

Regal : réseau GPS permanent dans les Alpes occidentales. Configuration et premiers résultats

Éric Calais^{a*}, Roger Bayer^b, Jean Chéry^b, Fabrice Cotton^c, Erik Doerflinger^b, Mireille Flouzat^d, François Jouanne^e, Michel Kasser^h, Maurice Laplanche^b, Didier Maillard^h, Joseph Martinod^f, Franck Mathieu^c, Philippe Nicolon^h, Jean-Mathieu Nocquet^{a,h}, Oona Scotti^c, Laurent Serrurier^e, Marc Tardy^e, Christophe Vigny^g

^a UMR 6526 CNRS, Géosciences Azur, Sophia-Antipolis, 250, rue Albert-Einstein, Les Lucioles I, 06560 Valbonne, France

^b Laboratoire de géophysique, tectonique et sédimentologie, UMR 5573 CNRS, 4, place Eugène-Bataillon, 34095 Montpellier cedex 05, France

^c Institut de protection et de sûreté nucléaire, BP 6, 92265 Fontenay-aux-Roses, France

^d Laboratoire de détection géophysique, CEA, BP 12, 91680 Bruyères-le-Châtel, France

^e UMR 5025 CNRS, LGCA, université de Savoie, campus scientifique, 73376 Le-Bourget-du-Lac cedex, France

^f Laboratoire de géophysique interne et tectonophysique, IRIGM-UJF, 38041 Grenoble cedex 9, France

^g Laboratoire de géologie de l'École normale supérieure, UMR 8538 CNRS, 24, rue Lhomond, 75005 Paris, France

^h Laboratoire de recherche en géodésie, Institut géographique national, 6–8, av. Blaise-Pascal, 77455 Marne-la-Vallée cedex 2, France

Reçu le 28 juin 2000 ; accepté le 11 septembre 2000

Présenté par Xavier Le Pichon

Abstract – REGAL: a permanent GPS network in the Western Alps. Configuration and first results. The REGAL permanent GPS network currently consists of 12 GPS stations covering the Western Alps and their foreland. Preliminary results indicate (i) residual velocities with respect to Eurasia lower than $3 \text{ mm}\cdot\text{yr}^{-1}$, (ii) extensional kinematic boundary conditions along the Lyons–Turin transect and extensional strain regime in the central part of the Western Alps, and (iii) north–south to NW–SE compression in the southern Alps and Provence. These results are still preliminary and marginally significant, given the associated uncertainties. They are however consistent with the most recent seismotectonic results published in these areas. © 2000 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

GPS / continuous measurements / Western Alps / present-day deformation

Résumé – Douze stations GPS permanentes, actuellement opérationnelles dans les Alpes occidentales et leur avant-pays, constituent le réseau GPS permanent Regal. Les résultats préliminaires montrent (1) des vitesses résiduelles inférieures à $3 \text{ mm}\cdot\text{an}^{-1}$ par rapport à l'Eurasie, (2) des conditions cinématiques aux limites en extension sur le transect Lyons–Turin et un régime en extension est–ouest dans la partie centrale des Alpes occidentales et (3) une compression nord–sud à NW–SE dans les Alpes du Sud et la Provence. Ces résultats, encore préliminaires et marginalement significatifs, compte tenu des incertitudes associées, sont toutefois conformes à ceux récemment obtenus par des approches sismotectoniques dans ces régions. © 2000 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

GPS / mesures continues / Alpes occidentales / déformation actuelle

Abridged version

The present-day tectonic activity of the Western Alps is demonstrated by a moderate seismicity and local

geodetic measurements [5, 7, 9, 15, 16, 18]. The kinematics of the present-day deformation in the Western Alps are however poorly known, mostly because of a lack of direct measurements of block motion and inter-

* Correspondance et tirés à part.

Adresse e-mail : calais@faille.unice.fr (Éric Calais).

nal deformation. Geodetic measurements have the potential to provide quantitative estimates of crustal strain and block motion in the Alps, but the low expected rates, close to the accuracy of the geodetic techniques, make such measurements challenging. Indeed, an analysis of 2.5 years of continuous GPS data at Turin (Italy), Grasse (France), and Zimmerwald (Switzerland), showed that the present-day differential motion across the Western Alps does not exceed $3 \text{ mm}\cdot\text{yr}^{-1}$ [4].

Continuous measurements performed at permanent GPS stations provide unique data sets for rigorously assessing crustal deformation in regions of low strain rates by reducing the amount of time necessary to detect a significant strain signal, minimizing systematic errors, providing continuous position time series, and possibly capturing co- and post-seismic motion. In 1997, we started the implementation of a network of permanent GPS stations in the Western Alps and their surroundings (REGAL network, *figure 1*).

The REGAL network mostly operates dual frequency Ashtech Z12 CGRS GPS stations with choke-ring antennas (*figure 2*). All stations are connected to the AC power, with backup batteries, and to the phone network by a high-speed modem using regular phone lines. In most cases, the GPS antenna is installed on top of a 1.5 to 2.5 m high concrete pillar directly anchored into the bedrock. The data are currently recorded at 30 s intervals. They are downloaded once daily and sent to a data center located at Géosciences Azur, Sophia-Antipolis where they are converted into RINEX format, quality checked, archived, and made available to users. Data are freely available in raw and RINEX format at <http://kreiz.unice.fr/regal>.

The GPS data from the REGAL network are routinely processed with the GAMIT software [11], together with 10 global IGS stations (KOSG, WZTR, NOTO, MATE, GRAZ, EBRE, VILL, CAGL, MEDI, UPAD) that serve as ties with the ITRF97 [5]. We also include the stations ZIMM, TORI, GRAS, TOUL, GENO, HFLK, OBER because of their tectonic interest. We solve for regional station coordinates, satellite state vectors, 13 tropospheric zenith delay parameters per site and day, and phase ambiguities using doubly-differenced GPS phase measurements, with IGS final orbits and IERS earth orientation parameters. We apply azimuth and elevation-dependent antenna phase center models, following the tables recommended by the IGS. The least squares adjustment vector and its corresponding variance-covariance matrix for station positions and orbital elements estimated for each independent daily solution are then passed to a Kalman filter (GLOBK, [8]) that estimates station positions and velocities. We obtain long term

repeatabilities [12] of the order of 2–3 mm for the horizontal components and 8–10 mm for the vertical component. Using a noise model that combines white and colored noise (flicker noise, spectral index 1 [4, 14, 21]), we find uncertainties for the velocities ranging from $1 \text{ mm}\cdot\text{yr}^{-1}$ for the oldest stations (ZIMM, GRAS, TOUL, TORI, SJDV) to $4\text{--}5 \text{ mm}\cdot\text{yr}^{-1}$ for the most recently installed (CHAT, MTPL) (*table*).

Station velocities obtained in ITRF97 are rotated into a Eurasian reference by subtracting the rigid rotation computed from ITRF97 velocities [3] at 11 central European sites located away from major active tectonic structures (GOPE, JOZE, BOR1, LAMA, ZWEN, POTS, WETT, GRAZ, PENC, Effelsberg, ONSA). The resulting velocity field shows residual motions with respect to Eurasia lower than $3 \text{ mm}\cdot\text{yr}^{-1}$ (*figure 3*). We obtain at TORI, in the Po plain, a residual velocity of $2.3 \pm 0.8 \text{ mm}\cdot\text{yr}^{-1}$ to the SSW and a velocity of $1.9 \pm 1.1 \text{ mm}\cdot\text{yr}^{-1}$ at SJDV, on the alpine foreland. These results indicate that the current kinematic boundary conditions across the Western Alps are extensional, as also shown by the SJDV–TORI baseline time series (*figure 4*). We obtain at MODA (internal zones) a residual velocity of $1.2 \pm 1.2 \text{ mm}\cdot\text{yr}^{-1}$ to the SSE. The MODA–FCLZ baseline shows lengthening at a rate of $1.6 \pm 0.8 \text{ mm}\cdot\text{yr}^{-1}$. These results are still marginally significant but suggest that the current deformation regime along the Lyons–Turin transect is extensional, as also indicated by recent seismotectonic data [19]. It is in qualitative agreement with local geodetic measurements in the internal zones (Briançon area [18]) but excludes more than $2.4 \text{ mm}\cdot\text{yr}^{-1}$ of extension (FCLZ–MODA baseline, upper uncertainty limit at 95 % confidence). Our results indicate a different tectonic regime in the southern part of the Western Alps and Provence, with NW–SE to north–south compression. The GRAS–TORI baseline, for instance, shows shortening at a rate of $1.4 \pm 1.0 \text{ mm}\cdot\text{yr}^{-1}$. This result is consistent with seismotectonic data and local geodetic measurements in these areas [2, 5, 10, 13]. The Middle Durance fault zone, one of the main active faults in this area [6], is crossed by the GINA–MICH baseline, which shows shortening at a rate of $1.0 \pm 0.8 \text{ mm}\cdot\text{yr}^{-1}$ (*figure 4*). This result is only marginally significant, but confirms the upper bound of $2 \text{ mm}\cdot\text{yr}^{-1}$ obtained by [7] from triangulation–GPS comparisons.

The REGAL permanent GPS network has been operating since the end of 1997 for the oldest stations and will continue to be densified. Although they are still close to or within their associated uncertainties, preliminary results provide, for the first time, a direct estimate of crustal deformation across and within the Western Alps.

1. Introduction

La sismicité qui jalonne la chaîne des Alpes occidentales et des mesures géodésiques locales montrent que la déformation tectonique y est toujours active [5, 7, 9, 15, 16, 18]. Cette déformation est généralement interprétée comme le résultat de la convergence Afrique/Eurasie, mais les mécanismes liant cette cinématique à la déformation observée ne sont pas encore établis. En particulier, à l'échelle des Alpes occidentales, on connaît mal les conditions cinématiques aux limites, la distribution de la déformation entre les structures actives majeures et le taux de glissement sur les failles actives. L'accès à ces connaissances passe, en particulier, par la mesure directe des déplacements et déformations crustales par géodésie.

La technique de géodésie spatiale *Global Positioning System* (GPS) permet de déterminer les positions relatives de points situés à plusieurs centaines de kilomètres les uns des autres, avec une précision de 2 à 3 mm en planimétrie et de 5 à 10 mm en altimétrie. Répétées, les mesures GPS permettent de quantifier les déformations crustales à toutes les échelles spatiales [17]. Dans les Alpes occidentales et leur avant-pays, les taux de déformation et les vitesses de déplacement sur les failles actives majeures sont faibles, probablement inférieurs à $3 \text{ mm}\cdot\text{an}^{-1}$ au travers de la chaîne [4]. Leur mesure par GPS doit donc reposer sur des stratégies adaptées pour fournir des résultats en un temps raisonnable. C'est le cas du « GPS continu », qui consiste à enregistrer des données sans interruption et durant plusieurs années sur des sites instrumentés en permanence.

L'avantage principal du GPS continu est la résolution temporelle, obtenue néanmoins au détriment de la résolution spatiale. Cette résolution temporelle permet d'abord de diminuer le temps nécessaire à l'obtention d'un signal tectonique qui dépasse le bruit de mesure, grâce à la fréquence d'échantillonnage quotidienne [14, 21]. En outre, elle permet d'obtenir des séries temporelles continues des positions des stations, ce qui permet (1) de déterminer rigoureusement les modèles d'erreur associés aux données et (2) de détecter les effets géophysiques transitoires qui peuvent affecter la position des stations au cours du temps. Ces effets transitoires peuvent être d'origine tectonique (déplacement co- ou post-sismique par exemple) ou atmosphérique (variabilité troposphérique saisonnière), voire liées aux surcharges océaniques, atmosphériques ou au rebond post-glaciaire.

2. Le réseau GPS permanent Regal

Quatorze stations GPS permanentes sont actuellement opérationnelles dans le cadre du projet Regal : AJAC, CHAT, FCLZ, GINA, JOUX, MARS, MICH, MODA, MTPL, SAUV, SJDV, et STJ9 (*figure 1*). Les stations GRAS

et TORI du réseau global de l'IGS (International GPS Service for Geodynamics) sont incluses dans ce réseau. Sept stations supplémentaires verront le jour entre la fin 2000 et le début 2001 (*figure 1*) : mont Aigoual (Cévennes), aiguilles Rouges (Haute-Savoie), Bure (Dévoluy), Welschbruch (Vosges), Chateaurenard (Alpilles), Nice (Alpes-Maritimes), cap Camarat (Maures).

Le réseau Regal adhère aux standards internationaux utilisés en matière d'équipement GPS, de choix des sites et de monumentation pour la mesure des déformations crustales. Les sites sélectionnés sont géologiquement stables et au rocher. Les monuments géodésiques sont des piliers de béton d'une hauteur de 1,5 m à 2 m pour un diamètre de 40 cm, directement ancrés dans la roche en place (*figure 2*). Nous utilisons essentiellement des récepteurs GPS bifréquences Ashtech Z12 CGRS, munis d'antennes de type *choke-ring* (*figure 2*). Un modem connecte chaque récepteur au réseau téléphonique pour la télémaintenance et la récupération quotidienne des données. Les données sont enregistrées en continu, 24 h sur 24, à la cadence de 30 s.

Les données des stations Regal sont récupérées quotidiennement par les différents organismes participant au projet et déposées sur le serveur de données situé à Géosciences Azur, Sophia-Antipolis. Elles y sont converties au format standard d'échange Rinex, leur qualité et intégrité sont contrôlées et elles sont archivées. Les utilisateurs accèdent à la base de données Regal via internet à l'adresse <http://kreiz.unice.fr/regal>.

La totalité des données est traitée en routine à Géosciences Azur à l'aide du logiciel Gamit/GLOBK [11]. Une partie des stations est traitée au Lareg (sites participant au RGP) et à l'université de Savoie à Chambéry, à l'aide du logiciel Bernese. Les résultats présentés ici sont dérivés du traitement Gamit-GLOBK, car il concerne l'ensemble des stations et la totalité de la période des mesures. Nous renvoyons le lecteur à la référence [4] pour une description détaillée de la stratégie de traitement. Nous rappelons simplement que ce traitement consiste en une inversion au sens des moindres carrés des données GPS de phase et de code. Nous traitons les stations Regal en même temps que 10 stations GPS permanentes en Europe, ce qui permet le rattachement au référentiel terrestre ITRF97 [3] (KOSG, WZTR, NOTO, MATE, GRAZ, EBRE, VILL, CAGL, MEDI, UPAD). Nous incluons aussi les stations ZIMM, TORI, GRAS, TOUL, GENO, HFLK, OBER, en raison de leur intérêt tectonique. Chaque solution journalière libre (contraintes a priori sur les paramètres estimés relâchées) est ensuite combinée à l'aide d'un filtre de Kalman (GLOBK [8]), afin de déterminer les positions et les vitesses des stations dans le référentiel terrestre ITRF97. Le résultat final est une série temporelle de positions, une position et une vitesse par station dans le référentiel ITRF97 (*tableau*).

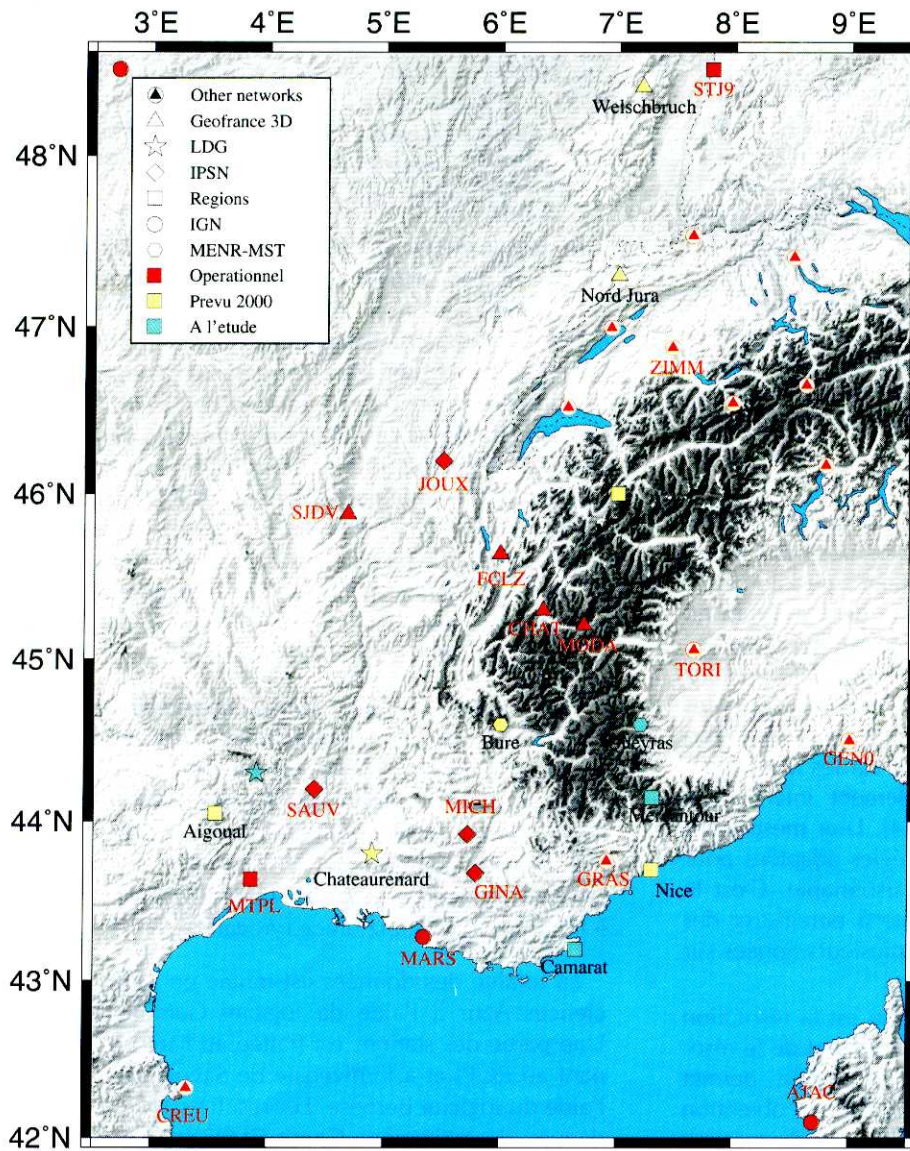


Figure 1. Carte de localisation des stations GPS permanentes du réseau Regal.

Figure 1. Location map of the REGAL permanent GPS stations.

3. Premiers résultats

3.1. Précision

La précision des résultats est quantifiée par la répétabilité à long terme des positions des stations (ou écart moyen quadratique pondéré après soustraction de la tendance linéaire [4, 14, 21]). Nous obtenons, pour l'ensemble des stations, des répétabilités long terme de l'ordre de 2–3 mm pour les composantes planimétriques et de 8–10 mm pour la composante verticale [12].

À partir de l'analyse de séries temporelles de sites GPS permanents, plusieurs auteurs ont mis en évidence des corrélations temporelles associées à un bruit coloré d'indice spectral généralement compris entre 1 et 2, superposé à un bruit blanc [4, 14, 21]. Le *tableau* montre les résultats obtenus en utilisant un modèle d'erreur

combinant bruit blanc et coloré d'indice spectral 1 [21], adapté aux séries temporelles des stations Regal. Les incertitudes sur les vitesses dans ITRF97 varient entre $1 \text{ mm}\cdot\text{an}^{-1}$ pour les stations les plus anciennes (ZIMM, GRAS, TOUL, TORI, SJDV), jusqu'à 4 à $5 \text{ mm}\cdot\text{an}^{-1}$ pour les plus récemment installées (CHAT, MTPL). Dans la suite du texte, les incertitudes indiquées seront basées sur un modèle d'erreur combinant bruit blanc et coloré d'indice spectral 1 et les valeurs indiquées pour un intervalle de confiance de 95 %.

3.2. Interprétation

Les résultats bruts issus du traitement des données GPS sont obtenus dans le référentiel ITRF97 (*tableau*). L'interprétation de ces vitesses passe par un changement de référentiel afin, par exemple, de représenter des vitesses résiduelles par rapport à l'Eurasie, stable. Nous

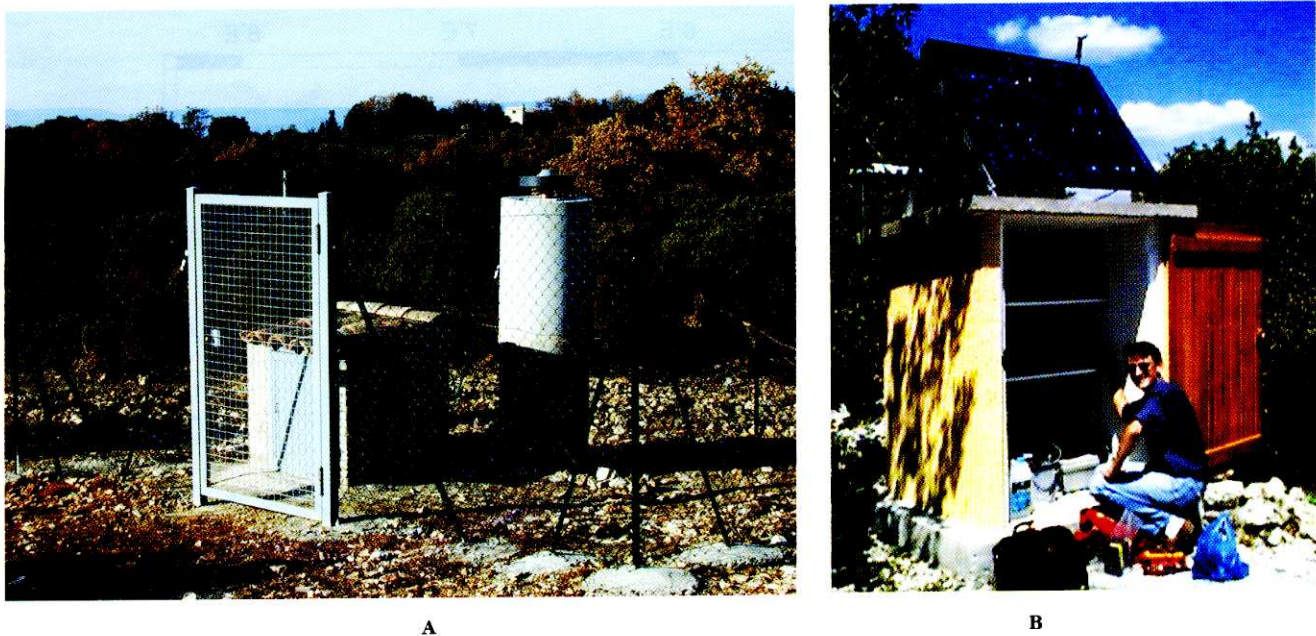


Figure 2. A. Pilier géodésique de la station Regal du Sauvan (SAUV). Le récepteur est installé dans la petite cabane attenante. B. Récepteur GPS de la station Regal de Saint-Michel-l'Observatoire (MICH), colocalisé avec une station sismologique du réseau IPSN de la Durance.

Figure 2. A. Geodetic pillar (station SAUV). The receiver is installed in the next to it. B. GPS receiver (MICH), colocalized with a seismic station of the IPSN Durance network.

utilisons une définition de l'Eurasie dérivée du champ de vitesse ITRF97 [3], calculée à partir des positions et vitesses de 11 sites situés en Europe centrale hors des zones de déformation actives majeures (GOPE, JOZE, BOR1, LAMA, ZWEN, POTS, WETT, GRAZ, PENC, Effelsberg, ONSA ; paramètres de rotation : longitude -90.5° , latitude 63.6° , vitesse angulaire $0,277^\circ\text{Ma}^{-1}$; ellipse d'erreur : demi-petit axe $1,5^\circ$, demi-grand axe $0,8^\circ$, orientation $-67,0^\circ$). Les résidus à ces 11 stations sont inférieurs à $0,7 \text{ mm}\cdot\text{an}^{-1}$. Cette approche est cohérente avec notre analyse, qui repose elle aussi sur

ITRF97. Elle présente, de plus, l'avantage d'être indépendante du modèle cinématique Nuvel1A-NNR [1] et d'être basée uniquement sur des données géodésiques. Après soustraction de la rotation rigide de l'Eurasie, nous obtenons les vitesses indiquées sur la figure 3. Nous listons ci-après les principales observations qui peuvent être faites à partir de ces résultats.

1. Par rapport à l'Eurasie, les mouvements résiduels au travers de l'ensemble des Alpes occidentales et à l'intérieur même de la chaîne ne dépassent pas

Tableau. Position et vitesse des stations GPS Regal dans ITRF97 [3] et par rapport à l'Eurasie (explications dans le texte). Vitesses (V_e , V_n) et écarts types (σ_{ve} , σ_{vn}) en $\text{mm}\cdot\text{an}^{-1}$, 95 % de confiance.

Table. Positions and velocities of the Regal GPS sites in ITRF97 [3] and relative to Eurasia (explanations in the text). Velocities (V_e , V_n) and standard deviations (σ_{ve} , σ_{vn}) in $\text{mm}\cdot\text{yr}^{-1}$, 95 % confidence.

SITE	Position		ITRF97				Eurasie	
	Longitude ($^\circ$)	Latitude ($^\circ$)	V_e	V_n	σ_{ve}	σ_{vn}	V_e	V_n
CHAT	6,359	45,304	21,1	13,0	2,6	5,0	0,4	-0,6
FCLZ	5,986	45,643	19,2	13,4	2,0	1,6	-1,3	-0,2
GINA	5,787	43,676	19,4	14,4	1,2	0,6	-1,7	0,8
GRAS	6,921	43,755	19,3	13,1	0,8	0,8	-1,8	-0,4
MARS	5,354	43,279	19,3	13,9	1,8	0,8	-1,8	0,3
MICH	5,717	43,924	20,1	13,7	1,6	1,2	-0,9	0,1
MODA	6,710	45,214	21,0	12,4	3,6	1,8	0,3	-1,2
MTPL	3,865	43,637	18,2	14,4			-2,6	0,7
SJDV	4,677	45,879	18,4	14,4	0,8	1,0	-1,8	0,8
TORI	7,661	45,063	20,0	11,5	0,8	0,8	-0,9	-2,0
TOUL	1,481	43,561	17,9	13,7	1,0	1,0	-2,5	0,0
ZIMM	7,465	46,877	21,3	14,0	0,8	1,0	1,0	0,4

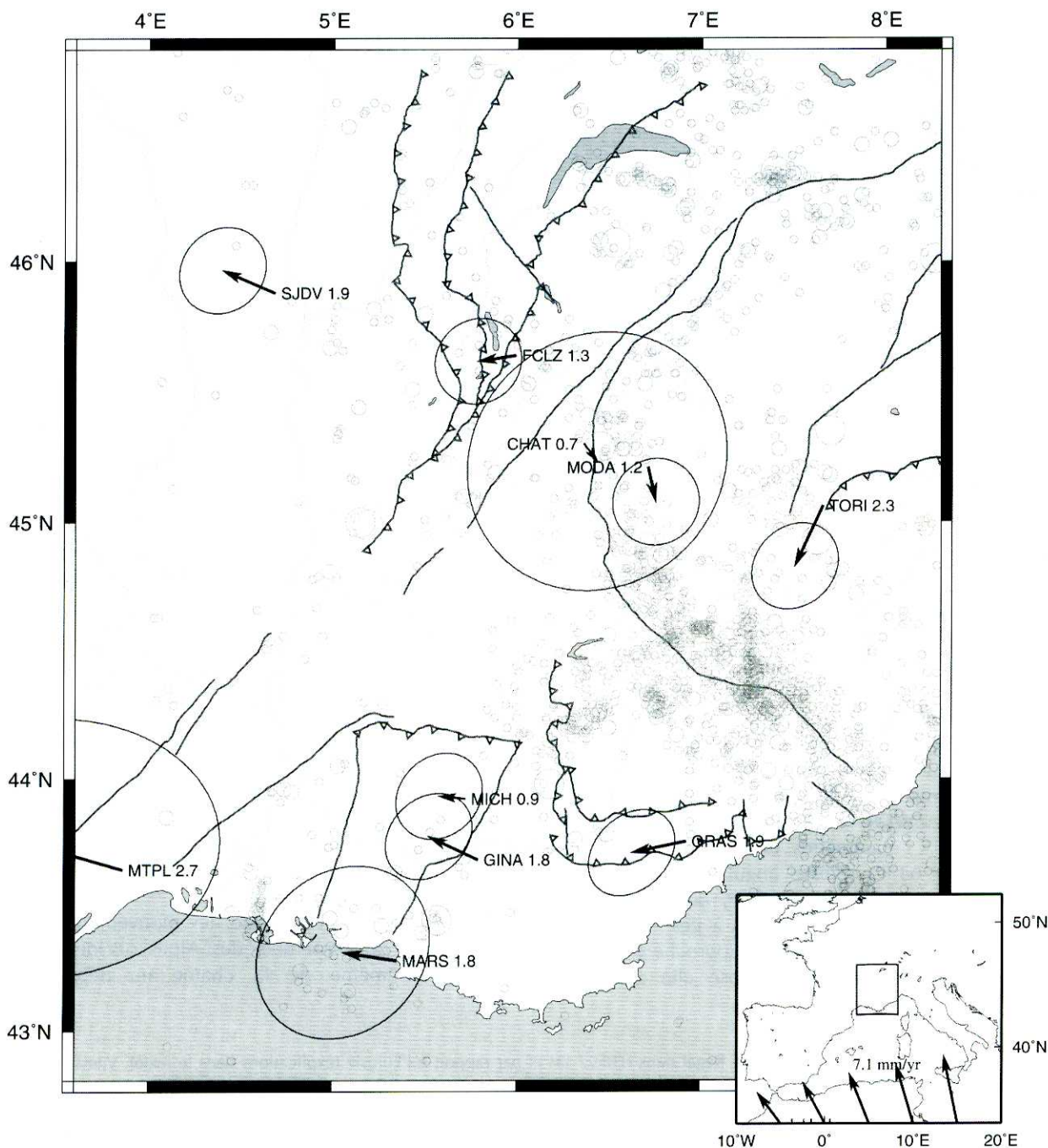


Figure 3. Vitesses résiduelles des sites GPS permanents Regal par rapport à l'Eurasie stable définie à partir d'un sous-ensemble rigide de sites ITRF97 situés en Europe centrale (explications dans le texte). Les principales failles récentes et/ou actives sont indiquées, ainsi que la sismicité instrumentale (catalogue LDG, 1960–1995).

Figure 3. Residual velocities at the REGAL permanent GPS sites with respect to Eurasia, defined from a rigid subset of the ITRF97 velocity field in central Europe (see text for explanations). The main active/recent faults are indicated, together with the instrumental seismicity (LDG catalog, 1960–1995).

3 mm·an⁻¹, en accord avec des résultats obtenus indépendamment sur les sites GPS permanents de Grasse, Turin et Zimmerwald [4].

2. La station de Turin montre un déplacement résiduel de $2,3 \pm 0,8$ mm·an⁻¹ vers le SSW. Le site de Saint-Jean-

des-Vignes, première station Regal installée (octobre 1997), située dans l'avant-pays alpin, montre un déplacement résiduel de $1,9 \pm 1,1$ mm·an⁻¹ vers l'ouest. Ces résultats indiquent des conditions cinématiques aux limites en extension dans les Alpes occidentales.

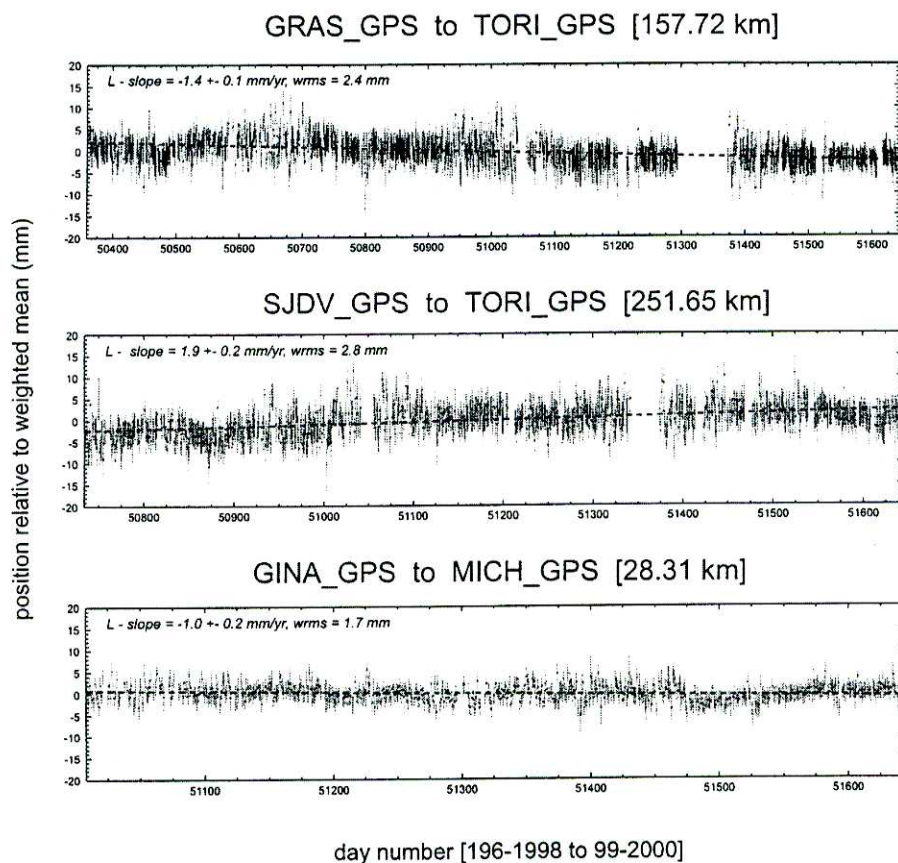


Figure 4. Série temporelle des solutions journalières de la longueur des lignes de base GINA–MICH, SJDV–TORI, GRAS–TORI. Abscisses en jours juliens modifiés. Les ordonnées sont les écarts en millimètres par rapport à la moyenne pondérée par les écarts types des solutions journalières. Les longueurs sont calculées sur une géodésique entre les deux sites.

Figure 4. Time series of daily solutions for the GINA–MICH, SJDV–TORI, GRAS–TORI baselines. X-axis in modified Julian days. The Y-axis represents the scatter with respect to the weighted mean of the daily solutions. Lengths are calculated along a geodesic.

L'extension prévaut également sur la série temporelle de la ligne de base Turin–Saint-Jean-des-Vignes ($1,9 \pm 1,4 \text{ mm}\cdot\text{an}^{-1}$, figure 4).

3. Modane, seul site permanent situé dans les zones internes, montre un mouvement résiduel de $1,2 \pm 1,2 \text{ mm}\cdot\text{an}^{-1}$ vers le sud-sud-est. Le site de La Feclaz, situé au front subalpin des Bauges, montre un déplacement résiduel de $1,3 \pm 1,2 \text{ mm}\cdot\text{an}^{-1}$ vers l'ouest-sud-ouest. La ligne de base entre La Feclaz et Modane fait apparaître un allongement à un taux de $1,6 \pm 0,8 \text{ mm}\cdot\text{an}^{-1}$. Bien que marginalement significatifs, ces résultats suggèrent que la cinématique dominante à l'est du front pennique, le long de la coupe Lyons–Turin, est d'extension est–ouest. Ce résultat est en accord avec les résultats sismotectoniques [19], qui montrent une extension radiale généralisée affectant l'ensemble des zones internes des Alpes occidentales sur toute l'épaisseur de la croûte sismogénique, localisée à l'aplomb du front pennique. Il est qualitativement en accord avec les mesures géodésiques locales dans les zones internes (région de Briançon [18]) mais exclut plus de $2,4 \text{ mm}\cdot\text{an}^{-1}$ d'extension (ligne de base La Feclaz–Modane, borne supérieure des erreurs à 95 % de confiance).

4. Le régime de déformation change dans le Sud des Alpes occidentales et en Provence : il s'agit essentiellement de compression NW–SE à nord–sud. Ce résultat

est illustré par le raccourcissement de $1,4 \pm 1,0 \text{ mm}\cdot\text{an}^{-1}$ de la ligne de base Grasse–Turin (figure 4). Ces résultats sont conformes à ceux obtenus à partir d'études sismotectoniques et géodésiques locales, indiquant un régime tectonique actuel en compression nord–sud à WNW–ESE dans le Sud-Est de la France [2, 5, 10, 13]. Dans cette région, la faille de la moyenne Durance est un accident actif majeur [6, 20], le seul du territoire national métropolitain dont l'activité soit identifiée à travers la sismicité instrumentale, la sismicité historique et la paléosismicité [2]. La série temporelle de la ligne de base Gina–Mich, qui traverse cette faille, indique un raccourcissement de $1,0 \pm 0,8 \text{ mm}\cdot\text{an}^{-1}$ (figure 4). Ce résultat, bien qu'encore marginalement significatif, confirme la borne supérieure de $2 \text{ mm}\cdot\text{an}^{-1}$ obtenue par comparaison de données de triangulation et GPS [7].

4. Conclusions

Le réseau GPS permanent Regal est actuellement constitué de 14 stations opérationnelles enregistrant des données en continu depuis la fin de l'année 1997 pour les stations les plus anciennes. Les résultats préliminaires issus des stations permanentes Regal font apparaître des vitesses résiduelles faibles par rapport à l'Eurasie, inférieures à $3 \text{ mm}\cdot\text{an}^{-1}$. Ils mettent en évidence des

conditions cinématiques aux limites en extension sur la coupe Lyons–Turin et un régime en extension est–ouest dans la partie centrale des Alpes occidentales. Ces résultats, en désaccord avec l'idée généralement admise de conditions aux limites en convergence (« poussée alpine » des auteurs), sont cependant en accord avec les données sismotectoniques les plus récentes [19]. Ils montrent finalement une compression nord–sud à NW–SE dans les Alpes du Sud et en Provence, conformes aux résultats d'études sismotectoniques et géodésiques locales [2, 5, 10, 13].

Remerciements. Le projet Regal a vu le jour grâce au soutien scientifique et financier du programme national GéoFrance 3D (BRGM, MENRT, Insu). Le réseau Regal est implémenté et maintenu dans le cadre d'une collaboration entre le laboratoire Géosciences Azur de Sophia-Antipolis, l'observatoire de Grenoble, le laboratoire de géodynamique de Chambéry, le laboratoire de tectonique de Montpellier, l'observatoire de la Côte d'Azur à Nice, l'Institut de physique du globe de Strasbourg, l'Institut géographique national (IGN), l'Institut de protection et de sûreté nucléaire (IPSN), le laboratoire de détection géophysique (LDG). Il est financé par GéoFrance 3D, l'IPSN, le LDG, l'IGN, les régions Provence-Alpes-Côte-d'Azur, Rhône-Alpes, Languedoc-Roussillon et Alsace, le Pôle grenoblois pour la prévention des risques naturels, le programme Interreg II, ainsi que par des financements propres des laboratoires universitaires partenaires.

Références

- [1] Argus D.F., Gordon R.G., No-net-rotation model of current plate velocities incorporating plate motion model NUVEL-1, *Geophys. Res. Lett.* 18 (1991) 2039–2042.
- [2] Barroux E., thèse, université Paris-Sud–Orsay, 2000, 250 p.
- [3] Boucher C., Altamimi Z., Sillard P., Results and analysis of the ITRF97, IERS Technical note 27, 191p.
- [4] Calais E., Continuous GPS measurements across the Western Alps, 1996–1998, *Geophys. J. Int.* 38 (1999) 221–230.
- [5] Calais E., Galisson L., Stéphan J.F., Delteil J., Deverchère J., Larroque C., Mercier de Lépinay B., Popoff M., Sosson M., Crustal strain in the Southern Alps, 1948–1998, *Tectonophysics* 319 (2000) 1–17.
- [6] Cushing M., Volant P., Bellier O., Sebrier M., Barroux E., Grellet B., Combes P., Rosique T., A multidisciplinary experiment to characterize an active fault system in moderate seismic activity area : the example of the Durance fault (south eastern France), *European Geophysical Society, Annales Geophysicae, supplement I to vol 15, p. C233, Vienne, Autriche, avril 1997.*
- [7] Ferhat G., Feigl K.L., Ritz J.F., Souriau A., Geodetic measurement of tectonic deformation in the Southern Alps and Provence, France, 1947–1994, *Earth Planet. Sci. Lett.* 159 (1998) 35–46.
- [8] Herring T.A., Davis J.L., Shapiro I.L., Geodesy by radio interferometry: the application of Kalman filtering to the analysis of very long baseline interferometry data, *J. Geophys. Res.* 95 (1990) 12561–12581.
- [9] Jouanne F., Ménard G., Jault D., Present-day deformation measurement in the French north-western Alps/southern Jura Mountains: data from triangulations comparison, *Geophys. J. Int.* 119 (1994) 151–165.
- [10] Jouanne J., Hyppolyte J.C., Gamond J.F., Martinod J., Current deformation of the Digne nappe (SW Alps) from a comparison between triangulation and GPS data, *Geophys. J. Int.* (accepté).
- [11] King R.W., Bock Y., Documentation for the GAMIT GPS software analysis, release 9.9, Mass. Inst. of Technology & Scripps Inst. of Oceanography, 1999.
- [12] Larson K.M., Agnew D.C., Application of the Global Positioning System to crustal deformation measurement, 1. Precision and accuracy, *J. Geophys. Res.* 96 (1991) 16547–16565.
- [13] Maddedu B., Béthoux N., Stéphan J.F., Champ de contrainte post-pliocène et déformations récentes dans les Alpes sud-occidentales, *Bull. Soc. géol. France* 167 (1997) 797–810.
- [14] Mao A., Harrison C.G.A., Dixon T.H., Noise in GPS coordinate time series, *J. Geophys. Res.* 104 (1999) 2797–2816.
- [15] Martinod J., Jouanne F., Taverna J., Ménard G., Gamond J.F., Darmendrail X., Notter J.C., Basile C., Present-day deformation of the Dauphiné alpine and subalpine massifs (SE France), *Geophys. J. Int.* 127 (1996) 189–200.
- [16] Reilly W.I., Gubler E., Crustal strain in Switzerland 1870–1970, *Geophys. J. Int.* 103 (1990) 251–256.
- [17] Segall P., Davies J.L., GPS applications for geodynamics and earthquake studies, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 25 (1997) 3401–3436.
- [18] Sue C., Martinod J., Tricart P., Thouvenot F., Gamond J.F., Fréchet J., Marinier D., Glot J.P., Grasso J.R., Active deformation in the inner western Alps inferred from comparison between-classical and 1996-GPS geodetic surveys, *Tectonophysics* 320 (2000) 17–29.
- [19] Sue C., Thouvenot F., Fréchet J., Tricart P., Widespread extension in the core of the Western Alps revealed by earthquake analysis, *J. Geophys. Res.* 104 (1999) 25611–25622.
- [20] Volant P., Berge C., Dervin P., Cushing M., Mohammadioun G., Mathieu F., The south eastern Durance fault permanent network: preliminary results, *J. Seismology* 4 (2) (2000) 175–189.
- [21] Zhang J., Bock Y., Johnson H., Fang P., Williams S., Genrich J., Wdowinski S., Behr J., Southern California Permanent GPS geodetic array: error analysis of daily position estimates and sites velocities, *J. Geophys. Res.* 102 (1997) 18035–18055.