

Surveillance tectonique par GPS à la jonction des plaques Afrique, Arabie et Anatolie, au sud-est de la Turquie

■ Sophie BERTRAND

La Terre tremble tous les jours et elle continuera de trembler en raison des mouvements tectoniques imposés par sa géophysique interne et sa géodynamique. La Turquie est l'une des régions les plus sismiques au monde : chacun d'entre nous se souvient des terribles événements de Kocaeli (M_w 7.6) et Düzce (M_w 7.1) survenus les 17 août et 12 novembre 1999 à proximité d'Istanbul et qui causèrent 30 000 victimes, 50 000 blessés et plus de 35 milliards d'euros de dégâts. Ces deux séismes suscitèrent l'intérêt de la communauté scientifique dans ces régions à forte densité de population. De nombreux projets virent ainsi le jour dans les zones de risque sismique élevé au Moyen-Orient, comme le projet européen Archaeosismology and Palaeosismology for the protection of Archaeological sites in the Middle East, ICA-CT-2002-10024 (APAME). Les multiples collaborations entre TUBITAK (Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu, Gebze, Turquie), le Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, États-Unis (MIT) et diverses équipes de l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg (IPGS) ont rendu possible, entre autres, ce travail de thèse de doctorat réalisé à l'IPGS. Cet article présente la quantification par GPS des mouvements tectoniques des structures liées à la convergence des plaques Eurasie, Afrique et Arabie au sud-est de la Turquie, ce qui constitue un enjeu majeur dans la compréhension et l'évaluation du risque sismique.

■ mots-clés

GPS, Moyen-Orient, jonction triple, cinématique, répétabilité, traitement des données, référentiel, champ de vitesses

Problèmes et motivations

■ Contexte géodynamique

Le bloc anatolien (presque intégralement la Turquie actuelle) se situe à l'intersection de trois principales plaques tectoniques nommées Afrique, Arabie et Eurasie et constitue une zone tectonique clef de la ceinture Alpes – Himalaya, qui s'étend de l'Espagne à la Chine (Figure 1). La Turquie est donc un fabuleux laboratoire naturel pour étudier la convergence liée à la collision entre ces trois plaques et les structures qui en sont la conséquence (failles actives décrochantes ou normales, bassins, etc.). Cette collision en cours a comme effet l'expulsion de l'Anatolie vers l'ouest le long de deux failles décrochantes, les failles Nord Anatolienne

(FNA) et Est Anatolienne (FEA), dextre et sénestre respectivement, qui, associées à l'Arc de Chypre, gouvernent la tectonique actuelle de la Turquie.

Notre zone d'étude est localisée au sud-est de la Turquie, dans la province d'Hatay dont le chef-lieu est Antakya (ancienne Antioche). Trois failles s'y rencontrent : la terminaison nord de la Faille de la Mer Morte (FMM), la terminaison sud-ouest de la FEA et l'extrémité orientale de l'Arc de Chypre (Figure 2). La FEA marque la frontière entre l'Arabie et l'Anatolie et s'étend de Karliova où elle joint la FNA à Türkoğlu au nord de la Vallée de Karasu. Sa vitesse varie entre 6 et 15 mm/an selon les échelles temporelles et les méthodes considérées. La branche sud-ouest de la FEA se divise entre la Faille

de Karataş – Osmaniye (FKO) de Türkoğlu à la Mer Méditerranée et la Faille de Karasu (FK) le long de la marge orientale du Massif d'Amanos, entre Türkoğlu et Antakya. La vitesse de la FK est estimée entre 1 et 7 mm/an alors que la FKO est considérée dans certaines études comme inactive.

La FMM s'étend de la Mer Rouge jusqu'à la Turquie et constitue la limite continentale séparant l'Arabie à l'est de l'Afrique à l'ouest. Cette faille sert de guide décrochant sénestre au mouvement différentiel vers le nord entre l'Arabie et l'Afrique, estimé entre 4 et 7 mm/an. Enfin, l'Arc de Chypre est regardé comme le segment le plus oriental de la frontière de plaques accommodant la convergence entre l'Afrique au sud et l'Eurasie au nord.

■ ■ ■ Bien que de nombreuses études s'accordent à dire, d'un point de vue cinématique, que la limite entre l'Arabie, l'Afrique et l'Anatolie forme une jonction triple en Hatay, la nature et la géométrie de la zone tectonique à l'approche de cette jonction restent source de débats sur un modèle cohérent de déformation, simplement parce que la cinématique des failles demeure peu claire et que les mouvements des blocs tectoniques ne sont pas bien contraints. Il reste donc à ce jour plusieurs questions, comme par exemple : quelles sont les vitesses le long des failles ? Quel est le rôle de chaque structure dans la déformation régionale ?

■ Apport de la géodésie spatiale

La théorie de la tectonique des plaques est basée sur deux hypothèses fondamentales : (1) la lithosphère agit comme un ensemble de plaques rigides en rotation sur une surface sphérique et (2) la vitesse relative entre ces plaques est constante sur les derniers millions d'années. Cependant, ces hypothèses ne sont plus valables dans les régions de limites de plaques, où la complexité des failles, la topographie qui en résulte et l'importante sismicité jouent un rôle primordial dans la déformation active. Pour mieux comprendre les mécanismes de la déformation dans ces régions, il est alors essentiel de mesurer le champ de vitesses en surface. Une telle mesure repose sur du positionnement précis, réalisé depuis une centaine d'années par des méthodes géodésiques aussi bien classiques (triangulation, nivellement, etc.) que spatiales (GPS, InSAR, etc.). En effet, le terrible séisme survenu le 18 avril 1906 à San Francisco provoqua une prise de conscience du danger sismique par les scientifiques. Reid mesura ainsi pour la première fois la déformation associée à un séisme, en comparant des mesures de triangulation effectuées avant et après cet événement. Il montra ensuite, à partir de deux séries de mesures réalisées avant le séisme, que la Terre se déforme également en période de quiescence sismique, en accumulant lentement et progressivement sous

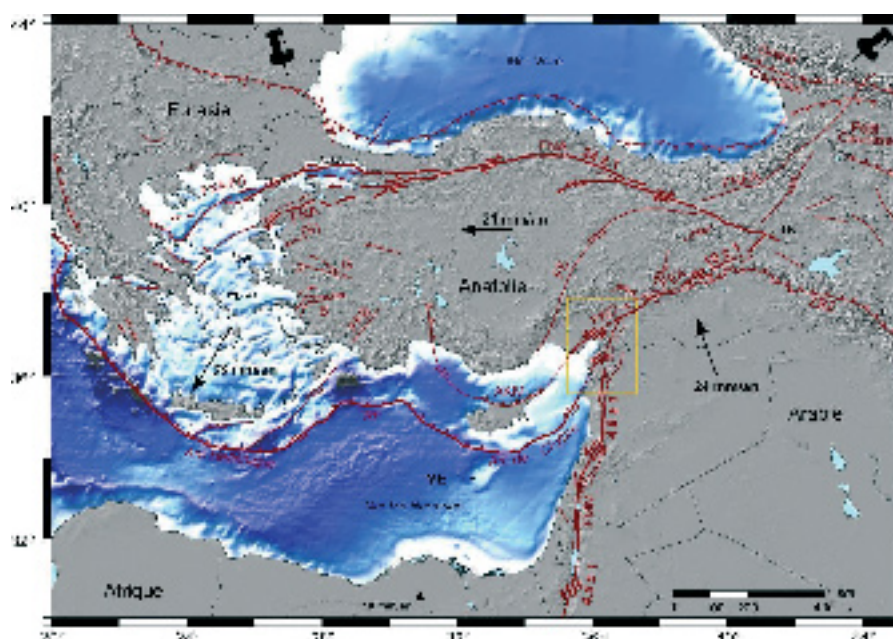


Figure 1. MNT de l'est du bassin méditerranéen (données topographiques SRTM et bathymétriques ETOPO2) avec indication de la zone d'étude. Les vitesses des plaques sont données par rapport à l'Eurasie.

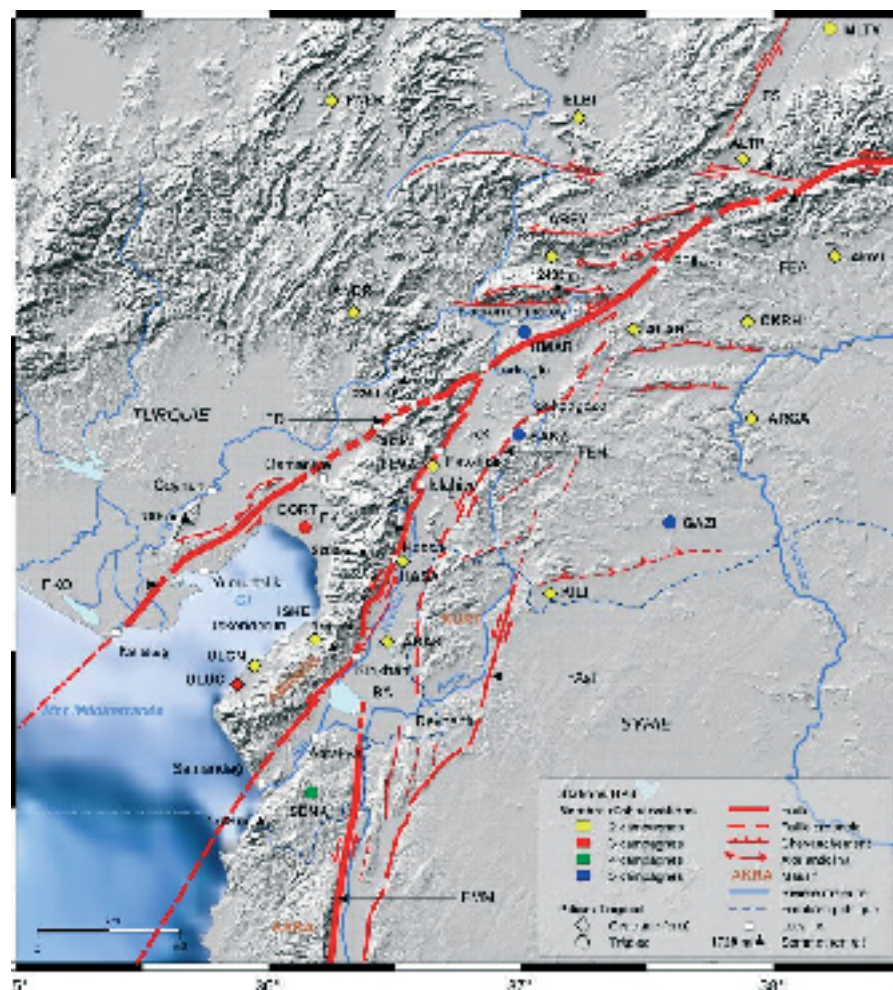


Figure 2 : Réseau Hatay.

forme de déformation élastique, l'énergie qui sera brutalement relâchée lors d'un séisme par la rupture d'une faille dans la croûte terrestre (Calais, 2000). La théorie du cycle sismique venait d'être posée...

Dès le début des années 1980, les Américains furent les premiers à envisager l'application du GPS à la géophysique, et plus particulièrement à la surveillance des failles actives : en effet, ils attendent toujours le "big one" sur la faille de San Andreas, un séisme dont les effets seraient certainement destructeurs. Le premier réseau de stations permanentes fut donc installé aux abords de cette faille, dans le but de mesurer ses déplacements en continu. De par son aspect portable et sa facilité de mise en œuvre, le GPS n'a ensuite cessé de se répandre et d'améliorer sa précision pour être aujourd'hui un outil très performant de quantification directe des mouvements tectoniques actuels.

Le principe est simple : connaissant la position précise d'un repère, il suffit de mesurer à nouveau la position du repère quelque temps plus tard pour déceler un déplacement et ainsi en déduire une vitesse. Une étude GPS approfondie permet alors de répondre à plusieurs interrogations concernant la distribution spatiale de la déformation : est-elle localisée et limitée aux frontières de blocs, que l'on peut considérer comme quasiment rigides et qui forment la frontière entre les plaques, ou bien est-elle plutôt répartie sur de plus larges régions sous la forme d'un écoulement continu ?

Réseau GPS à la jonction

La complexité tectonique en Hatay nécessite un réseau GPS dense couvrant les failles par des stations relativement proches, dans le but d'augmenter la résolution spatiale du champ de vitesses. Ainsi, le réseau Hatay comporte 23 stations, formant des lignes de base de 50 km environ entre stations (Figure 2). Le réseau a été installé par des collaborations entre le MIT et TUBITAK.



Figure 3 : a. Dispositif d'observation avec pilier en béton à la station ULCN. Le montage de l'antenne se fait par centrage forcé sur la vis positionnée sur la plate-forme.

b. Dispositif d'observation avec trépied sur le site DORT. Dans ce cas, le point est matérialisé par un repère géodésique placé dans un affleurement rocheux. Pour une hauteur d'antenne d'un mètre, une erreur de 0.1° par rapport à la verticale au-dessus du clou entraîne une erreur de positionnement horizontal d'environ 2 mm.

La répartition spatiale des stations se base sur les considérations morpho-tectoniques de la jonction. Ainsi, chaque bloc tectonique, défini en fonction de la géométrie des failles, est couvert par un maximum de stations : (1) le nord-ouest de l'Arabie est couvert par six stations (ADYI, ALAR, ARG, CKRH, GAZI et KILI) ; (2) quatre stations se trouvent à l'intérieur de la Vallée de Karasu (ABAK, HASA, FEVZ et SAKZ) ; (3) le massif d'Amanos et le littoral de la Mer Méditerranée sont couverts par quatre stations (DORT, ISKE, ULCN et ULUC) ; (4) le bloc anatolien montre un réseau composé de huit sites (ABEY, ALTP, ANDR, ELBI, KMAR, MLTY, MLT1 et PNLR) ; (5) une station est située à l'ouest de la FMM (SENK). Pour réduire les erreurs dues au centrage des antennes, 17 stations se composent d'un pilier en béton ancré dans le socle et muni d'une vis de centrage (Figure 3a). Pour les autres stations, le centrage s'effectue grâce à un trépied (Figure 3b).

■ Campagnes réalisées

La cartographie précise du champ de déformation nécessite une large fenêtre temporelle d'observations (Tableau 1) et plusieurs campagnes de mesures pour chaque site. Les premières mesures ont débuté en 1989, puis le réseau a progressivement été densifié pour atteindre 23 stations en 2004. Au total, sept campagnes ont eu lieu.

Elles ont toutes été conduites entre août et octobre, dans le but de minimiser les erreurs systématiques annuelles, puisque certains effets ont des variations périodiques, comme la densité électronique de l'ionosphère, qui dépend principalement de l'activité solaire, mais qui montre également des variations de période annuelle et semi-annuelle, liées à l'alternance des saisons. L'équipe de Tectonique Active de l'IPGS a participé à la dernière campagne de 2004, avec le soutien financier du projet APAME. Les données des campagnes antérieures ont été fournies

■■■

Site	Longitude	Latitude	Alt. (m)	1989	1991	1994	1996	1998	2002	2004
ABAK (Hatay Kirikhan)	36°27'54.2"	36°31'51.8"	121.1					◆		▲
ABEY (Maras Agbeyli)	37°06'45.5"	37°44'47.8"	1392.4					○		❖
ADYI (Adiyaman)	38°13'51.5"	37°44'49.1"	705.7			○	❖			
ALAR (Maras Pazarcik)	37°26'09.1"	37°31'03.6"	946.2					○		❖
ALTP (Malatya)	37°52'07.5"	38°03'01.2"	1336.4					○		❖
ANDR (Maras Andirin)	36°19'47.4"	37°34'21.0"	1072.8						□	❖
ARGA (S. Urfa Halfeti)	37°54'08.4"	37°14'12.4"	675.6					○		▲
CKRH (Adiyaman)	37°53'10.0"	37°32'29.2"	636.2					○		❖
DORT (Dört Yol)	36°08'14.7"	36°53'57.9"	71.2			○		❖		▲
ELBI (Maras Elbistan)	37°13'12.1"	38°10'44.3"	1218.3					○		❖
FEVZ (Fevzipasa)	36°38'35.7"	37°05'15.2"	599.4					◆		▲
GAZI (Gaziantep)	37°34'26.1"	36°54'03.8"	723.2		□	○	❖	○	□	
HASA (Hassa)	36°31'24.6"	36°47'16.7"	432.2					◆		▲
ISKE (Iskenderun)	36°10'48.2"	36°32'23.7"	373.8						◆	▲
KILI (Kilis)	37°06'21.8"	36°41'06.4"	651.4						◆	▲
KMAR (Maras Merkez)	36°59'45.4"	37°31'17.8"	604.8			○	❖	❖	□	❖
MLT1 (Malatya)	38°12'54.7"	38°27'22.2"	814.6						□	▲
MLTY (Malatya)	38°12'53.4"	38°27'22.2"	821.6	❖		○	❖			
PNLR (Tufanbeyli)	36°14'41.8"	38°13'52.6"	1407.6						□	❖
SAKZ (Sakçagöze)	36°58'19.0"	37°11'25.7"	1051.9			○	❖	❖	◆	▲
SENK (Senköy)	36°07'52.1"	36°02'58.6"	936.4			○	○	❖	◆	
ULCN (Uluçınar)	35°52'13.8"	36°23'48.4"	122.6						◆	▲
ULUC (Uluçınar)	35°56'22.8"	36°27'20.1"	91.5	❖	□	○				

Tableau 1. Années d'observation des sites. Coordonnées géographiques sur l'ellipsoïde WGS84.

Récepteurs : ◆ : Ashtech UZ-12 ; ❖ : Trimble 4000SSI ; ○ : Trimble 4000SSE ; ● : Trimble 4000SST ; □ : Trimble 4700 ; ▲ : Trimble 5700.

par l'équipe GPS du MIT, qui collabore avec l'IPGS pour cette étude.

■ Acquisition des données de la campagne de 2004

Généralement, une campagne d'acquisition de données se compose de plusieurs sessions de mesures, dont la longueur peut varier de quelques heures à quelques jours. Pour la campagne de 2004, toutes les sessions ont été de 10 heures et les répétabilités de 3 jours. La totalité des sites avait auparavant été contrôlée, ce qui consistait à vérifier si le site n'était pas dégradé (vis et/ou pilier vandalisé par exemple), afin d'organiser au mieux la mission d'observation.

Lors du positionnement de l'antenne, il faut prendre garde à deux sources d'erreurs : (1) des erreurs aléatoires dues à une mauvaise mise en station de l'antenne ou à une erreur de lecture de la

hauteur d'antenne et (2) des erreurs systématiques qui se produisent à chaque mise en station, telle qu'une embase mal réglée. Une stratégie pour limiter les effets de ces erreurs consiste à permuter les opérateurs et l'instrumentation (embase, antenne, récepteur). Pour des raisons pratiques (distance entre stations et nombre d'opérateurs), cette manière de procéder n'a pas été utilisée.

Le récepteur enregistre les signaux à un intervalle régulier de 30 secondes, en considérant un angle de coupure de 15°. Cet angle détermine la hauteur sous laquelle les signaux ne seront pas enregistrés, et conditionne donc le nombre d'observations disponibles pour le traitement mais également la tranche d'atmosphère traversée. Par conséquent, plus cet angle est petit, plus la couche d'atmosphère traversée sera épaisse et l'erreur causée par le

décali troposphérique importante. Une valeur de 15° permet d'acquérir suffisamment de données à faible élévation, ce qui est nécessaire pour contraindre la position verticale des stations, mais sans pour autant trop dégrader les enregistrements. Après acquisition, les données sont converties au format d'échange standard rinex.

Principe du traitement des données

Le traitement des données a été effectué à l'aide du logiciel GAMIT (version 10.1) et GLOBK (version 5.08, King et Bock, 2002 ; Herring, 2002), dans une approche en trois étapes :

- on utilise les observations des doubles différences de phase afin d'estimer les positions des stations pour chaque jour, le délai zénithal à

chaque station toutes les deux heures, les paramètres orbitaux et d'orientation de la Terre, en appliquant des contraintes a priori faibles sur tous les paramètres. On obtient pour chaque session un jeu de "quasi-observations", qui sont les différents paramètres estimés et la matrice de covariance associée (étape GAMIT) ;

- les paramètres estimés et la matrice de covariance associée pour chaque solution journalière à contrainte relâchée sont combinés et ajustés à l'aide d'un filtre de Kalman, afin de définir un jeu consistant de positions et de vitesses. En effet, si l'on utilise de fortes contraintes sur les coordonnées de stations dont les positions a priori ou mesurées sont erronées (problème d'antenne ou mauvaise mise en station par exemple), cela entraîne une erreur sur la position des autres stations et donc une déformation du réseau ;
- après combinaison des quasi-observations, le référentiel n'est que faiblement établi. On le définit en imposant de fortes contraintes sur les stations dont les positions et vitesses dans un référentiel donné sont connues. La solution libre est rattachée à l'ITRF en lui appliquant une similitude spatiale à 7 paramètres (séries temporelles) ou 14 (vitesses), de façon à minimiser les déviations des positions et vitesses des stations IGS intégrées au réseau. Le résultat final est une série temporelle de positions par station, ainsi qu'une position (référéncée à l'époque du milieu de la série de données) ajustée pour chaque site, une vitesse (dans un référentiel donné) et des statistiques qualitatives sur les résultats. Pratiquement, les deuxième et troisième étapes sont liées et effectuées par GLOBK.

■ Traitement des données en sessions journalières

Une source importante d'erreur dans la mesure est le délai introduit par l'ionosphère. Comme cette tranche atmosphérique est un milieu dispersif, la réfraction induite sur le signal dépend de sa fréquence et peut introduire un

retard variable. Ce délai peut être réduit à moins d'un mm en formant une combinaison linéaire particulière des phases L1 et L2 appelée LC, qui, en 1^{re} approximation, est indépendante des effets de la réfraction ionosphérique. Nous utilisons les orbites précises diffusées par l'IGS, dont la précision est estimée à ± 5 cm. Nous incluons les données de 20 stations IGS permanentes dont les positions et vitesses sont précisément déterminées dans le référentiel ITRF00 (Altamimi et al., 2002), afin de nous rattacher à celui-ci. Nous appliquons un modèle de correction de centre de phase des antennes dépendant de l'élévation et de l'azimut, un modèle de marées solides lunisolaires et polaires et un modèle de surcharge océanique. La campagne de 1989 n'a pas été traitée, parce que nous n'avons pas eu accès aux fichiers rinx des stations IGS à inclure dans le traitement.

Chaque solution individuelle possède des incertitudes formelles *nrms* (*normalized root mean square*, résidus moyens normalisés) pour les 4 composantes des lignes de base (N-S, E-O, vertical et longueur). Des modèles théoriques permettent d'évaluer ces incertitudes. Cependant, ces modèles ne prennent pas en compte certains phénomènes extérieurs et les erreurs accidentelles qui peuvent survenir pendant l'observation du site et peuvent donc sous-estimer les incertitudes. La répétabilité appelée *wrms* (*weighted root mean square*), ou dispersion, permet de donner un indicateur de la précision des mesures (Larson et Agnew, 1991), en quantifiant la constance des mesures effectuées à différentes époques. La référence considérée est la moyenne des mesures et la répétabilité est l'écart-type à cette moyenne. Le principal critère de validation du calcul des sessions journalières consiste donc à vérifier la dispersion sur les composantes horizontales des lignes de base, qui doit être la plus faible possible. En effet, comme il n'existe pas de référence absolue pour le positionnement, le critère de justesse sera la stabilité de la mesure dans le temps. Nous avons choisi de calculer les répétabilités des composantes des lignes de base en tes-

tant trois différentes solutions :

- (1) avec ambiguïtés fixées (un maximum d'ambiguïtés est contraint à prendre des valeurs entières) et orbites réajustées,
- (2) avec ambiguïtés libres (ambiguïtés laissées à leurs valeurs réelles) et orbites réajustées et
- (3) avec ambiguïtés fixées et orbites fixées.

La composante Est – Ouest a une dispersion plus élevée dans tous les cas, ceci étant lié aux trajectoires des satellites essentiellement orientées Nord – Sud, donnant ainsi une meilleure "répartition" des signaux en N – S qu'en E – O. Bien que les différences soient très faibles, les meilleures répétabilités sont obtenues pour les 1^{re} et 3^e méthodes. En effet, le fait de fixer les ambiguïtés à des valeurs entières permet d'augmenter la précision des mesures : ceci se voit essentiellement sur la composante E – O dont la dispersion maximale atteint ~ 8 mm lorsque l'on ne fixe pas les ambiguïtés et ~5 mm dans le cas où un maximum d'ambiguïtés est fixé. La solution avec orbites fixées est comparable à celle avec orbites réajustées.

Pour rester cohérent avec les solutions SOPAC (*Scripps Orbit and Permanent Array Center*) utilisées lors de la combinaison des campagnes et qui sont calculées avec réajustement des orbites, nous emploierons la stratégie avec réajustement des orbites. Les valeurs moyennes sont de 1 à 2 mm pour les campagnes de 1994 à 2004. Pour celle de 1991, les dispersions atteignent 10 mm sur la composante E – O. L'amélioration de la précision à court terme observée entre 1991 et 2004 est principalement la conséquence de l'augmentation du nombre de satellites formant la constellation, ce qui permet de définir aujourd'hui une meilleure couverture spatiale, mais elle est également due à l'expansion du réseau global utilisé pour déterminer les orbites des satellites.

■ Combinaison des campagnes

La combinaison consiste à intégrer sur plusieurs années en continu des solutions calculées par d'autres orga-

■■■

nismes, afin d'améliorer la combinaison et la mise en référentiel du réseau régional. SOPAC donne ainsi les jeux de quasi-observations résultant du traitement GAMIT de différents réseaux globaux. Dans cette étude, les 29 réseaux disponibles ont été utilisés. C'est dans ce but qu'il est indispensable, lors de l'étape GAMIT, d'intégrer des stations IGS communes avec les solutions SOPAC.

■ Mise en référentiel

La dernière phase du traitement consiste à définir un référentiel pour exprimer les positions et les vitesses des stations. Deux méthodes peuvent être mises en œuvre :

- estimer les solutions dans un référentiel où positions et vitesses des stations IGS sont bien déterminées. Dans notre cas, il s'agit de l'ITRF00, référentiel où toutes les plaques sont en mouvement ;
- comme l'ITRF00 n'a pas de signification tectonique, il est nécessaire de transférer le champ de vitesses observé dans un référentiel tectoniquement significatif pour distinguer les limites de blocs mais également les mouvements relatifs entre les différentes entités. Compte tenu de la localisation de notre zone d'étude, nous nous intéresserons uniquement à de tels référentiels.

■ Définition des référentiels Eurasie, Arabie et Anatolie

La première méthode possible pour définir le référentiel Eurasie consiste à calculer la solution en ITRF00, puis de lui retirer le mouvement de la plaque Eurasie donné par son pôle de rotation. De tels pôles de rotation peuvent être définis par le modèle global de tectonique des plaques NNR-NUVEL-1A de DeMets et al. (1994) ou par des études géodésiques, comme dans les travaux de Sella et al. (2002) et Altamimi et al. (2002).

La seconde stratégie consiste à minimiser les vitesses de sites eurasiens, choisis de façon à avoir des résidus en vitesses les plus faibles possible pour les sites servant à la définition du référentiel. Nous avons ainsi minimisé les

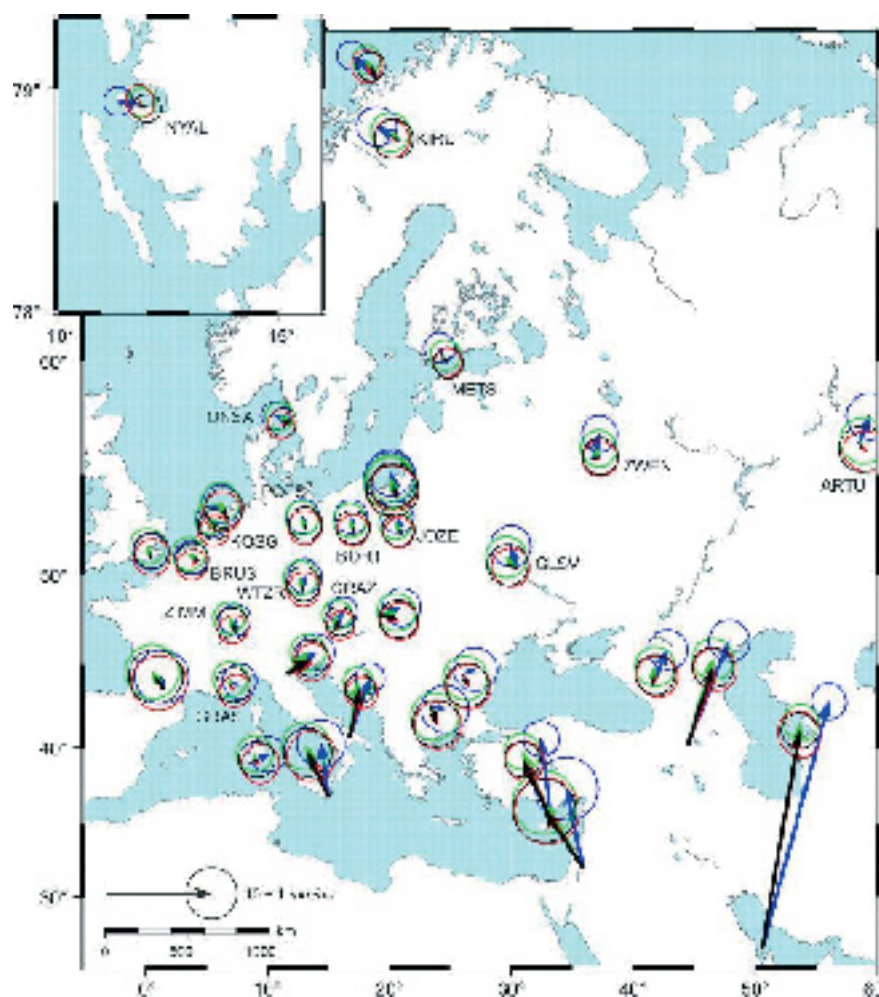


Figure 4. Résidus en vitesses des principales stations IGS pour les quatre solutions testées pour définir le référentiel Eurasie (intervalle de confiance à 2?). Flèches noires : pôle d'Altamimi et al. (2002) ; flèches bleues : pôle du modèle NNR-NUVEL-1A (DeMets et al., 1994) ; flèches vertes : pôle de Sella et al. (2002) ; flèches rouges : solution calculée en minimisant les vitesses horizontales de 17 stations IGS.

vitesse de 16 stations IGS en Eurasie : ARTU, BOR1, BRUS, GLSV, GRAS, GRAZ, JOZE, KIRU, KOSG, METS, NYAL, ONSA, POTS, WTZR, ZIMM et ZWEN et contraint la vitesse du site asiatique POL2 à 2 mm/an en composante nord et 0.5 mm/an en composante est, afin de prendre en compte son mouvement par rapport à la plateforme kazakhe (Figure 4).

Les vitesses obtenues pour ces 16 sites sont toutes inférieures à 1 mm/an et celles de la station POL2 ne diffèrent pas de plus d'1 mm/an de leurs valeurs a priori. Par ailleurs, le rms sur les vitesses de ces 17 stations après transformation est de 0.6 mm/an.

La figure 4 présente les résidus en

vitesse des principales stations permanentes eurasiennes, pour les quatre solutions testées pour définir le référentiel Eurasie. Les vitesses calculées à partir du pôle de rotation du modèle NNR-NUVEL-1A montrent systématiquement des différences d'orientation par rapport aux trois autres méthodes. Ceci est particulièrement vérifié pour les stations localisées en Méditerranée et au Moyen-Orient. Bien que l'ajustement global avec l'ITRF00 soit de 0.6 mm/an, cette solution a des résidus en vitesses trop élevés pour servir de définition au référentiel Eurasie, avec des résidus la plupart du temps supérieurs à 1 mm/an. Les trois autres solutions sont très peu différentes en termes d'orientation, mais elles pré-

sentent des différences d'amplitude.

Comme les plus faibles résidus sont obtenus par la méthode de minimisation, avec des moyennes des valeurs absolues des vitesses de 0.44 mm/an en est et 0.29 mm/an en nord, cette solution sera gardée pour la suite du traitement. Le référentiel Eurasie ainsi défini permettra d'estimer les taux de glissement instantanés sur les failles en Hatay, à l'aide d'un modèle rhéologique dans un demi-espace élastique. Dans le but de mieux identifier les limites des différents blocs impliqués à la jonction, il est également indispensable de définir des référentiels liés aux plaques participant à la jonction, c'est-à-dire des référentiels Arabie et Anatolie.

Le mouvement de chaque plaque à la surface du globe peut être décrit de manière simple, aussi bien en termes de cinématique finie qu'instantanée, à l'aide de la géométrie eulérienne. Cette géométrie précise que tout déplacement instantané à la surface d'une sphère peut être décrit par un vecteur rotation qui passe par le centre de la Terre et en perce la surface au pôle de rotation, dont le module est la vitesse angulaire de rotation.

Pour déterminer les référentiels Arabie et Anatolie, nous n'avons affecté aucune plaque aux stations du réseau Hatay, puisqu'elles sont localisées dans une zone d'intense déformation. Ces deux référentiels ont été définis par les vecteurs d'Euler relatifs entre plaques : (1) le vecteur Arabie – Eurasie pour le référentiel Arabie et (2) le vecteur Anatolie – Eurasie pour le référentiel Anatolie. En utilisant les stations permanentes IGS et les stations régionales turques intégrées dans le traitement, nous dérivons un vecteur d'Euler Ar – Eu situé à $27.7 \pm 0.7^\circ\text{N}$, $20.3 \pm 1.6^\circ\text{E}$ et un taux de rotation de $0.41 \pm 0.03^\circ/\text{Ma}$, un vecteur An – Ar situé à $31.0 \pm 1.0^\circ\text{N}$, $41.1 \pm 0.9^\circ\text{E}$ et un taux de rotation de $0.7 \pm 0.09^\circ/\text{Ma}$ et un vecteur An – Eu situé à $30.1 \pm 0.7^\circ\text{N}$, $33.2 \pm 0.2^\circ\text{E}$ et un taux de rotation de $1.1 \pm 0.08^\circ/\text{Ma}$. Nous obtenons un rms de 0.6 mm/an pour les vitesses résiduelles des plaques Arabie et Anatolie. Les vec-

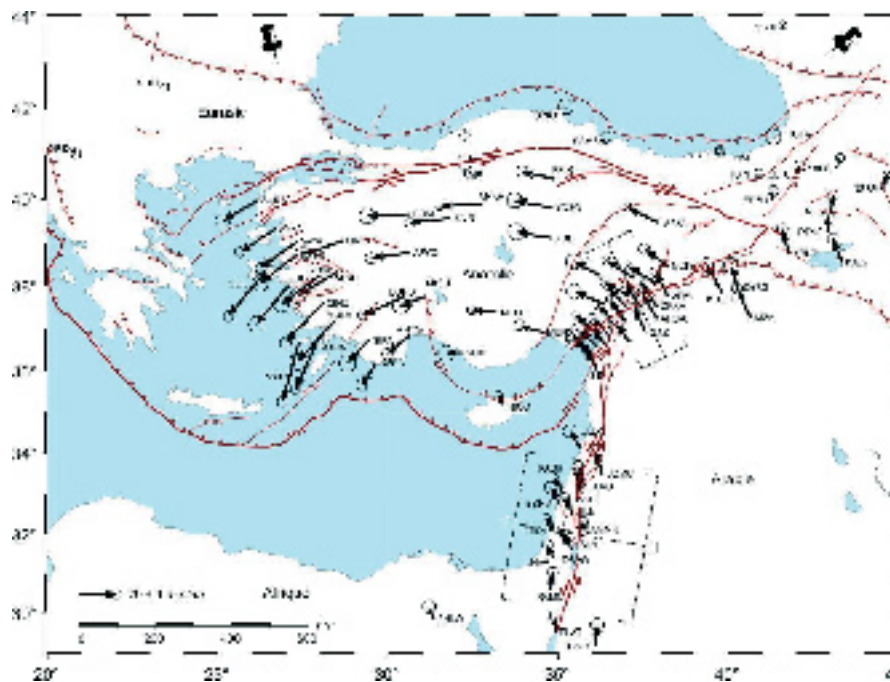


Figure 5. Vitesses horizontales GPS et ellipses de confiance à 95 % dans le référentiel Eurasie (1991 – 2004).

teurs eulériens calculés dans cette étude se situent à proximité de ceux déterminés dans les études antérieures de géodésie spatiale (par exemple, Reilinger et al., 2006). Par contre, leurs localisations confirment les différences entre ceux déterminés par le modèle NUVEL-1A et ceux donnés par la géodésie.

■ Estimation de la qualité

La qualité du traitement a été évaluée par l'analyse des séries temporelles pour les sites observés au moins trois fois et par le calcul de la précision à long terme.

Les séries temporelles des positions des stations ont été calculées en utilisant la même approche que pour le calcul des vitesses, excepté le fait que les jeux de quasi-observations sont traités indépendamment. Après avoir éliminé la vitesse estimée pour chaque site, les séries temporelles montrent toutes un alignement correct des positions calculées pour les différentes campagnes, avec une dispersion maximale de 4 mm.

La précision à long terme se définit par la dispersion des différentes compo-

santes des lignes de base par rapport à la régression linéaire qui ajuste au mieux l'évolution de la position de la station au cours du temps. Les moyennes des répétabilités sont de l'ordre de 1.4 mm sur les composantes horizontales. La mesure verticale reste encore environ 3 fois moins précise que le positionnement horizontal, en raison des problèmes liés à la surcharge atmosphérique, à la géométrie du système, etc. Ceci se vérifie dans la dispersion verticale, qui atteint une moyenne de 6.2 mm.

Bien que la plupart des sites n'aient été observés qu'à deux reprises, les critères de qualité du traitement sont vérifiés. Les précisions ainsi obtenues pour les vitesses des stations en Hatay sont de 1 mm/an et permettent de contraindre précisément la déformation régionale à la jonction triple.

Apport du champ de vitesses GPS

■ Description des mouvements en Méditerranée orientale

Le champ de vitesses GPS présenté à la figure 5 dans le référentiel Eurasie

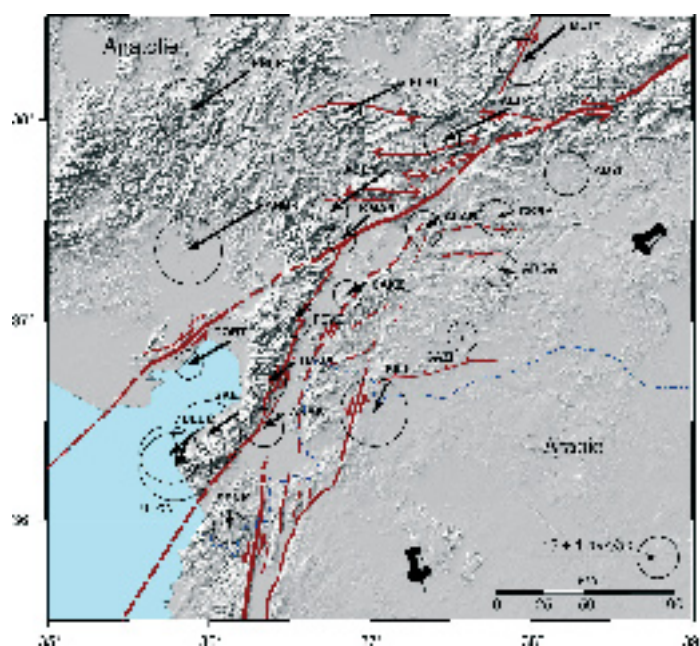


Figure 6. Vitesses horizontales GPS et ellipses de confiance à 95 % dans le référentiel Arabie (1991 – 2004)

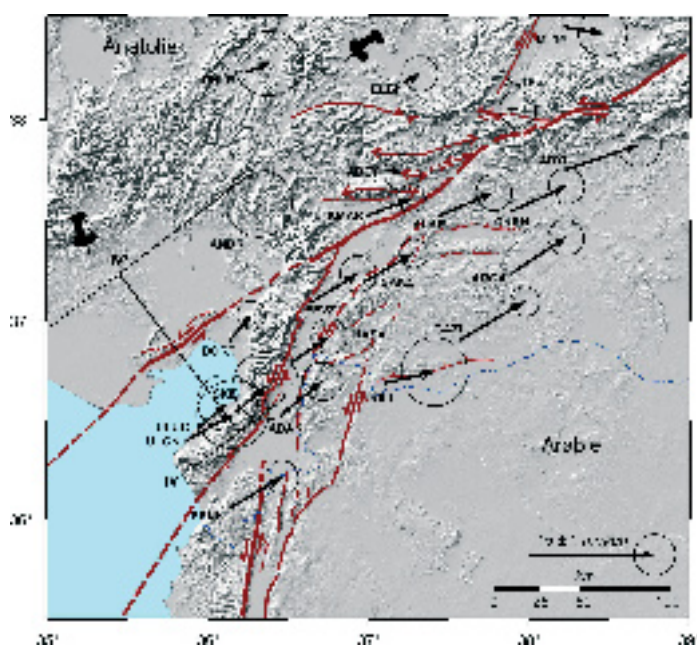


Figure 7. Vitesses horizontales GPS et ellipses de confiance à 95 % dans le référentiel Anatolie (1991 – 2004).

■ quantifie les mouvements du nord-est de l'Afrique, du nord de l'Arabie et la rotation anti-horaire de l'Anatolie. Les stations situées au nord de la FNA (HALI, SINO, SAMS, etc.), au nord du Caucase (ZECK) et en Grèce (SOFI, ORID) sont liées à la plaque eurasienne. Les sites en Égée (CEIL, OZDE, KNID et MARM) sont dominés par un mouvement vers le sud-ouest d'environ 32 ± 2 mm/an. Les points en Anatolie (KKIR, YOZG, ABDI) montrent l'échappement vers l'ouest de cette microplaque avec un mouvement de 18 à 19 mm/an orienté $\sim N75^\circ O$.

■ Cinématique actuelle à la jonction triple

Effectuons à présent un zoom en Hatay. Exprimé dans les référentiels Arabie (Figure 6) et Anatolie (Figure 7), le champ de vitesses illustre clairement le caractère décrochant sénestre dominant de la FEA. Les stations situées sur la côte méditerranéenne (DORT, ISKE, ULCN, ULUC) présentent des mouvements de direction similaire avec celles situées au nord de la FEA (ANDR, ELBI, ALTP) dans le référentiel Arabie et, par conséquent, semblent appartenir à l'Anatolie. Cependant, leurs normes plus faibles

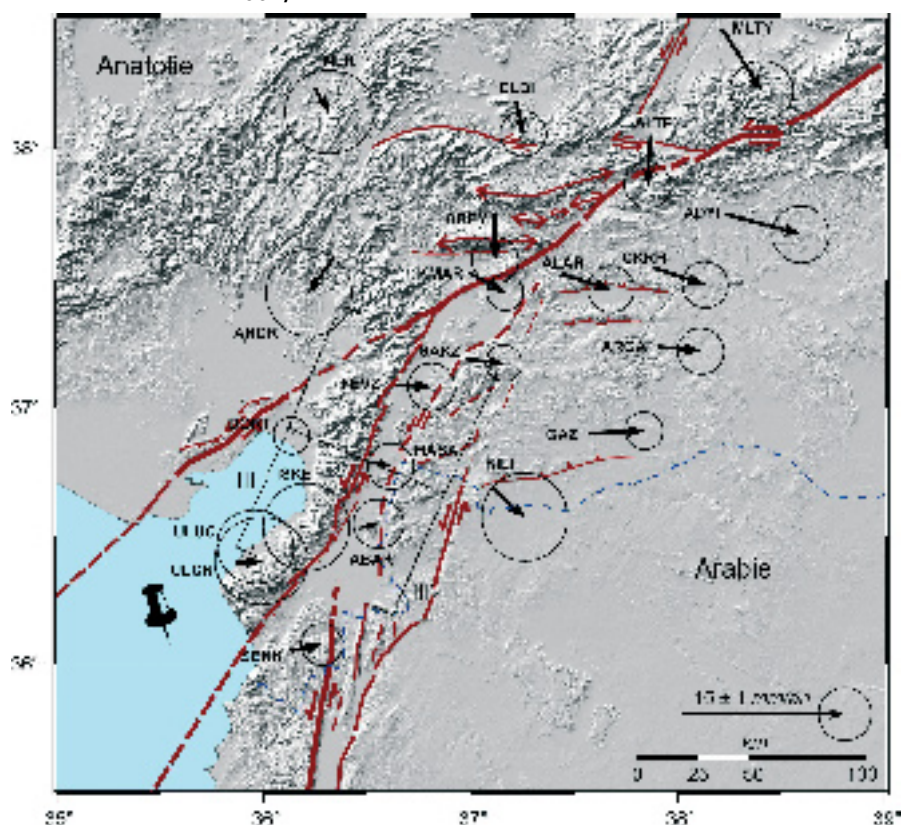


Figure 8. Vitesses horizontales GPS et ellipses de confiance à 95 % dans le référentiel "Iskenderun" (1991 – 2004).

(entre 3.5 et 5.7 mm/an), ce qui représente environ la moitié des vitesses des sites anatoliens, impliquent un taux de glissement significatif sur la

FKO. Cette structure est en effet la seule qui puisse prendre en compte une telle différence de mouvement. Cette hypothèse est en accord avec

une morphologie d'escarpement de faille visible sur le terrain et sur les images satellites, mais également avec l'occurrence du tremblement de terre de juin 1998 (M_w 6.2), qui est le plus gros événement enregistré pendant la période instrumentale à la jonction triple.

Les vitesses GPS observées suggèrent donc que la FEA se prolonge en direction du sud-ouest à travers le massif d'Amanos, de Türkoğlu jusqu'au nord de Chypre.

Une observation équivalente peut être faite pour les vitesses des stations à l'est et à l'ouest de la FK. En effet, les vitesses des stations à l'ouest de cette faille (DORT, ISKE, ULUC, ULCN) et celles des stations à l'est dans la Vallée de Karasu (ABAK, FEVZ, HASA, SAKZ) ont des directions similaires, obliques à la direction principale de la faille, mais avec des amplitudes à l'ouest environ du double de celles à l'est dans le référentiel Arabie. Ceci indique que la FK est une structure active, caractérisée par un mouvement latéral sénestre prédominant, associé à une composante normale.

Enfin, on peut observer le mouvement vers le sud dans le référentiel Arabie du site SENK, localisé au sud du Bassin d'Amik et à l'ouest de la FMM. Bien que la vitesse soit à l'intérieur de son ellipse d'incertitude, elle reste compatible en direction et en norme aux vitesses des stations localisées plus au sud, à l'ouest de la FMM (Figure 5), ce qui suggère une position associée à l'Afrique.

La combinaison de ces trois observations du champ de vitesses GPS indique clairement l'existence d'un bloc indépendant de l'Anatolie, l'Arabie et l'Afrique, appelé "bloc d'Iskenderun". Ce bloc est limité au nord par la FKO et à l'est et au sud-est par la FK. Un référentiel lié à ce bloc illustre le mouvement vers l'est de l'Arabie (stations ABAK, FEVZ, HASA) et la composante normale de la FK, qui s'accroît en allant du sud vers le nord, s'orientant progressivement vers les vecteurs vitesses des stations situées

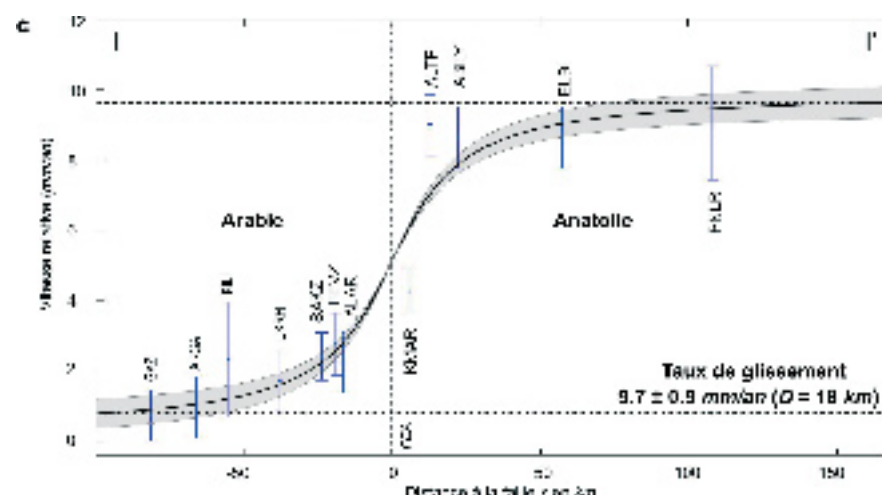


Figure 9. Vitesses des composantes parallèles à l'ouest de la FEA par rapport à l'Eurasie (incertitudes à 1 σ) et modèle de Savage et Burford (1973) pour une couche sismogène de 18 km. La courbe noire indique la perturbation élastique pour une faille décrochante sénestre fonctionnant à 9.7 mm/an centrée sur la FEA. L'aire grisée correspond à la zone d'incertitude à 1 σ du meilleur ajustement. Localisation du profil I-I' à la figure 5.

au sud de la FEA (Fig. 8). Cette extension est estimée à 1.0 ± 0.5 mm/an.

Gradients de vitesses par rapport aux failles

■ Principe

Le champ de vitesses exprimé dans des référentiels tectoniquement significatifs a été analysé. Il reste à présent à déterminer les vitesses des failles. Pour cela, les modèles rhéologiques relient quantitativement la déformation à court terme mesurée par la géodésie au taux de glissement à long terme sur une faille. Le modèle le plus simple considère que la Terre est un demi-espace parfaitement élastique.

En général, le plan de faille entre deux blocs est une zone "rugueuse" sur laquelle le glissement ne s'effectue pas facilement. En période inter-sismique, même si les deux blocs veulent coulisser, on suppose que la faille est bloquée parce que le niveau de contraintes n'est pas encore suffisamment élevé pour la faire glisser. Il se produit alors une accumulation de déformations élastiques entre les blocs qui bougent l'un par rapport à l'autre loin de la faille, mais pas le long de la faille.

Nous utilisons le modèle de Savage et

Burford (1973), qui considère une faille infinie. Cette hypothèse implique que la vitesse de la composante normale à la faille est nulle, alors que la vitesse de la composante parallèle ne dépend que de la distance horizontale à la structure. Le déplacement inter-sismique $V(x)$ observé par GPS à la distance x d'un décrochement ayant une vitesse V_0 sous une zone bloquée d'épaisseur D , peut être décrit par l'équation ci-dessous, dans laquelle V_1 représente un décalage arbitraire entre le profil de vitesses et le repère de référence choisi :

$$V(x) = V_1 + V_0 \frac{1}{\pi} \arctan \left(\frac{x}{D} \right)$$

■ Modélisation

L'application du modèle de Savage et Burford à la section occidentale de la FEA permet d'estimer le taux de glissement sur ce tronçon à 9.7 ± 0.9 mm/an en considérant une profondeur de faille bloquée de 18 km (Figure 9). Cette profondeur a été choisie en fonction de la profondeur maximale des séismes enregistrés sur ce segment de faille.

Pour estimer les vitesses sur les FK et FKO, nous disposons de trois stations situées entre ces deux structures (DORT, ULUC et ISKE), la quatrième

■ station (ULCN) présentant un mouvement incompatible avec celui des trois autres. Compte tenu de la proximité de ces stations avec les FK et FKO, les mouvements de ces sites sont liés au mouvement de la FK et à celui de la FKO. Il faut donc déterminer de façon conjointe les vitesses sur les deux failles avec un unique modèle. Cependant, cette approche nécessite une approximation, celle de considérer deux failles infinies parallèles, ce qui est uniquement le cas entre Kirikhan et Samandağ. Nous avons donc considéré les failles parallèles à la direction moyenne des deux structures, c'est-à-dire N044°E. Par cette méthode, nous obtenons des taux de glissement moyens de 2.5 ± 1 mm/an sur la FK et de 5.5 ± 1.5 mm/an sur la FKO.

Conclusion

Cette étude valide la contribution du GPS à la tectonique active dans des régions de limites de plaques. Les campagnes GPS effectuées entre 1991 et 2004 fournissent une cartographie précise des mouvements actuels à la jonction triple et permettent de quantifier directement la convergence de l'Arabie et l'Afrique avec l'Eurasie et la distribution des segments de failles, et contribuent à une meilleure détermination des mouvements des blocs.

Quand elles sont effectuées avec soin et précision, les campagnes GPS couvrant plusieurs années associées à un réseau dense peuvent donc aisément améliorer la compréhension de la cinématique et de la déformation active dans des régions tectoniquement complexes. La définition de référentiels liés aux plaques tectoniques en présence permet alors de révéler plus clairement la subdivision en blocs, les limites entre ces entités et les failles actives ou inactives. ●

Contact

Sophie BERTRAND

Attachée Temporaire à l'Enseignement et à la Recherche (filière Topographie)
Institut National des Sciences Appliquées

de Strasbourg – Laboratoire MAP-PAGE
24, boulevard de la Victoire
67084 STRASBOURG cedex
sophie.bertrand@insa-strasbourg.fr

Références

Altamimi, Z., Sillard, P et Boucher, C., 2002, ITRF2000 *A new release of the International Terrestrial Reference Frame for earth sciences applications*, J. Geophys. Res., 107 (B10), doi:10.1029/2001JB000561.

Bertrand, S., 2006 *Tectonique active à la jonction des plaques Afrique, Arabie et Anatolie – Eurasie (sud de la Turquie) : caractérisation des failles et analyse de la déformation par un réseau GPS dense*, Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg.

Calais, E., 2000 *Les réseaux GPS permanents : de nouveaux outils de mesure géophysique*, Géomètres.

DeMets, C., Gordon, R.G., Argus, D.F. et Stein, S., 1990 *Current plate motions*, Geophys. J. Int., 101, 425-478.

Herring, T.A., 2002, GLOBK *Global Kalman filter VLBI et GPS analysis program*, MIT, Cambridge.

King, R. W. et Bock, Y., 2002 *Documentation for the GAMIT analysis software, release 10.0*, Department of Earth, Atmospheric and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.

Larson, K.M. et Agnew, D.C., 1991 *Application of the Global Positioning System to crustal deformation measurement*, 1. Precision and accuracy, J. Geophys. Res., 96 (B10), 16547-16565.

Reilinger, R.E., McClusky, S., Vernant, P., Lawrence, S., Ergintav, S., Cakmak, R., Kadirov, F., Guliev, I., Stepanyan, R., Nadariya, M., Hahubia, G., Mahmoud, S., Sakr, K., ArRajehi, A., Paradissis, D., Al-Aydrus, A., Prilepin, M., Guseva, T., Evren, E., Dmitrotsa, A., Filikov, S.V., Gomez, F., Al-Ghazzi, R. et Karam, G., 2006, GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions, Journ. Geophys. Res., 111, doi:10.1029/2005JB004051.

Savage, J.C. et Burford, R.O., 1973, Geodetic determination of relative plate motion in central California, J. Geophys. Res., 78, 832-845.

Sella, G.F., Dixon, T.H. et Mao, A., 2002, REVEL: a model for recent plate

ABSTRACT

Keywords: GPS, Middle East, triple junction, kinematics, data processing, repeatability, reference frame, velocity field

Earthquakes shake the Earth every day and it will continue so because of the tectonic motions imposed by its internal geophysics and geodynamics. Turkey is one of the most seismically active regions in the world: everybody remembers the terrible events of Kocaeli (M_w 7.6) and Düzce (M_w 7.1), that occurred on August 17th and November 12th, 1999, near Istanbul, which caused 30 000 casualties, 50 000 injured and more than 35 billions euro of damages. These two earthquakes reinforced the interest of the scientific community in these regions of high population density. Many projects were born in the areas of high seismic risk in the Middle East, like the European APAME project (Archaeosismology and Palaeosismology for the protection of Archaeological sites in the Middle East, ICA-CT-2002-10024). The multiple collaborations between TUBITAK (Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu, Gebze, Turkey), MIT (Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, United States) and laboratories of the IPGS (Institut de Physique du Globe, Strasbourg, France) made possible this PhD study performed at the IPGS. This article presents the quantification by GPS of the tectonics of the major structures linked to the convergence of the Eurasian, African and Arabian plates in south-eastern Turkey, which constitutes a major stake for the understanding and evaluation of the seismic hazard.