

ANÁLISIS DE MOVIMIENTOS ALTIMÉTRICOS DE LA REGIÓN SÍSMICA DE CHLEF POR EL MÉTODO DE MONTE CARLO

ANALYSIS OF ALTIMETRIC MOVEMENTS OF THE SEISMIC REGION OF CHLEF BY MONTE CARLO METHOD

Ali Merbah⁽¹⁾, Miguel J. Sevilla⁽²⁾ y Yelles-Chaouch A⁽¹⁾

⁽¹⁾Centre de recherche en Astronomie, Astrophysique et Géophysique, Argel, Argelia

⁽²⁾Instituto de Astronomía y Geodesia, Facultad de Matemáticas, Universidad Complutense, 28040 MADRID, maast01@sis.ucm.es

SUMMARY

In the region of Chlef (ex El Asnam, Northwest of Algeria) numerous geodesic campaigns have been made for the study of terrestrial crustal movements associated to the seismicity of the region.

The results of the works of different times of leveling measurements, of 1976, 1986, 1987 are compared with the results obtained in 1981, 1988 and 1989, they confirm the tendency to NW-SE overthrust and they indicate the persistence of relative movements in the same sense.

The evaluation and the simultaneous representation of these deformations and of their errors are made by the method of Monte Carlo that allows to simulate a great number of series of measurements. This method has put in evidence the existence of significant movements in 90% of the simulations of Monte Carlo about the speed of the altimetric displacements of different sections of leveling net in the region.

In this work the results obtained in the different campaign are presented.

1. INTRODUCCIÓN

El estudio de la detección de movimientos de la corteza terrestre necesita el establecimiento de proyectos geodésicos específicos (auscultación de monumentos y de instalaciones industriales, levantamientos sísmicos, redes geodésicas y catastrales, etc.). Las posiciones relativas de puntos pueden ser obtenidas por dos tipos de técnicas de posicionamiento:

- Técnicas clásicas (Nivelación, trilateración, triangulación, etc.)
- Técnicas espaciales (GPS, DORIS, etc.)

La comparación de medidas sucesivas permite detectar eventuales movimientos aparecidos durante un periodo de tiempo dado, no obstante se presentan dos problemas estrechamente relacionados (Pagarete et al., 1990).

- Detección de zonas "estables".
- Estimación de la precisión de los movimientos obtenidos y de sus errores.

Estos dos problemas muestran que la interpretación rigurosa de los movimientos y de sus errores exige una estimación precisa de los márgenes de error sobre los desplazamientos de los puntos de la red.

En este contexto es en el que se inscribe el tema de este artículo que consiste en una mejor representación de movimientos postsísmicos y de sus errores obtenidos por nivelación de precisión con el método de Monte Carlo.

La presentación e interpretación de los resultados de los trabajos geodésicos se hará estudiando la deformación cosísmica y la deformación postsísmica.

2. DEFORMACIÓN COSÍSMICA

En 1981, algunos meses después del seísmo, un equipo Franco-Argelino procedió a las medidas de nivelación geodésica a lo largo de la vía férrea Argel-Orán siguiendo un perfil SE-NW perpendicular a la falla principal. Este mismo perfil fue medido antes en el cuadro de la nivelación general de Argelia por el INC (Institut National de Cartographie) en 1976, esta

fecha es tomada como año de referencia para el cálculo de los movimientos cosísmicos. La precisión estimada fue del orden de 1 cm km^{-1} (Ruegg et al., 1982).

El punto de referencia se encuentra en la presa de Oued Fodda, lejos de la zona experimentada. Con respecto a este punto un levantamiento vertical de 5.15 m fue medido cerca de la falla sobre el bloque montado (overthrusting) con una atenuación progresiva en dirección Noroeste (Figura 1). Ha sido igualmente medido un desnivel de 0.76 m sobre el bloque SE, región considerada como relativamente estable (Cisternas et al., 1982).

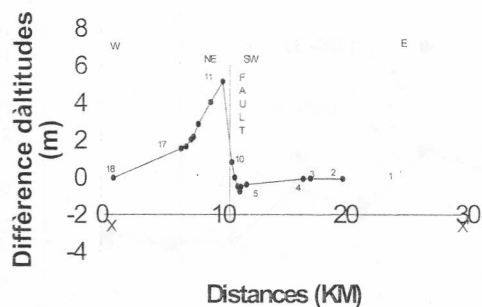


Figura 1 - Deformación cosísmica 1976-1981 (Coseismic deformation 1976-1981).

3. DEFORMACIÓN POSTSÍSMICA

Los resultados de los trabajos de nivelación de 1988 y 1989 comparados con los resultados de 1987 (Sara El Maarouf- SEM) y 1986 (Carretera nacional Argel- Oran- RN4 y ferrocarril-Argel- Oran) permiten poner en evidencia movimientos altimétricos. Como muestran las figuras 2, 3 y 4, sobre los tres

perfiles observamos cambios muy débiles de altitud cerca de la falla.

Notamos un levantamiento de 2 cm en media en el bloque Noroeste y, no obstante, observamos una ligera subsidencia sobre el bloque Sureste cerca de la traza de la falla.

Los movimientos verticales son débiles, pero en buena concordancia con los movimientos cosísmicos: levantamiento sobre la zona situada al Noroeste de la falla y hundimiento al Sureste. (Lammali et al., 1997)

4. MÉTODO ADOPTADO PARA EVALUACIÓN Y REPRESENTACIÓN DE DEFORMACIONES VERTICALES Y DE SUS ERRORES

La determinación de deformaciones verticales de la región sísmica de Chlef (Ruegg et al., 1982) está basada en el cálculo de desplazamientos altimétricos y de las velocidades relativas de estos desplazamientos entre dos campañas de observación, en las diferentes secciones de nivelación. La representación simultánea de estos movimientos y sus errores es efectuada por el método de Monte Carlo (Kasser et Thom, 1995).

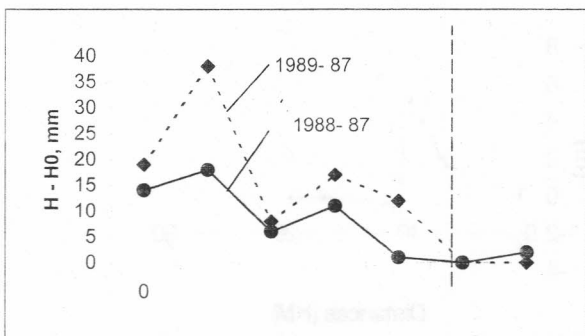
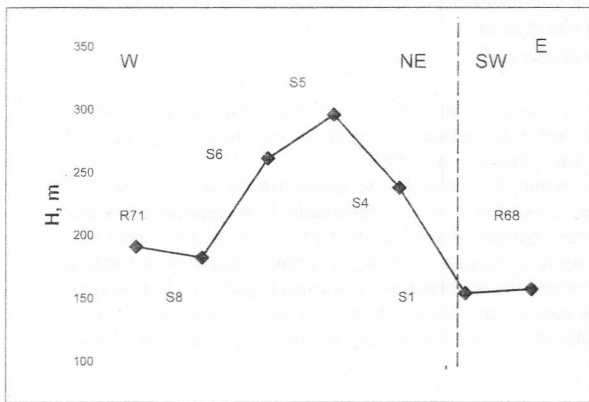


Figura 2 - Topografía y movimientos verticales calculados por nivelación a través del anticlinal Sara El Maarouf. (Topography and vertical movements calculated from levelling across Sara El Maarouf anticline).

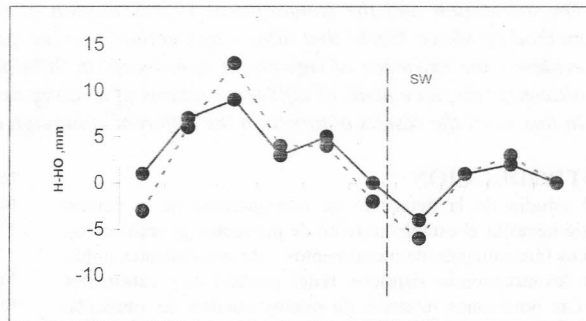
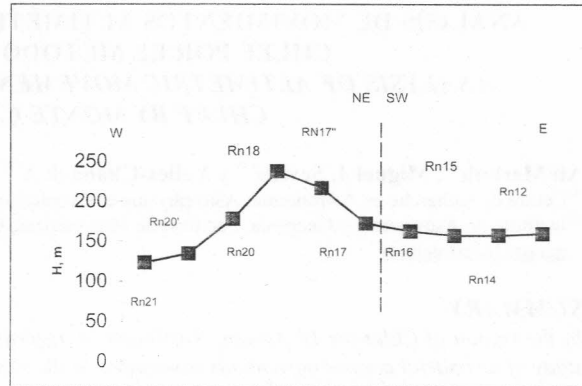
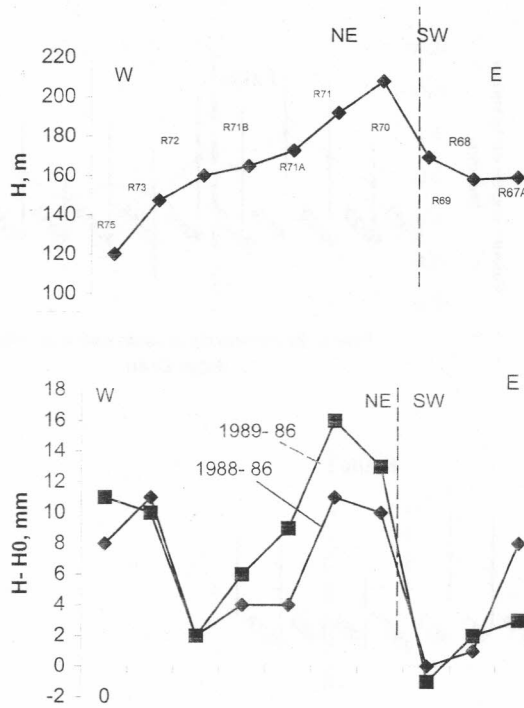


Figura 3 - Topografía y movimientos verticales calculados por líneas de nivelación sobre la carretera nacional 4 Argel-Oran. (Topography and vertical movements calculated from levelling lines on the N°4 National Road Algiers-Oran).

La idea general es construir nubes de puntos representantes de las velocidades de los desplazamientos verticales que perturban las medidas. Estos puntos están normalmente distribuidos alrededor del valor inicial *no perturbado*. La dispersión de las soluciones perturbadas da una idea del rigor de la solución no perturbada (Pagarete et al., 1990).

Supongamos que se perturban pseudoaleatoriamente las altitudes $h_k^{(1)}$ correspondientes a las medidas hechas sobre los puntos de nivelación de una época t_1 , de tal suerte que la dispersión de cada uno de ellos sigue la ley normal de valor medio $h_k^{(1)}$ y desviación típica $\sigma_{h_k^{(1)}}$. A continuación perturbaciones análogas son generadas para las altitudes $h_k^{(2)}$ de la época t_2 , asociada a las desviaciones típicas $\sigma_{h_k^{(2)}}$. Se pueden calcular los desplazamientos simulados de las altitudes de cada punto, tales que:

$$\Delta h_k^S = h_k^{(2)S} - h_k^{(1)S}, (k=1,2,\dots,m)$$



Los valores mínimos y máximos de los intervalos de error de las simulaciones se presentan en la tabla siguiente

Sección	Sara El-Maarouf	Carretera Nacional RN4	Ferrocarril
Intervalo mínimo. (mm/an)	± 2.5 - S7	± 3.4 - RN15	± 6.0 - R75
Intervalo máximo. (mm/an):	± 10.5 - S8	± 9.5 - RN13	± 12.5 - R69

Esta tabla muestra también la influencia de los errores sobre la estimación de las velocidades de los desplazamientos verticales. No obstante, es preciso cuantificar y distinguir entre velocidades de movimientos significativos y las de movimientos debidos a errores groseros.

Figura 4 - Topografía y movimientos verticales calculados por líneas de nivelación sobre el ferrocarril Argel-Oran. (Topography and vertical movements calculated from levelling lines on the Railway levelling route Algiers-Oran).

El exponente S designa la simulación, m es el número de puntos que constituyen la sección de nivelación.

Por consiguiente, los valores simulados de las velocidades relativas a los desplazamientos verticales vienen dados por:

$$V_k^S = \frac{\Delta h_k^S}{t_2 - t_1} \quad (k=1, 2, \dots, m)$$

Así, la representación gráfica de los valores perturbados V_k^S conduce a una nube de puntos alrededor del valor de la velocidad no perturbada, bajo la forma de un intervalo.

5. LA SIMULACIÓN DE MONTE CARLO

Los gráficos siguientes de la Figura 5, ilustran los dominios de errores obtenidos con 100 simulaciones de Monte Carlo sobre las velocidades relativas a los movimientos verticales entre 1986 y 1989, para cada punto de las tres secciones de nivelación (Sara El-Maarouf, la carretera nacional RN4 Argel-Oran, y el ferrocarril Argel-Oran).

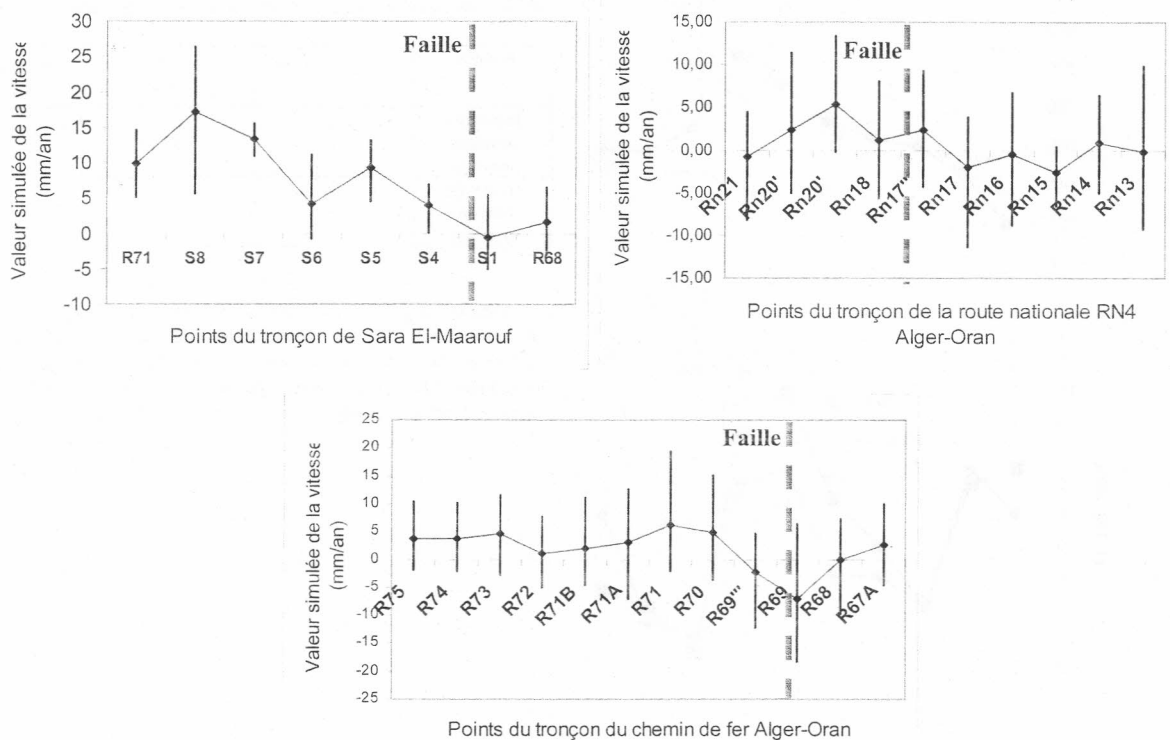


Figura 5 - Dominios de errores obtenidos con 100 simulaciones de Monte Carlo (Domains of errors obtained with 100 simulations of Monte Carlo).

6. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE RESULTADOS

Los histogramas de la Figura 6 ilustran los porcentajes de errores groseros sobre las velocidades simuladas de los desplazamientos de puntos de las diferentes secciones de nivelación. Después del cálculo de los intervalos de confianza, obtenidos con el test de Student, los valores simulados que están fuera de estos intervalos son considerados como valores de movimientos no significativos.

Se observa que se tiene un porcentaje medio del orden del 10% de tener un valor de movimiento no significativo debido a los errores groseros. Por consiguiente el 90% de los movimientos verticales son significativos lo que confirma su existencia

Siguiendo el test del Chi cuadrado, se han efectuado test de detección de movimientos sobre los valores simulados por Monte Carlo. Los resultados obtenidos han demostrado que todos los puntos de las tres secciones son susceptibles de tener movimientos significativos (Pagarete et al., 1990). El test del Chi cuadrado da valores superiores a los valores 123.0 y 135.0 que se explican por la existencia de movimientos al 95% y 99%, respectivamente.

La fórmula del Chi cuadrado viene dada por (Lebart et al., 1979):

$$\chi^2 = (m \times n) \frac{\sigma_0'^2}{\sigma_0^2}$$

donde *m* es el número de simulaciones, *n* es el número de parámetros. En nuestro caso, *m* = 100 y *n*=1. σ_0' es la precisión de los valores simulados de la velocidad del desplazamiento vertical y σ_0 es la precisión de la velocidad no simulada del desplazamiento vertical del punto considerado.

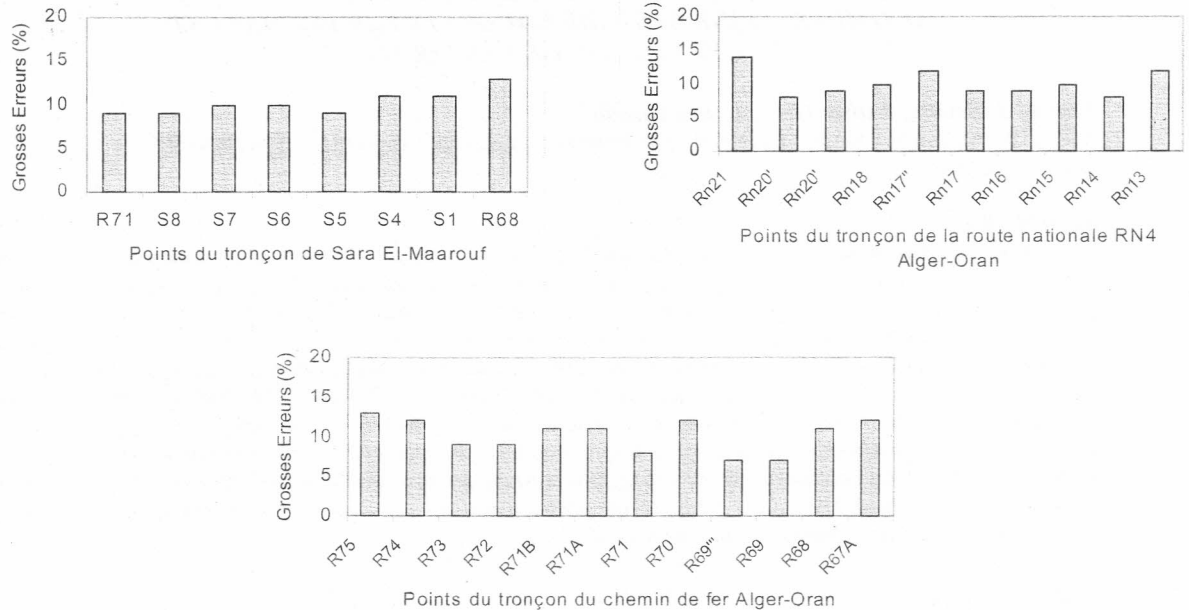


Figura 6 - Porcentajes de errores grosos sobre las velocidades simuladas de los desplazamientos de puntos de las diferentes secciones de nivelación. (Percentages of gross errors in the simulated speeds of the displacements of points in the different leveling sections).

7. CONCLUSIONES

La utilización de test estadísticos clásicos (test de Student, test del Chi cuadrado, etc.) aplicados al método de simulación de Monte Carlo en el estudio de movimientos altimétricos de la región sísmica de Chlef, nos ha permitido proporcionar una representación visual simultánea de los movimientos altimétricos y de los errores sobre su determinación. Esto ha puesto en evidencia la detección de las zonas estables y de las afectadas por movimientos.

8. REFERENCIAS:

- Cisternas A., Dorel J. and Gaulon R (1982): Models of the complex source of El Asnam earthquake, Bulletin of Seismological Society of America, vol. 72, N°6, XII, 2245-2260
- Kasser M. et C. Thom (1995): étude des déformations dans un réseau géodésique par emploi de tenseurs de déformations régulièrement répartis. Rapport Interne, ESGT, Paris
- Lammali, K., M. Bezzeghoud, F. Oussadou, D. Dimitrov and H. Benhallou (1997): Postseismic deformation at El Asnam in the seismotectonic context of norwestern Algeria, Geophys. J (1997) 129, 597- 612
- Lebart, L., A. Morineau, J.P. Fénelon (1979): Traitement des données statistiques, méthodes et programmes, Edition Dunod, pp 72-73.
- Pagarete, J., M. Kasser et J.C. Ruegg (1990): Évaluation et représentation des erreurs sur les déformations d'un réseau

géodésique: utilisation de la méthode de Monté Carlo, Bulletin Géodésique 64 (1990) pp. 63-72.

- Ruegg, J.C., M. Kasser, A. Tarantola, J. C. Lepine and B. Chouikrat (1982): Deformations associated with the El Asnam earthquake of 10 October 1980: Geodetic determination of vertical and horizontal movements, Bulletin of Seismological Society of America, vol. 72, N°6, pp 2227-2244, December 1982