

Mesures de **déformation** par **GPS** : une méthode d'investigation des **mouvements tectoniques** à grande échelle

Le système GPS de positionnement par satellites s'est imposé en une décennie pour suivre avec une précision millimétrique les mouvements et les déformations des plaques tectoniques à grande échelle. Le CEA participe à l'acquisition de nouvelles données dans le cadre d'une collaboration internationale.



Le Langtang Lirung (altitude 7 227 m), sommet situé au front de la haute chaîne himalayenne au Népal central. Zone de collision entre les plaques indienne et eurasienne, l'Himalaya est une région de déformation largement étudiée.

Au cours de ses missions de surveillance de sites, le Département analyse, surveillance, environnement du CEA (Dase) utilise le système satellitaire GPS (*Global Positioning System*) depuis sa mise en service (encadré). Permettant d'atteindre depuis une dizaine d'années des précisions millimétriques, le système GPS est devenu de nos jours un outil incontournable, aussi bien pour la mesure du mouvement des **plaques tectoniques** à grande échelle que pour la détection des mouvements parfois plus faibles dans les zones de déformation intraplaque.

Dans le cadre des études conduites par le Laboratoire de détection et de géophysique (Dase/LDG) – pôle de compétence aléa sismique –, il s'agit d'évaluer le potentiel sismogénique de la région étudiée, en particulier celui des **failles** actives (Mémo D, *Tectonique des plaques et séismes*, p. 90). Cependant, à l'échelle du territoire métropolitain, les déformations sont faibles et difficiles à mesurer. Aussi, le Dase mène-t-il des tra-

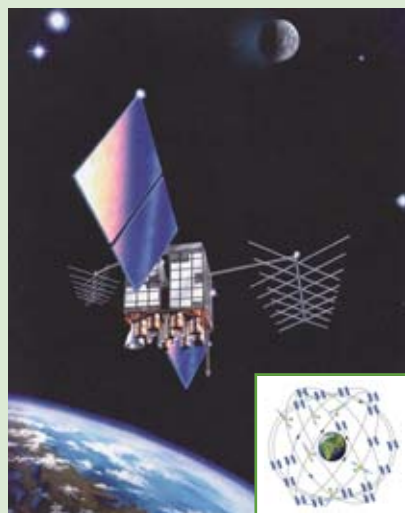
voux de fond concernant l'étude du cycle sismique. Une des régions propice à ces investigations est la zone de **collision** continentale entre les plaques indienne et eurasienne, où les mouvements sont environ quatre fois plus rapides que dans les Alpes. Un réseau GPS a été installé au Népal. Sur le territoire métropolitain, le Dase participe par ailleurs au projet national de réseau GPS RENAG⁽¹⁾ dont l'un des objectifs est de mesurer la déformation de la **croûte terrestre** en France et dans les régions frontalières (Mémo A, *Voyage au centre de la Terre et aux confins de l'atmosphère*, p. 21).

(1) RENAG (Réseau national GPS permanent) : ensemble de stations GPS permanentes, gérées par des laboratoires de recherche français, qui a pour vocation la recherche scientifique et l'observation de la Terre en géophysique interne, externe et en géodésie. À ce titre, ce réseau bénéficie du soutien financier du **CNRS/Insu**, du ministère de l'Enseignement supérieur ainsi que de l'aide matérielle de plusieurs établissements publics tels que l'**IGN**, le **CEA**, l'**IRSN**, le **Cnes**. Les données recueillies sont d'un accès public et gratuit.



Sur quel principe fonctionne le GPS ?

Le système GPS a été conçu à l'origine par le Département de la Défense américain (*Department of Defense DoD*) afin de doter les forces armées d'un système de radio-navigation à couverture mondiale. Le système est pleinement opérationnel depuis avril 1995 et a été ouvert à la communauté civile. Il permet à quiconque muni du système, d'accéder à sa position, par tous les temps, de nuit comme de jour, en tout point du globe, sur la terre, sur mer et dans l'espace. La constellation comprend plus de 24 satellites évoluant sur une orbite quasi circulaire à environ 20 200 km d'altitude. Ces satellites sont déployés sur 6 plans inclinés par rapport à l'équateur à raison de 4 satellites par plan. Leur période de rotation autour de la Terre est approximativement de 11 h 58 min.



Constellation de satellites GPS Navstar et image d'un satellite.

Le système GPS est constitué de 3 segments : le segment spatial (les satellites), le segment utilisateur (l'ensemble des récepteurs) et le segment de contrôle. Ce dernier consiste en 5 stations de suivi qui "traquent" les satellites en permanence puis transmettent leurs informations à une station maître qui recalcule les orbites précises des satellites.

Les signaux émis

Chaque satellite est équipé de plusieurs horloges atomiques au rubidium ou au césium⁽¹⁾. Les satellites émettent simultanément en bande radio L⁽²⁾ deux fréquences de longueur d'onde respective 19 et 24 cm modulées par deux codes, le code C/A (*Coarse Acquisition*) et le code P (*Precise*, environ 10 fois plus précis que le premier), ainsi qu'un message de navigation contenant différentes informations comme les éléments orbitaux, les paramètres d'horloge, le temps et des messages de santé.

Mode opératoire et traitement des données

L'antenne GPS doit être fixée sur un support stable (pilier, trépied, bâtiment) et ancrée au sol afin d'être parfaitement solidaire des mouvements de la **croûte terrestre**. Elle est reliée à un récepteur ultra-précis (permettant notamment des mesures sur la phase du signal). Les récepteurs effectuent des mesures de temps de propagation du signal **électromagnétique** satellite-récepteur, converties en pseudo-distances (mesures de distances aux erreurs d'horloge près), ainsi que des mesures consistant à compter le nombre de fractions de cycles sur le signal sinusoïdal (porteuse). Ce sont ces dernières mesures, très précises, qui sont utilisées pour la **géodésie**. Un premier traitement vise à éliminer une grande partie des erreurs (en particulier d'horloge et de **modélisation**) par une technique différentielle où sont combinés simultanément, à un instant donné, l'en-

(1) Horloge atomique : elle utilise comme référence (l'équivalent du mouvement de balancier d'une pendule traditionnelle) la fréquence du rayonnement émis lors de la transition atomique entre deux niveaux d'énergie particuliers de l'atome de césium 133 ou de l'atome de rubidium 87.

(2) Bande radio L : partie du spectre électromagnétique définie par les fréquences de 1,4 à 1,5 GHz environ. Des segments de cette bande sont attribués au service de radioastronomie à des fins de recherches spatiales et scientifiques. Elle est notamment utilisée en France pour la Radio numérique terrestre en DMB (*Digital Multimedia Broadcasting*).



Système d'acquisition et de transmission des données à la station GPS permanente DAMAN installée au Népal.

semble des satellites et des récepteurs. Après quoi, une procédure d'inversion dite par moindres carrés – qui consiste à ajuster les coordonnées initiales afin de minimiser au mieux les écarts entre les différences obtenues entre trajets observés et théoriques en tenant compte de divers paramètres de correction (**ionosphère**, **troposphère**, gradients horizontaux, marées terrestres et lunaires, pression de radiation solaire, correction relativiste) et des orbites précises – permet de déterminer les coordonnées relatives très précises entre stations. Étant donné les nombreuses sources d'erreur possibles, la redondance des informations fournies par les stations permanentes conduit à un gain de précision notable par rapport à des données de campagne (erreurs dues au repositionnement, points aberrants, variations saisonnières). Pour rattacher les coordonnées absolues du réseau au système géodésique mondial, il faut intégrer dans le calcul les données de stations IGS (*International Global Navigation Satellite System Service*) dont les positions sont connues avec une très grande précision. Le futur système européen Galileo, prévu pour être opérationnel vers 2010-2013, devrait apporter des performances encore améliorées avec le nombre supplémentaire de satellites disponibles. Il faudra alors remplacer les récepteurs GPS pour recevoir les données issues de ce nouveau système ainsi que du système russe Glonass (Système global de navigation par satellite).

Des réseaux denses de stations permanentes

Le développement des techniques de **géodésie spatiale** constitue une véritable révolution pour la mesure des déformations de la croûte terrestre, non seulement par leur précision mais aussi par leur capacité à offrir des systèmes de référence unifiés à l'échelle de la planète, tâche pratiquement impossible auparavant. De par sa relative facilité de mise en œuvre, combinée à une diminution des coûts, le système GPS, devenu pleinement opérationnel depuis 1995, est largement utilisé par la communauté scien-

tifique et généralement associé à des approches pluridisciplinaires complémentaires (sismologie, tectonique, géologie, **géodésie terrestre**, **interférométrie radar**, DORIS⁽²⁾). Il a permis en une dizaine

(2) DORIS (*Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite*) : système proposé, en 1982, par le Cnes, le Groupe de recherches de géodésie spatiale (GRGS) et l'IGN, en support de l'expérience d'altimétrie océanographique POSEIDON. Un tel système est dit "ascendant". Le signal est émis par les stations au sol comprenant une balise émettrice et une antenne, et reçu par les satellites, à l'inverse du GPS pour lequel les émetteurs sont à bord des satellites. Le récepteur embarqué effectue des mesures de **décalage Doppler** sur les deux fréquences – environ 400 MHz et 2 GHz – émises par les stations au sol.

d'années de nombreuses avancées scientifiques sur la connaissance du mode de déformation de la croûte terrestre à toutes les échelles spatiales ainsi qu'à toutes les étapes du cycle sismique, c'est-à-dire avant, pendant et après un séisme. Parmi les régions les plus actives du monde, la faille de San Andreas en Californie a été l'une des premières à être instrumentée. Les mouvements produits lors du séisme de Landers (1992, **magnitude** 7,4) ont ainsi été mesurés directement. Le développement des stations permanentes, avec notamment le réseau IGS (*International Global Navigation Satellite System Service*) – consortium mondial universitaire qui comporte environ 350 stations –, permet d'accéder à des précisions millimétriques. Les données obtenues participent avec d'autres à la détermination du Repère international de référence terrestre⁽³⁾ (ITRF) et au calcul des vitesses des stations participantes. La densification des réseaux permanents ne cesse de s'accroître au niveau régional, prioritairement dans les zones à forte déformation qui existent généralement en bordure de plaques (Californie, Japon, Taïwan, Sumatra, Chili, Mexique... pour n'en citer que quelques-unes) et dans les zones de déformation intraplaque parfois de plus faible amplitude (Mongolie, Alpes, Jura...). Des phénomènes qui passaient totalement inaperçus auparavant sont alors mis en évidence. Des déformations transitoires, interprétées comme de possibles glissements asismiques (séismes lents) – par exemple dans les régions des Cascades (Canada) et de Guerrero (sud du Mexique) – ou encore comme de possibles précurseurs de séismes – par exemple au Chili –, sont observées.

Les méthodes d'investigation à grande échelle

Parmi les confirmations les plus spectaculaires de la tectonique des plaques, théorie d'abord appelée **expansion des fonds océaniques** (Mémo D, *Tectonique des plaques et séismes*, p. 90), les anomalies magnétiques fournissent les premières estimations quantitatives du mouvement des plaques. Les matériaux **basaltiques** remontés du **manteau** au niveau de la **dorsale océanique** et épanchés de part et d'autre de son axe s'aimantent, lors de leur refroidissement, selon la direction du champ magnétique terrestre présent à l'époque, et en figent la mémoire lors de la solidification. Or, la direction de ce champ subit des inversions au cours du temps, à intervalles plus ou moins réguliers. En s'éloignant de la dorsale, les roches du plancher océanique conservent cette empreinte, produisant une alternance d'anomalies de largeurs variables, positives ou négatives selon que le champ terrestre était normal ou inverse par rapport au champ actuel. Le phénomène est symétrique de part et d'autre de la dorsale. Ces sortes de codes-barres fournissent ainsi une échelle datée permettant de déterminer le taux d'expansion des océans.

Un grand nombre d'observations proviennent également de la **géomorphologie** et de la sismicité. Les déplacements horizontaux des plaques tectoniques ont longtemps été décrits par des **modèles** établis uniquement à partir d'observations géologiques et géophysiques sur les frontières de plaques.

L'un de ces modèles cinématiques de référence est le NUVEL-1. Il suppose que les plaques tectoniques sont rigides et que leurs vitesses de déplacement restent constantes sur 3-4 millions d'années. Parmi les autres méthodes, les mesures géodésiques **VLBI** (*Very Long Baseline Interferometry*) ont permis, par exemple, de mesurer la vitesse d'ouverture de l'Atlantique à 2 cm/an. Il existe maintenant de nouveaux modèles géodésiques, combinant des données géodésiques spatiales, indépendants des modèles géologiques.

Étude de la déformation à travers l'Himalaya du Népal

Poursuivant depuis de nombreuses années une collaboration scientifique au Népal, le Dase et le laboratoire népalais DMG (*Department of Mines and Geology*) ont installé, en 1997, un réseau de 3 stations GPS permanentes et télémétrées⁽⁴⁾, en supplément du réseau sismique existant. Ce réseau a été complété de campagnes ponctuelles fournissant des mesures d'une plus grande densité spatiale. La vitesse de **convergence** intersismique au travers de l'Himalaya du Népal, paramètre essentiel dans l'étude du cycle sismique, est débattue depuis plusieurs années. L'analyse de données géodésiques combinées a permis d'apporter des contraintes sur le taux de raccourcissement au travers du Népal central, ainsi que sur la vitesse du mouvement de l'Inde. L'étude des séries temporelles GPS révèle, par ailleurs, des variations saisonnières significatives.

(3) Repère international de référence terrestre (ITRF) : système permettant de se positionner sur Terre mais aussi de positionner tout objet céleste par rapport à la Terre (étoile, Lune, planète, satellite artificiel orbitant autour de notre planète).

(4) M. FLOUZAT, J.-P. AVOUAC, B. DURETTE, L. BOLLINGER, T. HÉRITIER, F. JOUANNE, M. R. PANDEY, "Interseismic deformation across the Himalaya of Central Nepal from GPS measurement, 1997-2001", *AGU Fall Meeting*, 2002.



Station GPS permanente DAMAN installée en 1997 au Népal à une altitude de 2 150 m.



Après la fermeture de l’océan Téthys, l’Inde entre en collision avec l’Eurasie vers une époque estimée entre 60 et 45 millions d’années (Ma), collision qui se poursuit aujourd’hui. Depuis cette période, l’Inde a pénétré l’Asie sur plus de 2 500 km, engendrant les plus hautes topographies présentes sur Terre, tandis que le bloc indochinois est chassé vers l’est. La contribution respective de ces deux mécanismes de la déformation globale reste une question discutée, cruciale vis-à-vis du risque sismique, particulièrement élevé au Népal. Plusieurs séismes destructeurs ont frappé la région depuis la fin du XIX^e siècle, le dernier en 1934 de magnitude **Mw** 8,4. La connaissance du mode de déformation et ses relations avec la sismicité sont donc indispensables pour l’évaluation du risque sismique.

Dans la continuité des collaborations⁽⁵⁾ et travaux menés au Dase sur le cycle sismique⁽⁶⁾, au travers d’approches en géomorphologie, géologie et **sismo-**

tectonique, une étude combinant des données géodésiques a été conduite récemment. Cette analyse inclut des données de déplacements verticaux, des données de la station Everest du système DORIS, des données de campagnes GPS de 1995 à 2001, et enfin les stations GPS continues mises en œuvre par le DMG et le Dase, sur une section nord-sud à la longitude de Katmandou⁽⁷⁾ (figure 1).

Les données GPS ont été traitées au LDG/Dase dans le référentiel ITRF 2000, en intégrant les données de 20 stations du réseau mondial IGS. Il en ressort que l’Inde se déplace d’environ 35 mm/an⁽⁷⁾ (figure 2), taux significativement moins rapide que celui déduit des modèles globaux de la tectonique des plaques (48 mm/an). Cette différence est probablement liée à la difficulté, dans les modèles géologiques globaux, de résoudre les mouvements respectifs des plaques indienne, arabe et eurasienne. La déformation interne à l’Inde, quant à elle, est très faible (inférieure à 1,8 mm/an).

Le raccourcissement au travers de l’Himalaya du Népal central est absorbé sur un chevauchement majeur, le *Main Himalayan Thrust* (MHT), tandis que la déformation est aismique en profondeur. La surface de glissement est bloquée pendant la période intersismique et l’énergie élastique emmagasinée durant la compression est relâchée brutalement lors de séismes de forte magnitude. L’étude a permis de contraindre la zone bloquée sur une distance de 115 km, de la surface jusqu’à une profondeur de 20 km sous la haute chaîne, et la vitesse de raccourcissement dans la région centre-est du Népal à $19 \pm 2,5$ mm/an⁽⁷⁾ (figure 3).

Les séries temporelles GPS révèlent, par ailleurs, des variations saisonnières, notamment sur la composante horizontale perpendiculaire à la chaîne himalayenne (figure 1). Il a pu être établi que celles-ci étaient liées au chargement hydraulique dans la plaine du Gange⁽⁸⁾.

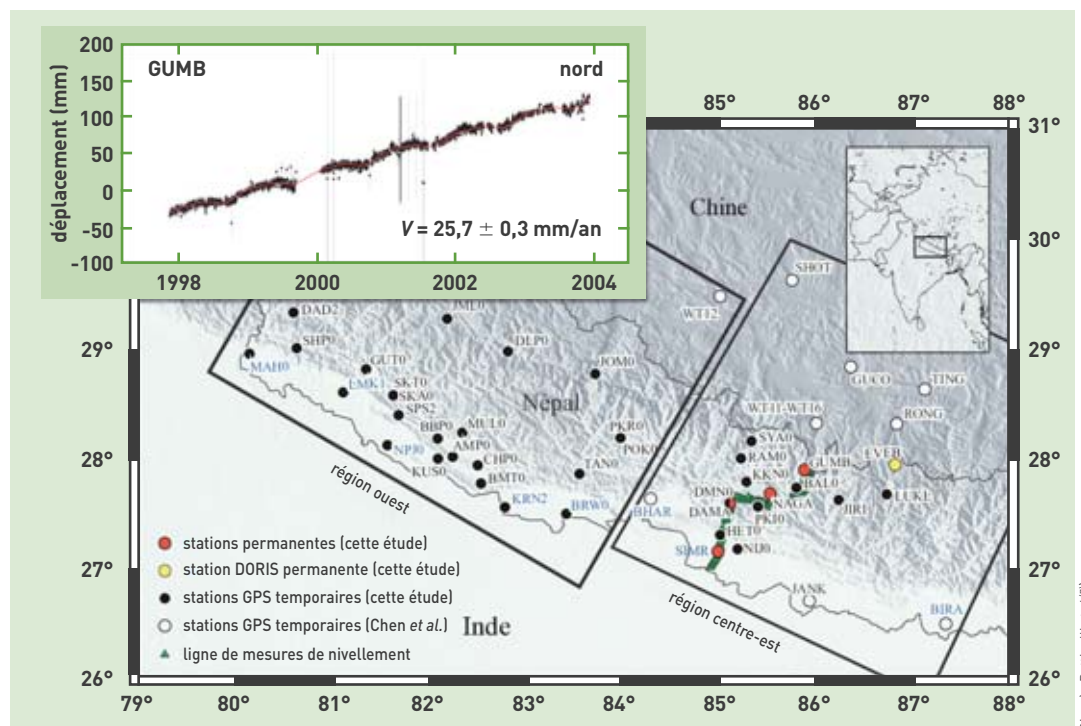
(5) F. JOUANNE, J.-L. MUGNIER, J.-F. GAMOND, P. LE FORT, M. R. PANDEY, L. BOLLINGER, M. FLOUZAT and J.-P. AVOUAC, “Current shortening across the Himalayas of Nepal”, *Geophysical Journal International*, 157, p. 1-14, 2004, 10.1111/j.1365-246X.2004.02180.x.

(6) J.-P. AVOUAC, L. BOLLINGER, J. LAVÉ, R. CATTIN et M. FLOUZAT, *Comptes-rendus de l’Académie des sciences Paris* (section Sciences de la Terre et des planètes/Earth and Planetary sciences) 333, p. 513-529, 2001. L. BOLLINGER, J.-P. AVOUAC, R. CATTIN and M. R. PANDEY, “Stress buildup in the Himalaya”, *Journal of Geophysical Research*, 109, B11405, 2004, DOI: 10.1029/2003JB002911.

(7) P. BETTINELLI, J.-P. AVOUAC, M. FLOUZAT, F. JOUANNE, L. BOLLINGER, P. WILLIS and G. R. CHITRAKAR, “Plate motion of India and interseismic strain in the Nepal Himalaya from GPS and DORIS measurements”, *Journal of Geodesy*, 80, p. 567-589, 2006.

(8) P. BETTINELLI, J.-P. AVOUAC, M. FLOUZAT, L. BOLLINGER, G. RAMILLIEN, S. RAJAURE and S. SAPKOTA, “Seasonal variations of seismicity and geodetic strain in the Himalaya induced by surface hydrology”, *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 266, issues 3-4, p. 332-344, 2008, DOI: 10.1016/j.epsl.2007.11.021.

Figure 1. Ensemble des données géodésiques utilisées pour le traitement, fournies par les stations GPS permanentes (points rouges), DORIS (point jaune), campagnes GPS (points noirs et blancs). Les noms des stations employées pour la détermination du mouvement de la plaque indienne apparaissent en bleu. En encart à gauche, évolution de la position vers le nord de la station permanente GUMBA et sa vitesse dans le système de référence mondial ITRF 2000. Des variations saisonnières sont visibles. La ligne continue représente le meilleur ajustement théorique aux données tenant compte de deux variations périodiques annuelle et bi-annuelle.



(D'après Bettinelli et al. (7))

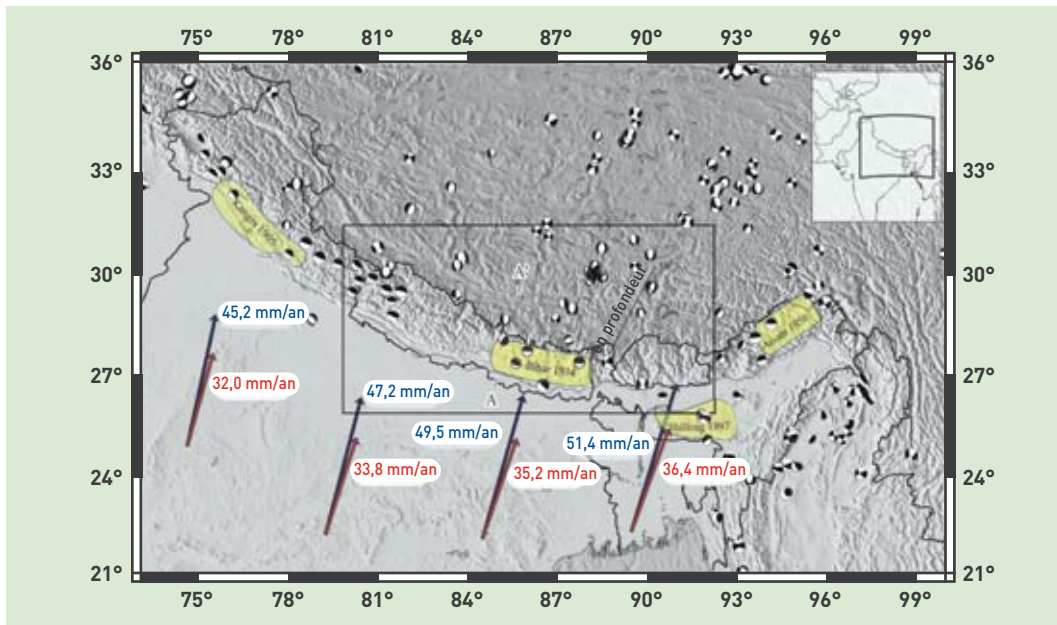


Figure 2. Carte sismotectonique centrée sur le Népal. Les zones de rupture des séismes historiques majeurs apparaissent en jaune. Les flèches bleues représentent le mouvement de l'Inde par rapport à l'Eurasie à partir du modèle global NUVEL-1A. Les flèches rouges indiquent le mouvement de l'Inde par rapport à l'Eurasie déterminé par Bettinelli *et al.* (1997).

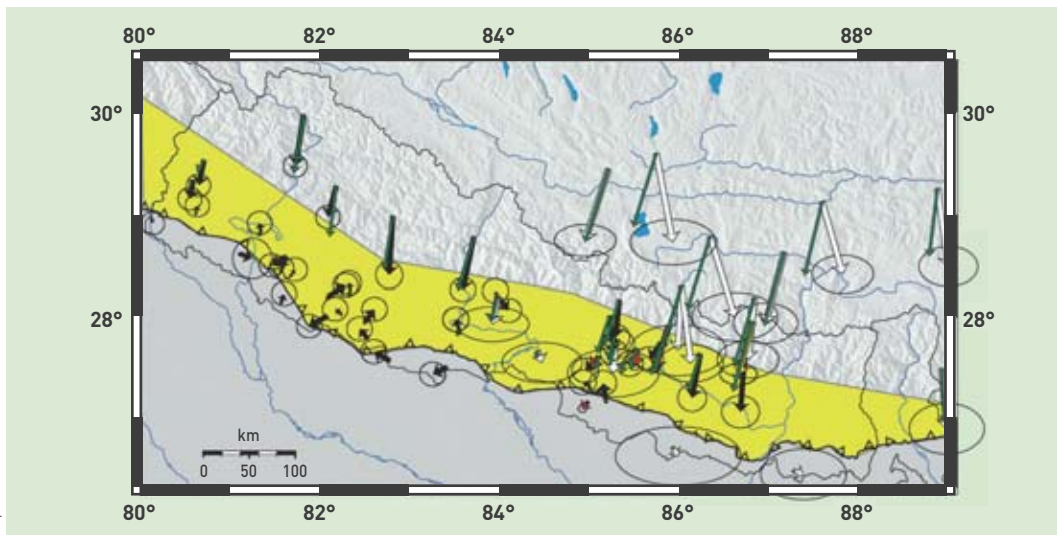


Figure 3. Vitesses observées des stations GPS par rapport à l'Inde. Les flèches rouges correspondent au réseau GPS permanent, la flèche jaune au système DORIS, les noires aux campagnes GPS, les blanches à d'autres réseaux et les vertes aux vitesses modélisées. La zone jaune représente la géométrie de la zone bloquée du MHT.

(D'après Bettinelli *et al.* (1997))

Étude du mouvement Afrique-Europe

L'évaluation du risque sismique requiert la prise en compte des failles actives et sismogènes dans la région d'étude. À l'échelle du territoire français, ces failles sont encore assez mal connues et leur vitesse, inférieure ou égale à 1 mm/an, est difficile à apprécier en raison du manque de données et de la faiblesse des signaux. Toutefois, un taux faible de déformation accumulé pendant de longues années peut conduire à un ensemble de contraintes élastiques suffisantes pour produire des séismes modérés à importants sur des failles fonctionnant avec une longue période de récurrence.

La sismicité de la France est généralement attribuée à la convergence des plaques africaine et eurasienne qui se rapprochent à une vitesse d'environ 5 mm/an à la longitude de la France. Cependant, le mode de raccourcissement entre ces deux plaques tectoniques reste mal connu. Dans le cadre des études d'aléa sismique à l'échelle du territoire métropolitain, le CEA collabore depuis l'année 2000 au projet REGAL (Réseau GPS dans les Alpes) créé en 1997, devenu



CNRS Photothèque/Michel Faure

Panorama des Alpes franco-italiennes. La convergence des plaques africaine et eurasienne est le moteur des déformations à l'origine de la formation de la chaîne alpine. Mesurer la déformation actuelle et en comprendre les mécanismes et ses articulations par rapport aux grandes structures géologiques majeures font l'objet de recherches qui s'appuient notamment sur les mesures GPS acquises par le réseau RENAG.



Station GPS permanente TENC (Tence, Auvergne) installée par le Dase pour la surveillance de la faille des Cévennes.

CEA/DAM

RENAG (voir la note (1) p. 95). L'un des premiers objectifs du projet était d'étudier la déformation tectonique dans les Alpes.

Deux stations GPS permanentes ont été installées par le Dase dans la région provençale pour la surveillance

(9) C. VIGNY *et al.*, "GPS network monitors the western Alps' deformation over a five-year period: 1993-1998", *Journal of Geodesy*, 76, p. 63-76, 2002.

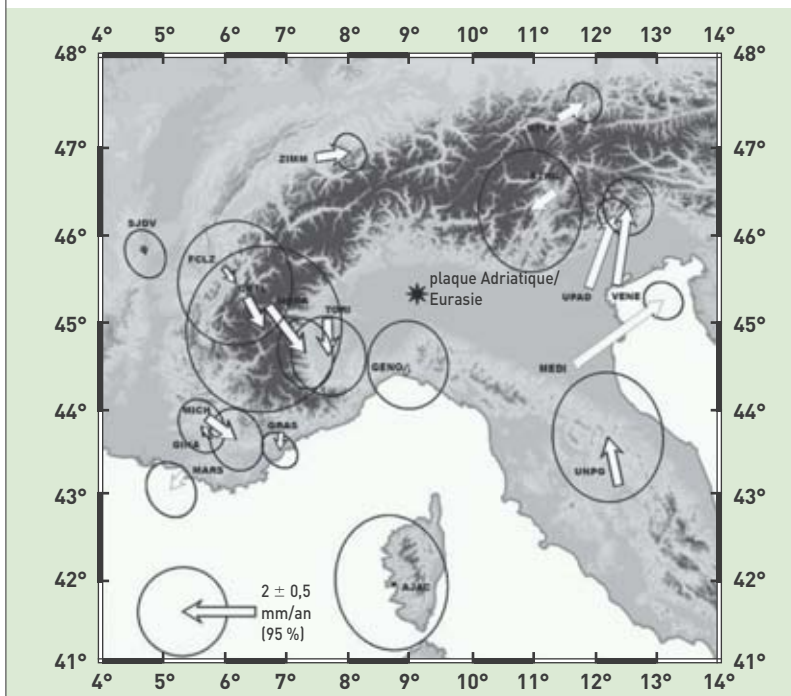
J.-M. NOCQUET and E. CALAIS, "Crustal velocity field of western Europe from permanent GPS array solutions, 1996-2001", *Geophysical Journal International*, 154, p. 72-88, 2003.

(10) J.-M. NOCQUET and E. CALAIS, "Geodetic measurements of crustal deformation in the western Mediterranean and Europe", *Pure and Applied Geophysics*, 161, p. 661-681, 2004, DOI: 10.1007/s00024-003-2468-z.

des failles de Nîmes (CHRN) et des Cévennes (TENC). Les premiers résultats issus des campagnes GPS, menées dans les Alpes par la communauté scientifique française, et du réseau REGAL^(9,10) apportent déjà des éléments nouveaux. Le champ de déformation dans les Alpes occidentales montre une combinaison d'extension est-ouest et de **décrochement** dextre. L'hypothèse d'une microplaque Adriatique indépendante, qui tourne dans le sens inverse des aiguilles d'une montre par rapport à l'Europe, se confirme (figure 4). Elle contrôlerait le régime de déformation à ses limites dans le Frioul, les Alpes et les Apennins. Le mouvement relatif de la plaque Afrique-Europe, dans la Méditerranée occidentale, serait de 40 à 50 % plus faible que les prédictions des modèles géologiques, et d'orientation oblique (de 20° à 30° dans le sens inverse des aiguilles d'une montre). L'essentiel de la convergence Afrique-Europe semble être à l'heure actuelle absorbée en Afrique du Nord et au sud de la péninsule ibérique, et très peu de déformation serait transférée dans les Alpes.

Des collaborations fructueuses

Les mesures GPS directes s'avèrent indispensables et informatives pour l'étude des déformations de la croûte terrestre dans le cadre de l'évaluation du risque sismique et de la compréhension des relations entre déformation et sismicité. L'acquisition de données nouvelles se poursuit au Népal au travers d'une collaboration tripartite entre le Dase, le DMG et l'Université de Caltech (*California Institute of technology*), et de collaborations nationales sur le territoire métropolitain, région à plus faible déformation. Les résultats obtenus à partir de données de géodésie spatiale GPS à court terme sur environ 20 ans et ceux provenant de modèles géodynamiques issus de données à long terme restent à discuter.



(D'après J.-M. Nocquet et E. Calais⁽¹⁰⁾)

Figure 4. Vecteurs vitesses de déformation sur les Alpes et la partie nord des Apennins, et de la plaque Adriatique par rapport à l'Eurasie, à partir des réseaux GPS permanents RENAG et européens. Compte tenu des incertitudes, la pointe de chaque flèche est située à l'intérieur d'une ellipse noire avec un intervalle de confiance à 95 %.

> Mireille Flouzat

Département analyse, surveillance, environnement
Direction des applications militaires
CEA Centre DAM Ile-de-France