

Evaluation et Interprétation des Déformations Horizontales et de leurs Erreurs sur un Réseau de Surveillance Sismique

A. MERBAH, B. GOURINE, S. KAHLOUCHE, Algeria, M.MEGHRAOUI, France, B. GHEZALI and M.J SEVILLA' Spain

Key words: Crustal motion, Earthquake, Geodetic network, Monte Carlo, Simulation, Strain tensors.

SUMMARY

The region of Chelif (ex-El Asnam), situated in the North West of Algeria, is of an exceptional interest for the study of crustal motion which is related to the region seismic activity.

The realised tests have focused on the horizontal movements determination and their errors on the strain tensors from periodic observations. The operation was stretched over a two year campaign of classical geodetic observations

(June 1988 and April 1992). The network, established by distance measurements, is composed of 02 reference points spaced of some kilometres over the seismic zone and 10 monitoring points distributed along the reverse fault of the famous earthquake on the 10th October 1980.

The methodology developed in this context is based on the computation of the network strain tensors and on the simultaneous representation of the deformations and their related errors, using the Monte Carlo method which allows an easy visual interpretation.

Otherwise we put in evidence in the central segment of the fault a post seismic meaningful deformation characterized by the globally NW-SE direction of strain tensors in agree with a field data.

Mots-clés: Déformation, Tenseur de déformation, Monté Carlo, Simulation.

SOMMAIRE

La région sismique de Chelif est d'un intérêt exceptionnel pour l'étude, au moyen de mesures géodésiques, des mouvements de l'écorce terrestre liés à la sismicité de la région.

Le travail présenté dans cet article porte sur la détermination des déformations horizontales de la région et l'influence de leurs erreurs sur le tenseur de déformation.

L'évaluation de la déformation se fait par le calcul des déplacements planimétriques des points et par les tenseurs de déformation à l'intérieur de chaque figure élémentaire du réseau.

La représentation simultanée de ces déformations et de leurs erreurs est effectuée par la méthode de Monté Carlo qui permet de simuler un grand nombre de séries de mesures.

D'autre part, nous avons mis en évidence au niveau du segment central de la faille une déformation post sismique significative caractérisée par des tenseurs de déformation montrant des directions de compression globalement NW- SE en accord avec les observations de terrain.

Evaluation et Interprétation des Déformations Horizontales et de leurs Erreurs sur un Réseau de Surveillance Sismique

A. MERBAH, B. GOURINE, S. KAHLOUCHE, Algeria, M.MEGHRAOUI, France, B. GHEZALI and M.J SEVILLA' Spain

1. INTRODUCTION

L'étude sur la détection des mouvements du sol de la croûte terrestre nécessite la mise en place de canevas géodésiques spécifiques (auscultation d'ouvrages d'art et de sites industriels, surveillance sismique, réseaux géodésiques et cadastraux, etc.).

Les positions relatives des points du canevas peuvent être obtenues par deux types de techniques de positionnement :

- Techniques classiques (Nivellement Trilatération, Triangulation, ...)
- Techniques spatiales (GPS, ...)

La comparaison de mesures successives permet de déceler d'éventuels mouvements apparus pendant une période donnée mais toutefois elle présente deux problèmes étroitement liés (Pagarete et al., 1990):

- Détection des zones 'stables' ?
- Estimation de la précision sur les mouvements obtenus et de leur erreurs ?

Ces deux problèmes montrent que l'interprétation rigoureuse des mouvements et de leurs erreurs exige une estimation précise des marges d'erreurs sur les déplacements des points du réseau.

C'est dans ce contexte que s'inscrit le thème de cet article qui consiste à une meilleure représentation des mouvements et de leur erreurs utilisant les tenseurs de déformations classiques avec la méthode de Monté Carlo.

2. METHODES DE CALCUL DE LA DEFORMATION

Il existe deux méthodes d'évaluation des déformations d'un réseau géodésique (Brunner, 1979; Welsch, 1983; Franck, 1966; Prescott et al, 1979; P. Xu et E. Grafarend 1995):

- La première repose sur le calcul des *vecteurs déplacements* qui sont déduits à partir des coordonnées compensées d'un réseau de points commun à deux époques, par rapport à un canevas de référence à priori. La représentation des erreurs de détermination des vecteurs qui est basée sur l'exploitation des ellipses d'erreurs nous renseignent sur les incertitudes des jeux successifs de coordonnées. Cette méthode n'est pas intrinsèque car elle dépend de certains paramètres fixés à priori (système géodésique de référence), ce qui rend difficile l'interprétation des mouvements et de leurs erreurs (Kasser et Thom, 1995).

- La seconde est basée sur le calcul des tenseurs de déformation qui est indépendant du système de référence choisi ce qui nous permet de bien repérer et représenter les zones déformées. Néanmoins, cette technique présente quelques inconvénients qui sont les suivants:
 - La représentation des axes principaux des tenseurs de déformation est d'une lecture et d'une interprétation visuelle peu pratique, nécessitant un certain entraînement.
 - La représentation tensorielle n'est pas complètement intrinsèque puisqu'elle dépend de la configuration du réseau (choix des figures élémentaires).
 - La représentation graphique des axes des tenseurs présente une singularité au voisinage d'une déformation isotrope (il s'agit des axes d'une ellipse lorsque celle-ci devient un cercle), par conséquent il est souvent difficile de tracer correctement les intervalles de confiance sur chaque tenseur à partir de l'estimation de ceux relatifs aux longueurs des axes et à leur orientation. A ce niveau, on a recours à un tracé d'éventails autour des axes, mais cette solution est critiquable du fait qu'il y a, d'une part, des erreurs sur les composantes du tenseur qui sont parfois du même ordre de grandeur que celles-ci et, d'autre part, il y a en général une forte corrélation entre ces composantes eux-mêmes et avec leur orientation.

3. METHODE ADOPTEE POUR L'EVALUATION ET LA REPRESENTATION DES DEFORMATIONS ET DE LEURS ERREURS

La méthode adoptée pour la détermination des déformations d'un réseau géodésique est basée sur le calcul des tenseurs de déformation. La représentation simultanée de ces mouvements et leurs erreurs est effectuée par la méthode de Monté Carlo.

3.1 Calcul du tenseur de déformation

Soit un réseau géodésique composé de n points, observés à deux époques t^1 et t^2 dont on dispose de deux séries d'observations représentées respectivement par des longueurs des côtés du réseau d_k^1 et d_k^2 . Chaque côté d_k présente une variation entre les deux époques désignée par :

$$\Delta d_k = d_k^2 - d_k^1 \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

Le calcul des composantes du tenseur utilise la méthode des éléments finis (Pagarete et al, 1990) qui nous permet de représenter la déformation à l'intérieur de chaque figure élémentaire (triangle ou polygone construit par les côtés observés).

Pour des déformations infinitésimales la variation relative de chaque côté d_k peut s'écrire (Kasser et Thom, 1995; Welsch, 1983):

$$u_k = \frac{\Delta d_k}{d_k} = \varepsilon_{xx} \sin^2 G_k + 2 \cdot \varepsilon_{xy} \cdot \sin G_k \cdot \cos G_k + \varepsilon_{yy} \cdot \cos^2 G_k \quad (2)$$

Avec:

$G_k, d_k, \Delta d_k$: respectivement sont le gisement, la longueur et la variation de la longueur du coté k .

$\epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}$: composantes du tenseur de déformation suivant les axes de coordonnées.

ϵ_{xy} : composante cisailante.

La détermination de ces trois inconnues ($\epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}, \epsilon_{xy}$) requiert trois observations au minimum, et c'est ainsi que s'impose le choix du triangle comme figure élémentaire. Si, au lieu d'un triangle, on prend un contour polygonal, ces inconnues seront déterminées par les moindres carrés. D'une manière générale, on peut construire l'équation matricielle suivante :

$$H(m,3) \cdot \epsilon(3,1) = u(1,m) \quad (3)$$

Où,

H : matrice des coefficients suivant l'équation (2);

ϵ : vecteur des composantes ($\epsilon_{xx}, \epsilon_{xy}, \epsilon_{yy}$);

u : vecteur des élongations unitaires de chaque côté du triangle ($m=3$) ou polygone ($m>3$) considéré.

La représentation de la déformation nécessite le calcul des composantes principales maximale e_1 et minimale e_2 à l'intérieur de chaque surface élémentaire (Million, 1984; Pagarete et al., 1990) définies par :

$$e_1 = \frac{\Delta + \gamma}{2}, e_2 = \frac{\Delta - \gamma}{2}.$$

Avec:

$$\Delta = \epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} \text{ et } \gamma = \sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_2^2}.$$

Où, $\gamma_1 = \epsilon_{xx} - \epsilon_{yy}$ et $\gamma_2 = 2 \cdot \epsilon_{xy}$.

Le calcul du gisement des composantes e_1 et e_2 est obtenu par les relations suivantes :

$$\theta_1 = \frac{1}{2} \arctg\left(\frac{-\gamma_2}{\gamma_1}\right)$$

$$\theta_2 = \theta_1 + 90^\circ$$

Le tenseur de déformation est divisé en deux parties: le *divergent* et le *déviateur* (Million, 1993). Le divergent caractérise la dilatation ou la compression d'un corps (surface élémentaire) et se calcule par la demi somme des composantes principales du tenseur. Par contre, le déviateur (partie antisymétrique du tenseur) caractérise le cisaillement et se calcule par la demi différence des composantes principales du tenseur.

3.2 Représentation des erreurs sur les tenseurs des déformations par la méthode de Monté Carlo

Habituellement, le calcul des erreurs commises sur l'estimation des éléments du tenseur de déformation (e_1, e_2, θ), se fait en utilisant la loi de propagation des erreurs (Pagarete et al, 1990). Cependant, on peut résoudre le problème d'une autre façon. L'idée générale est de construire un ensemble d'axes de tenseurs de déformation en perturbant les mesures. Les extrémités de ces axes sont normalement distribuées autour du tenseur *non perturbé* et

forment ainsi un nuage de points dont la dispersion des solutions perturbées donne une idée de la rigueur de la solution non perturbée.

Supposons qu'on perturbe pseudo-aléatoirement des longueurs $d_k^{(1)}$ correspondantes aux mesures faites sur un polygone du réseau à une époque $t^{(1)}$, de telle sorte que la dispersion de chacune d'entre elles suive la loi normale de valeur moyenne $d_k^{(1)}$ et d'écart type $\sigma d_k^{(1)}$. Ensuite, des perturbations analogues sont générés pour les longueurs $d_k^{(2)}$ de l'époque $t^{(2)}$, associées à des écarts type $\sigma d_k^{(2)}$. On peut calculer des variations simulées des longueurs du polygone, telles que :

$$\Delta d_k^s = d_k^{(2)s} - d_k^{(1)s} \quad (k=1, 2, \dots, m) \quad (4)$$

l'exposant (s) désigne la simulation.

Les valeurs perturbées Δd_k^s serviront à la résolution du système (3), d'où les nouvelles solutions ε nous permettront de déterminer des nouvelles valeurs pour e_1 , e_2 et θ . Ainsi, la représentation graphique des tenseurs de déformation simulés conduit, dans chaque polygone, à un nuage de points autour de chaque composante non perturbée (Million, 1993) .

4. APPLICATION ET DISCUSSION

Le réseau de surveillance pour l'observation des mouvements horizontaux, figure (1), se situe à l'intérieur du réseau sismique de la région de Chelif (ex. El-Asnam) considérée comme zone la plus active en Algérie. Il est limité entre ($1^\circ 24'$ et $1^\circ 36'$ Est) en longitude et ($36^\circ 07'$ et $36^\circ 15'$ Nord) en latitude et il est mis en place pour encadrer la faille inverse à l'origine du mémorable séisme du 10 octobre 1980 et évaluer l'évolution de la déformation du terrain environnant de cette faille (Ruegg et al., 1982).

Le réseau considéré est constitué de 12 points dont 02 points d'appui et 10 points de surveillance. Il est observé par trilatération dans deux campagnes d'observations en Juin 1988 et en Avril 1992 (travaux entrepris par le CRAAG).

La majorité des côtés mesurés varient entre 4.5kms et 7.3kms et la valeur modale étant de 6kms.

Les distances entre les points du réseau ont été mesurées avec le distance mètre (Di20) de précision de $(5\text{mm} \pm 5.10^{-6}.D \text{ (m)})$. Elles sont corrigées des effets météorologiques et réduites au plan de projection UTM associée à l'ellipsoïde de référence Clarke 1880A du datum NS-59.

(Nord Sahara-59)

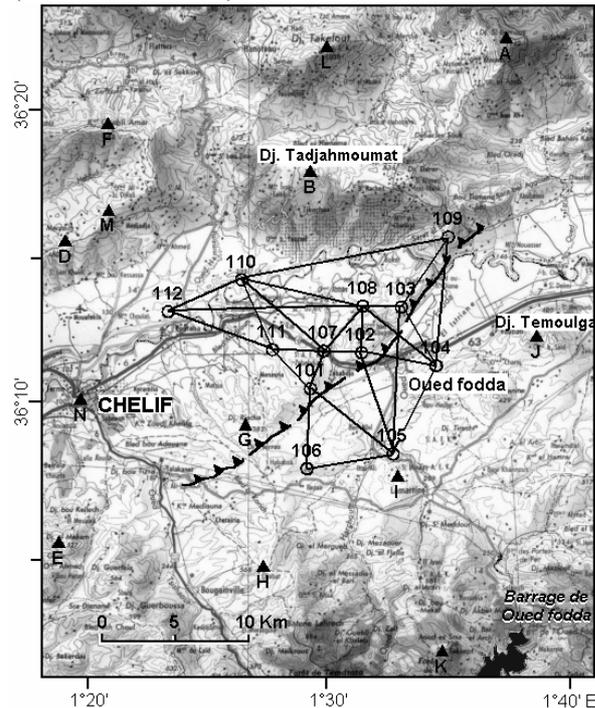


Figure 1. Réseau de surveillance sismique de la région de Chelif sur un extrait de carte au 1/200000 - type 1960

L'ajustement des coordonnées des points du réseau relatif aux deux campagnes d'observations est effectué par la méthode des moindres carrés. Le canevas d'appui (réseau de référence) est constitué des stations 105, 106.

La déformation du réseau est représentée par les tenseurs moyens de déformation à l'intérieur de chaque triangle choisi comme surface élémentaire, voir figure (2).

La figure (2) montre une prédominance à la compression bien que les composantes de dilatation dans la partie Est soient importantes.

Cette tendance à la compression est assez fidèlement représentée par les triangles traversant la faille. Les composantes principales moyennes des tenseurs de déformations indiquent une tendance globale de raccourcissement NW-SE analogue à celui déduit par les observations tectoniques (Meghraoui, 1982) ou par les mécanismes focaux (Cisternas et al, 1982).

La présence de failles distensives sur le compartiment chevauchant, zone où les mouvements sont généralement compressifs est due selon M.Meghraoui et H.Philip à une extension extrados et à des effets gravitaires.

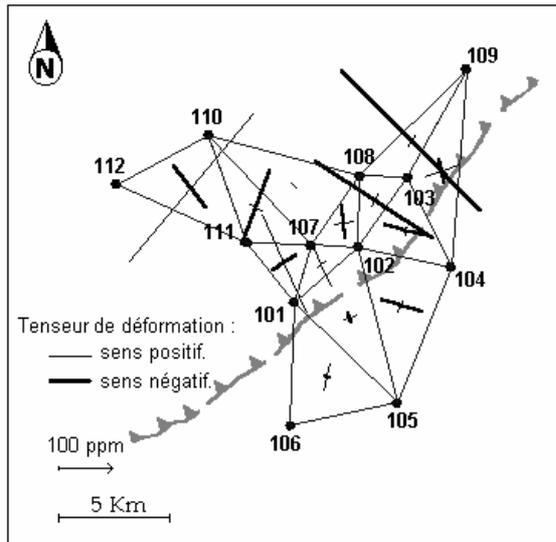


Figure 2. Tenseurs de déformation à l'intérieur du réseau de surveillance sismique de la région de Chelif.

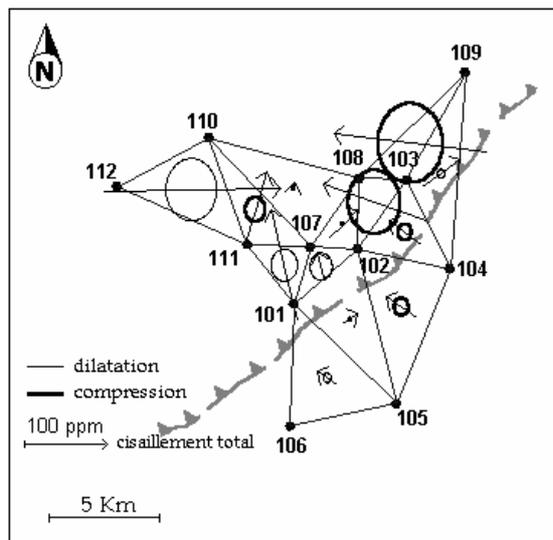


Figure 3. Dilatation et compression des surfaces élémentaires (triangles) du réseau.

De la même manière la figure (3) illustre les zones de déformation qui ont subi des dilatations et des compressions. Les cisaillements totaux de ces zones sont représentés par des vecteurs proportionnels à leurs valeurs. Cette période donne des valeurs de « cisaillement total » d'après la méthode de Franck (1966) assez intenses.

Les directions moyennes de cisaillement sont globalement NW-SE. De tels résultats confirment l'hypothèse émise par Ouyed (M.Ouyed 1981 et M.Ouyed et al 1983). Hypothèse qui consiste en l'existence de 2 failles de coulissage dextre de direction NW-SE expliquant le

décalage entre le segment central et le segment SE de la faille. Les directions NW-SE se retrouvent de part et d'autre de la faille.

La figure(4) est obtenue après 100 simulations de Monté Carlo des calculs des tenseurs, où chaque point correspond à une composante du tenseur simulé.

On distingue deux types de régions, La première région présente des nuages de points qui débordent largement sur les composantes du tenseur non- perturbé et ne permettant pas de distinguer entre chacune des deux directions principales, comme par exemple les zones intérieures aux triangles (101-102-105 et 107-108-110, ...). Ces régions peuvent être considérées comme stables dans la limite des erreurs sur les mesures.

la deuxième présente des tenseurs avec des composantes de valeur assez élevée. Dans cette région, les nuages de points ne recoupent qu'une partie des segments correspondants à la solution non- perturbée et on peut considérer ces tenseurs de déformation comme significatifs, c'est le cas des zones intérieures aux triangles (112- 110- 111, 103- 104- 109,102- 103- 108, 101- 111- 107, 102- 104- 105 , etc..).

ceci est confirmé par les tests de stabilité effectués sur ces triangles. Prenons comme exemple le triangle 102- 103- 108 , le résultat du test du χ^2 calculé nous donne une valeur de 12.135 et en nous référant à la table du χ_0^2 pour 3 degrés de liberté et pour une probabilité P= 99 % la valeur lue est de 11.13.

ce qui nous donne une valeur théorique inférieure à la valeur expérimentale :

$$\chi_0^2 < \chi^2.$$

Ceci nous permet d'affirmer avec un coefficient de confiance égal à 99 % qu'il y a eu un déplacement significatif évident des sommets du triangle considéré entre les deux époques de mesure.

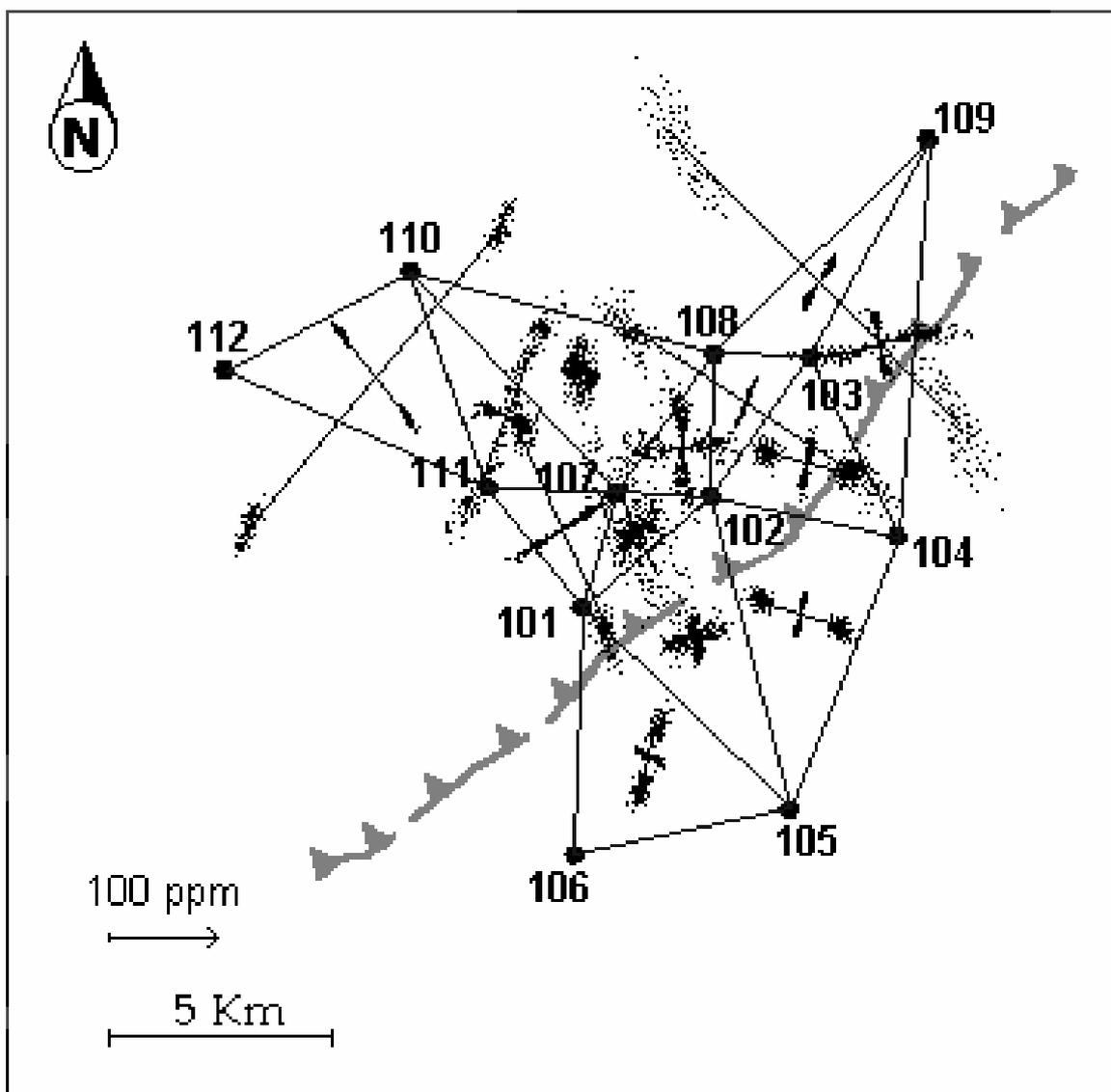


Figure 4. Composantes principales des tenseurs de déformation des triangles du réseau de surveillance de la région de Chelif correspondant à la période (Juin 1988 - Avril 1992). Les nuages de points représentent les domaines d'erreurs obtenus avec 100 simulations Monté Carlo, prenant en compte un écart type sur chaque côté de 2cm, à partir de l'estimation de la précision sur le réseau par ajustement en moindres carrés.

5. CONCLUSION

En plus des test statistiques assiques, L'application de la méthode de Monté Carlo dans l'étude des déformations planimétriques de la région de Chelif nous a permis de fournir une représentation visuelle simultanée des tenseurs de déformation et des erreurs sur leur détermination. Elle a mis en évidence la détection des zones stables et de ceux affectés par des mouvements. De plus Il a été aussi mis en évidence une déformation post sismique

significative au niveau du segment central de la faille principale qui peut être considérée comme un facteur préséismique à ne pas négliger.

REFERENCES

- C. Million (1993): *Les bases du calcul du tenseur de déformation et du tenseur d'indécision*, Revue Géotop de ESGT N°128-Mars 1993.
- C. Million (1984): *Conséquences de la précision des observations sur l'exploitation des mesures de mouvements des sols et des ouvrages*, Revue ESGT N°95-Décembre 1984.
- J. Pagarete, 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.
- M. Kasser et C. Thom (1995) : *Étude des déformations dans un réseau géodésique par emploi de tenseurs de déformations régulièrement répartis*.
- J. C. Ruegg, 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.
- P. Xu et E. Grafarend (1995) : *A multi-objective second-order optimal design for deforming networks*. Geophys. J. Int. (1995) 120, pp 577-589.
- S. Touam (1997) : *Contribution du GPS à l'étude géodynamique de la Méditerranée occidentale*. Thèse de Magistère, CNTS - Arzew, 1997.

CONTACTS

A. Merbah
Centre de Recherche en Astronomie
Astrophysique et de Géophysique (CRAAG), B.P.63 Alger
ALGÉRIE

B. Gourine, S. Kahlouche and B. Ghezali
Centre National des Techniques Spatiales (CNTS), B.P. 13
31200 Arzew
ALGÉRIE

M. Meghraoui
Institut de Physique du Globe de Strasbourg (IPGS)
Strasbourg
FRANCE

M.J Sevilla
Instituto de Astronomía y Geodesia (IAG- CSIC)
Facultad de Matemáticas
Universidad Complutense
28040 Madrid
ESPAÑA
Email: mjsevilla@mat.ucm.es

TS 43 – Deformation Measurement and Analysis

11/11

A. Merbah, B. Gourine, B. Ghezali, S. Kahlouche M. Meghraoui and M.J Sevilla

TS43.7 Evaluation et Interpretation des Deformations Horizontales et de leurs Erreurs sur un Réseau de Surveillance Sismique

From Pharaohs to Geoinformatics
FIG Working Week 2005 and GSDI-8
Cairo, Egypt April 16-21, 2005