

Tectonique

Mouvements actuels des blocs tectoniques dans l'arc Bético-Rifain à partir des mesures GPS entre 1999 et 2005

Abdelilah Tahayt^{a,b}, Taoufik Mourabit^{a,1}, Alexis Rigo^{b,*}, Kurt L. Feigl^{b,2},
Abdelali Fadil^c, Simon McClusky^d, Robert Reilinger^d, Mostafa Serroukh^a,
Abdelouahed Ouazzani-Touhami^a, Driss Ben Sari^c, Philippe Vernant^{d,3}

^a Département de géologie, faculté des sciences, université Abdelmalek-Essaâdi, M'hannech II, B.P. 2121, 93002 Tétouan, Maroc

^b UMR5562/DTP, observatoire Midi-Pyrénées, 14, avenue Édouard-Belin, 31400 Toulouse, France

^c Département de génie civil, école Mohammadia d'ingénieurs, B.P. 765, avenue Ibn-Sina, Rabat, Maroc

^d Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology,
42, Carleton Street, Cambridge, MA 02142, USA

Reçu le 15 mai 2007 ; accepté après révision le 25 février 2008

Disponible sur Internet le 18 avril 2008

Présenté par Jacques Angelier

Résumé

Les vitesses mesurées par GPS, combinées avec les données de sismologie, ont permis d'évaluer la situation sismotectonique actuelle des différents domaines structuraux de l'arc Bético-Rifain (Maroc et Ibérie). Les mouvements sont asymétriques dans la région d'Alboran, accommodant la convergence entre l'Afrique (Nubie) et l'Eurasie. Alors que les Bétiques rattachées à l'Ibérie se déplacent vers le sud-est par rapport à l'Afrique, le Rif se subdivise en trois blocs distincts : (1) le bloc de Tanger se déplaçant vers le sud-est, (2) le bloc central du Rif se déplaçant vers le SSW et (3) le bloc oriental du Rif, avec une rotation dans le sens horaire. Les mouvements s'amortissent des nappes du Rif vers l'avant-pays. **Pour citer cet article** : A. Tahayt et al., C. R. *Geoscience* 340 (2008).

© 2007 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Abstract

Present-day movements of tectonic blocks in the Betic–Rif Arc from GPS measurements 1999–2005. GPS velocities and seismicity across the Betic–Rif Arc structural domains (Morocco and Iberia) provide a basis to evaluate present-day seismotectonic processes between different deformation belts. The results show asymmetric movements in the complex Alboran system accommodating the convergence between the African (Nubian) and Eurasian plates. While the Betic Mountains are attached to Iberia, moving toward the southeast with respect to Africa, the Rif is divided into three blocks with distinct displacements relative

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : rigo@ntp.obs-mip.fr (A. Rigo).

¹ Adresse actuelle : Département de géologie, faculté des sciences et techniques, université Abdelmalek-Essaâdi, B.P. 416, route de Ziaten, Km 10, Tanger, Maroc.

² Adresse actuelle : Department of Geology and Geophysics, University of Wisconsin-Madison, 1215 W. Dayton St., Madison, WI 53706-1692 États-Unis.

³ Adresse actuelle : Laboratoire Géosciences-Montpellier, CC060, université Montpellier-2, place Eugène-Bataillon, 34095 Montpellier cedex 5, France.

to Nubia: (1) the Tangier block moving southeastward, (2) the Central Rif block moving SSW, and (3) the Oriental Rif block undergoing clockwise rotation. GPS-derived motions decrease in rate from the Rif nappes complex to the foreland. **To cite this article:** A. Tahayt et al., *C. R. Geoscience* 340 (2008).

© 2007 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Mots-clés : GPS ; Sismotectonique ; Rif ; Alboran ; Bloc ; Tectonique actuelle

Keywords: GPS; Seismotectonics; Rif; Alboran; Block; Present-day tectonics

Abridged English version

The present-day tectonic setting in the western Mediterranean is the result of a complex orogenic history, which is still a matter of debate. Models using geological and geophysical data have been developed to investigate the driving forces of tectonic movements (e.g. [2,6,9,11,19,25,36,37,40,49,54]). The combination of GPS and seismology can provide information on relative motions between different structural areas, and the aseismic or seismic character of faults. Gravity data can be interpreted in terms of density distributions that also reflect tectonic processes [31,34,44]. Models to explain the present-day situation in the Alboran region can be divided into three principal categories: (1) delamination and roll-back beneath the Betics and Rif [9,20], (2) subduction to the east beneath the Gibraltar Arc [27], and (3) the coexistence, as two potential driving mechanisms, of an ENE–WSW extension in the Alboran basin, induced by dynamic processes in the upper mantle, and a westward drag related to the anti-clockwise-rotating African plate [53]. In this paper, we present results from six years (1999–2005) of GPS measurements covering all the structural domains of the Betic–Rif Arc. We combine them with seismological and gravity data to constrain the relative block motions and dynamics of the Nubia–Iberia plate interaction.

The seismotectonic framework of the region is characterized by generally diffuse seismicity, with clusters of important earthquakes: (1) Al Hoceima, (2) Melilla-Nador, (3) Almeria, and (4) Malaga-Granada (Fig. 1). The accommodation of convergence between the Africa and Eurasia plates in the Alboran region is accomplished mostly within strike-slip faults and/or low-angle reverse faults [1,39]. The velocity of convergence in this region estimated from geological and geodetic data ranges between 3 and 5 mm/yr [8,14,38], although the geodetic data indicate more westerly motion of Africa relative to Eurasia than the geological estimates.

The Moroccan GPS network used in this study consists of 28 campaign stations and 4 continuous stations (RABT, TETN, IFRN, and CEUT). Each

campaign station, of which 13 are located in the Rif domain, has been observed between 1999 and 2005 at least three times per 24 hours. Fig. 2 shows the velocity field in the western Mediterranean region with respect to Eurasia. Fig. 3 is the one with respect to Africa. Anomalous movements can be observed in the central Rif, which is moving toward the SSW with respect to Africa. The new results for new stations agree well with earlier results [20].

We consider three transects, as mapped in Fig. 4. In each transect, we plot the horizontal GPS velocity with respect to Africa decomposed into two components: parallel to the direction of the profile and perpendicular to it. Profile P1 (Fig. 5) shows the Central Rif block interactions with all of the Rif domain and the foreland. The Central Rif block is characterized by relatively high velocities (3.4 ± 1.2 mm/yr with respect to Africa) and negative free-air gravity anomalies. P2 (Fig. 6) and P3 (Fig. 7), roughly perpendicular and parallel to the Africa–Eurasia convergence respectively, show the transversal variations between all structural domains of Morocco, the Alboran domain and the Iberia plate. In the light of the new GPS results in the Rif and taking into account the structural character of the region, we discuss a new interpretation of the observed movements. Fig. 8 shows a structural sketch of the present-day situation in the Betic–Rif Arc.

The Central Rif block is moving toward the SSW. Its northwestern limit corresponds to the prolongation of the dextral transform fault of Tetouan [4] to the southwest (region of Larache), where it coincides with the border between the ‘rides préifaines’ and the Gharb basin. We suggest that the Tetouan–Larache trend (T–LF, Fig. 8) is playing the role of an aseismic lateral ramp composed of several right-lateral strike-slip faults, with small thrusting components, inherited from orogenic periods, permitting the movement of the central block nappes toward the SSW. On the other hand, the Tangier block attached to the Gibraltar arc is moving along with the Iberian plate, albeit at a slower rate (1.6 ± 1.2 mm/yr with respect to Africa), toward the southeast. Moreover, the Tangier block (TB) is characterized by a Quaternary uplift with respect to the

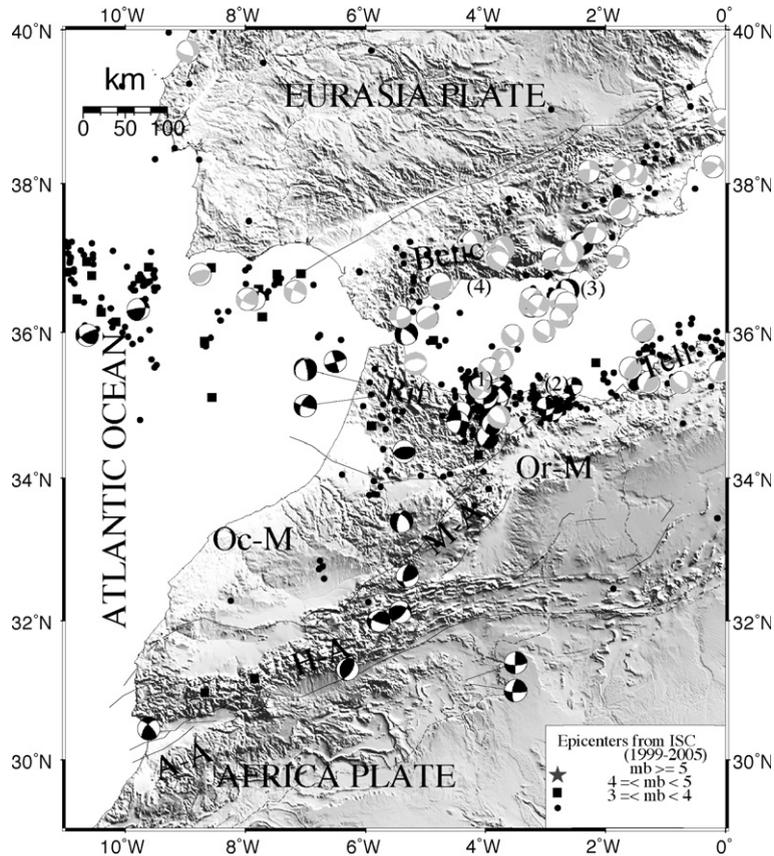


Fig. 1. Contexte sismotectonique de la Méditerranée occidentale ; les mécanismes focaux en gris proviennent de [52] et ceux en noir des catalogues Harvard [28] et IAG [32]. Zones sismogènes : (1) Al Hoceima, (2) Nador-Melilla, (3) Almeria et (4) Malaga-Granada. A-A = Anti Atlas, H-A = Haut Atlas, M-A = Moyen Atlas, Oc-M = Meseta occidentale, Or-M = Meseta orientale. La topographie est établie à partir des données NASA/SRTM [42].

Fig. 1. Seismotectonic setting of Occidental Mediterranean region. Focal mechanisms: grey from [52], black from Harvard [28] and IAG [32] catalogs. Seismogenic zones: (1) Al Hoceima, (2) Nador-Melilla, (3) Almeria and (4) Malaga-Granada. A-A = Anti Atlas, H-A = High Atlas, M-A = Middle Atlas, Oc-M = Occidental Meseta, Or-M = Oriental Meseta. Topography is derived from NASA/SRTM [42].

central block [26,45]. To the east, the Central Rif block is bounded by the Al Hoceima Fault (AF), which is seismically active. A block in the Oriental Rif (ORB), including the GPS site MDAR, could be delimited by the Al Hoceima and Gareb–Kebdana faults (G–KF), characterized by seismic left-lateral strike-slip activity (e.g. [5]). We interpret our observations and earlier geophysical observations in terms of a trans-rotational regime applied to the Oriental Rif block with a clockwise rotation. This clockwise rotation of the eastern Rif block is the result of superimposition of the Nubia–Eurasia convergence and rotation, anti-clockwise rotation imparting a westward motion to the southern boundary of the block and roughly NW–SE convergence imparting an eastward motion to the northern boundary.

Considering the wide range of models proposed for the Betic–Rif Arc, we are challenged to describe all the observations with a single process. In this paper, we

suggest that geodynamic models should combine the compression due to the convergence of Nubia and Eurasia with three essential processes: (1) anticlockwise rotation of Africa, (2) syncollisional extension in the Alboran basin, and (3) deviatoric stresses between blocks from geological heterogeneities. All three of these processes seem to be operating at different spatial and temporal scales across the boundary between the Eurasia and Nubia plates.

1. Introduction

La structure actuelle des différents domaines de l'arc Bético-Rifain est le résultat d'une tectonique polyphasée. La richesse des observations réalisées dans la Méditerranée occidentale a abouti à la proposition d'une large gamme de modèles et d'hypothèses, qui tentent d'expliquer les phénomènes orogéniques et

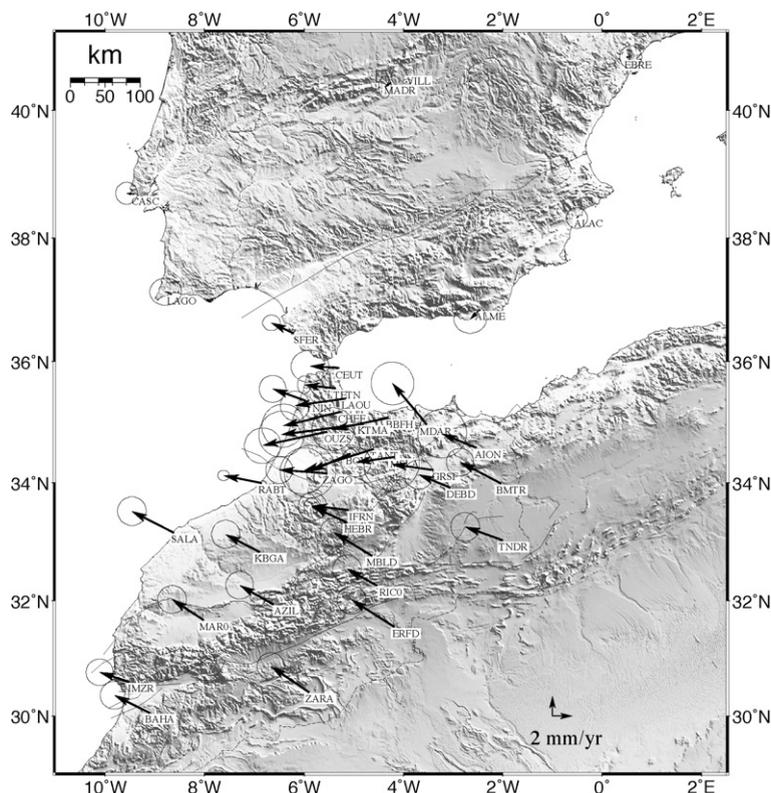


Fig. 2. Champ de vitesses GPS par rapport à l'Eurasie. Les ellipses montrent les incertitudes avec 95% de confiance.

Fig. 2. GPS velocity field with respect to the Eurasia plate. Ellipses delimit the region of 95% confidence.

post-orogéniques dans cette zone. Les principaux modèles se basent essentiellement sur des données géologiques et géophysiques (par exemple, [2,6,9,11,19,25,36,37,40,49,54]).

La surveillance continue ou périodique par GPS pendant plusieurs années permet d'établir le champ de vitesses des mouvements tectoniques, avec une précision millimétrique, sur les mouvements horizontaux. La combinaison du GPS avec la tectonique et la sismologie, selon la disponibilité des données, permet d'identifier les failles actives. Le changement d'intensité et de direction des contraintes appliquées sur des blocs adjacents [46] peut provoquer le blocage de certaines failles, allant même jusqu'à induire l'apparition de nouvelles ruptures ou réactiver d'anciennes failles.

L'accommodation des contraintes peut être effectuée par des failles majeures délimitant des blocs crustaux, ou bien par un ensemble de failles distribuées sur toute une région [55]. La déformation pendant la formation de l'arc de Gibraltar a été partagée entre des structures transpressives (plis et chevauchements) traduisant un raccourcissement nord-sud et des structures extensives (failles normales, décrochements conjugués et struc-

tures mineures de déformation distribuée) indiquant une extension est-ouest [3].

L'anomalie gravimétrique à l'air libre peut apporter des informations clés pour caractériser des blocs lithosphériques en fonction de leur densité. En effet, le gradient de l'énergie potentielle gravitationnelle (GPE) entre des blocs structuraux peut être à l'origine de déplacements aussi bien horizontaux que verticaux [34]. Dans l'arc Bético-Rifain, le contraste du GPE entre le domaine d'Alboran et ses avant-pays (Afrique et Ibérie) est considéré comme un facteur important à l'origine de la subsidence du bassin d'Alboran, ainsi que du raccourcissement nord-sud et de l'extension est-ouest de l'arc au Miocène [44].

Dans cet article, nous présentons les résultats de mesures GPS répétées pendant 6 ans (1999–2005) sur des sites répartis sur les différents domaines structuraux du Maroc septentrional. Vu l'importance des mouvements observés dans le Rif, nous nous focalisons sur cette zone de frontière de plaques. Le but de cette étude est de donner une description quantitative de la cinématique actuelle de cette zone de convergence entre l'Afrique et l'Eurasie. Nous présentons de

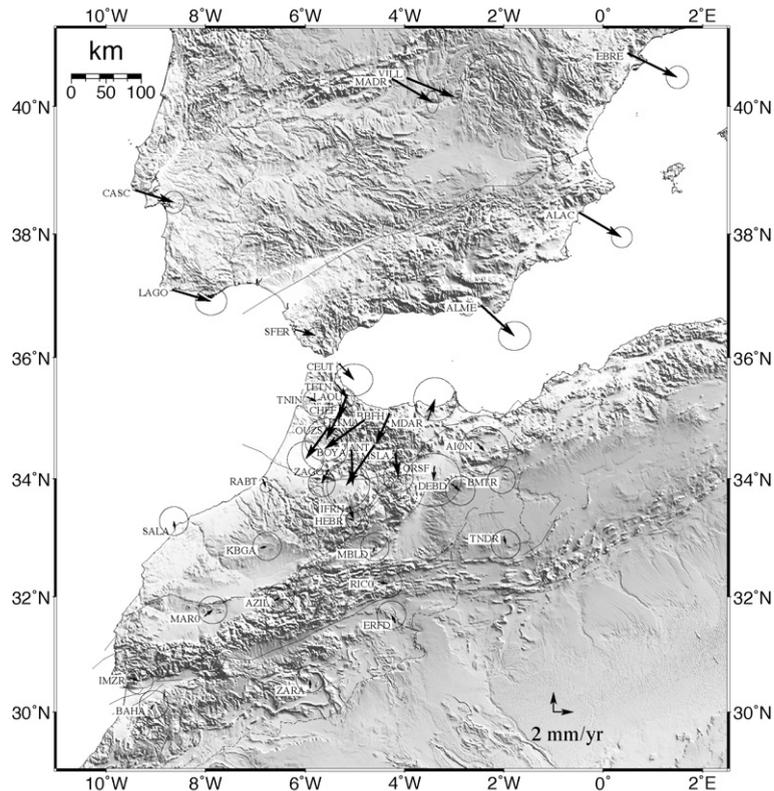


Fig. 3. Champ de vitesses GPS par rapport à l'Afrique. Les ellipses montrent les incertitudes avec 95% de confiance.

Fig. 3. GPS velocity field with respect to the Africa plate. Ellipses delimit the region of 95% confidence.

nouvelles observations GPS dans le Rif, qui viennent compléter le travail de Fadil et al. [20]. Nous tentons d'établir ici le lien entre les déformations observées en surface et, d'une part, l'activité sismique pendant la même période d'acquisition des mesures GPS, d'autre part, les anomalies gravimétriques à l'air libre, pour aider à différencier les blocs crustaux évoqués dans les différents modèles cinématiques régionaux existants. Enfin, nous discutons une nouvelle interprétation des observations.

2. Contexte sismotectonique

Situé à la bordure sud de la Méditerranée occidentale, le Maroc fait partie d'une zone complexe de convergence entre les plaques Africaine et Eurasiatique. Les différentes chaînes de montagnes actuelles (Atlas, Rif, cordillères Bétiques) sont le résultat d'une longue histoire d'interaction complexe entre ces deux grandes plaques tectoniques. Pendant cette histoire, différents blocs crustaux ont été pris dans les processus géodynamiques qui ont affecté cette région. Nous nous limiterons ici à donner un bref aperçu des différents domaines structuraux couverts par notre réseau GPS

marocain, ainsi que les stations GPS permanentes autour du domaine d'Alboran.

Du sud vers le nord, on distingue, en premier lieu, les domaines de l'Anti-Atlas, des Atlas (Haut et Moyen) et des Mesetas (orientale et occidentale), qui ont souvent été considérés comme des blocs solidaires de la partie occidentale de la plaque Africaine (Nubie). Ils sont délimités par des accidents majeurs, dont certains montrent une activité tectonique récente [50]. La discussion sur les mobilités (verticale et horizontale) relatives de ces blocs, depuis le cycle orogénique varisque [23,30] jusqu'à l'Actuel, reste ouverte. Les autres domaines du Nord du Maroc (Rif) et du Sud de l'Espagne (Bétiques) sont liés géodynamiquement au domaine d'Alboran, situé entre l'Afrique et l'Ibérie. Le domaine Bético-Rifain, structuré pendant le cycle alpin [10,40], est découpé en de nombreuses écailles tectoniques très fracturées, avec un grand contraste rhéologique entre ses unités. Vers le sud, les nappes du Rif chevauchent la marge africaine proprement dite. Vers le nord, les nappes des Bétiques chevauchent la marge de l'Ibérie. Dans cette situation, le Rif et les Bétiques sont soumis à des contraintes liées à la convergence oblique de direction NW–SE entre

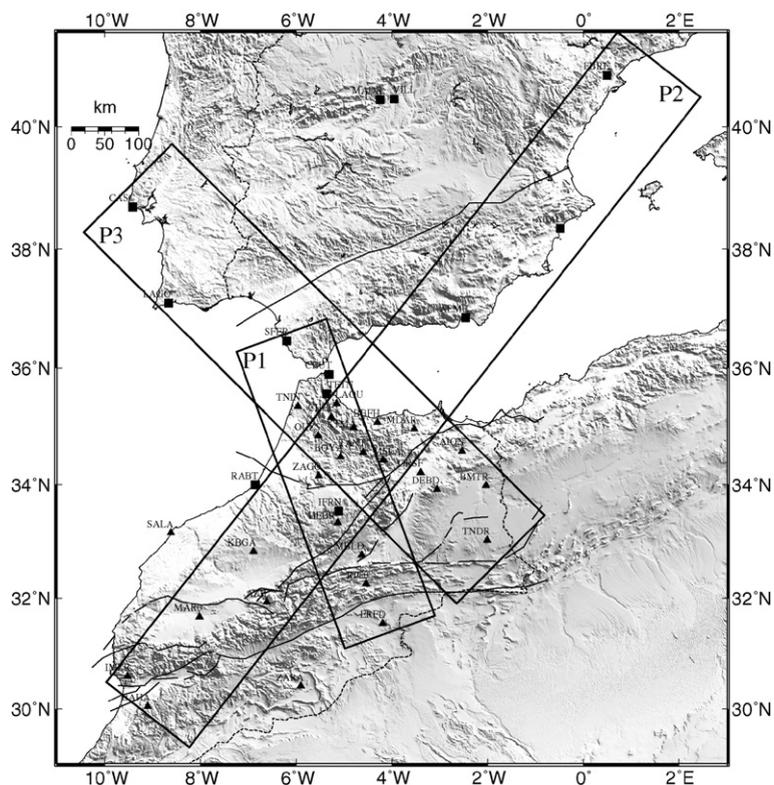


Fig. 4. Localisation des profils P1, P2, et P3 de vitesse GPS présentés respectivement dans les Figs. 5–7. Les carrés indiquent les stations de mesure continue et les triangles indiquent les stations de mesure en campagne.

Fig. 4. Locations of the transects P1, P2, and P3 presented respectively in Figs. 5–7. Squares indicate continuous GPS stations and triangles indicate campaign GPS stations.

l’Afrique et l’Eurasie, au niveau du domaine d’Alboran [38]. La majorité de ces contraintes est accommodée par les structures actives de cette zone qui, dans la plupart des cas, sont des décrochements et/ou des failles à faible pendage préexistant entre les nappes [1,39]. La vitesse de cette convergence dans cette région a été estimée entre 3 et 5 mm/an [8,14,38].

La distribution des séismes permet de situer les accidents de la croûte potentiellement actifs (Fig. 1). La sismologie historique et instrumentale montre que le Maroc présente une sismicité diffuse affectant presque tous les domaines structuraux [7,17,18]. Dans la région d’Alboran, la sismicité de magnitudes M_w supérieures à 5 et d’intensités supérieures à VII (MSK) présente une fréquence exceptionnelle dans (1) la zone d’Al Hoceima, (2) la zone de Nador–Melilla, (3) la zone d’Almeria et (4) la zone de Malaga–Granada.

3. Données GPS et analyses

Dans le but d’évaluer les mouvements tectoniques dans la partie nord-occidentale de l’Afrique, un réseau

GPS a été mis en place à partir de 1999. Lors d’une première étape, 22 points géodésiques (repères géodésiques ancrés dans des roches en place) ont été déployés sur tous les grands domaines structuraux du Maroc, séparés par des failles majeures. En 2002, le sous-réseau du Nord du Maroc a été densifié par l’installation de 6 stations de campagne. Le réseau GPS marocain compte actuellement 28 stations de mesures en campagne, renforcées par quatre stations permanentes (RABT, TETN, IFRN et CEUT). Les mesures en campagne ont été effectuées entre 1999 et 2005 pendant des sessions de 24 h (Tableau 1).

La tectonique active de l’Anti-Atlas, en bordure nord de la plate-forme Africaine, est observée (Fig. 2) par les trois stations BAHA, ZARA et ERFD, alignées en direction SW–NE selon l’alignement général de la chaîne. Le Haut Atlas, dont l’altitude dépasse 4000 m, est aligné SW–NE dans sa partie occidentale à est–ouest dans sa partie orientale. Il est découpé par le système de failles du Tizi n’Test, d’orientation NE–SW. Cette grande structure du Maroc est observée par 4 stations IMZR, MARO, AZIL et RIC0. Le Moyen Atlas, qui se

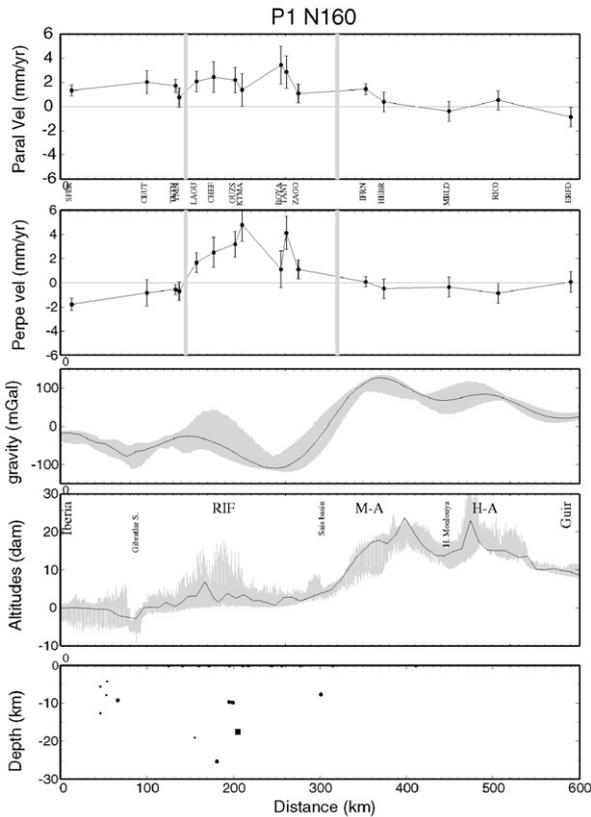


Fig. 5. Profils P1 traversant les domaines structuraux du Maroc. Du haut vers le bas sont présentés : les composantes parallèles (N160E) et perpendiculaires (N250E) des vitesses GPS par rapport à l'Afrique, avec leurs barres d'incertitude de 1-sigma (les barres grises correspondent aux limites de blocs), les anomalies gravimétriques à l'air libre provenant de Topex [48], topographie provenant de NASA/SRTM [42], et les hypocentres des séismes de magnitude supérieure à 2,0, obtenus à partir du catalogue ISC [33]. Les mouvements vers le sud et les mouvements vers l'ouest sont positifs dans le premier et le deuxième profils respectivement. Les abréviations sont les mêmes que la Fig. 1.

Fig. 5. Transect P1 crossing Moroccan structural domains. Parallel (N160E) and perpendicular (N250E) GPS velocity components (first and second from the top panels, respectively) are shown with respect to Africa, each with its 1-sigma uncertainty (bars). In the top panel, motions towards the south are positive, and in the second panel westward motions are positive. Grey bars indicate limits of blocks. Third panel shows free-air gravity anomaly taken from TOPEX [48]. Fourth panel shows elevation from NASA/SRTM [42]. Abbreviations as in Fig. 1. Fifth panel indicates hypocentral depths for earthquakes with magnitude larger than 2.0 from the ISC catalog [33].

sépare obliquement du Haut Atlas au niveau de Beni Mellal, est surveillé en permanence par la station IFRN et en campagnes de mesures par les deux stations HEBR et MBLD. La Meseta côtière, considérée comme plus ou moins stable, est contrôlée par la station permanente RABT située juste sur sa bordure nord, où commence la flexure de la plaque africaine sous le bassin du Gharb,

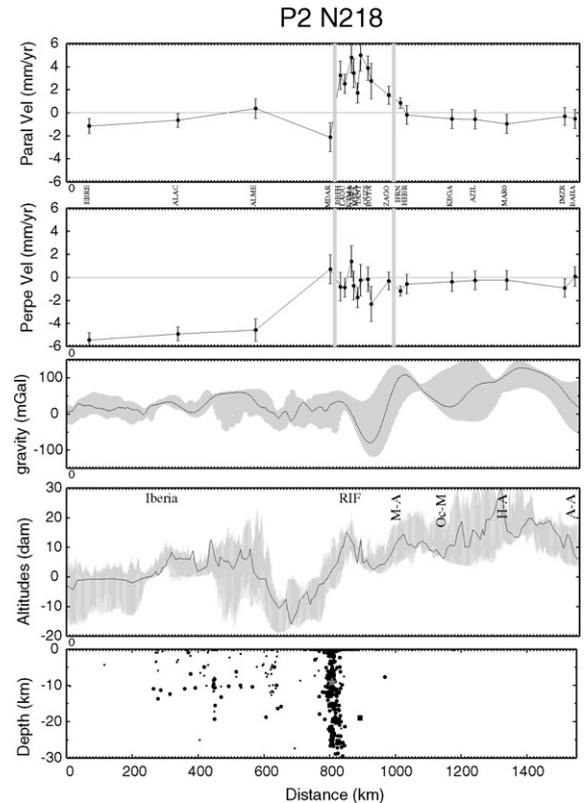


Fig. 6. Profils P2 traversant les domaines structuraux marocains au sud et l'Ibérie vers le nord (mêmes conventions que dans la figure précédente). Les composantes parallèles (N218E) et perpendiculaires (N308E) des vitesses GPS sont représentées par rapport à l'Afrique. Les mouvements vers le sud-ouest et les mouvements vers le nord-ouest sont positifs dans le premier et le deuxième profils respectivement. Les abréviations sont les mêmes que dans la Fig. 1.

Fig. 6. Transect P2 crossing Moroccan structural domains from the south and the adjacent Iberia plate (plotting conventions as in the previous figure). Parallel (N218E) and perpendicular (N308E) GPS velocity components are represented with respect to the Africa plate. In the top panel, motions towards the southwest are positive, and in the second panel northwestward motions are positive. Plotting conventions as in the previous figure. Abbreviations as in Fig. 1.

ainsi que par trois stations de mesure en campagne, SALA, KBGA et ONRA. En Meseta orientale, plateau qui se prolonge en Algérie, les déformations sont observées par 3 stations DEBD, BMTR, TNDR. Le Rif, considéré comme un domaine de haute complexité, du fait de sa situation dans la zone d'interaction des grandes plaques Afrique et Eurasie, est instrumenté par un réseau de 15 sites, dont deux stations permanentes TETN et CEUT et 13 stations de campagne (TNIN, LAOU, BBFH, MDAR, MSLA, ZAGO, CHEF, OUSZ, BOYA, TANT, KTMA, GRSF, AION).

Les données GPS des six années de mesures ont été traitées à l'aide des logiciels GAMIT/GLOBK [29,35],

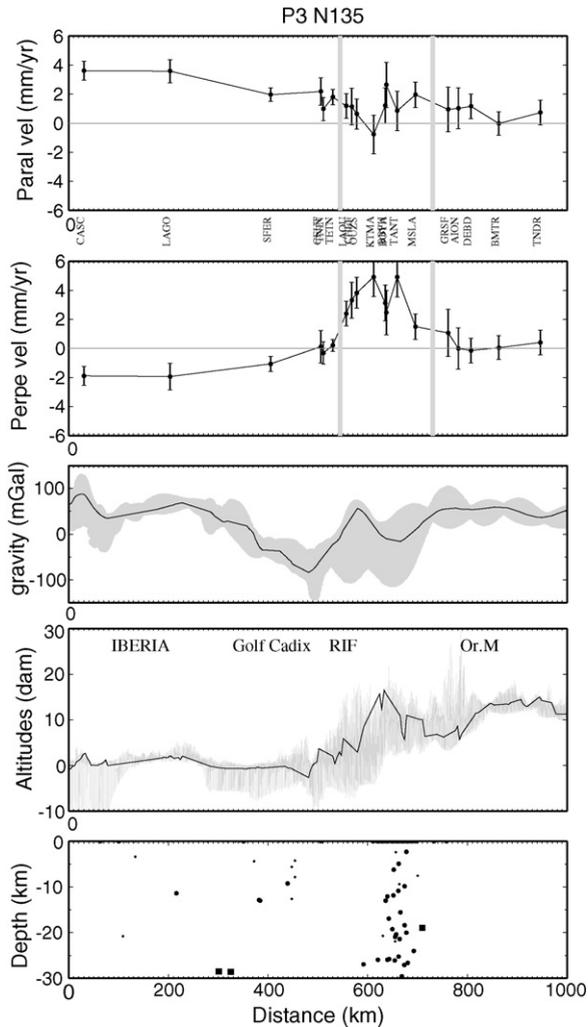


Fig. 7. Profils P3 traversant les hauts plateaux, le Rif et l'Ibérie adjacente (mêmes conventions que dans la Fig. 5). Les composantes parallèles (N135E) et perpendiculaires (N225E) sont représentées par rapport à l'Afrique. Les mouvements vers le sud-est et les mouvements vers le sud-ouest sont positifs dans le premier et dans le deuxième profils, respectivement. Les abréviations sont les mêmes que dans la Fig. 1.

Fig. 7. Transect P3 across the high plateau, the Rif and the adjacent Iberia plate. Parallel (N135E) and perpendicular (N225E) GPS velocity components are represented with respect to the Africa plate. In the top panel, motions towards the southeast are positive, and in the second panel southwestward motions are positive. Plotting conventions as in Fig. 5. Abbreviations as in Fig. 1.

selon la même stratégie que celle utilisée par Fadil et al. [20]. Les données des stations IGS d'Afrique et d'Europe ont été introduites dans les calculs des vitesses relatives afin de réduire les incertitudes (écart-types inférieurs à 1 mm/an). Nous montrons le champ de vitesses dans la Méditerranée occidentale par rapport à l'Eurasie fixe, d'une part (Fig. 2), et par rapport à

l'Afrique fixe, d'autre part (Fig. 3). Des vitesses de déplacement horizontal anormales ($3,4 \pm 1,2$ mm/an vers le sud par rapport à l'Afrique) dans la partie centrale du Rif ont été observées par Fadil et al. [20] et sont confirmées ici par les vitesses obtenues à partir des mesures sur la période de 2002 à 2005 de six stations supplémentaires (CHEF, BOYA, TANT, KTMA, GRSF, AION). Un bloc individualisé par le sens de déplacement des stations du Rif central (LAOU, CHEF, OUZS, BOYA, TANT, KTMA, MSLA et ZAGO) montre un mouvement général vers le SSW par rapport à l'Afrique fixe. Le mouvement des autres stations, non significatif, montre la faiblesse du signal tectonique. Le mouvement du bloc central du Rif par rapport à l'Europe fixe (Fig. 2) apparaît dévié vers l'WSW en tenant compte du mouvement de l'Afrique par rapport à l'Eurasie indiqué par les autres stations GPS du Maroc. Par rapport à l'Europe fixe, on remarque aussi le mouvement vers l'WNW de la station SFER située à l'ouest des Bétiques. Les stations CEUT, TETN et TNIN indiquent un mouvement vers le sud-est par rapport à l'Afrique stable. Ces trois stations définiraient un bloc à part (bloc de Tanger), qui semble être intermédiaire entre le mouvement de l'Ibérie et celui de l'Afrique.

4. Profils de vitesses GPS

Le GPS fournit les déplacements à la surface de la terre selon ses trois composantes. Tandis que les deux composantes horizontales sont évaluées avec des incertitudes raisonnables (d'ordre millimétrique), la composante verticale reste, cependant, faiblement cernée avec des incertitudes deux à trois fois supérieures par rapport aux incertitudes horizontales.

Trois profils associant les vitesses GPS (composantes horizontales parallèles et perpendiculaires aux profils), les anomalies gravimétriques à l'air libre, la topographie et la sismicité (couvrant la même période d'observation que les mesures GPS) ont été réalisés (Fig. 4). La combinaison des données a été faite dans le souci de confronter les mouvements horizontaux observés par GPS aux différentes données de profondeur : (1) l'anomalie gravimétrique à l'air libre, liée à la distribution de masse, peut s'interpréter en termes de contraintes et de déformations induites par les processus orogéniques [31] ; (2) la distribution de la sismicité en profondeur sur la même période d'observation indique si les mesures GPS ont pu être affectées par des déplacements cosismiques lors des mesures.

Le profil P1 (Fig. 5) est parallèle à la direction générale du mouvement de l'Afrique. Il caractérise les interactions du bloc central du Rif avec l'ensemble du

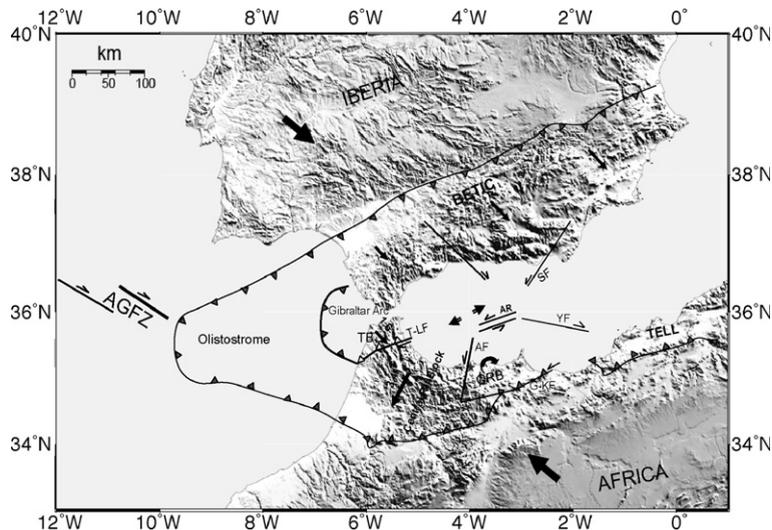


Fig. 8. Interprétation structurale au niveau de la région d'Alboran. Les flèches larges indiquent la direction générale de la convergence relative Afrique–Eurasie. Les flèches étroites indiquent les vecteurs de vitesse des mouvements actuels de chaque bloc. Les failles et les bordures tectoniques sont modifiées à partir de [1,4,37]. AGFZ = zone de failles Açores–Gibraltar; AF = faille d'Al Hoceima; AR = ride d'Alboran; G–KF = faille de Gareb–Kebdana; T–LF = faille de Tétouan–Larache; SF = faille de Serrata; YF = faille de Yusuf; TB = bloc de Tanger; ORB = bloc du Rif oriental.

Fig. 8. Structural interpretation of the Alboran region. Large arrows show the relative convergence between Africa and Eurasia. Narrow arrows indicate the average velocity vector for each block. Faults and tectonic borders are modified from [1,4,37]. AGFZ = Azores Gibraltar Faulted Zone; AF = Al Hoceima Fault; AR = Alboran Ridge; G–KF = Gareb–Kebdana Fault; T–LF = Tetouan–Larache Fault; SF = Serrata Fault; YF = Yusuf Fault; TB = Tanger Block; ORB = Oriental Rif Block.

domaine rifain et l'avant-pays. Ce profil suggère une diminution des vitesses perpendiculaires au profil entre SFER (Ibérie) et TETN–TNIN (péninsule de Tanger). Le bloc central du Rif est marqué par des vitesses plus élevées. Le mouvement quasi nul de BOYA (rides pré-rifaines) perpendiculairement au profil peut être interprété comme un blocage de l'avancée des nappes de charriage vers le SSW sur l'avant-pays. La station ZAGO, située elle-même sur une ride pré-rifaine, semble être bloquée dans les deux directions. Le système atlasique est, quant à lui, presque stable le long du profil. Par ailleurs, le bloc central du Rif est caractérisé par une anomalie gravimétrique négative importante (–100 mGal), qui peut être liée à la flexure de la plaque africaine sous l'effet du mouvement continu des nappes de charriage vers le SSW. En contraste du Rif, le système des Atlas est caractérisé par une anomalie gravimétrique positive importante (+100 mGal), en dépit des hautes altitudes. Un modèle de lithosphère fortement amincie a été proposé par [22] au niveau des Atlas, en utilisant les données de gravimétrie, le géoïde, les flux de chaleur et la topographie.

Les profils P2 et P3 (Figs. 6 et 7) montrent des variations latérales des vitesses GPS, des anomalies gravimétriques à l'air libre et de sismicité en profondeur

entre les domaines structuraux du Maroc, le domaine d'Alboran et l'Ibérie. Sur ces deux profils, les vitesses semblent diminuer de l'Ibérie vers le bloc central du Rif (P2 et P3) et du Rif central vers les hauts plateaux (P3). La limite sud du bloc central du Rif (entre ZAGO et IFRN) est marquée par un fort gradient de l'anomalie gravimétrique à l'air libre, qui atteint des minima de –100 mGal (P2); la limite est coïncide avec un plan de sismicité à fort pendage vers l'ouest. Le vecteur vitesse calculé pour la station MDAR est différent de ceux des stations du Rif central qui sont situées plus à l'Ouest. Cette observation unique sur le Rif oriental est en accord avec la rotation horaire mise en évidence par Najid et al. 1981 (in [40]). L'activité sismique au niveau de la région Nador–Melilla [5] témoigne de la persistance actuelle des mouvements tectoniques étudiés par [16] dans cette zone de bordure entre le Rif et l'avant-pays.

5. Discussion

La formation de l'arc Bético-Rifain est liée à l'histoire du découplage/couplage entre l'Afrique, l'Ibérie et le domaine d'Alboran, où l'on distingue deux périodes : (1) au Miocène, alors que les deux plaques sont plutôt découplées, le *roll-back* du *slab* de subduction de la plaque océanique Téthys permet le

Tableau 1

Vitesses GPS (1999–2005) par rapport à l’Afrique des sites utilisés dans cette étude, les incertitudes à 1-sigma, et la corrélation entre les composantes est (E) et nord (N) de la vitesse (ρ)

Table 1

GPS velocities (1999–2005) with respect to the Africa plate of sites used in this study, 1-sigma uncertainties, and correlation between the east (E) and north (N) components of velocity (ρ)

| Station | Long. (deg E) | Lat. (deg N) | V(E) (mm/yr) | V(N) (mm/yr) | \pm E (mm/yr) | \pm N (mm/yr) | ρ |
|-----------------------------|---------------|--------------|--------------|--------------|-----------------|-----------------|--------|
| AION ^{4,6,7} | 357,467 | 34,588 | 0,71 | −0,71 | 1,00 | 0,99 | 0,024 |
| ALAC* | 359,519 | 38,339 | 4,28 | −2,50 | 0,43 | 0,43 | 0,002 |
| ALME* | 357,541 | 36,853 | 3,37 | −3,10 | 0,67 | 0,59 | 0,016 |
| AZIL ^{1,2,3,4,6} | 353,384 | 31,934 | 0,57 | 0,30 | 0,57 | 0,57 | 0,011 |
| BAHA ^{1,2,3,4,6} | 350,898 | 30,053 | 0,28 | 0,46 | 0,59 | 0,57 | 0,012 |
| BBFH ^{1,2,3,4,5,6} | 355,699 | 35,081 | −1,35 | −3,06 | 0,87 | 0,87 | 0,010 |
| BMTR ^{1,2,3,4,6} | 357,967 | 33,986 | −0,05 | −0,01 | 0,57 | 0,56 | −0,009 |
| BOYA ^{1,2,3,4,6,7} | 354,931 | 34,485 | 0,13 | −3,61 | 1,06 | 1,08 | 0,026 |
| CASC* | 350,581 | 38,693 | 3,88 | −1,22 | 0,45 | 0,45 | 0,002 |
| CEUT* | 354,689 | 35,896 | 1,46 | −1,62 | 0,78 | 0,66 | 0,013 |
| CHEF ^{4,6,7} | 354,734 | 35,173 | −1,53 | −3,15 | 0,87 | 0,88 | 0,034 |
| DEBD ^{1,2,3,4,6} | 356,945 | 33,919 | 0,91 | −0,72 | 0,60 | 0,60 | −0,007 |
| EBRE* | 0,492 | 40,821 | 5,0 | −2,44 | 0,46 | 0,46 | 0,001 |
| ERFD ^{1,2,3,4,6} | 355,813 | 31,549 | −0,38 | 0,80 | 0,59 | 0,58 | −0,002 |
| GRSF ^{4,6,7} | 356,603 | 34,216 | −0,09 | −1,43 | 1,14 | 1,09 | 0,031 |
| HEBR ^{1,2,3,4,6} | 354,869 | 33,333 | 0,59 | −0,20 | 0,58 | 0,58 | −0,001 |
| IFRN* | 354,892 | 33,540 | 0,42 | −1,39 | 0,31 | 0,32 | 0,007 |
| IMZR ^{1,2,3,4,6} | 350,479 | 30,596 | 0,93 | −0,32 | 0,56 | 0,54 | 0,006 |
| KBGA ^{1,2,3,4,6} | 353,110 | 32,834 | 0,63 | 0,17 | 0,58 | 0,58 | 0,007 |
| KTMA ^{4,6,7} | 355,198 | 34,987 | −4,02 | −2,93 | 0,94 | 0,93 | 0,018 |
| LAGO* | 351,332 | 37,099 | 3,89 | −1,16 | 0,65 | 0,56 | 0,017 |
| LAOU ^{1,2,3,4,6} | 354,845 | 35,395 | −0,86 | −2,53 | 0,60 | 0,60 | 0,006 |
| MADR* | 355,750 | 40,429 | 4,06 | −2,34 | 0,25 | 0,46 | 0,000 |
| MAR0 ^{1,2,3,4,6} | 351,982 | 31,665 | 0,79 | 0,62 | 0,59 | 0,57 | 0,002 |
| MBLD ^{1,2,3,4,6} | 355,366 | 32,769 | 0,21 | 0,48 | 0,58 | 0,58 | 0,005 |
| MDAR ^{1,2,3,4,5,6} | 356,468 | 34,970 | 0,75 | 2,12 | 0,88 | 0,88 | −0,015 |
| MSLA ^{1,2,3,4,6} | 355,816 | 34,432 | 0,32 | −2,44 | 0,61 | 0,61 | −0,018 |
| ONGA ^{1,2,3,4,6} | 350,447 | 31,561 | −4,52 | 6,11 | 1,60 | 1,54 | 0,011 |
| OUZS ^{4,6,7} | 354,461 | 34,850 | −2,25 | −3,15 | 0,75 | 0,73 | 0,021 |
| RABT* | 353,146 | 33,998 | 0,33 | −0,84 | 0,24 | 0,21 | 0,006 |
| RIC0 ^{1,2,3,4,6} | 355,465 | 32,255 | 0,98 | −0,20 | 0,59 | 0,58 | 0,000 |
| SALA ^{1,2,3,4,6} | 351,381 | 33,162 | −0,10 | 0,75 | 0,59 | 0,59 | −0,004 |
| SFER* | 353,794 | 36,464 | 2,13 | −0,63 | 0,36 | 0,32 | 0,002 |
| TANT ^{4,6,7} | 355,404 | 34,565 | −2,88 | −4,08 | 0,96 | 0,95 | 0,030 |
| TETN* | 354,637 | 35,562 | 1,11 | −1,42 | 0,28 | 0,37 | 0,004 |
| TNDR ^{1,2,3,4,6} | 357,997 | 33,031 | 0,22 | −0,81 | 0,59 | 0,59 | −0,012 |
| TNIN ^{1,2,3,4,6} | 354,042 | 35,351 | 0,91 | −0,47 | 0,55 | 0,56 | 0,004 |
| VILL* | 356,048 | 40,444 | 4,82 | −1,94 | 0,18 | 0,10 | 0,001 |
| ZAGO ^{1,2,3,4,6} | 354,469 | 34,158 | −0,68 | −1,40 | 0,55 | 0,56 | 0,003 |
| ZARA ^{1,2,3,4,6} | 354,102 | 30,415 | −0,04 | 0,90 | 0,56 | 0,56 | 0,005 |

Mesures : *continue, ¹octobre 1999, ²février 2001, ³octobre 2001, ⁴octobre 2002, ⁵février–mars 2004, ⁶octobre 2004, ⁷septembre 2005.
Measurements: *continous, ¹October 1999, ²February 2001, ³October 2001, ⁴October 2002, ⁵February–March 2004, ⁶October 2004, ⁷September 2005.

mouvement vers l’ouest du domaine d’Alboran et le développement du prisme d’accrétion aux dépens des marges passives de l’Afrique et de l’Ibérie (par exemple, [11,25,22]). Par conséquent, l’ensemble du Rif externe est déplacé vers l’ouest par l’intermédiaire des rampes latérales des Tamsamani, puis du Nekor [21,25]. La structuration du Rif externe se caractérise

par des chevauchements majeurs vers le sud délimitant les différentes unités (par exemple, [22]). (2) Depuis le Pliocène, le couplage entre les plaques devient plus fort, consécutivement aux diverses ruptures et déchirures des *slabs* en Méditerranée occidentale [19,51]. Les effets de la convergence sont alors transmis vers l’Atlas (l’avant-pays africain de la chaîne du Rif) [24]. Il est à noter

l'asymétrie entre les Bétiques et le Rif (zones externes), mise en évidence par des différences structurales importantes [13]. Pendant que le Rif a été régi par une tectonique d'imbrication socle–couverture du pré-Oligocène au Miocène, les Bétiques ont subi une tectonique de couverture au Miocène.

Les modèles régionaux voulant expliquer la tectonique active actuelle de la zone Bétiques–Alboran–Rif peuvent être subdivisés selon trois mécanismes dynamiques principaux : (1) délamination et *roll-back* au niveau des Bétiques et du Rif [9,20], (2) subduction vers l'est au niveau de l'arc de Gibraltar [27] et (3) coexistence d'une extension ENE–WSW au niveau du bassin d'Alboran, induite par des processus dans le manteau supérieur, et d'un coulissement de la région vers l'ouest lié à la rotation de la plaque africaine [53]. Fadil et al. [20] ont discuté la limite de plaques Eurasie–Afrique et ont proposé un modèle de bloc élastique pour déterminer les conditions aux limites en terme de vitesses de glissement le long des failles qui séparent les blocs.

À la lumière des nouvelles observations que nous présentons, nous souhaitons confronter nos résultats avec les modèles cinématiques proposés. La Fig. 8 montre un schéma structural interprétatif de la situation tectonique actuelle dans l'arc Bético-Rifain. Nous proposons une synthèse des mouvements de surface des stations GPS supplémentaires décrites dans ce travail, ainsi que les observations des travaux précédents.

Le bloc central du Rif se déplace plutôt vers le SSW par rapport à l'Afrique fixe. La limite nord-ouest de ce bloc correspond à la prolongation de l'accident transformant dextre de Tétouan [4] vers le sud-ouest, bordant les rides pré-rifaines dans la région de Larache (T–LF dans la Fig. 8), ce qui marque, dans cette région, le début du sillon Sud-Rifain, qui sépare le Rif du continent africain. Le bloc de Tanger s'individualise en accord avec les conditions cinématiques actuelles par un soulèvement prononcé par rapport au bloc central du Rif, comme semblent le montrer des observations sur le littoral pour le Quaternaire [26,45]. Nous suggérons la mise en place d'un accident complexe (T–LF), de direction générale WSW–ENE, entre la région de Tétouan et la région de Larache. Cet accident serait constitué de plusieurs failles décrochantes dextres, héritées des périodes orogéniques antérieures. L'accident pourrait être une rampe latérale (oblique par rapport au bloc central du Rif), avec un mouvement décrochant dextre à composante inverse, permettant à la fois le soulèvement du bloc de Tanger et le déplacement des nappes du bloc central vers le SSW par rapport à

l'Afrique. Il faut noter cependant qu'aucun décalage du front de chevauchement des zones internes n'a été révélé jusqu'à présent. Cela nous permet de suggérer deux hypothèses : il s'agit, soit (1) d'une structure très jeune découpant le dispositif antérieur limité plutôt par la faille de Jebha, soit (2) de la réactivation d'un accident antérieur ayant les caractéristiques d'une faille transformante [4]. Dans les deux hypothèses, la structure pourrait définir une zone de déformation distribuée. Une étude détaillée de la géomorphologie et de la microsismicité paraît indispensable pour localiser respectivement la trace en surface et la géométrie en profondeur des différents segments.

La limite est du bloc central du Rif semble être confirmée par la sismicité au niveau de la région d'Al Hoceima et semble se prolonger vers le sud selon une direction N190 à N200. Cette structure semble coïncider avec la faille décrite dans des travaux comme ceux de [15,43]. Le bloc oriental du Rif, qui est en contact direct avec le bloc central par la faille sénestre d'Al Hoceima (AF), est séparé de l'avant-pays par la faille de Gareb–Kebdana (G–KF), située dans une zone sismique de décrochements sénestres (par exemple, [5]). Le bloc se trouve en un régime trans-rotationnel sous les effets conjugués de la convergence entre l'Eurasie et l'Afrique et de la rotation antihoraire de cette dernière. La convergence NW–SE transférerait un mouvement vers l'est à la bordure nord, tandis que la rotation transférerait un mouvement vers l'ouest à la bordure sud du bloc oriental du Rif. Cela se manifeste par le jeu sénestre de ses deux bordures (AF et G–KF) sur sa partie émergée. Les variations latérales des anomalies gravimétriques entre les blocs dans l'arc Bético-Rifain peuvent être à leur tour à l'origine des mouvements horizontaux observés dans ce travail. Mais cela ne peut être précisé que par la modélisation des contraintes déviatoriques dans la région, en déterminant leurs sens et amplitudes. La structure complexe du Rif, combinant des nappes de charriage limitées par des rampes latérales à fort pendage, doit être prise en compte pour déterminer le mode d'accommodation des contraintes, observé en surface par les composantes horizontales du GPS.

Les blocs du domaine rifain, distingués dans ce travail, montrent à la fois des accords et des désaccords par rapport aux trois types de mécanismes présentés plus haut. Le mouvement vertical et horizontal vers le sud-est du bloc de Tanger implique une «force» poussant dans ce sens et que nous pourrions lier à l'effet de la subduction suggérée par [27] au niveau de l'arc de Gibraltar. Cependant, ces mouvements sont incompatibles avec le *roll-back* vers l'ouest proposé par

ces mêmes auteurs. De même, il serait possible d'interpréter l'individualisation de ce bloc par l'effet du coulissement de blocs le long de la zone de faille transformante Açores–Gibraltar (AGFZ) entre les deux grandes plaques Afrique–Eurasie. Le mouvement particulier du bloc central est fort étonnant du point de vue de son sens (SSW) et de sa vitesse horizontale ($3,4 \pm 1,2$ mm/an). Cela confirme les observations de Fadil et al. [20], mais nous restons prudents pour confirmer leur interprétation en ce qui concerne la délamination et le *roll-back* au niveau du Rif. Nous pouvons toutefois évoquer une explication alternative liée à une extrusion crustale [12,41,54] de ce bloc en réponse aux contraintes de convergence Afrique–Eurasie. Le bloc oriental du Rif, faisant partie de l'ensemble structural rifain, s'individualise impérativement, d'une part, par ces limites sismogènes au niveau de la région d'Al Hoceima et au niveau de la région de Nador–Melilla et, d'autre part, par sa rotation horaire sous l'effet du régime trans-rotationnel imposé par les mouvements des deux grandes plaques lithosphériques Afrique et Eurasie. Le modèle général de Stich et al. [53] cité plus haut, basé sur les données de la sismologie, semble être plutôt un cadre très général des mouvements des blocs dans cette même région.

Les déplacements significatifs du Rif central impliquent la mise en place d'une zone de découplage, suggérant la présence d'un décollement plus profond que les niveaux d'imbrication des unités structurales d'origines différentes (zones internes et externes). L'amortissement des mouvements sur l'avant-pays (Afrique) permet de suggérer que le front actif sud du Rif coïncide avec le front de chevauchement de la chaîne par rapport à la plaque africaine. Cela indiquerait un découplage entre la couverture et le socle, mais la lacune liée à la résolution verticale de nos données ne nous permet pas de déterminer sa géométrie. Cependant, dans l'hypothèse d'un *roll-back* du manteau lithosphérique délaminé sous le Rif [20], le découplage ne pourrait être que partiel (voir inexistant). Il faut également noter que la lacune de résolution des données au sud de l'Ibérie ne nous permet pas de donner une interprétation précise sur le front de déformation active au nord des Bétiques. Les profils ne montrent aucun changement significatif des vitesses GPS de part et d'autre du bassin de Guadalquivir.

Expliquer les déformations par un mécanisme unique devient de plus en plus difficile à adopter. La réconciliation des modèles testés par des méthodes différentes s'impose pour expliquer le mode de déformation actuelle dans la région. La combinaison des méthodes d'évaluation des forces (compressives ou

extensives) intrinsèques et extrinsèques et des déformations qui en résultent permet une meilleure estimation des mécanismes de déformation. De même, la sommation des contributions élémentaires à l'échelle locale est essentielle pour lisser les différences d'interprétation régionale. Dans notre travail, le nombre limité des stations GPS dans la région ne permet pas de préciser des processus géodynamiques responsables des déformations observées face à une large gamme de modèles proposés. Néanmoins, nous insistons sur le fait que ces mouvements dans la région de l'arc Bético-Rifain sont le résultat du jeu combiné de la compression due à la convergence Afrique–Eurasie et de trois processus essentiels : (1) la rotation antihoraire de l'Afrique, (2) l'extension syncollisionnelle au niveau de la mer d'Alboran, ainsi que (3) les contraintes déviatoriques liées à l'hétérogénéité géologique des blocs impliqués dans cette région. La coexistence de ces trois processus peut élargir la zone de déformations entre les plaques dans la région.

6. Conclusion

L'interprétation de nouvelles données GPS, associées aux données gravimétriques et sismologiques, ainsi que leur comparaison avec des résultats antérieurs permettent de confirmer la distinction d'un bloc central au Rif [20], caractérisé par un mouvement de l'ordre de $3,4 \pm 1,2$ mm/an vers le SSW. Le Rif semble être séparé en trois blocs, de caractéristiques cinématiques différentes. (1) Le bloc de Tanger, qui se trouve au cœur de l'arc de Gibraltar, présente un mouvement ($1,6 \pm 1,2$ mm/an) vers le sud-est. Il est limité par une rampe latérale, que nous avons appelé faille de Tétouan–Larache (T–LF). (2) Le bloc central du Rif se déplace vers le SSW avec une vitesse apparemment plus élevée que celle des autres blocs. Il est soumis, d'une part, à la compression due à la convergence et, d'autre part, à l'extension au centre de la mer d'Alboran (bassin occidental). (3) Le bloc oriental du Rif est en rotation horaire et est délimité par la faille d'Al Hoceima (AF), qui le sépare du Rif central, et par la faille de Gareb–Kebdana (G–KF), qui le sépare de l'avant-pays. La vitesse des mouvements des blocs diminue progressivement des nappes rifaines vers l'avant-pays. Comme on l'a montré dans la discussion, les mouvements des différents blocs, caractérisés à partir des observations GPS dans l'arc Bético-Rifain, présentent des incompatibilités avec les modèles proposés pour cette région dans la littérature. Les sources de divergence entre nos observations et ces modèles sont liées aux types de données utilisées. D'où l'intérêt d'une poursuite des

efforts d'observation impliquant différents types de données (GPS, sismologiques, gravimétriques, etc.) pour contribuer à comprendre au mieux la déformation actuelle de cette région.

Remerciements

Nous remercions R. Hlila et M. Chourak pour leur participation aux mesures GPS. Nous tenons également à remercier D. Frizon de Lamotte et un relecteur anonyme pour leurs commentaires détaillés et constructifs sur le manuscrit. Ce travail a été financé partiellement par The National Aeronautics and Space Administration (NAG-6145), The National Science Foundation (EAR-9814964, EAR-0208200 et EAR-0408728), et une bourse de formation à la recherche de l'Agence Universitaire de la Francophonie (A. Tahayt). Toutes les figures ont été élaborées à l'aide du logiciel GMT [47].

Références

- [1] L. Ait Brahim, P. Chotin, S. Hinaj, A. Abdelouafi, A. El Adraoui, C. Nakcha, D. Dhont, M. Charroud, F. Sossey Alaoui, M. Amrhar, A. Bouaza, H. Tabyaoui, A. Chaouni, Paleostress evolution in the Moroccan African margin from Triassic to Present, *Tectonophysics* 357 (2002) 187–205.
- [2] J. Andrieux, J.-M. Fontbote, M. Mattauer, Sur un modèle explicatif de l'arc de Gibraltar, *Earth Planet. Sci. Lett.* 12 (1971) 191–198.
- [3] J. Balanya, A. Crespo-Blanc, M.D. Azpiroz, I. Exposito, M. Lujan, Structural trend line pattern and strain partitioning around the Gibraltar Arc accretionary wedge: Insights as to the mode of orogenic arc building, *Tectonics* 26 (TC2005) (2007), doi:10.1029/2005TC001932.
- [4] M. BenMakhlouf, Genèse et évolution de l'Accident de Tétouan et son rôle transformant au niveau du Rif septentrional (Maroc) depuis l'Oligocène jusqu'à l'Actuel, thèse, université Mohamed-V, Rabat, Maroc (1990).
- [5] M. Bezzeghoud, E. Buforn, Source parameters of the 1992 Melilla (Spain, Mw = 4.8), 1994 Al Hoceima (Morocco, Mw = 5.8) and Mascara (Algeria, Mw = 5.7) earthquakes and seismotectonic implications, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 89 (1999) 359–372.
- [6] M.J. Blanco, W. Spakman, The P-wave velocity structure of the mantle below the Iberian Peninsula: evidence for subducted lithosphere below southern Spain, *Tectonophysics* 221 (1993) 13–34.
- [7] E. Buforn, M. Bezzaghoud, A. Udias, C. Pro, Seismic source on the Iberian-African plate boundary and their tectonic implications, *Pure Appl. Geophys.* 161 (2004) 623–646.
- [8] E. Calais, C. DeMets, J.-M. Nocquet, Evidence for a post-3.16-Ma change in Nubia–Eurasia–North America plate motions? *Earth Planet. Sci. Lett.* 216 (2003) 81–92.
- [9] A. Calvert, E. Sandvol, D. Seber, M. Barazangi, S. Roecker, T. Mourabit, F. Vidal, G. Alguacil, N. Jabour, Geodynamic evolution of the lithosphere and upper mantle beneath the Alboran region of the western Mediterranean: Constraints from travel time tomography, *J. Geophys. Res.* 105 (2000) 10, 871–10,898.
- [10] A. Chalouan, A. Michard, H. Feinberg, R. Montigny, O. Saddiqi, The Rif mountain building (Morocco): a new tectonic scenario, *Bull. Soc. geol. France* (2001) 603–616.
- [11] A. Chalouan, A. Michard, The Alpine Rif Belt (Morocco): A Case of Mountain Building in a Subduction–Subduction–Transform Fault Triple Junction, *Pure appl. Geophys.* 161 (2004) 489–519.
- [12] A. Chalouan, J. Galindo-Zaldívar, M. Akil, C. Marin, A. Chabli, P. Ruano, K. Bargach, C. S. de Galdeano, M. Benmakhlouf, M. Ahmamou, L. Gourari, Tectonic wedge escape in the southwestern front of the Rif Cordillera (Morocco), *Geol. Soc., Lond., Spec. Publications* 262 (2006) 101–118.
- [13] A. Crespo-Blanc, D. Frizon de Lamotte, Structural evolution of the external zones derived from the Flysch Through and the South Iberian and Maghreb paleomargins around the Gibraltar Arc: A comparative study, *Bull. Soc. geol. France* 177 (2006) 267–282.
- [14] C. DeMets, R. Gordon, D. Argus, S. Stein, Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions, *Geophys. Res. Lett.* 21 (1994) 2191–2194.
- [15] W. Dillon, J. Robin, H. Green, J. Lucena, Evolution of the Continental Margin in southern Spain and the Alboran Sea, *Mar. Geol.* 36 (1980) 205–226.
- [16] A. El Adraoui, D. Leblanc, Amortissement des mouvements tectoniques en bordure du Rif oriental (chaîne du Gareb, Maroc), *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. II* 307 (1988) 517–520.
- [17] S.O. El Alami, B. Tadili, L. Ait Brahim, I. Mouayn, Seismicity of Morocco for the Period 1987–1994, *Pure Appl. Geophys.* 161 (2004) 969–982.
- [18] T. El Mrabet, The great earthquakes in the Maghreb region and their consequences on man and environment, Edit. CNRST, 2005 (in Arabic).
- [19] C. Faccenna, C. Piromallo, A. Crespo-Blanc, L. Jolivet, F. Rossetti, Lateral slab deformation and the origin of the western Mediterranean arcs, *Tectonics* 23 (TC1012) (2004), doi:10.1029/2002TC001488.
- [20] A. Fadil, P. Vernant, S. McClusky, R. Reilinger, F. Gomez, D. Ben Sari, T. Mourabit, K. Feigl, M. Barazangi, Active tectonics of the western Mediterranean: Geodetic evidence for roll back of a delaminated subcontinental lithospheric slab beneath the Rif mountains (Morocco), *Geology* 34 (7) (2006) 529–532.
- [21] P. Favre, Analyse quantitative du *rifting* et de la relaxation thermique de la partie occidentale de la marge transformante nord-africaine: le Rif externe (Maroc). Comparaison avec la structure actuelle de la chaîne, *Geodin. Acta* 8 (1995) 59–81.
- [22] D. Frizon de Lamotte, A. Crespo-Blanc, B. Saint-Bézar, M. Comas, M. Fernandez, H. Zeyen, H. Ayarza, C. Robert-Charrue, A. Chalouan, M. Zizi, A. Teixell, M.L. Arbolea, F. Alvarez-Lobato, M. Julivet, A. Michard, TRASNSMED-transsect I [Betics, Alboran Sea, Rif, Moroccan Meseta, High Atlas, Jbel Saghro, Tindouf basin], in: W. Cavazza, F. Roure, W. Spakman, G.M. Stampfli, P.A. Ziegler (Eds.), *The TRANSMED Atlas – the Mediterranean Region from Crust to Mantle*, Springer, Berlin, 2004.
- [23] D. Frizon de Lamotte, A. Michard, O. Saddiqi, Quelques développements récents sur la géodynamique du Maghreb, *C. R. Geoscience* 338 (2006) 1–10.
- [24] D. Frizon de Lamotte, B. Saint Bezar, R. Bracène, E. Mercier, The two main steps of the Atlas building and geodynamics of the western Mediterranean, *Tectonics* 19 (2000) 740–761.
- [25] D. Frizon de Lamotte, J. Andrieux, J.-C. Guezou, Cinématique des chevauchements néogènes dans l'arc Bético-Rifain : discussion

- sion sur les modèles géodynamiques, *Bull. Soc. geol. France* 162 (1991) 611–626.
- [26] Groupe de recherche néotectonique de l'arc de Gibraltar, L'histoire tectonique récente (Tortonien à Quaternaire) de l'arc de Gibraltar et des bordures de la mer d'Alboran, *Bull. Soc. geol. France* 7 (XIX 3) (1977) 575–614.
- [27] M.A. Gutscher, J. Malod, J.-P. Rehault, I. Contrucci, F. Klingelhoefer, L. Mendes-Victor, W. Spakman, Evidence for active subduction beneath Gibraltar, *Geology* 30 (12) (2002) 1071–1074.
- [28] Harvard CMT, (Centroid Moment Tensor Project) On-line Catalog. <http://www.seismology.harvard.edu/>.
- [29] T. Herring, GLOBK : Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program, Version 10.0, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge (2002).
- [30] C. Hoepffner, M.R. Houari, M. Bouabdelli, Tectonics of the North African Variscides (Morocco and western Algeria): an outline, *C.R. Geoscience* 338 (2006) 25–40.
- [31] G. Houseman, P. England, A dynamical model of lithosphere extension and sedimentary basin formation, *J. Geophys. Res.* 91 (1986) 719–729.
- [32] IAG, (Instituto Andaluz de Geofísica) On-line Catalog. <http://www.ugr.es/iag/>.
- [33] ISC, (International Seismological Centre) On-line Catalog. <http://www.isc.ac.uk/>.
- [34] C. Jones, J.R. Unruh, L.J. Sonder, The role of gravitational energy active deformation in the southwestern United States, *Nature* 381 (1996) 37–41.
- [35] R. King, Y. Bock, Documentation for GAMIT analysis software, release 10.2, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 2004.
- [36] D. Leblanc, P. Olivier, Role of strike-slip faults in the Betic–Rifian orogeny, *Tectonophysics* 101 (1984) 345–355.
- [37] A. Maldonado, L. Somoza, L. Pallares, The Betic orogen and the Iberian–African boundary in the Gulf of Cadiz: Geological evolution (central North Atlantic), *Mar. Geol.* 155 (1999) 9–43.
- [38] S. McClusky, R. Reilinger, S. Mahmoud, D. Ben Sari, A. Tealeb, GPS constraints on Africa (Nubia) and Arabia plate motions, *Geophys. J. Int.* 155 (2003) 126–138.
- [39] M. Meghraoui, J.-L. Morel, J. Andrieux, M. Dahmani, Tectonique plio-quaternaire de la chaîne tello-rifaine et de la mer d'Alboran dans une zone complexe de convergence continent–continent, *Bull. Soc. geol. France* 1 (1996) 141–157.
- [40] A. Michard, A. Chalouan, H. Feinberg, B. Goffe, R. Montigny, How does the Alpine belt end between Spain and Morocco? *Bull. Soc. geol. France* 1 (2002) 3–15.
- [41] P. Molnar, P. Tapponnier, Cenozoic tectonics of Asia; effects of a continental collision, *Science* 189 (1975) 419–426.
- [42] NASA/SRTM, SRTM3 : Shuttle Radar Topography Mission digital topographic data. Version 2. <ftp://e0srp01u.ecs.nasa.gov/srtm/version2/SRTM3/>.
- [43] P. Olivier, L'accident de Jebha-Chrafate (Rif, Maroc), *Rev. Geol. dyn. Geogr. phys.* 23 (1982) 97–106.
- [44] J. Platt, From orogenic hinterlands to Mediterranean-style back-arc basins : a comparative analysis, *J. Geol. Soc.* 164 (2007) 297–311.
- [45] J. Rampoux, J. Angelier, B. Colletta, S. Fudral, M. Guillemin, G. Pierre, *Bull. Soc. geol. France* 7 (1977) 594–599.
- [46] S. Rebai, H. Philip, A. Taboada, Modern tectonic stress field in the Mediterranean region : evidence for variation in stress directions at different scales, *Geophys. J. Int.* 110 (1992) 106–140.
- [47] D. Sandwell, W. Smith, Free software helps map and display data, *EOS Trans. Am. Geophys. Union* 72 (41) (1991) 445–446. <http://gmt.soest.hawaii.edu/>
- [48] D. Sandwell, W. Smith, Marine gravity anomaly from Geosat and ERS1 satellite altimetry, *J. Geophys. Res.* 102 (B5) (1997) 10039–10054. http://topex.ucsd.edu/WWW_html/mar_grav.html
- [49] D. Seber, M. Barazangi, A. Ibenbrahim, A. Demnati, Geophysical evidence for lithospheric delamination beneath the Alboran Sea and Rif–Betic mountains, *Nature* 379 (1996) 785–790.
- [50] M. Sebrier, L. Siame, M. Zouine, T. Winter, Y. Missenard, P. Leturmy, Active tectonics in the Moroccan High Atlas, *C. R. Geoscience* 338 (2006) 65–79.
- [51] W. Spakman, R. Wortel, A tomographic view on Western Mediterranean geodynamics, in : W. Cavazza, F.M. Roure, W. Spakman, G.M. Stampfli, P.A. Ziegler (Eds.), *The Transmed Atlas – The Mediterranean Region from Crust to Mantle*, Springer, Berlin, 2004.
- [52] D. Stich, C. Ammon, J. Morales, Moment tensor solutions for small and moderate earthquakes in the Ibero-Maghreb region, *J. Geophys. Res.* 108 (B3) (2003) 2148, doi:10.1029/2002JB002057.
- [53] D. Stich, E. Serpelloni, F.L. Mancilla, J. Morales, Kinematics of the Iberia–Maghreb plate contact from seismic moment tensors and GPS observations, *Tectonophysics* 426 (2006) 295–317.
- [54] P. Tapponnier, Évolution tectonique du système alpin en Méditerranée : poinçonnement et écrasement rigide-plastique, *Bull. Soc. geol. France* 19 (1977) 437–460.
- [55] W. Thatcher, Microplate versus continuum descriptions of active tectonic deformation, *J. Geophys. Res.* 100 (1995) 3885–3894.