

2nd FIG Regional Conference and 10th Anniversary of ONIGT
Marrakech, Morocco, Decembre 2-5, 2003

Contribution à la Détermination des Déplacements Horizontaux Récents et des Paramètres de Tension des Plaques Africaine et Eurasienne dans l'Ouest Méditerranéen par GPS, pour la période 1997 - 2003

Présentée par:

R. Azzouzi, Prof. Assistant à la Filière de Formation en Topographie IAV Hassan II

En collaboration avec :

Prof. A. B. Rimi , Dpt de la Physique du Globe, Université Med V Rabat

Prof. M. Ettarid et Prof. El H. Semlali, Filière de Formation en Topographie IAV
Hassan II

1

PLAN DE L'EXPOSE

Introduction

Problématique

Objectif de la recherche

Approche méthodologique

Étude expérimentale

- Etablissement du réseau GEOGM
- Les campagnes GPS
- Résolutions et compensations
- Les résultats préliminaires

Conclusions et Recommandations

2

Introduction

➤ Position privilégiée:

Sur la plaque africaine et la ligne de frontière par rapport à la plaque eurasiennne;
Activités sismiques appréciables.

➤ Modèles globaux de mouvement des plaques

- RMI (Minster et al., 1974) ;
- RM2 (Minster et al., 1978) ;
- NUVEL 1 (DeMets et al., 1990);
- NNR-Nuvel-1A (DeMets et al., 1994).

➤ Les investigations géologiques et géophysiques prévoient un rapprochement entre les deux plaques.

3

Problématique

- Cette contribution comporte une étude sur l'utilisation du GPS pour des fins géodynamiques en Méditerranée Occidentale.
 - A partir des observations répétées GPS sur un réseau marocain lié à celui de l'IGS et EUREF:
 - Déterminer les mouvements.
 - Détecter les déformations tectoniques.
- Rem: De part et d'autre de la ligne de frontières entre les deux plaques africaine et eurasiennne

4

Méthodes utilisées

- Technique de la géodésie de précision GPS (précision absolue pouvant atteindre l'ordre du 1/10 mm ou même 1/100 mm sur les grandes lignes de base).
- Mesures géodésiques de rattachements.
- Programmes informatiques de traitement, d'analyse et d'interprétation:
 - Logiciels GPS scientifiques: GAMIT/GLOBK, BERNESE
 - Logiciels GPS commerciaux: WINPRISM, TRIMBLE GEOMATIC OFFICE, SKY PRO de LEICA
- Programmes pour le calcul des déformations et des déplacements.

5

Objectifs de l'étude

- Mesurer , analyser et étudier la cinétique des plaques et leurs déformations.
- Contribuer globalement à l'étude géodynamique de la région.
- Etudier les mouvements et les déformations de l'écorce terrestre en un certain nombre de points du territoire national en utilisant des mesures géodésiques GPS répétées.
 - Détecter et évaluer les déformations et les mouvements globaux causées par le déplacement des plaques tectoniques.
 - Mesurer l'augmentation de tension et son impact sur l'activité sismique;
 - Contribuer à l'étude de l'activité des failles majeures.

6

Objectifs de l'étude (Suite)

- Contribuer à une bonne connaissance de l'occurrence, de l'amplitude et de la prévision des séismes.
- Contribuer à garantir plus de sécurité pour tout projet d'aménagement du territoire:
 - les projets de construction des grands ouvrages (barrages, ponts, centrales électronucléaires...).
 - le plus grand ouvrage qui est celui de la liaison fixe entre l'Europe et l'Afrique à travers le Détroit de Gibraltar.

7

Approche méthodologique

Une recherche bibliographique.

Tectonique des plaques
Déformations terrestres
Géodynamique de la Méditerranée Occidentale, surtout marocaine
Etude des méthodes de détermination des paramètres de tension
Présentation du système GPS
Etude des méthodes de détermination des mouvements

Une étude expérimentale.

Mise en place des stations GPS géodynamique marocaines.

. Planification et matérialisations;

. Observations, traitements et compensations.

Evaluation des déplacements globaux des deux plaques.

Evaluation des déplacements et des paramètres de tension.

8

La tectonique des plaques

La dérive des continents avec Wegener (1912)
L'expansion des océans avec Hess (1962)
La tectonique des plaques avec Le Pichon (1968)

Les déformations terrestres

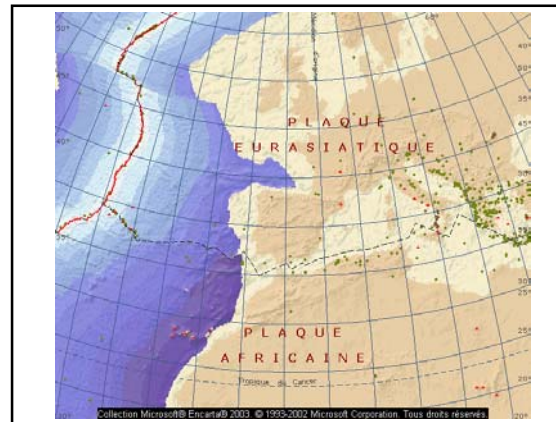
- Globales
- Régionales
- Locales

9

APERCU SUR LA GEODYNAMIQUE DE LA MEDITERRANEE OCCIDENTALE

- Failles transformantes ou de coulissage, faille de Gloria à l'Ouest de Gibraltar.
- Failles normales ou distension de la dorsale médio océanique de l'Atlantique (Triple jonction des Açores).
- Failles inverses ou de compression (le long de la ligne Gibraltar – Sicile).
- Dominée surtout par l'ouverture de l'Atlantique depuis 200 Millions d'années
- Collision entre la plaque Africaine et Eurasienne: orogenèse des Sierras Ibériques, des Pyrénées, des Alpes ...

10



La géodynamique marocaine

- Compression très lente due à la rotation de l'Afrique autour d'un pivot marocain.
- Collision entre les plaques Eurasienne et Africaine.
- Orogenèse des Cordillères Bétiques et du Rif.
- Oogenèse des Chaînes de l'Atlas, résultantes principales de l'extension atlantique (E-W) et de la compression (N-S).

12

Présentation du système GPS

- Le système NAVSTAR, GPS est un système de positionnement par satellites conçu et mis en service par le USDoD (Département de la défense des USA).
- Détermination du temps de la position et de la vitesse de la station.
- Système conçu pour toutes les conditions.
- Localisation globale (WGS 84) et en 3-D.
- Constellation actuelle de 28 satellites.

13

Présentation du système GPS

(suite)

- Période de 12 heures.
- Inclinaison de 55° par rapport au plan équatorial.
- Une durée de vie en moyenne de 10 ans.
- Visibilité au dessus de l'horizon entre 5 et 7 heures.
- les satellites émettent des messages vers les récepteurs et reçoivent d'autres de la part des stations de poursuite du système.
- Différents récepteurs à plusieurs usages.
- Poursuite des satellites NAVSTAR en parallèle par le système civil international IGS.

14

Quelques applications géodynamiques du GPS

- Djibouti pour l'étude du problème "Rifting" .
- Roumanie, en Turquie et à l'Ouest des Alpes.
- L' Arc Hellénique Ouest;
- Tokai au Japon .
- Taiwan.
- Etats Unies.
- Australie.
- etc..

15

Etude expérimentale

Les campagnes GPS

1. Etablissement de l'avant projet (première campagne débutant en l'an 1998).
2. Reconnaissance et matérialisation (première campagne).
3. Conception du réseau et observations des campagnes couvrant la période des années 1999 à 2003:
 - Les lignes de base du réseau entre une à plusieurs centaines de kilomètres.
 - Les récepteurs GPS bi-fréquences .
 - Le mode statique, avec des mesures continues, quasi continues de 72 heures.
 - Les éphémérides précises.
4. Rattachement de points par GPS.

16

Modélisation mathématique et résolution des systèmes

- Modèle mathématique.
- Ligne de base-distance déduite des observations GPS.
- Déformation des polyèdres sur cette base.
- Résolutions par moindres carrées (variation des paramètres) ou par usage des inverses généralisés

17

Calcul des paramètres de tension

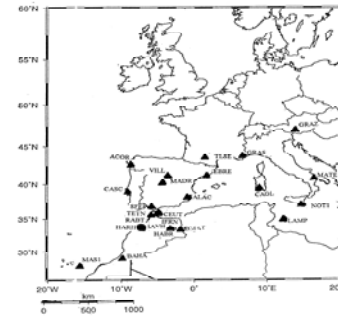
Description sommaire des méthodes de détermination des paramètres de tension:

- Méthode d'observations de Frank (1966)
- Généralisation de la méthode de Frank par Prescott (1976)
- Méthode des coordonnées intérieures Brunner(1979)
- Méthode des coordonnées intérieures et extérieures de Brunner et al. (1981)
- Méthode de réduction simultanée Bibby (1982)
- Méthode des éléments finis par Welsch (1983)
- Méthode polynomiale de Chrzanowski et al. (1982)
-

18

GEOGM Réseau GPS Géodynamique de la Méditerranée Occidentale.

19



Réseau GEOdynamique GPS de la Méditerranée Occidentale (GEOGM)

20

24 STATIONS DU RESEAU GEOGM

5 sites observés pour le réseau GEOGM:

IAVH, HARH, BMAT, BAH, HABR

19 Sites observés pour les réseaux IGS ou/et EUREF:

RABT, MATE, GRAZ, GRAS, MADR, ILL, LAMP, MASI, SFER, TLSE, NOTO, CASC, CALG, EBRE, ALAC, ACOR, TETN, IFRN, CEUT

21

Répartition des sites par pays

- 9 sites au Maroc
- 7 sites en Espagne
- 4 sites en Italie
- 2 sites en France
- 1 station en Autriche
- 1 station au Portugal

22

Répartition par plaques

12 stations sur la plaque Africaine.
12 stations sur la plaque Eurasienne.

Remarque : La station NOTO (ou NOT1) se trouvant en Sicile se meut comme une station Africaine.

23

Missions d'observations GPS du réseau GEOGM

1997: Les stations permanentes du réseau IGS et EUREF.

1998: La station IAVH, et les stations permanentes du réseau IGS et EUREF.

1999: Les stations du projet AMIGO, celle de l'IAVH et celles du réseau IGS et EUREF.

2000: La station IAVH, et les stations permanentes du réseau IGS et EUREF

2001: Les stations du projet AMIGO, celle de l'IAVH et celles du réseau IGS et EUREF.

2002: Mission Meseta Occidentale.

2003: Mission Meseta Occidentale;
Mission Meseta Orientale et Moyen Atlas;
Mission Sud du Maroc.

24

LISTE DES SESSIONS D'OBSERVATIONS GPS ET DES CALLS DU RESEAU GEODIOM

RECEPTEUR	Type	Latitude	Longitude	Années																	
				1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008						
ALAC	Recpt EU	39.34	6.49E	Red																	
ALAB	Recpt EU	39.34	6.49E																		
ALBA	Recpt AR	39.09	6.50N																		
ALBL	Recpt EU	39.14	6.49E																		
ALCA	Recpt EU	39.65	6.43W																		
ALCH	Recpt EU	39.70	6.43W																		
ALDA	Recpt EU	40.82	6.48E																		
ALDE	Recpt EU	43.72	6.49E																		
ALDI	Recpt EU	47.67	6.49E																		
ALDO	Recpt AR	33.35	6.50W																		
ALDU	Recpt AR	33.35	6.50W																		
ALDV	Recpt AR	33.35	6.50W																		
ALDW	Recpt AR	33.35	6.50W																		
ALDX	Recpt EU	35.50	6.50E																		
ALDY	Recpt EU	35.50	6.50E																		
ALDZ	Recpt EU	35.50	6.50E																		
ALEA	Recpt EU	37.70	6.50W																		
ALFB	Recpt EU	40.85	6.70E																		
ALFC	Recpt AR	36.20	6.49E																		
ALFD	Recpt AR	33.35	6.50W																		
ALFE	Recpt EU	36.46	6.20W																		
ALFH	Recpt EU	43.36	6.49E																		
ALFI	Recpt EU	40.44	6.50W																		
ALFL	Recpt AR																				
ALFU	Recpt EU																				
ALFV	Recpt EU																				
ALFW	Recpt EU																				

Red: Calculé par LAREG-KIN France ITRF2000 Green: Extrapolations faites par SCOPAC USA
 Blue: Calculé par MIT-USA Pink: KIN France continu Yellow: SGM-Monitors Et Cartographie ANSP-FCO

Traitement des lignes de base GPS

- les éphémérides précises IGS (SP3).
- Les calculs se réfèrent au système ITRF 2000.
- Iono free float combiné à l'usage des récepteurs bifréquences pour éliminer l'effet ionosphérique.
- Fixation des ambiguïtés.
- Utilisation du modèle troposphérique de Hopfield.
- Angle d'élévation de 10 degrés.
- Intervalle d'enregistrement considéré 30 secondes.
- Les fichiers de coordonnées précises IGS (SNX)...

Compensation libre

- Aucune contrainte.
- Contrôle de la géométrie interne du réseau.
- Examiner la cohérence des observations entachées d'erreurs.
- Éliminer les lignes de base hors tolérance.
- Permettre de qualifier les observations.

Compensation avec contraintes

- Fixer en premier lieu un seul point de référence IGS;
- Fixer d'autres points toujours IGS connus et calculés par ce service avec une précision de l'ordre de 2 mm.
- Intégrer le réseau calculé au référentiel ITRF2000

REPERE DE REFERENCE INTERNATIONAL ITRF2000

Le repère ITRF est réalisé par l'AIG avec la contribution de l'IERS:

- Géocentrique, origine confondue avec le centre de masse de la Terre.
- Echelle définie par la vitesse de la lumière dans le vide.
- L'orientation alignée sur celle du modèle géologique NNR-NIUVEL-IA d'Argus et Gordon (1991).
- Axe Z dirigé vers le CIO.
- Plan (OX, OZ) = plan du méridien international.
- Réalisé grâce à un réseau global de stations d'observations de géodésie spatiale (VLBI, SLR, LLR, Système Doppler, GPS, GLONASS, DORIS..).
- Constitué de plus de 800 stations localisées sur environ 500 sites.

Passage entre systèmes de référence géodésiques

- Il existe des paramètres de transformation entre les systèmes ITRF-YY, WGS84.
- Transformation entre un système local et le système GPS WGS84

$$X_{Local} = X_{WGS84} + T + \begin{pmatrix} D & -R_3 & R_2 \\ R_3 & D & -R_1 \\ -R_2 & R_1 & D \end{pmatrix} X_{WGS84}$$

- Où T : Vecteur de translation
- D : Echelle
- R : Rotation autour de l'un des trois axes X, Y, Z.

Déplacements des stations

$$X_i = X_{i0} + (t - t_0) \frac{dX_{i0}}{dt} + S$$

X_{i0} : Position du point P à l'instant t_0

$\frac{dX_{i0}}{dt}$: Vitesse de déplacement, $= V_{\text{plaque}} + V_{\text{glace}} + V_r$

V_{plaque} : vitesse horizontale des plaques

Avec V_{glace} : Vitesse verticale due au rebond post-glaciaire

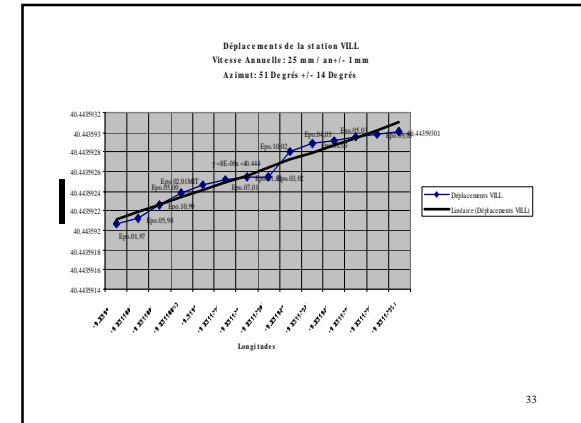
V_r : Vitesse résiduelle.

S : Corrections des effets temporels non uniformes, tels l'effet des marées terrestres (30 cm), des surcharges océaniques (quelques centimètres)...

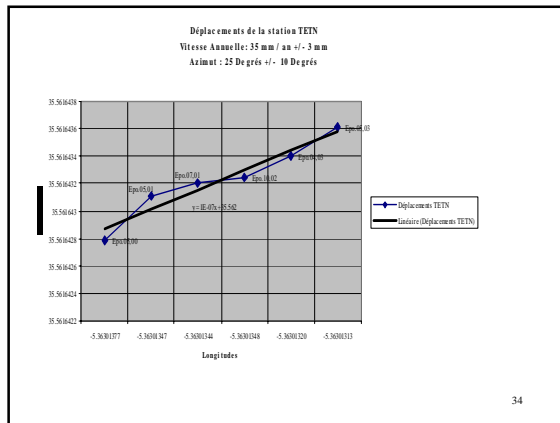
31

Tableau des déplacements des stations du réseau GEOGM											
Méthode directe											
Station	Latitude	Différence de latitudes	Différence de longitudes	Durée	Déplacement en latitudes	Déplacement en longitudes	Vitesse	Ecart-type	Azimuth	Ecart-type	
	Degrés	10 ⁻⁶ Degrés	10 ⁻⁶ Degrés	an	mm	mm	mm/an	mm/m	Degrés	Degrés	
ACOR	43.40	139	171	6.5	24	21	32	2	42	11	
ALAC	38.30	98	167	6.75	16	22	27	2	53	12	
BAHA	30.05	32	74	2.25	16	37	15	4	67	8	
BMAT	33.88	42	77	2.5	19	28	34	4	57	10	
CAGL	39.14	90	173	6.75	15	28	32	1	63	11	
CASC	38.69	102	110	6.75	17	14	22	2	40	15	
CELT	35.89	64	99	2	36	33	48	5	43	7	
EBRE	40.82	106	195	6.5	18	25	31	2	54	11	
GRAS	43.75	90	173	6.75	15	21	25	1	54	13	
GRAZ	47.27	83	181	2	14	21	25	3	56	13	
HABR	33.23	59	92	6.5	29	21	36	2	36	10	
IAPH	33.88	56	158	2.25	9	22	23	4	36	14	
IFRN	33.54	31	44	6.75	11	14	18	2	50	19	
LAMP	35.50	102	154	3	17	21	27	3	39	12	
MADR	40.43	109	98	6.75	18	12	22	1	34	16	
MASI	27.76	100	112	6.75	16	16	23	1	45	15	
MATE	40.65	107	192	6.75	18	24	30	1	54	11	
NOTO	36.88	16	79	6.75	5	20	21	1	76	16	
NOT1	36.88	50	40	3.5	17	11	20	1	32	17	
RABT	33.99	41	46	2.75	17	16	23	2	43	14	
SFER	36.46	99	122	6.75	16	16	23	1	55	15	
TETN	35.56	85	48	3	31	14	35	3	25	10	
TOUL	43.56	12	76	3.5	4	17	18	2	78	19	
TLSE	43.96	36	57	2.25	18	20	27	2	49	13	
VILL	40.44	94	192	6.75	15	19	25	1	51	14	

32



33



34

Calculs des paramètres de tension de la station 1 (IAVH) vers les 12 autres de la plaque Eurasienne

Station	Changement Max (rad/par an)		Azimut (degrés)	Dilatation par an
	De	Vers		
1	1	.55E-07	84.3	-1.0E-07
1	2	.38E-06	84.3	-7.1E-07
1	3	.22E-06	84.3	-4.0E-07
1	4	.22E-06	84.3	-4.0E-07
1	5	.49E-06	84.3	-9.1E-07
1	6	.71E-06	84.3	-1.3E-06
1	7	.82E-06	84.3	-1.5E-06
1	8	.11E-06	84.3	-2.0E-07
1	9	.25E-07	80.1	-1.0E-07
1	10	.25E-07	80.1	-1.0E-07
1	11	.44E-07	80.1	-1.7E-07

CALCULS DES PARAMETRES DE TENSION DE PART ET D' AUTRE DE LA LIGNE DES FRONTIERES ENTRE LES PLAQUES AFRICAINE ET EURASIENNE EN MEDITERRANEE OCCIDENTALE. RESEAU GPS GEOGM (1997-2003)

Nombre sites Afrique	Nombre sites Eurasie	Cisaillement Max (rad par an)	Azimut moyen (degrés)	Dilatation moyenne (par an)
(2003) 8	11	.42E-06	83°.9	-.4E-07

Calculs Reilly et al. (1992) .12E-06 87°/267' -.7E-07

Reilly et al. (1992) Geodetic determination of crustal deformation across the Strait of Gibraltar, Geophysical J. Int. 111, pp 391-398

Rem. : - Calculs préliminaires
- Deux sessions d'observations GPS concernées.

36

CONCLUSIONS et RECOMMANDATIONS

- Confirmer ou infirmer les investigations géophysiques par les observations in situ GPS.
- Déterminer et d'une façon précise les déplacements dans l'Ouest de la Méditerranée Occidentale.
- Impact de la détermination des paramètres de tension sur les séismes.
- Mieux définir le modèle géophysique dans la région.
- Intégrer le réseau GEOGM dans le nouveau réseau géodésique GPS Marocain.
- Intégrer le réseau GEOGM dans un réseau GPS régional, Africain, Européen et même international.

37



Merci pour votre attention



39