

le projet REGAL

un réseau GPS
permanent
dans
les alpes

Éric Calais – CNRS (Geosciences Azur)

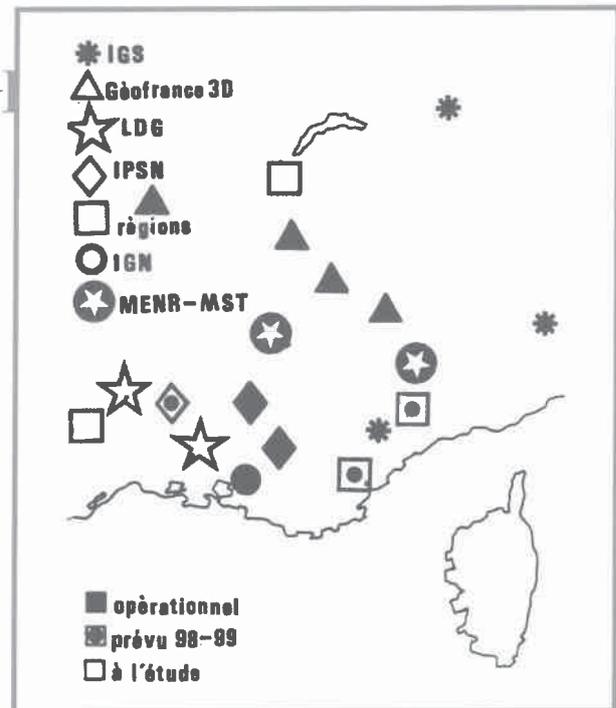


Fig. 1 – Carte du réseau GPS permanent REGAL

RÉSUMÉ

Une équipe de scientifiques du Centre National de la Recherche Scientifique, de l'Institut de Protection et de Sécurité Nucléaire, des universités de Nice, Chambéry, Montpellier, Grenoble, du Laboratoire de Détection Géophysique du CEA et de l'Observatoire de la Côte d'Azur met en place un réseau de 12 stations GPS permanentes couvrant les Alpes occidentales et leur avant-pays (Figure 1). Ce projet a pour objectif principal la mesure des déformations de la croûte terrestre dans les Alpes afin de mieux comprendre la formation de cette chaîne de montagne et la sismicité qui la jalonne. Les données du réseau REGAL sont cependant disponibles pour d'autres applications scientifiques ainsi que pour des applications pratiques en topographie, cartographie, etc. Les stations du réseau REGAL sont équipées de récepteurs GPS bifréquence enregistrant des données en continu, 24 heures sur 24. Ces données sont mises à disposition des utilisateurs sur internet sous 24 heures dans leur format propriétaire ainsi qu'au format standard d'échange RINEX, assurant ainsi la compatibilité avec tout type de matériel GPS et de logiciel de traitement de données. Elles sont accessibles interactivement à l'adresse <http://kreiz.unice.fr/regal>. Les positions précises des stations sont disponibles sur ce même serveur ainsi que des informations générales sur le GPS et sur le projet REGAL.

LES ALPES OCCIDENTALES : UNE CHAÎNE DE MONTAGNE EN COURS DE (DÉ)FORMATION...

Les Alpes occidentales françaises constituent un des fleurons touristiques et industriels français. De grandes vallées et un important effort d'équipement en grands ouvrages d'art ont permis l'installation humaine jusqu'au cœur de la chaîne et l'exploitation de ses ressources naturelles. Ce patrimoine naturel extraordinaire nous est cependant légué avec ses avatars géologiques, en particulier une sismicité modérée témoignant de déformations de la croûte terrestre toujours actives de nos jours. Si la théorie de la tectonique des plaques a fourni le cadre nécessaire pour mettre ces déformations en relation avec la convergence entre les plaques Afrique et Europe, les processus selon lesquels les forces tectoniques se transmettent dans la croûte terrestre, les facteurs qui régissent sa déformation sur différentes échelles de temps et les conséquences sur l'aléa sismique restent à élucider. Cet objectif passe par la mesure directe des déplacements et déformations de la croûte terrestre, indispensable pour contraindre quantitativement les théories géodynamiques. Le "Global Positioning System", ou GPS, est un outil particulièrement adapté à de telles mesures.

Le GPS est un système de positionnement par satellites permettant de déterminer sa position à tout moment

et en tout lieu avec une précision qui s'échelonne de la centaine de mètres au millimètre suivant le type de matériel et la technique utilisés. Les résultats issus de mesures GPS sont en train de révolutionner bon nombre d'idées en recherche fondamentale en Sciences de la Terre car cet outil permet de mesurer directement les mouvements du sol liés à des séismes, à des éruptions volcaniques, ou au déplacement lent de blocs tectoniques. Pour ces applications, une précision millimétrique est nécessaire car les mouvements à mesurer sont lents, de l'ordre de quelques millimètres à quelques centimètres par an (la convergence Afrique-Europe, par exemple, responsable de la formation des Alpes, s'effectue à seulement 6 mm/an en Méditerranée occidentale). Un traitement informatique sophistiqué des données GPS et l'utilisation d'équipement bifréquence de qualité, enregistrant données de pseudodistance et de phase, permettent d'atteindre de telles précisions en routine dans les laboratoires de recherche.

POURQUOI DES MESURES GPS CONTINUES ?

Deux stratégies GPS complémentaires sont couramment utilisées pour mesurer les déformations de la croûte terrestre : l'observation temporaire répétée d'un réseau de points géodésiques (quelques jours chaque année ou tous les deux ans par exemple) et l'observation en

continu de quelques sites permanents. La stratégie "mesures répétées", qui permet de mesurer un grand nombre de points, est appliquée à la chaîne alpine dans le cadre du projet "GPS Alpes", coordonné par l'université de Montpellier. Cinquante sites ont été stationnés à deux reprises, en 1993 et 1998, le traitement et la comparaison des données sont en cours. Une stratégie voisine consiste à reprendre par GPS des points stationnés lors de campagnes géodésiques anciennes de triangulation et/ou trilatération. Elle est appliquée à des études plus locales par des collègues des universités de Chambéry, Grenoble et Toulouse. La stratégie "mesures continues", elle, consiste à enregistrer des données de manière ininterrompue, 24 heures par jour et 365 jours par an, sur un nombre limité de sites permanents. Elle a été initiée en 1991 en Californie du Sud par des géophysiciens américains cherchant à surveiller la faille de San Andréas pour mieux comprendre le risque sismique associé et connaît depuis un succès grandissant.

est de 3 mm (le rms pour la composante verticale est de 10 mm). La Figure 3 montre la dispersion en planimétrie de la position "absolue" du site SJDV : le rms obtenu est de l'ordre du centimètre (traitement GAMIT). L'emploi du GPS continu se justifie donc tout à fait dans les régions à faible taux de déformation comme les Alpes. De plus, les erreurs d'opérateur (centrage et nivellement des antennes, mesure de hauteur d'antenne, stabilité du trépied, etc.) sont réduites au minimum car les antennes sont montées de manière permanente sur un monument géodésique stable et pérenne. La marque géodésique est le centre de phase de l'antenne, non pas une marque au sol. Enfin cette stratégie permet d'obtenir des séries temporelles continues des positions ou distances entre stations. Cela permet d'analyser avec beaucoup de finesse les différents facteurs qui affectent la position des stations au cours du temps (déformations tectoniques, variabilité troposphérique liée aux conditions météorologiques et aux saisons, stabilité du monument géodésique, etc.) et de déterminer au mieux les modèles statistiques décrivant les résultats et leurs incertitudes. Enfin, des stations GPS permanentes peuvent être exploitées scientifiquement par des applications parfois transdisciplinaires telles que la mesure du contenu électronique ionosphérique ou la mesure de l'humidité atmosphérique. Les stations du réseau REGAL font par exemple partie d'un projet européen dont l'objectif est la mesure par GPS de la quantité de vapeur d'eau intégrée dans l'atmosphère et l'assimilation de ces mesures dans les modèles météorologiques.

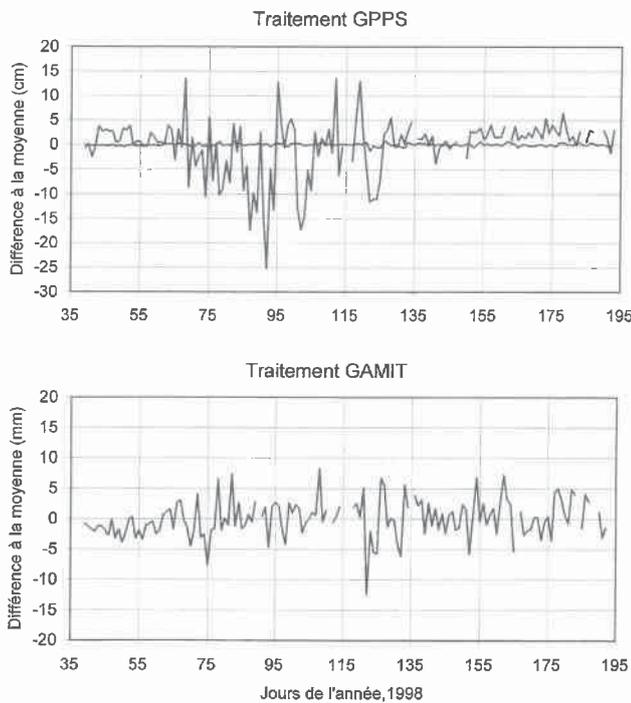


Fig. 2 – Exemple de série temporelle de mesures GPS sur la ligne de base SJDV-GINA montrant un raccourcissement à une vitesse de 1-2 mm/an

Les avantages du GPS permanent sont en effet multiples. Pour les applications géophysiques, cette stratégie permet de diminuer la durée nécessaire pour obtenir une incertitude suffisamment petite pour mesurer de faibles déformations (inférieures à 1 cm). La répétition des mesures permet en effet de corriger les erreurs qui affectent chaque mesure prise individuellement. En première approximation, on peut dire que plus le temps d'acquisition s'allonge, meilleure devient la précision (de récentes études montrent cependant que les mesures GPS sont entachées d'erreurs corrélées avec le temps sur des périodes pluriannuelles qui, dans le détail, amènent à nuancer cette affirmation). La Figure 2 montre l'exemple de la longueur de la ligne de base entre les stations du réseau REGAL SJDV et GINA (260 km) calculée quotidiennement du 6 février 1998 au 7 septembre 1998. Le rms de la déviation par rapport à la moyenne pondérée

IMPACT D'UN RÉSEAU GPS PERMANENT RÉGIONAL EN TOPOGRAPHIE

Les applications du GPS dépassent bien sûr largement la recherche fondamentale. Elles intéressent en particulier les géomètres-topographes et toutes les activités liées à l'information géographique : gestion des routes, cadastre, aménagement du territoire, toute activité basée sur l'utilisation de documents et de bases de données cartographiques géoréférencés.

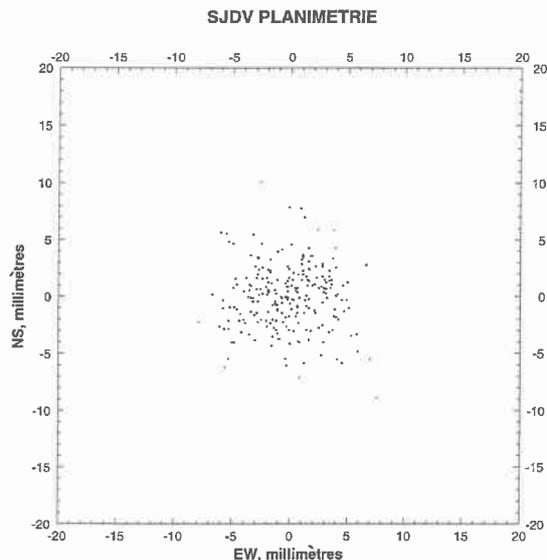


Fig. 3 – Exemple de dispersion planimétrique

Le réseau REGAL peut être considéré comme un réseau géodésique de référence actif. Dans son état actuel, il permet à tout utilisateur enregistrant et traitant des données GPS de phase d'exploiter l'outil GPS de manière optimale. En effet, le fait d'intégrer dans leurs calculs les données de stations GPS permanentes régionales offre (1) un rattachement automatique aux référentiels géodésiques nationaux et internationaux, et donc une cohérence de fait entre les mesures GPS réalisées, quel que soit le temps ou la distance les séparant, (2) un gain en flexibilité car la simultanéité des mesures entre plusieurs récepteurs mobiles n'est plus nécessaire, (3) un gain de productivité car il n'est plus nécessaire d'immobiliser et de surveiller un récepteur pivot fixe, les stations GPS permanentes fournissant à la fois les corrections à appliquer au calcul et un référentiel géodésique précis, (4) une précision optimale, infradécimétrique pour les utilisateurs de matériel bifréquence, inframétrique pour les utilisateurs de matériel monofréquence (fonction du temps de stationnement et de la distance aux stations GPS permanentes). La *Figure 2* montre l'exemple de la longueur de la ligne de base entre les stations SJDV et GINA (*Figure 1*) traitée par le logiciel commercial GPPS. La déviation standard sur un échantillon de 155 jours de mesures continues est de 5,5 cm. Ce résultat satisfierait déjà bon nombre d'applications, même s'il est évidemment moins bon que le rms de 3 mm obtenu avec le logiciel de recherche GAMIT (voir ci-dessus). Il faut cependant noter que les valeurs moyennes de la longueur de cette ligne de base issues des traitements GAMIT et GPPS sur ces 155 jours diffèrent de moins d'un millimètre, ce qui est excellent.

Pour les utilisateurs dont les besoins concernent le temps réel, il est envisagé d'utiliser les stations permanentes REGAL pour l'émission de corrections différentielles ainsi que des données de phases pour les applications cinématique. Les corrections différentielles calculées à partir de stations proches offrent une précision de l'ordre du mètre en temps réel. L'utilisation des données de phase en mode cinématique permet des précisions de l'ordre de quelques centimètres en temps réel.

LE RÉSEAU REGAL ET LES STATIONS GPS PERMANENTES EN FRANCE

La plupart des pays d'Europe (et bon nombre de pays dans le monde) s'équipent actuellement de réseaux de stations GPS permanentes bifréquence. On comprend que la Californie (équipée de plus de 100 sites GPS permanents) ou le Japon (équipé de plus de 600 sites permanents) y voient un intérêt pour la surveillance sismique. En Suède ou en Allemagne, par contre, le risque sismique n'est pas le moteur du développement de tels réseaux, pourtant opérationnels depuis plusieurs années, mais la nécessité d'offrir aux utilisateurs du GPS un réseau géodésique actif adapté à cette technologie. La France a tardé à entrer dans cette logique, mais comble maintenant ce retard.

Jusqu'en 1997, deux stations GPS permanentes bifréquence civiles seulement étaient opérationnelles en France, à l'Observatoire de la Côte d'Azur (plateau de Calern, Alpes Maritimes) et à Toulouse (CNES), dans le cadre du réseau global permanent de l'IGS (International GPS Service for Geodynamics). La première station du

réseau permanent REGAL a été installée en octobre 1997 (SJDV, *Figure 1*). Sept stations de ce réseau sont aujourd'hui opérationnelles à Saint Jean des Vignes (Saône et Loire), La Feclaz, Le Chatel, Modane (Savoie), Cadarache (Bouches du Rhône), Saint Michel l'Observatoire (Alpes de Haute Provence), Sainte Maxime (Var). Le réseau sera complété en 1999 par quatre stations dans le Haut Queyras, dans le Mercantour, en Haute Savoie, et dans le Vaucluse (*Figure 1*). Par ailleurs, la station SJDV fait partie depuis juillet 1998 du réseau européen permanent EUREF et rattache de fait le reste du réseau REGAL à ce référentiel et ses données sont traitées quotidiennement par trois centres de calcul indépendants en Europe. La comparaison de leurs résultats avec ceux obtenus dans le cadre du réseau REGAL permet un contrôle constant de l'intégrité des données et de la qualité des solutions géodésiques.

Dans le même temps, l'École Supérieure de Géomètres-Topographes, sous l'impulsion de son directeur M. Kasser, a installé une station permanente au Mans, pour des applications de topographie. Enfin, le laboratoire de recherche en géodésie de l'IGN (LAREG), sous l'impulsion de C. Boucher et dans le cadre du projet pilote RGP (Réseau GPS Permanent), met en place 5 stations permanentes bifréquence en France pour des applications géodésiques (Brest, Bordeaux, Marseille, Marne la Vallée, Strasbourg). Ces réseaux GPS permanents sont développés en concertation afin d'optimiser le nombre et la localisation des stations.

LES CHOIX TECHNOLOGIQUES

Des répétabilités de l'ordre de 2-3 mm en planimétrie et 5-7 mm en altimétrie sur les positions relatives de stations GPS sont couramment obtenues dans le cadre d'applications géophysiques du GPS, même pour des lignes de bases de plusieurs centaines de kilomètres (*Figure 2*). Le réseau REGAL atteint de telles précisions grâce à l'utilisation de matériel GPS haut de gamme, de sites sélectionnés sur des critères stricts et d'un traitement sophistiqué des données.

Monumentation. Les sites sélectionnés sont géologiquement stables et directement au rocher. Ils sont dégagés et offrent une visibilité du ciel totale dans toutes les directions. Ils ne comportent pas d'objets proches susceptibles de générer des multitrajets. Les monuments géodésiques, stables et pérennes, sont des piliers de béton vibré, hydrofuge et armé, d'une hauteur de 1,5 m à 2 m pour un diamètre de 40 cm. Ils sont ancrés dans la roche par une base cubique d'environ 1 m³, elle-même solidarisée de l'encaissant rocheux par des ferrailages le pénétrant sur environ un mètre de profondeur et scellés à la résine synthétique. Chaque site est constitué du pilier (point principal) et de trois repères (points auxiliaires) situés à quelques centaines de mètres du point principal. L'ensemble est rattaché aux points du RBF les plus proches.

Équipement GPS. Les sites du réseau REGAL sont équipés de récepteurs bifréquence Ashtech Z12 CGRS, spécialement conçus pour une utilisation en station permanente (*Figure 4*). Ces récepteurs sont adjoints d'antennes de type "choke ring" réduisant au maximum les multitrajets et dont le diagramme de phase (position des centres de phase en fonction de l'azimut et de l'élévation

des satellites) est parfaitement connu. Un modem connecte chaque récepteur au réseau téléphonique pour la télémaintenance et la récupération quotidienne des données. Le matériel est alimenté directement sur le secteur, une batterie en charge permanente permet de faire face aux éventuelles coupures d'électricité. Les données sont enregistrées en continu, 24 heures sur 24, à une cadence de 30 secondes (qui peut être augmentée à la demande).

Accès aux données. Les données des stations REGAL sont récupérées quotidiennement par modem par les différents organismes participant au projet et déposées via internet dans une "boîte aux lettres informatique" sur un ordinateur serveur au CNRS à Sophia Antipolis. Une procédure automatique relève cette "boîte aux lettres" deux fois par jour, convertit les données présentes au format standard d'échange RINEX puis leur applique un contrôle qualité afin de s'assurer de leur intégrité. Les données sont ensuite archivées dans une base de données et mises à la disposition des utilisateurs dans leur format brut propriétaire et au format RINEX, assurant ainsi la compatibilité avec tout type de matériel GPS et de logiciel de traitement de données. Sauf incident, les données de toutes les stations sont disponibles dès 02:00 UT le lendemain de leur acquisition. L'utilisateur accède à la base de données REGAL via internet à l'adresse <http://kreiz.unice.fr/regal> au travers d'une interface conviviale et intuitive. Les données y sont disponibles sous la forme de fichiers journaliers, dont l'utilisateur peut ne sélectionner que certaines portions, éventuellement en décimant le pas d'échantillonnage. Les positions précises des stations sont disponibles sur ce même serveur.

Traitement des données. Les données des stations du réseau REGAL sont traitées quotidiennement au CNRS afin d'une part d'effectuer un contrôle de leur qualité et de leur intégrité, d'autre part d'obtenir les solutions géodésiques qui permettront de mesurer les déplacements relatifs des points du réseau liés aux déformations tectoniques. Nous utilisons le logiciel GAMIT/GLOBK, développé au Massachusetts Institute of Technology. Il traite les données de pseudodistance et de phase en doubles différences, intègre des modèles géophysiques sophistiqués (marées, rotation de la terre, etc.), et permet d'utiliser les orbites GPS précises diffusées par l'IGS. Les données sont traitées par blocs de 24 heures

afin de minimiser les erreurs aléatoires de période infrajournalière telles que l'effet de l'alternance jour/nuit sur la troposphère et l'ionosphère et l'effet de la variation géométrique de la constellation satellitaire. Les données d'une dizaine de stations GPS permanentes européennes participant à la définition du référentiel géodésique ITRF sont incluses afin d'y rattacher les stations REGAL.

CONCLUSION

Le réseau de stations GPS permanentes REGAL est un outil géodésique et géophysique d'un nouveau type en France. Bien que son application principale concerne la mesure des déformations de la croûte terrestre dans les Alpes, les données de ce réseau sont disponibles pour d'autres applications scientifiques ainsi que pour des applications topographiques. Les premiers résultats en terme de déformations sont attendus après deux ans de fonctionnement, mais les données sont d'ores et déjà disponibles pour toute autre application scientifique ou pratique.

E-mail : calais@faille.unice.fr
 Web : <http://kreiz.unice.fr/regal>



Fig. 4 – Installation GPS permanente à La Feclaz, Savoie.