, Boumerdès, Algérie, 22 Mai 2005.

2006

- DEVERCHERE J., and the MARADJA team, 2006. An overview of the tectonic and sedimentary patterns off Algeria, ESF EUROMARGINS Conference, Third ESF Meeting for Life and Environmental Sciences (LESC), CNR, Bologna, Italia, 4-7 october (abstract, talk).
- DOMZIG A., PETIT C., DEVERCHERE J., YELLES K., Dynamics of the deforming Algerian margin: constraints from flexural gravity modelling, Geophysical Research Abstracts, Vol. 8, 07772, 2006, SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU06-A-07772.
- DOMZIG A., GAULLIER V., GIRESE P., PAUC H., DEVERCHERE J., YELLES K., Role of tectonics in deposition processes along the western Algerian margin (Oran-Tenes) from echo-character mapping, Geophysical Research Abstracts, Vol. 8, 04793, 2006, SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU06-A-04793.
- GAULLIER V., CATTANEO A., DOMZIG A., DEVERCHERE J., YELLES K., MERCIER DE LEPINAY B., KHERROUBI A., GRAINDORGE D., BRACENE B., 2006. Submarine mass movements on the eastern Algerian margin : preliminary results from the MARADJA 2 Leg 2 cruise (2005)(Poster). Geophysical Research Abstracts, Vol. 8, 08833, 2006, SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU06-A-08833.
- GAULLIER V., VENDEVILLE B., HUGUEN C., DEVERCHERE J., DROZ L., DOMZIG A., OBONE ZUE OBAME, E., YELLES K., and the MARADJA and PROGRES Scientific Parties, Role of thick-skinned tectonics on thin-skinned salt tectonics in the western Mediterranean : a comparison between the Algerian and North-Balearic basins, Geophysical Research Abstracts, Vol. 8, 06030, 2006, SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU06-A-06030.
- GIRESE P., PAUC H., SAVOYE B., DAN G., DEVERCHERE J., GAULLIER V., and the MARADJA Team, Sediment accumulation rates and gravity-induced processes evidenced offshore Algeria from coring results (MARADJA cruise), Geophysical Research Abstracts, Vol. 8, 08833, 2006, SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU06-A-06088.

2007

- BABONNEAU N., CATTANEO A., HARSTER M., DÉVERCHÈRE J., YELLES K., SAVOYE B., DOMZIG A., 2007, Morphology and Structure of the Algiers Deep-Sea Fan and Possible Sedimentary Record of the 2003 Boumerdès Earthquake (Poster), AGU meeting, San Francisco, Dec. 2007.
- BABONNEAU N., CATTANEO A., DÉVERCHÈRE J., SAVOYE B., DAN G., DOMZIG A., GAULLIER V., GIRESE P., DJADID F., MATOUGUI R., MERCIER DE LÉPINAY B., PAUC H., YELLES K., Sedimentological imprint of past earthquakes in the central Algerian margin from slump and turbidite record (Maradja Project), XXIV Assembly of IUGG Perugia Italy July 2-13 July, 2007 Session JSS002 (Poster).
- BABONNEAU N., CATTANEO A., HARSTER M., YELLES K., SAVOYE B., DEVERCHERE J., 2007, Activité turbiditique récente au large d'Alger : morpho-bathymétrie de l'éventail d'Alger et enregistrement sédimentaire du séisme de Boumerdès (2003), Congrès ASF, Caen, octobre 2007.
- DAN G., SAVOYE B., SULTAN N., CATTANEO A., GAULLIER V., DÉVERCHÈRE J., YELLES K., & the MARADJA2 Team, Characterization of earthquake-induced landslides from swath bathymetry, sediment cores and high resolution side-scan sonar images (Algiers area, Algerian margin, SW Mediterranean), European Geosciences Union General Assembly 2007, Vienna, Austria, 15 - 20 April, Geophysical Research Abstracts, Vol. 9, 08957, 2007, SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU2007-A-08957.
- DÉVERCHÈRE J., YELLES K., and the MARADJA Scientific Party, Offshore evidence for contractional tectonic reactivation of the north Africa margin, Western Mediterranean Sea, and geodynamic implications, MAPG Meeting, Marrakech, Oct. 2007.
- DEVERCHERE J., YELLES K., and the MARADJA Scientific Party, Campagnes scientifiques MARADJA 1 & 2-SAMRA (2003-2005): Des données, des résultats, des perspectives, colloque SONATRACH, Boumerdès, Algérie, 8-9 décembre 2007.
- DOMZIG A., J. DÉVERCHÈRE, K. YELLES, R. GOVERS, R. WORTEL, C. PETIT, A. CATTANEO, A. KHERROUBI and the MARADJA Scientific teams, 2007, The Algerian Margin: an Example of a Reactivation in Compression of a Complex Cenozoic Passive Margin, AGU meeting, San Francisco, Dec. 2007.
- DOMZIG A., and the MARADJA2 team, 2007. Overall tectonic pattern of the Algerian margin: Evidence for active folding and thrusting from the 2003 and 2005 Maradja cruises, 38th CIESM Congress, Istanbul, 9-13 April 2007 (abstract, talk).
- GAULLIER V., VENDEVILLE B. C., DEVERCHERE J., DROZ L., DOMZIG A., YELLES K., AND THE MARADJA and PROGRES Scientific Parties, 2007. Role of thick-skinned tectonics on thin-skinned salt tectonics in the western Mediterranean: a comparison between the Algerian and North-Balearic basins, Third ILP Meeting, First MAPG International Convention, Conference & Exhibition, Marrakech, Morocco, October 28-31 (abstract, talk).
- KHERROUBI A., DÉVERCHÈRE J., YELLES A.K., MERCIER DE LÉPINAY B., DOMZIG A., CATTANEO A., BRACÈNE R., GRAINDORGE D., GAULLIER V., 2007. New evidences for recent uplift, thrusting and folding offshore easternmost Algeria (Poster), European Geosciences Union General Assembly 2007, Vienna, Austria, 15 - 20 April, Geophysical Research Abstracts (GRA CD-Rom), Volume 9, 10708, 2007, SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU2007-A-10708.
- KHERROUBI A., J. DÉVERCHÈRE, A.K. YELLES, B. MERCIER LEPINAY, A. DOMZIG, D. GRAINDORGE, R. BRACÈNE, A. CATTANEO, V. GAULLIER, New evidence for active deformation off the Annaba region (easternmost part of the Algerian margin): Estimates of Quaternary shortening and slip rates from folding analyses (Poster), AGU meeting, San Francisco, Dec. 2007.
- NOUGUES A., CATTANEO A., SAVOYE B., DAN G., DEVERCHERE J., YELLES K., et l'équipe MARADJA, 2006. Analyse morphologique des canyons et des glissements de la pente algérienne : une première étape pour l'évaluation du risque gravitaire. Réunion des Sciences de la Terre RST 2006, Dijon, France, 4-8/12/2006.

YELLES A.K., DÉVERCHÈRE J., DOMZIG A., BRACÈNE R., MERCIER DE LÉPINAY B., BOUDIAF A., KHERROUBI A., GRAINDORGE D., BERTRAND G., AND WINTER T., New evidences for offshore recent tectonic activity near Algiers: the Khayr-Al-Din bank, Algeria, European Geosciences Union General Assembly 2007, Vienna, Austria, 15 - 20 April, Geophysical Research Abstracts, Vol. 9, 08465, 2007, SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU2007-A-08465.
YELLES A.K., J. DÉVERCHÈRE, A. DOMZIG, B. MERCIER DE LÉPINAY, N. BABONNEAU, H. HÉBERT, J. ROGER, A. KHERROUBI, D. GRAINDORGE, R. BRACÈNE, A. CATTANEO, V. GAULLIER, B. SAVOYE, P. LEROY, R. AIT OUALI, 2007, the tsunami of Djidjelli (Eastern Algeria) of August 21-22, 1856: Seismotectonic context and its modelling, XXIV Assembly of IUGG Perugia Italy July 2-13 July, 2007 Session JSS002 (Poster).

ANNEXE 2 : Premières pages des articles publiés dans des revues internationales de rang A

GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL. 31, L18607, doi:10.1029/2004GL020687, 2004

Slip distribution of the 2003 Boumerdes-Zemmouri earthquake, Algeria, from teleseismic, GPS, and coastal uplift data

B. Delouis,¹ M. Vallée,² M. Meghraoui,³ E. Calais,⁴ S. Maouche,⁵ K. Lammali,⁵ A. Mahsas,⁵ P. Briole,⁶ F. Benhamouda,⁷ and K. Yelles⁵

Received 5 June 2004; revised 23 July 2004; accepted 18 August 2004; published 23 September 2004.

[1] Using a joint inversion of seismological waveforms and ground displacement observations, we estimate several parameters of the fault geometry and rupture process of the Mw = 6.9 May 21, 2003 Boumerdes-Zemmouri earthquake. The relocated epicenter is considered as a known parameter. Total rupture length, rupture duration, and maximum slip are 55 km (from 3.4°E to 4.0°E), 12 s, and 3 m. The modeled south dipping reverse fault, oriented ENE-WSW outcrops a few km offshore which is consistent with the absence of observed surface rupture inland. Two shallow and relatively localized slip zones are found, on both sides of the hypocenter. To the SW, between Boumerdes and Zemmouri, slip is concentrated between 11 and 2 km depth. To the NE, between Zemmouri and Dellys, slip is concentrated between 6 km depth and the sea floor. Various resolution tests indicate that our model is well constrained by the available data, and help understanding which data constrains each parameter of the model. **INDEX TERMS:** 1242 Geodesy and Gravity: Seismic deformations (7205); 7209 Seismology: Earthquake dynamics and mechanics; 7215 Seismology: Earthquake parameters. Citation: Delouis, B., M. Vallée, M. Meghraoui, E. Calais, S. Maouche, K. Lammali, A. Mahsas, P. Briole, F. Benhamouda, and K. Yelles (2004), Slip distribution of the 2003 Boumerdes-Zemmouri earthquake, Algeria, from teleseismic, GPS, and coastal uplift data, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L18607, doi:10.1029/2004GL020687.

1. Introduction

[2] The Mw = 6.9 May 21, 2003 Boumerdes-Zemmouri earthquake occurred beneath the northern coast of Algeria, about 50 kilometers east of Algiers [Ayadi et al., 2003]. Maximum intensity (EMS98 X) was observed in cities and villages located along the coast, among which Boumerdes and Zemmouri. Centroid moment tensor solutions from global or regional seismological networks indicate a reverse faulting mechanism with a fault plane oriented NE-SW or ENE-WSW (e.g., HCMT, USGS, ETHZ, INGV centroids).

No surface ruptures directly related to the earthquake was found in the field, preventing discrimination between the two candidate fault planes. However, the vicinity of the upper part of the fault to the shoreline was proved by the large coastal uplift observed between Boumerdes and Dellys (Figure 1). Modeling the horizontal coseismic displacement measured at nine GPS points [Yelles et al., 2004] showed that the correct fault plane is the south dipping one. This means that any surface rupture would be off-shore and this is consistent with the absence of such observation in-land. This solution is also in good agreement with the fact that the reverse faults bordering the Mitidja Basin near Boumerdes [Meghraoui, 1991] as well as those identified offshore along the Algerian margin [Déverchère et al., 2003] are south dipping faults. Using the master event technique, the epicenter, originally found offshore (CRAAG location [Yelles-Chaouche et al., 2003]), has been relocated on the coastline at 36.83°N and 3.65°E [Bouainif et al., 2004, Figure 1].

[3] A preliminary model of slip distribution based on teleseismic P waves Y. Yagi (see <http://isec.kenken.go.jp/staff/yagi/eq/algeria20030521/algeria20030521.html>, 2003) has proposed that the rupture occurred at shallow depth, with a larger extension in the SW direction. A more refined description taking into account body P and SH waves as well as surface waves [Vallée et al., 2003] has precised these first findings. In particular, the analysis of surface waves, following the technique described by Vallée [2004], has clearly shown the bilaterality of the rupture, with a global extension of about 60 km. Teleseismic data alone, however, have a limited resolution, and an accurate determination of the space and time distribution of slip requires additional constraints brought by measurements of near source static ground displacements. For that purpose, we invert jointly teleseismic body waves, GPS, and coastal uplift data.

2. Coseismic Data

[4] Broadband seismograms from the mainshock recorded at teleseismic distances were obtained from the IRIS and ORFEUS data centers. In the inversions, we use velocity waveforms windowed around the P and SH wave trains, well distributed azimuthally. Data processing is the same as that of Delouis et al. [2002]. P waveforms exhibit a complex shape which indicates that the rupture involved more than a single slip zone, as will be confirmed by the slip inversion.

[5] Coseismic horizontal displacements were obtained by resurveying a 9-site GPS network and details of GPS processing can be found in work by Yelles et al. [2004]. Stations at Boumerdes and more to the west display

¹UMR 6526, CNRS, Géosciences Azur, Nice, France.

²Osservatorio Vesuviano, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Naples, Italy.

³UMR 7516, CNRS, Institut de Physique du Globe, Strasbourg, France.

⁴Department of Earth and Atmospheric Sciences, Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA.

⁵Centre de Recherche en Astronomie, Astrophysique et Géophysique (CRAAG), Algiers, Algeria.

⁶UMR 7580, CNRS, Institut de Physique du Globe, Paris, France.

⁷Institut National de Cartographie et de Télédétection (INCT), Algiers, Algeria.

Active thrust faulting offshore Boumerdes, Algeria, and its relations to the 2003 Mw 6.9 earthquake

J. Déverchère,¹ K. Yelles,² A. Domzig,¹ B. Mercier de Lépinay,³ J.-P. Bouillin,⁴
V. Gaullier,⁵ R. Bracène,⁶ E. Calais,⁷ B. Savoye,⁸ A. Kherroubi,² P. Le Roy,¹ H. Pauc,⁵
and G. Dan⁸

Received 30 September 2004; revised 13 December 2004; accepted 5 January 2005; published 23 February 2005.

[1] We investigate the active seismogenic fault system in the area of the 2003 Mw 6.9 Boumerdes earthquake, Algeria, from a high-resolution swath bathymetry and seismic survey. A series of 5 main fault-propagation folds ~ 20 – 35 km long leave prominent cumulative escarpments on the steep slope and in the deep basin. Fault activity creates Plio-Quaternary growth strata within uplifted areas such as a rollover basin on the slope and piggyback basins in the deep ocean. Most thrusts turn to fault-propagation folds at the sub-surface and depict ramp-flat trajectories. We find that the two main slip patches of the 2003 Mw 6.9 Boumerdes earthquake are spatially correlated to two segmented cumulative scarps recognized on the slope and at the foot of the margin. The overall geometry indicates the predominance of back thrusts implying underthrusting of the Neogene oceanic crust. Citation: Déverchère, J., et al. (2005), Active thrust faulting offshore Boumerdes, Algeria, and its relations to the 2003 Mw 6.9 earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L04311, doi:10.1029/2004GL021646.

1. Introduction

[2] Seismic activity in the Western Mediterranean is concentrated in northern Africa, where GPS measurements suggest that most of the ~ 5 mm/yr oblique convergence ($\sim 50^\circ$) between the African and European plates is accommodated [Calais et al., 2003; Nocquet and Calais, 2004]. The October 1980, Ms 7.3 El Asnam and May 21, 2003, Mw 6.9 Boumerdes events are two well-documented examples of destructive earthquakes that struck northern Africa. Regional seismicity shows that strain is distributed over a broad area, from the Atlas front to the offshore margin

[Bufoin et al., 1995]. This renders the identification of seismogenic faults a difficult, although essential, task for earthquake hazard assessment.

[3] Although historical and instrumental seismicity indicates significant activity offshore [e.g., Roussel, 1973; Ambraseys and Vogt, 1988; Yelles et al., 1999], little attention has yet been paid to potentially seismogenic structures along the Algerian margin until the 2003 Boumerdes earthquake [Jéles et al., 2003]. However, 2–3 mm/yr of shortening may occur offshore, since the Tell-Atlas systems should accommodate only about 50% of the total convergence between the African and Eurasian plates [Meghraoui and Doumaz, 1996]. We provide here the first detailed tectonic frame of the area offshore Boumerdes (Figure 1) deduced from high-resolution swath bathymetry and seismic reflection profiling acquired during the *Maradja* cruise, scheduled just prior to the May 2003 Boumerdes earthquake. We compare the offshore active structures with source studies of the Boumerdes earthquake, propose a possible location for the rupture area, and interpret the geomorphic structures considering the recent geodynamic evolution of the Algerian margin.

2. Geological and Tectonic Framework

[4] Tectonic studies in the Tell-Rif and Atlas domains show predominantly NE-SW trending folds and reverse faults defining a right-stepping pattern [e.g., Meghraoui et al., 1986; Morel and Meghraoui, 1996; Boudiaf et al., 1998]. This deformation system is a ~ 200 km wide Alpine-type orogen (Maghrebides) resulting from the opening and subduction of a Tethyan ocean [Auzende et al., 1973]. The region offshore Boumerdes, located offshore the internal zone of Great Kabylie, shows the transition from the continental crust of the Maghrebides hinterland to a newly formed oceanic domain, namely the Algerian basin, interpreted as an Oligocene back-arc basin born behind the Tethyan subduction [Frizon de Lamotte et al., 2000; Jobet and Faccenna, 2000].

[5] Available focal mechanisms of earthquakes in the Tell domain depict mostly pure reverse faulting along NE-SW-trending planes, arguing for a \sim SE-NW-directed compression [Bufoin et al., 1995; Stich et al., 2003]. Both the 1980 El Asnam and 2003 Boumerdes events follow this pattern, but unlike the El Asnam event, the Boumerdes earthquake occurred on a south-dipping fault plane [Jéles et al., 2004, Figure 1]. According to Dekuis et al. [2004], the 2003 rupture strikes 70° E and extends for ~ 55 km, with two main slip patches at depths ranging from 0 to 11 km. The

¹UMR 6538, CNRS, Domaines Océaniques, Université de Bretagne Occidentale – Institut Universitaire Européen de la Mer, Plouzané, France.

²Centre de Recherche en Astronomie, Astrophysique et Géophysique, Bouzarrah, Algeria.

³UMR 6526, CNRS, Géosciences Azur, Valbonne, France.

⁴UMR 5025, CNRS, Laboratoire de Géologie des Chaînes Alpines, Université Joseph Fourier, Grenoble, France.

⁵Laboratoire d'Etudes des Géol Environnements Marins, Université de Perpignan, France.

⁶SONATRACH – Centre de Recherche et Développement, Boumerdes, Algeria.

⁷Department of Earth and Atmospheric Sciences, Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA.

⁸Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer, Plouzané, France.



Geodynamics

Searching for the Africa–Eurasia Miocene boundary offshore western Algeria (MARADJA'03 cruise)

Anne Domzig ^{a,*}, Karim Yelles ^b, Charlotte Le Roy ^c, Jacques Déverchère ^a, Jean-Pierre Bouillin ^d, Rabah Bracène ^e, Bernard Mercier de Lépinay ^f, Pascal Le Roy ^g, Eric Calais ^h, Abdelaziz Kherroubi ^c, Virginie Gaullier ^h, Bruno Savoye ⁱ, Henri Pauc ^h

^a « Domaines océaniques »-IUEM, UMR6538, université de Bretagne occidentale, place Nicolas-Copernic, 29280 Plouzané, France

^b Centre de recherche en astronomie, astrophysique et géophysique, BP 63, Bouzareah, Algérie

^c Chaire de géodynamique, Collège de France, Europe de l'Arbois, bât. Le Trocadéro, allée sud, BP 80, 13545 Aix-en-Provence, France

^d Laboratoire de géodynamique des chaînes alpines (UMR 5025), université Joseph-Fourier, Grenoble-I, Maison des Géosciences,

1381, rue de la Piscine, domaine universitaire, 38400 Saint-Martin-d'Hères, France

^e Sonatrach Exploration, av. du 1^{er} Novembre, Boumerdes, Algérie

^f Géosciences Azur, UMR CNRS 6526, 250, rue Albert-Einstein, bât. 4, 06360 Valbonne, France

^g Purdue University, 401 South Grant Street, West Lafayette, IN 47907-2024, USA

^h LEGOS, 52, av. Paul-Alduy, 65860 Perpignan cedex, France

ⁱ IFREMER, DRO-Géosciences marines, BP 70, 29280 Plouzané cedex, France

Received 4 October 2005; accepted after revision 8 November 2005

Available online 27 December 2005

Written on invitation of the Editorial Board

Abstract

We present new results from the MARADJA'03 cruise depicting the geological structures offshore central and western Algeria. Using swath bathymetry and seismic reflection data, we map and discuss the offshore limits of the Internal Zones corresponding to relics of the AIfKaPeCa domain that drifted and collided the African plate during the Miocene. We identify large reverse faults and folds that reactivate part of these limits and are still active today. The morphology of the westernmost NE–SW margin suggests a former strike-slip activity accommodating a westward block translation responsible for the shift of the Internal Zones towards the Moroccan Rif. To cite this article: A. Domzig et al., C. R. Geoscience 338 (2006).

© 2005 Académie des sciences. Published by Elsevier SAS. All rights reserved.

Résumé

À la recherche de la frontière miocène entre l'Afrique et l'Europe au large de l'Algérie occidentale (campagne Maradja'03). Nous présentons les résultats récents de la campagne MARADJA'03, qui visent à mettre en évidence les structures géologiques dans le domaine marin au nord-ouest de l'Algérie. Grâce aux données de bathymétrie multifaisceau et de sismique réflexion, nous cartographions et discutons les limites en mer des Zones internes correspondant aux reliques du domaine AIfKaPeCa qui a dérivé, puis est entré en collision avec la plaque africaine au Miocène. De grandes failles inverses et plis, actifs dans le champ de contrainte actuel, réactivent certaines de ces limites. La marge ouest-algérienne, orientée NE–SW, indique la présence d'une ancienne activité en décrochement ayant accommodé la translation des Zones internes vers l'ouest. Pour citer cet article : A. Domzig et al., C. R. Geoscience 338 (2006).

* Corresponding author.

E-mail address: sune.domzig@edf.univ-brest.fr (A. Domzig).

Shallow afterslip following the 2003 May 21, $M_w = 6.9$ Boumerdes earthquake, Algeria

A. Mahsas,¹ K. Lammali,¹ K. Yelles,¹ E. Calais,² A. M. Freed² and P. Briole³

¹Centre de Recherche en Astronomie, Astrophysique et Géophysique, Bouzaréah, Algeria

²Purdue University, Department of Earth and Atmospheric Sciences, West Lafayette, IN 47907, USA. E-mail: ecalais@purdue.edu

³Institut de Physique du Globe de Paris, 4 Place Jussieu, 75005 Paris, France

Accepted 2007 August 24. Received 2007 August 6; in original form 2007 March 26

SUMMARY

We investigated post-seismic deformation following the 2003 May 21, $M_w = 6.9$ Boumerdes, Algeria, earthquake using surface displacements from six continuous Global Positioning System sites that operated in the epicentral area for 2.5 yr following the event. We find up to 4 cm of cumulative horizontal displacement during that time period, with a time-dependence well fit by a logarithmic decay. Post-seismic deformation appears to continue at all sites after the 2.5-yr observation period, with rates on the order of 1 cm yr⁻¹ or less. The data is consistent with shallow afterslip (0–5 km) and shows no evidence for afterslip downdip of the coseismic rupture. The data is poorly explained by viscoelastic relaxation in the lower crust or upper mantle, or by poroelastic rebound. The concentration of afterslip adjacent to and updip of the coseismic rupture, at least in the western half of the fault, suggests that afterslip is driven by coseismic stresses. The correlation between the depth of afterslip and that of the sedimentary wedge along the Algerian margin, while coseismic slip occurs in deeper basement rocks, suggests (1) that post-seismic deformation may also involve folding and (2) that spatial variations in frictional properties along the fault correlate with the type of rocks involved.

Key words: Satellite geodesy; Seismic cycle; Transient deformation; Africa.

1 INTRODUCTION

Despite the well-established importance of post-seismic deformation during the earthquake cycle (e.g. Thatcher 1974, 1983), debate persists about the driving mechanisms (i.e. afterslip versus viscoelastic relaxation versus poroelastic rebound), where the deformation occurs (lower crust or upper mantle), and what are the relevant constitutive parameters of the candidate processes (e.g. Newtonian versus power-law viscosity). For instance, an early phase of rapidly decaying deformation following the 1992, $M_w = 7.3$ Landers earthquake has been explained by afterslip below 10 km (Shen *et al.* 1994; Savage & Svarc 1997). Some of the early deformation following that event, especially the observed pattern of uplift and subsidence near the fault, suggests poroelastic adjustments to the earthquake stress changes (Peltzer *et al.* 1996). Finally, longer-term post-seismic deformation following that same event has been interpreted as the result of viscoelastic relaxation in the lower crust and upper mantle, possibly involving non-linear mantle rheology, either biviscous (Pollitz *et al.* 2001) or stress-dependent (Freed & Bürgmann 2004). Multiple mechanisms may also be acting over different spatial and temporal scales. Freed *et al.* (2006) showed that post-seismic deformation following the 2002, $M_w = 7.9$ Denali, Alaska, earthquake resulted from the combination of viscoelastic flow in the upper mantle and possibly the lower crust, shallow afterslip in the upper crust and poroelastic rebound in the immediate vicinity of the rupture.

The difficulty for identifying post-seismic processes stems, in part, from the lack of sufficient observational data sets to constrain models. Here we report on post-seismic deformation following the 2003 May 21, $M_w = 6.9$ Boumerdes earthquake, Algeria (Fig. 1; Ayadi *et al.* 2003; Yelles *et al.* 2004). Within 3 weeks of the event, we deployed six semi-permanent Global Positioning System (GPS) stations in the epicentral area of the earthquake and operated them continuously for 2.5 yr to investigate the mechanism of post-seismic deformation that was likely to follow the event. In this paper, we describe the post-seismic signal recorded at the GPS sites and show that, over this 2.5-yr time period, post-seismic deformation is best modelled by shallow afterslip (0–5 km). Some of this shallow slip may contribute to the development of fault-propagation folds in the sedimentary wedge at the toe of the Algerian margin.

2 TECTONIC SETTING

On 2003 May 21, a $M_w = 6.9$ earthquake struck northern Algeria, about 50 km east of its capital, Algiers, with about 2400 casualties and 10 000 injured, leaving 200 000 homeless, and causing extensive damage (intensity X) in the Algiers-Dellys area (Fig. 1; Ayadi *et al.* 2003; Yelles *et al.* 2003). This earthquake is among the largest well-monitored events to occur in the Western Mediterranean over the past 25 yr. Its magnitude is comparable to the Campania (Italy)

Coseismic deformation of the May 21st, 2003, $M_w = 6.8$ Boumerdes earthquake, Algeria, from GPS measurements

K. Yelles, K. Lammali, and A. Mahsas

Centre de Recherche en Astronomie et Géophysique, Bouzarfah, Algeria

E. Calais

Department of Earth and Atmospheric Sciences, Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA

P. Briole

Centre National de la Recherche Scientifique, UMR 7580, Institut de Physique du Globe de Paris, Paris, France

Received 3 March 2004; revised 30 April 2004; accepted 12 May 2004; published 7 July 2004.

[1] On May 21st, 2003, a $M_w = 6.8$ earthquake struck the central part of northern Algeria causing extensive damage in the Boumerdes area, 40 km east of Algiers. It is among the largest events to occur in the western Mediterranean over the past 25 years. We present GPS measurements of horizontal coseismic displacements that provide new constraints on the rupture geometry. Modeling the data with a uniform dislocation on a rectangular fault in an elastic half-space, we find that the rupture occurred on a reverse fault dipping 42° S, with its upper edge 6 km offshore and lower edge 4 km inland. The amplitude distribution of the coseismic displacements indicates that the rupture did not reach the surface, at least in its western part, and ended to the west around 3.4° E. Offshore faults like that of the Boumerdes earthquake could account for part of the Africa-Eurasia relative plate motion in the western Mediterranean and represent a significant seismic threat for Algeria. **INDEX TERMS:** 1206 Geodesy and Gravity: Crustal movements—interplate (8155); 7215 Seismology: Earthquake parameters; 7230 Seismology: Seismicity and seismotectonics. Citation: Yelles, K., K. Lammali, A. Mahsas, E. Calais, and P. Briole (2004), Coseismic deformation of the May 21st, 2003, $M_w = 6.8$ Boumerdes earthquake, Algeria, from GPS measurements, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L13610, doi:10.1029/2004GL019884.

1. Introduction

[2] The trace of the Africa (Nubia)-Eurasia plate boundary in the western Mediterranean is well depicted by both historical and instrumental seismicity, in particular in Algeria (Figure 1). Recent GPS results show that both plates are currently converging obliquely ($N60^\circ$ W direction) at about 5 mm/yr at the longitude of Algiers [Nocquet and Calais, 2004]. They also show that most of the relative plate motion is accommodated in northern Africa, with no significant strain in Iberia, the Ligurian basin, and the Corsica-Sardinia block, that are rigidly attached to Eurasia (Figure 1).

[3] Well identified active faults in Algeria are also concentrated in a narrow coastal stripe in the northern part of the country. Active structures define a series of NE-SW trending folds and reverse faults affecting Neogene and

Quaternary basins, with a right-stepping en échelon pattern [Meghraoui *et al.*, 1986, 1996]. These reverse faults are connected by NW-SE to E-W trending strike-slip faults, some of them with a reverse component [Meghraoui, 1991]. This structural pattern is continuous with, and similar to, the one observed in the Moroccan Riff to the west [e.g., Cabert *et al.*, 1997].

[4] In addition to on-shore structures, a recent oceanographic survey of the central and western parts of the Algerian margin [Déverchère *et al.*, 2003] has shown that the margin and the proximal part of the deep basin east of Algiers are affected by a series of active north-verging reverse faults and folds, probably developing over south-dipping ramps. These observations indicate that part of the Africa-Eurasia plate convergence in Algeria may be accommodated offshore. Our analysis of the Boumerdes earthquake presented hereafter supports this idea.

2. The Boumerdes Earthquake

[5] On May 21st, 2003, a $M_w = 6.8$ (USGS Fast Moment Tensor Solution) earthquake struck northern Algeria, about 40 km east of Algiers, causing extensive damage (intensity X) in the Algiers-Dellys area [Ayadi *et al.*, 2003]. About 2,300 people were killed, 11,000 injured, and 200,000 homeless. It is among the largest well monitored earthquake in the western Mediterranean since the $M = 7.3$ October 10, 1980 El Asnam event, which occurred 200 km west of Algiers. The epicenter of the Boumerdes earthquake has been located by the Algerian Research Center for Astronomy and Geophysics (CRAAG) about 7 km north of the Zemmouri village (36.91° N, 3.56° E) (Figure 1) [Zes-Chaouche *et al.*, 2003]. Its location corresponds to a previously undocumented fault. Other epicenter locations derived from permanent seismic stations around the Mediterranean, like that of the European-Mediterranean Seismological (EMSC) also indicate an off-shore epicenter, consistent with that of CRAAG within about 10 km.

[6] The various moment tensor solutions calculated so far using long-period data from world-wide broad-band seismic stations (e.g., USGS, ETH Zurich) show reverse motion on NE-SW trending faults, with a shallow centroid depth (less than 10 km) and a moment magnitude ranging from 6.8 to 7.0. The slip vector estimated from the seismological data exactly parallels the Africa-Eurasia relative motion. A body