



Rapport de synthèse – juin 2009

Programme de recherche 2007 financé par le Conseil Général de l'Isère

-

Développement du GPS haute fréquence pour l'étude
des risques sismiques et gravitaires en Isère

Laboratoire de Géophysique Interne et Tectonophysique

Coordinatrice :

Nathalie Cotte

(Nathalie.Cotte@obs.ujf-grenoble.fr)

Partenaires du projet

- 1) Au Laboratoire de Géophysique Interne et Tectonophysique (LGIT) de Grenoble, sous la coordination de N. Cotte

Pour les sites GPS permanents

- Rémi Béthoux (ingénieur d'études – CDD Université Joseph Fourier) pour sites GPS
- Jean-Paul Glot (ingénieur de recherche – CNRS) pour sites GPS
- Yves Orengo (ingénieur de recherche – Université Joseph Fourier) pour sites GPS
- Mamadou Sow (stagiaire ingénieur Telecom) pour les tests de radios analogiques (été 2007)
- Raphael Jacquot (ingénieur de recherche – Université Joseph Fourier) pour son expertise en Wifi

Pour le développement méthodologique

- Andrea Walpersdorf (physicienne adjointe des observatoires)
- Mathilde Vergnolle (chargée de recherche - CNRS)
- Alexandra Royer (stagiaire M2-recherche en 2008-09)

Pour l'élaboration du banc de test et la réalisation des expériences

- Jean-Paul Masson (ingénieur d'études – CNRS)
- Mickael Langlais (ingénieur d'études – CNRS)
- Sophie Hatton (technicienne de l'équipement – LCPC)

- 2) A Géosciences Azur de Sophia Antipolis

Pour les sites permanents

- Claude Pambrun (ingénieur d'études – CNRS)

Pour le développement méthodologique

- Jean-Mathieu Nocquet (chargé de recherche – CNRS)
- Mami Ueno (ingénieur de recherche – CNRS)

1.- Rappels sur le GPS

Le GPS est un outil qui permet de connaître en tout point à la surface de la Terre sa position, sa vitesse et l'heure. Nous utilisons le GPS en Sciences de la Terre pour mesurer les déformations de surface (tectonique, surveillance des failles, des volcans, des glissements de terrain et des glaciers) mais également pour des applications en géophysique externe (suivi de vapeur d'eau dans la troposphère). C'est aussi un outil qui permet de faire du positionnement en mesure rapide pour localiser précisément d'autres appareils de mesure (e.g. sismomètres), pour cartographier un lieu ou pour construire un modèle numérique de terrain.

Le GPS peut être installé de façon permanente ou bien être employé lors de campagnes temporaires pour mesurer régulièrement des points physiques matérialisés au sol, permettant à deux époques de temps différentes de voir la déformation produite à la surface entre des points de mesure. Le GPS installé de façon permanente permet un suivi continu dans le temps mais il coûte cher en matériel, en installation et en maintenance. Les campagnes temporaires offrent la possibilité de multiplier les points de mesures avec peu d'instruments ou en peu de temps. Un compromis entre les deux consiste à faire du semi-permanent pour lequel il y a un roulement d'un appareil de mesure sur quelques points.

Dans le cadre de l'étude des risques naturels, nous préférons travailler avec du GPS permanent pour 1) avoir une quantité importante de données et donc mieux contraindre nos résultats et 2) avoir un suivi temporel des déformations du milieu étudié, mais aussi pouvoir extraire les fluctuations saisonnières ou des effets climatiques comme la pluie.

Depuis plus de dix ans, le GPS s'est imposé en Sciences de la Terre et il est aujourd'hui devenu un outil indispensable pour l'étude des risques naturels :

- Pour le risque sismique, le GPS permet de mesurer avec précision (le millimètre en relatif) les déformations co-, post- et inter-sismiques. En période inter-sismique, les contraintes s'accumulent sur les failles dans les zones de convergence (rapprochement de deux plaques) ou sont réparties dans des formations tectoniques intra-plaques. Il est possible, grâce à des GPS disposés de part et d'autre de failles ou de formation de plus grande échelle, de mesurer le taux de déplacement en fonction de la distance à la faille et de déterminer la profondeur de blocage des failles. En co-sismique, le GPS permet d'enregistrer les ondes sismiques de basse fréquence et grande amplitude générées par la rupture. Il permet aussi de visualiser au cours du temps, sur quelques minutes, la propagation des déformations de surface liées à la rupture lorsque le réseau de stations GPS est assez dense. Enfin, en post-sismique il permet de connaître la façon dont se fait la relaxation de la rupture jusqu'à ce que l'on retrouve un taux de déplacement inter-sismique linéaire ne correspondant plus qu'à la déformation à grande échelle liée à la tectonique des plaques.
- Pour le risque gravitaire, nous cherchons à déterminer à la fois les vitesses de glissement des versants instables et à la fois des phases d'accélération pour les corrélérer notamment à la sismicité, à des facteurs météorologiques (pluie) ou anthropiques. Pour cela, un site placé à proximité en milieu stable sert de référence aux stations GPS installées sur le glissement étudié et observé. Nous avons le même type de configuration pour l'étude de glacier où un site au rocher sert de référence pour les stations installées sur glace.
- Pour le risque météorologique, le GPS apporte une information très précise sur la teneur en vapeur d'eau de l'atmosphère, et ce quelque soient les conditions climatiques. Lors de la saison des pluies, des réseaux de GPS peuvent ainsi être déployés sur quelques semaines à quelques mois pour pouvoir déterminer la quantité d'eau 'précipitable' dans la troposphère et faire la corrélation avec des épisodes de pluie diluvienne et d'inondation. A terme, ces données issues de stations GPS permanentes pourront être assimilées dans les modèles de prévisions météorologiques. Par ailleurs, mieux modéliser la vapeur d'eau dans l'atmosphère permettra d'améliorer le positionnement vertical encore bien moins résolu que pour l'horizontal.

- Pour le risque volcanique, le GPS permet de suivre en temps quasi-réel, grâce à des analyses cinématiques, les déformations des flancs de volcans et donc dans certains cas il permet d'anticiper des activités volcaniques accrues.

2.- Présentation du projet et objectifs

En Isère, nous sommes confrontés au risque sismique (faille de Belledonne, effet de site et amplification des ondes sismiques dans la cuvette grenobloise), au risque gravitaire (glissements de terrain de Séchilienne et d'Avignonet) et dans une moindre mesure au risque météorologique lié aux crues éclair où de fortes précipitations pourraient subitement faire monter le niveau des cours d'eau.

Dans ce projet, nous avons voulu exploiter les nouvelles opportunités offertes par le GPS en mode d'acquisition haute-fréquence (1-5Hz au lieu de 30s classiquement) pour étudier les risques énumérés ci-dessus. En effet, le mode d'acquisition « haute-fréquence » pour le GPS permet de combler une lacune d'observation existant entre le GPS utilisé classiquement (30s d'échantillonnage et positions calculées pour des sessions d'enregistrement de 4 à 24h) et les observations sismologiques ne permettant pas l'observation de signaux supérieurs à quelques minutes de période. Le pôle de compétence GPS s'est fortement accru au LGIT avec le recrutement en 2006 d'un ingénieur de recherche et d'un chargé de recherche, venant ainsi renforcer le pôle de compétence existant. Par ailleurs, nous bénéficions au LGIT de l'expertise reconnue en sismologie et nos collègues sismologues sont intéressés par le lien à construire entre le GPS haute-fréquence et la sismologie longue période.

Nous avons travaillé sur deux axes distincts qui sont l'acquisition de données haute-fréquence et le développement méthodologique associé à ce type de données. Dans une première partie, nous présenterons nos avancées et résultats concernant l'observation GPS haute-fréquence dans l'Isère. Dans une seconde partie, nous présenterons nos résultats obtenus grâce aux données acquises par un banc de test développé dans le cadre de ce projet et qui servent à la validation des méthodes d'analyse.

2.- L'observation GPS haute-fréquence en Isère pour les risques naturels

Dès 2003, le LGIT s'est engagé dans l'installation et la maintenance de stations GPS permanentes régionales dans le but de densifier le Réseau National GPS (RENAG - <http://webrenag.unice.fr/>). Le réseau géré aujourd'hui par le LGIT comprend 10 stations GPS permanentes labellisées RENAG dans les Alpes, dont 4 sont localisées en Isère (Figure 2). Ce réseau est essentiellement dédié à l'étude des déformations tectoniques dans les Alpes Françaises. Depuis le 1er semestre 2008, 3 stations GPS permanentes supplémentaires sont installées et sont dédiées à la surveillance du glissement de terrain du Mas d'Avignonet dans le Trièves, qui est le premier glissement de terrain instrumenté par GPS continu en Isère (réseau OMIV : Observatoire Multidisciplinaire des Instabilités de Versant).

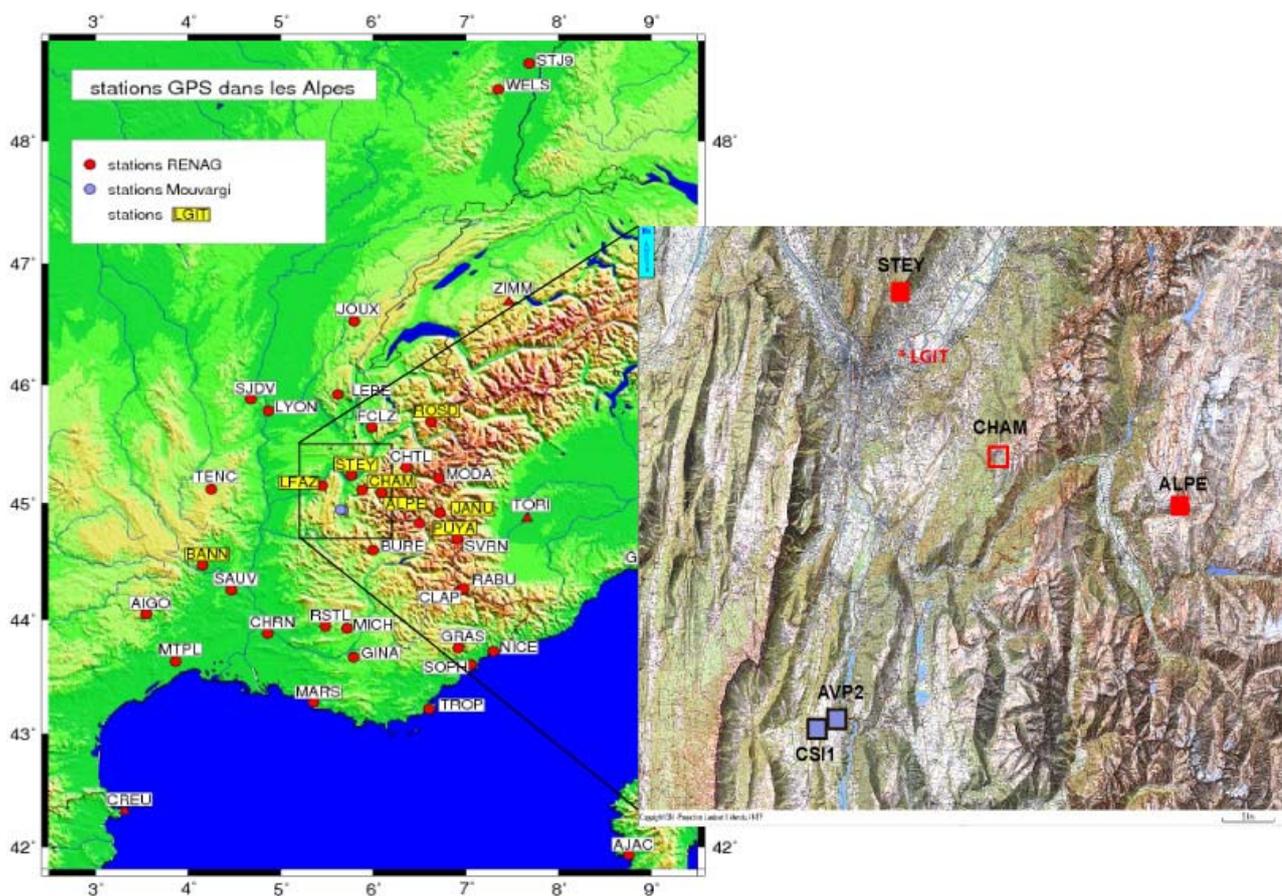


Figure 1 : A gauche : carte des stations RENAG (points rouges) et des stations de réseau OMIV (points bleus). Les stations labellisées en jaune sont gérées par le LGIT. A droite : Zoom sur les stations GPS en Isère (carrés pleins) qui vont évoluer vers de l'acquisition haute fréquence : STEY, ALPE, CSI1 (aujourd'hui remplacée par AVR1), AVP2. Notez que la station LFAZ, localisée en Isère, est hors cadre.

Dans le cadre de ce projet, notre objectif est de construire une base de données GPS haute-fréquence mais aussi de développer les compétences nécessaires à l'exploitation de ces données, pour les applications qui nous intéressent en Isère, à savoir la surveillance de l'évolution temporelle des glissements de terrain du Trièves, et à la surveillance des failles actives susceptibles de rompre prochainement lors de forts séismes (ex: faille de Belledonne). Nous proposons d'appliquer par ailleurs notre expertise à la surveillance et l'étude d'autres objets dans les Alpes, tels que le glacier d'Argentière (travaux en cours) et les failles actives du Vuache et du Valais.

Pour répondre à cet objectif, il est tout d'abord nécessaire de modifier le mode d'acquisition des stations GPS existant en Isère, de sorte à passer d'une acquisition classique à 30s à une acquisition haute fréquence à 1s. Cette transformation est complexe à réaliser car elle nécessite de modifier la chaîne d'acquisition et de revoir le système de télémétrie pour gérer des volumes de données devenus 30 fois plus importants que ce qu'ils sont actuellement. A ce jour, nous avons réussi cette opération pour deux des quatre sites initialement proposés :

- la station GPS permanente au fort du Saint Eynard (STEY) est en mode d'acquisition à 1s depuis juillet 2008, grâce à un lien Wifi fait depuis le LGIT sur une distance de 4-5km. Ceci a pu se faire en établissant une adaptation port série <-> port ethernet nécessaire pour le type de récepteur installé sur site. De ce fait, la vitesse de transmission des données est limitée par la vitesse du port série de l'appareil.
- la station GPS permanente à l'Alpe d'Huez (ALPE) qui bénéficie également d'un pont Wifi de 200m entre le GPS et le routeur ADSL proposé par le fournisseur d'accès à internet, comme le montre le schéma de la figure 2. Il nous reste à renforcer le site du GPS avec l'installation d'un panneau solaire supplémentaire pour supporter la consommation électrique du matériel Wifi. L'acquisition 1s est opérationnelle depuis avril 2009.

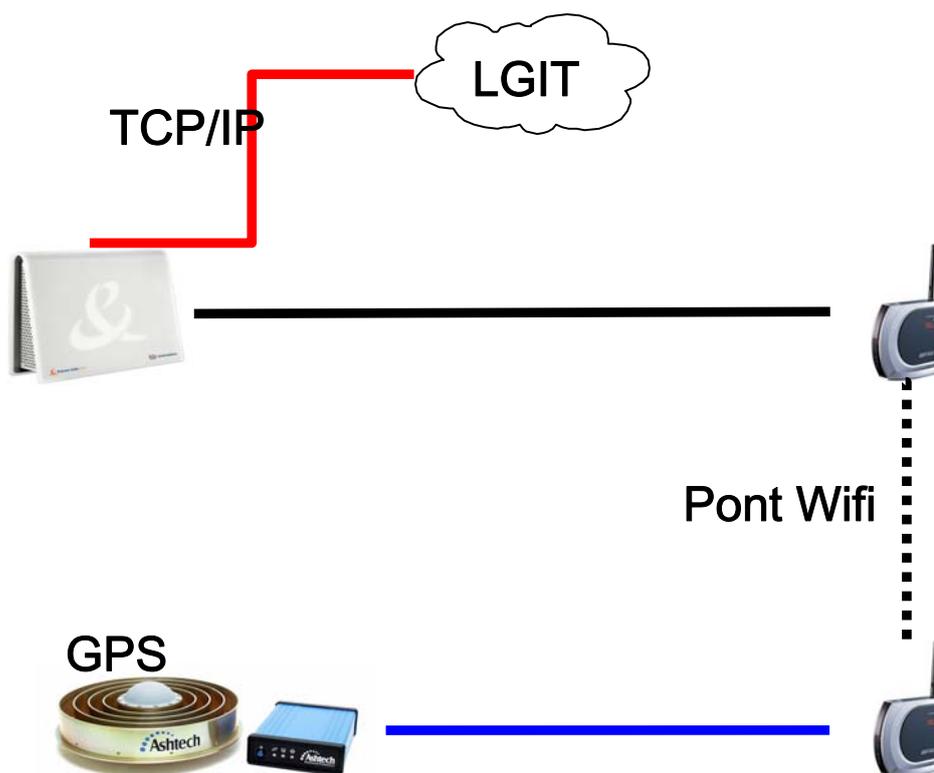


Figure 2 : schéma pour la station GPS permanente ALPE (Alpe d'Huez) avec un pont Wifi réalisé entre le routeur ADSL et la station GPS (200m). Réalisation de Raphael Jacquot.

La réalisation des ponts Wifi pour ces deux sites a pu être faite grâce à ce projet financé par le Pôle Grenoblois Risques Naturels. Quant aux 2 sites GPS dédiés au glissement de terrain d'Avignonet, la transformation en mode d'acquisition haute-fréquence s'est avérée plus difficile à entreprendre que ce qui était prévu, du fait que jusqu'en 2009 aucun fournisseur d'accès internet ne proposait de solutions à proximité. Les solutions satellitaires sont encore trop coûteuses et les solutions GSM/GPRS inadaptées au débit de données souhaité. Au moment de l'écriture de ce rapport, une entreprise (Alsatis), sous l'impulsion du Conseil Général de l'Isère, vient de développer une solution haut-débit au village de Monteynard qui se situe à 5km du site étudié, en vue directe. Il est donc prévu d'ici la fin de l'année 2009 de recourir à cette solution pour établir les connexions haut-débit dont nous avons besoin pour non seulement transformer le mode d'acquisition des GPS à 1s, mais également pour transférer les données au fur et à mesure et mettre en place au laboratoire une analyse automatique de ces données qui permettrait de suivre au temps quasi-réel les déformations de surface lié à l'instabilité de versant. Là encore, un pont Wifi est le seul moyen de raccorder nos sites d'observation au réseau internet haut-débit nouvellement mis en place, comme le montre la figure 3. Il n'est pas envisageable pour le GPS d'enregistrer à haute-fréquence sans mettre en place la télémétrie des données, les meilleurs récepteurs GPS n'offrant que 2 semaines d'autonomie de disque pour une acquisition à 1s.

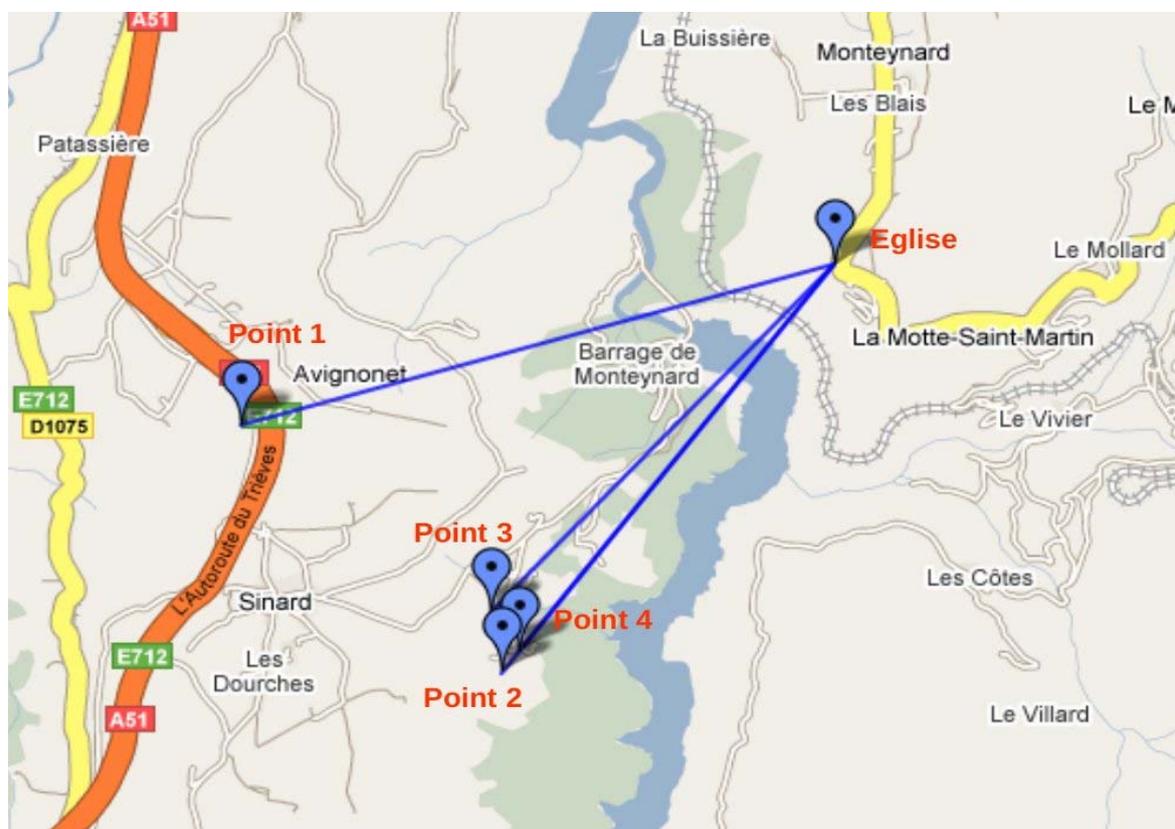


Figure 3 : schéma du projet d'implantation de l'internet haut-débit sur les sites de mesures permanents situés sur le glissement d'Avignonet. Une borne nous permettant l'accès à l'internet haut-débit est depuis 2009 disponible au niveau de l'église de Monteynard (FAI : société Alsatis). Un pont Wifi entre nos appareils de mesure et ce point nous permettra de télémétrer quotidiennement nos données GPS et sismologiques.

Toutes ces données seront prochainement accessibles par le portail du site Renag géré par nos collègues de Géosciences Azur à Sophia Antipolis (<http://webrenag.unice.fr>) et le sont sur demande au LGIT.

3.- Méthodologie d'analyse du GPS haute-fréquence et lien avec le risque sismique

En parallèle de ces développements techniques sur sites d'observation permanents et de l'acquisition des données GPS 1 Hz qui en découle, nous menons des développements méthodologiques dédiés à une utilisation performante des données 1Hz. Le but d'une telle orientation est de pouvoir répondre à un maximum d'applications et de proposer une composante transversale dédiée à plusieurs domaines liés aux risques naturels.

Le GPS utilisé classiquement à 30s d'échantillonnage permet le calcul de positions moyennées sur quelques heures. Avec le GPS haute-fréquence, typiquement à 1s pour nos sites déjà en place (Saint Eynard, Alpe d'Huez) ou à venir (Avignonet), nous allons vers un autre type d'analyse des données : l'analyse cinématique. Il s'agit de voir échantillon par échantillon comment varie la position du GPS en mouvement par rapport à un site stable de référence. Il est donc possible de déterminer une position toutes les secondes et de suivre ainsi l'évolution temporelle des déplacements du sol. Plus les déplacements sont grands et rapides dans le temps, plus le rapport signal sur bruit est grand, et donc plus la précision de la mesure est élevée. Il est important de parvenir à mesurer ces déplacements de surface avec finesse, que ce soit lors d'un séisme (déplacement co-sismique) ou lors d'une phase d'accélération de glissement de terrain.

Pour développer et valider les méthodes d'analyse cinématique, il nous faut des données parfaitement connues et calibrées. C'est pourquoi en 2008, dans le cadre de ce projet, nous avons élaboré au LGIT un banc de test dédié à reproduire les déplacements de surface générés par un séisme. Une plaque en mouvement par rapport à un socle fixe génère un déplacement en translation engendré par l'action d'une bielle (voir photos de la Figure 4). Sur cette plaque en mouvement peuvent être installés simultanément un capteur sismique (accéléromètre) et une antenne GPS dont le récepteur fait une acquisition à haute-fréquence (1 ou 5Hz). Pour étalonner nos mesures, un capteur de position permet de connaître le déplacement réel du plateau en mouvement. Nous avons défini trois longueurs de course différentes pour le mouvement du plateau : 1, 2 et 9.5cm. Pour l'instant nous n'avons travaillé qu'avec l'amplitude de mouvement de 9.5cm.

Nous avons procédé à différentes séries de mesure, et nous montrons dans ce rapport les résultats obtenus avec les mesures faites en août 2008 (mesures de N. Cotte et S. Hatton; analyses d'A. Royer, en stage avec A. Walpersdorf et N. Cotte, et avec la collaboration de M. Langlais pour l'analyse des données sismologiques). L'analyse cinématique a été faite avec le logiciel scientifique le plus développé à ce jour, le logiciel Track, module de GAMIT (GPS Analysis of MIT).

Les figures 5, 6 et 7 nous montrent les résultats pour 3 gammes de périodes différentes : 20, 6 et 0.8s environ. Nous avons fait 3 essais pour avoir des jeux de données de fréquences de signal différentes. Les résultats montrent qu'à partir du moment où l'échantillonnage des signaux GPS est adapté à la fréquence du déplacement de la plaque (i.e. au moins 2 fois supérieure, c'est le théorème de Shannon), alors nous retrouvons très bien ce déplacement par analyse cinématique des données GPS.

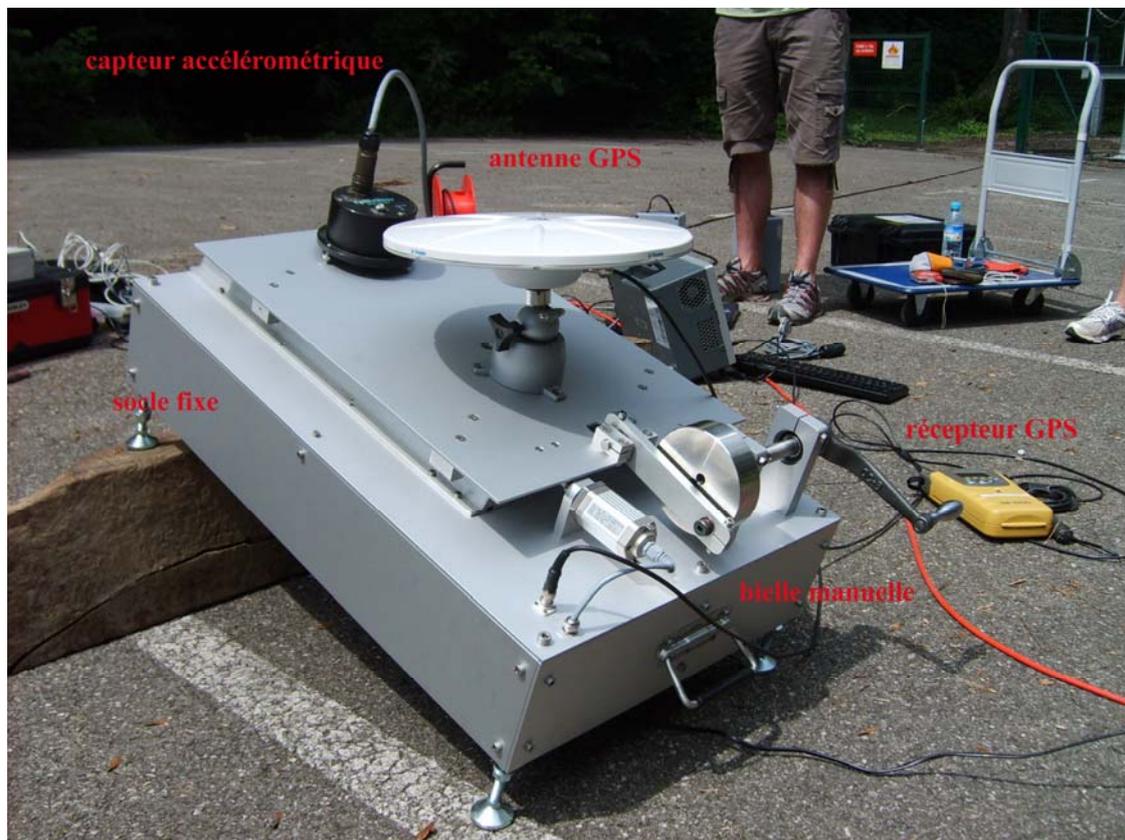


Figure 4: Banc de test réalisé au LGIT en 2008 pour l'acquisition de données GPS haute-fréquence couplée avec des mesures sismologiques (réalisation technique : J.-P. Masson, N. Cotte et M. Langlais, avec la participation de S. Hatton et B. Vial)

banc de test(kinematic)

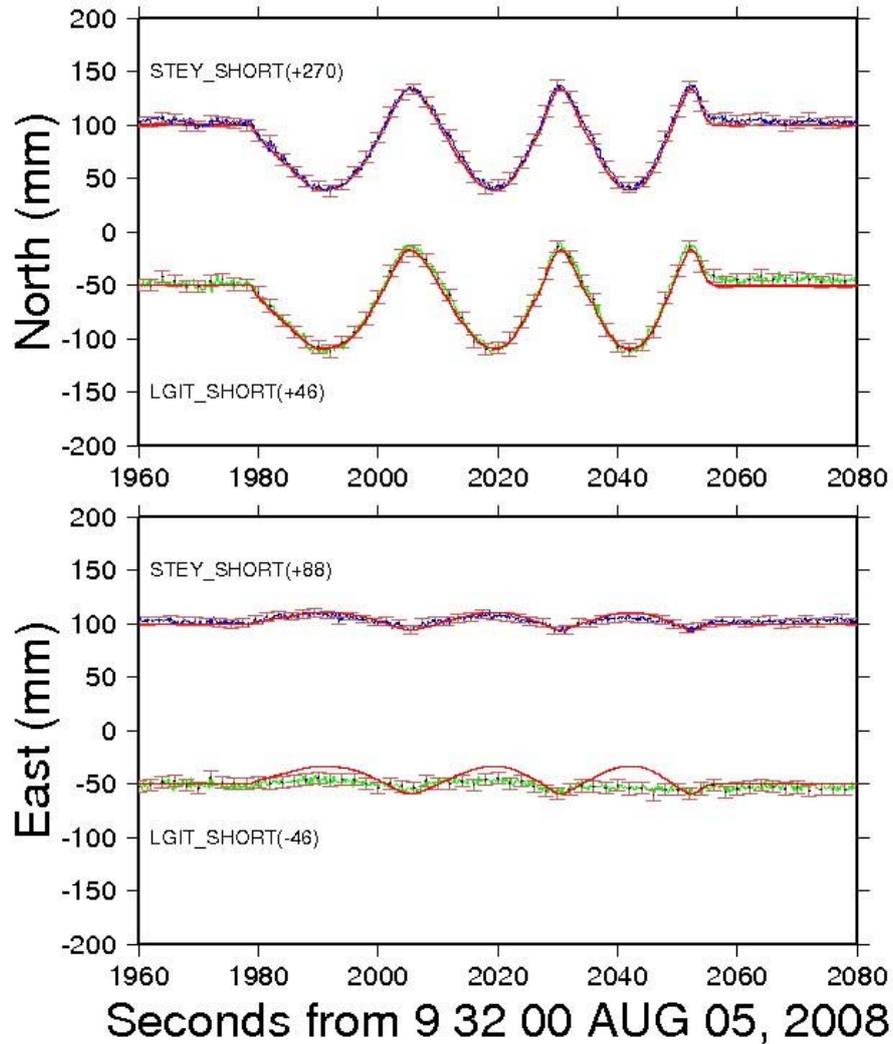


Figure 5: Résultats pour la série d'acquisition du déplacement à environ 20s de période, avec déplacement Nord-Sud et Est-Ouest respectivement, en millimètre en fonction du temps en secondes. En violet, la station de référence est au Saint Eynard (STEY, 5km de distance) et en vert elle est sur le toit du LGIT (LGIT, 30m). La courbe rouge est la mesure faite par le capteur de position.

banc de test(kinematic)

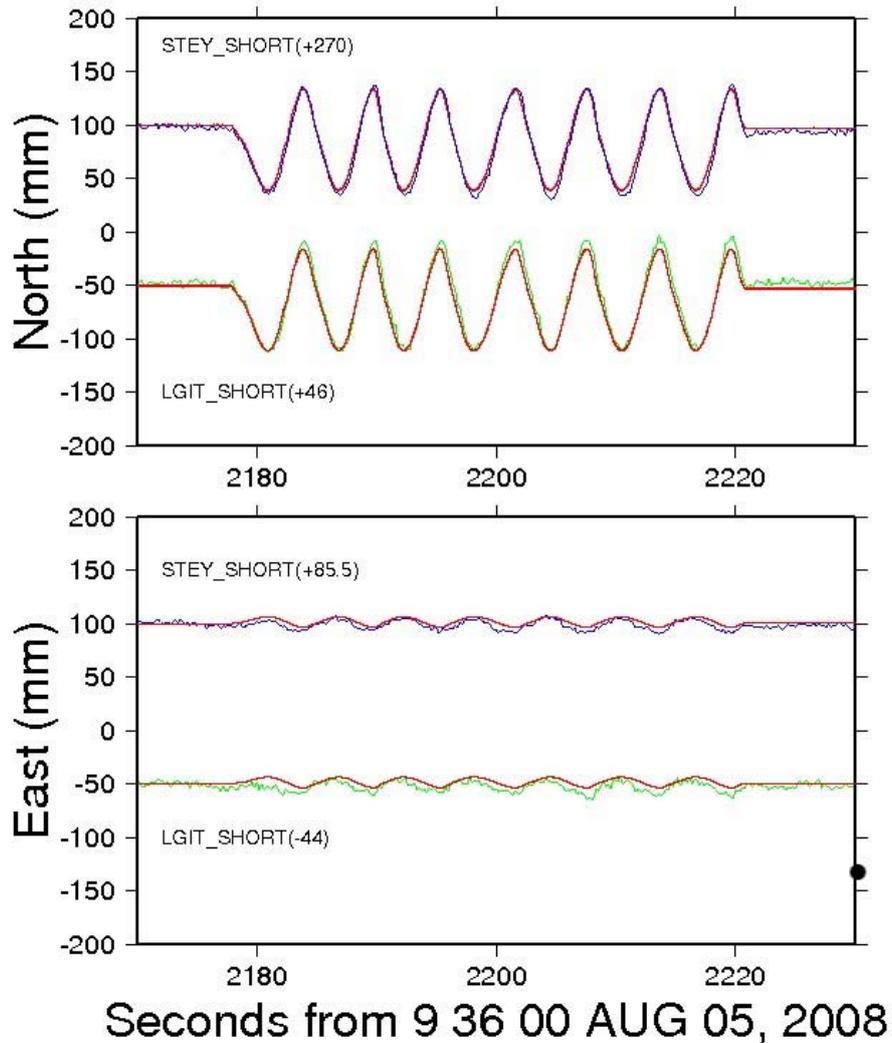


Figure 6: Résultats pour la série d'acquisition du déplacement à environ 6s de période, avec déplacement Nord-Sud et Est-Ouest respectivement, en millimètre en fonction du temps en secondes. En violet, la station de référence est au Saint Eynard (STEY, 5km de distance) et en vert elle est sur le toit du LGIT (LGIT, 30m). La courbe rouge est la mesure faite par le capteur de position.

banc de test(kinematic)

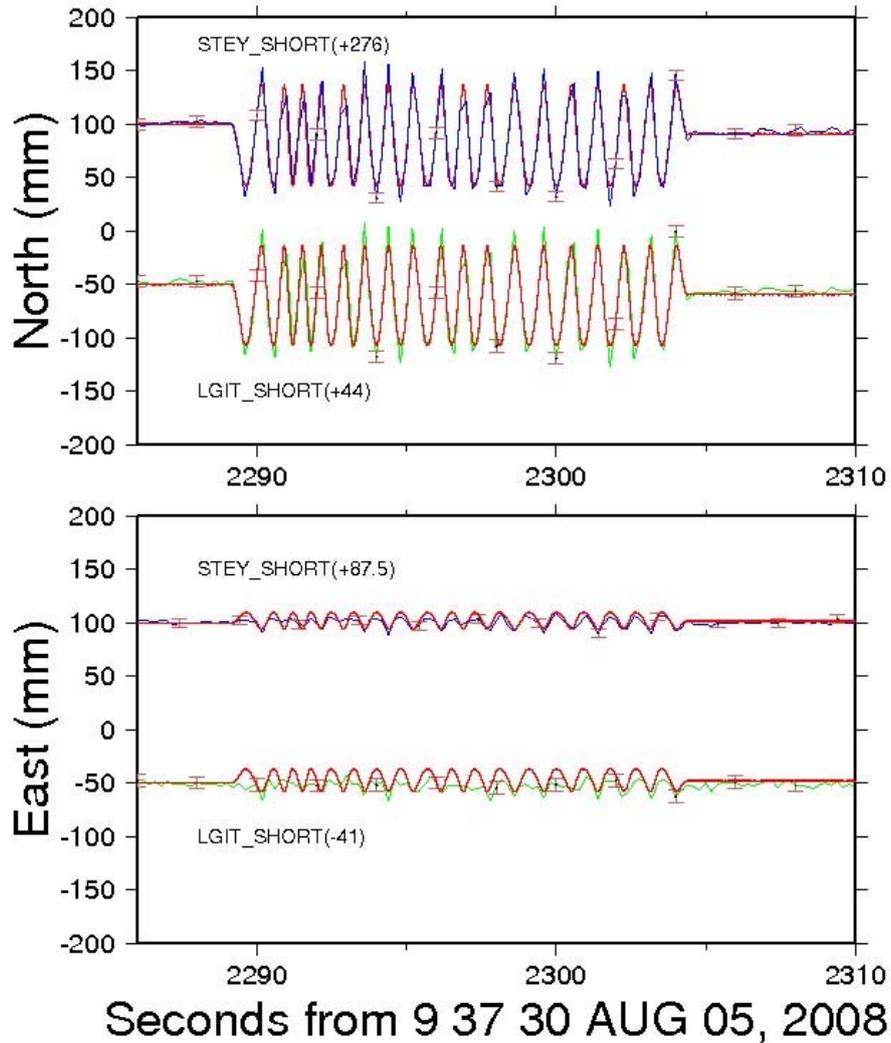


Figure 7: Résultats pour la série d'acquisition du déplacement à environ 0.8s de période, avec déplacement Nord-Sud et Est-Ouest respectivement, en millimètre en fonction du temps en secondes. En violet, la station de référence est au Saint Eynard (STEY, 5km de distance) et en vert elle est sur le toit du LGIT (LGIT, 30m). La courbe rouge est la mesure faite par le capteur de position.

Sur les figures 8 et 9, nous avons superposé les résultats de l'analyse cinématique des données GPS avec les enregistrements sismologiques. Le capteur sismologique utilisé était un accéléromètre (=mesure de l'accélération du sol), et nous avons corrigé son signal de la réponse instrumentale pour obtenir des m/s^2 . Afin de comparer les résultats GPS et accéléromètre, nous avons filtré et dérivé les résultats du GPS (initialement en mètre), et ce 2 fois pour obtenir une accélération, figure 8. De même, pour représenter les résultats en déplacement, nous avons filtré et intégré 2 fois les données sismologiques, figure 9.

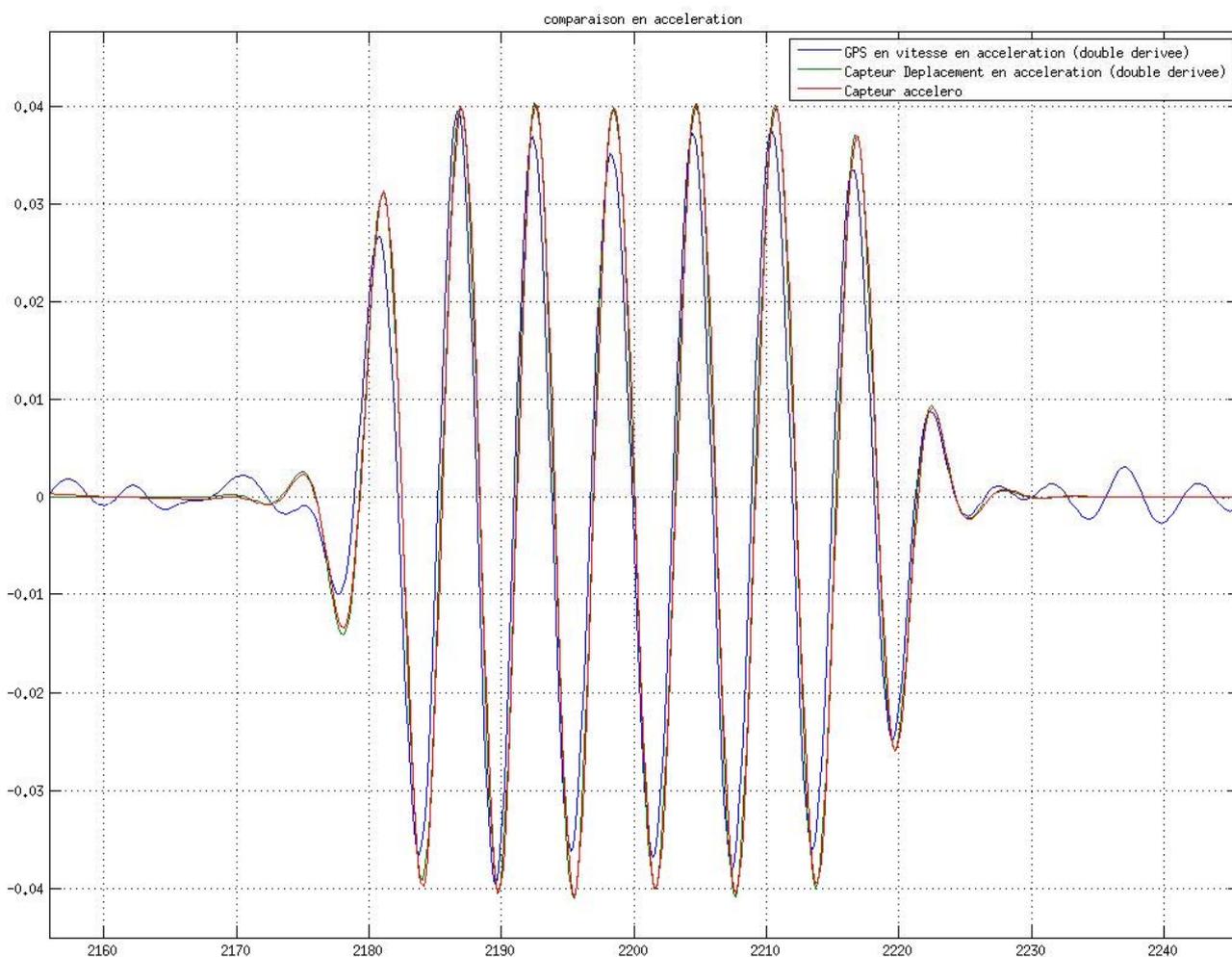


Figure 8: Comparaison de l'analyse GPS (bleu) et sismologique (rouge), en accélération (positionnement GPS dérivé 2 fois) exprimé en m/s^2 en fonction du temps en secondes. En vert nous avons superposé les mesures du capteur de position.

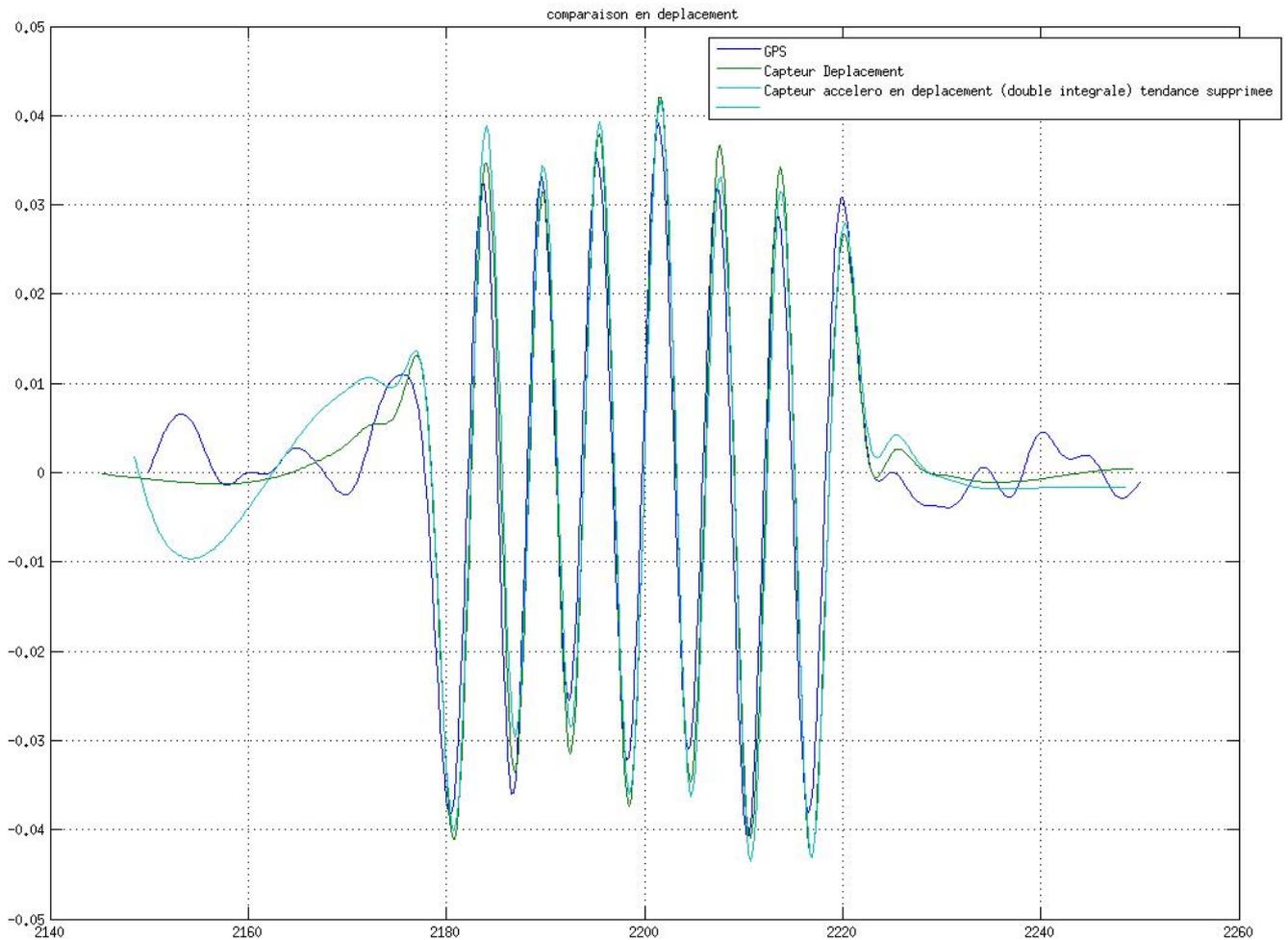


Figure 9: Comparaison de l'analyse GPS (violet) et sismologique (bleu clair), en déplacement (accélérogramme intégré 2 fois) exprimé en m en fonction du temps en secondes. En vert nous avons superposé les mesures du capteur de position. Les oscillations en début et fin sont dues aux filtres appliqués.

Nous n'avons pas montré ici les nombreux tests qui ont été faits sur les paramètres de l'analyse cinématique du GPS haute-fréquence. A ce stade de notre travail, les premiers résultats montrent que notre méthode d'analyse cinématique des données GPS haute-fréquence est déjà bien opérationnelle et offre des résultats proches du capteur de position, qui donne le déplacement vrai, et de l'accélérogramme. Ces résultats sont très encourageants et nous incitent à poursuivre dans cette voie pour affiner notre travail :

- travailler sur des déplacements plus petits
- travailler sur des lignes de base différentes (courtes pour les applications en risque gravitaire et longues pour le risque sismique de sorte à ce que la station de référence ne soit pas affectée par l'onde qui se propage)
- à terme, ajouter un mouvement en rotation au déplacement en translation pour montrer l'apport du GPS pour la correction des mesures sismiques en champ proche.

4. Bilan général

4.1 Autres programmes ou projets rattachés à cette thématique

Ce travail d'analyse de données GPS haute-fréquence a initié d'autres travaux en cours, tout comme l'analyse des données acquises sur le glacier d'Argentière (Haute-Savoie). Il est très intéressant de pouvoir valider toutes les méthodes d'analyse sur un objet se déplaçant à près de 15cm / jour pour pouvoir par la suite transposer ces résultats aux glissements de terrain bien présents en Isère, et dont celui d'Avignonet avec une vitesse moyenne de 10 cm / an.

D'autre part, ce programme visant à mieux évaluer les risques naturels de type sismique et gravitaire en Isère est développé en parallèle du projet « G-GAP » financé par l'ANR Risk-Nat pour 2009-2012 (coordinateur : M. Campillo), qui vise à étudier les séismes lents et le risque sismique dans la lacune de Guerrero au Mexique, en premier lieu à partir de données GPS permanentes. Notre projet au Mexique prévoit l'installation de 8 nouvelles stations GPS permanentes enregistrant à 1s. Nos avancées méthodologiques d'analyse GPS haute fréquence pourront être directement transposées à l'analyse des séismes lents, phénomènes engendrant des déplacements lents en surface (mm/jour) équivalents d'un point de vue traitement de données au déplacement d'un point à la surface d'un glissement de terrain lent.

4.2 Description des actions

Les actions ont été menées selon les deux axes suivant :

1) développement instrumental et déploiement sur site

- développement en laboratoire et validation de l'acquisition GPS continu à 1Hz sur PC pour différents types de récepteurs GPS (Trimble NetRS et Ashtech µZ). Essais validés au laboratoire mais encore pas déployés sur site
- développement des solutions de communication entre le récepteur GPS et un PC ou un routeur (pont Wifi)
- validation et installation de la chaîne d'acquisition sur site
 - site du *Saint Eynard* : STEY (proximité de l'agglomération grenobloise et de la faille de Belledonne). Pont Wifi validé depuis juillet 2008, données 1s télémétrées quotidiennement et disponibles au LGIT
 - site de l'*Alpe d'Huez* : ALPE (proximité du prolongement de la faille de Belledonne sur Laffrey et proximité du barrage de Grand-Maison). Pont Wifi validé depuis avril 2009, données 1s télémétrées quotidiennement et disponibles au LGIT
 - site de référence à Avignonet : AVR1 (site de référence pour les glissements de terrain dans le Trièves). En cours de réalisation avec le FAI (Fournisseur d'Accès Internet) Alasatis
 - site du *Mas d'Avignonet* : AVP2 (site sur glissement de terrain). En cours de réalisation avec le FAI (Fournisseur d'Accès Internet) Alasatis

2) développement méthodologique pour l'analyse des données haute-fréquence

- travail bibliographique et veille technique et scientifique pour identifier les solutions méthodologiques à tester et développer
- expérience en laboratoire de simulation de déplacement de sol lié à un séisme modéré en combinant un enregistrement GPS continu haute-fréquence et un enregistrement accélérométrique continu
- test de la méthodologie d'analyse GPS sur des données acquises par l'expérience en laboratoire

4.3 Financement des actions

- achat de serveurs informatiques (pour sites et au laboratoire)
- petit matériel informatique (disque dur externe, écran, onduleurs)
- matériel de télécommunication (radios analogiques et routeur Wifi, antennes)
- financement d'un stagiaire ingénieur en Telecom
- frais de mission pour les déplacements sur site
- réalisation du banc de test pour la simulation d'un déplacement de sol généré par un séisme

4.4 Valorisation

- rapport de stage (3ème année ingénieur Telecom) de Mamadou Sow : les différents types de radio possibles pour la géophysique (juillet 2007)
- rapport de stage (M2R) d'Alexandra Royer : acquisition et analyse de données GPS haute-fréquence (juin 2009)
- rapport et conférence (vidéo et présentation également disponibles) de Raphael Jacquot : Wifi et applications en géophysique (juin 2009)
- existence et disponibilité au laboratoire d'un banc de test
- à venir : analyse automatique des données GPS nouvellement télémétrées pour la surveillance en temps quasi-réel du glissement de terrain d'Avignonet

4.5 Bibliographie

- Bock, Y., R. M. Nikolaidis, P. J. de Jonge, and M. Bevis, (2000). "Instantaneous geodetic positioning at medium distances with the Global Positioning System", *J. Geophys. Res.*, 105, 28,223– 28,254.
- Bock, Y., L. Prawidordidjo and T. Melbourne (2004). "Detection of Arbitrarily Large Dynamic Ground Motions with a Dense High-Rate GPS Network", *Geophys. Res. Letter*, vol. 31, L06604.
- Boore, D. M. (2006). "Long Period Ground Motions from Digital Acceleration Recordings : A New Era in Engineering Seismology"
- Celebi, M. (2000). "GPS in Dynamic Monitoring of Long-Period Structures", *Soil Dyn. & Earth. Eng.*, 20, 477-483.
- Chen S.-M. and C.-H. Loh (2006). "Estimation of Permanent Ground Displacement from Near-Fault Strong Motion Accelerograms", proceeding in 1st ECEES, Geneva, Switzerland, 3-8 September 2006, Paper number:1631.
- Choi, K., A. Bilich, K.M. Larson, and P. Axelrad (2004). Modified sidereal filtering: Implications for high-rate GPS positioning, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L22608.
- Ge, L., et al. (2000). "GPS seismometers with up to 20Hz sampling rate", *Earth Planets Space*, 52, 881-884.
- Irwan, M., F. Kimata, K. Hirahara, T. Sagiya, and A. Yamagiwa (2004). "Measuring Ground Deformations with 1-Hz GPS Data: the 2003 Tokachi-oki Earthquake (preliminary report)", *Earth Planets Space*, 56, 389-393.
- Ji, C., K. Larson, Y. Tan, K. Hudnut, and K. Choi (2004). "Slip History of the 2003 San Simeon Earthquake Constrained by Combining 1-Hz GPS, Strong Motion, and Teleseismic Data", *Geophys. Res. Lett.*, 31, L17608.
- Langbein, J. and Y. Bock (2004). "High-Rate Real-Time GPS Network at Parkfield: Utility for Detecting Fault Slip and Seismic Displacements", *Geophys. Res. Letter*, vol. 31, L15S20.
- Langbein, J., J. Murray, and H. A. Snyder, (2006). "Coseismic and initial postseismic deformation from the 2004 Parkfield, California, earthquake, observed by Global Positioning System, creepmeters, and borehole strainmeters", *Bull. Seism. Soc. Am.* 96, no. 4B, S304–S320.
- Larson, K., P. Bodin, and J. Gombert (2003). "Using 1-Hz GPS Data to Measure Deformations Caused by the Denali Fault Earthquake", *Science*, vol. 300, 1421-1424.
- Miyazaki, S., K.M. Larson, K. Choi, K. Hikima, K. Koketsu, P. Bodin, J. Haase, G. Emore, A. Yamagiwa (2004). "Modeling the rupture process of the 2003 september Tokachi-Oki (Hokkaido) earthquake using 1-Hz GPS data", *Geophys. Res. Lett.*, 31, L21603.

ANNEXE : Références principales des acteurs du projet (dont celles citées dans le texte)

- Bock, O., M.-N. Bouin, **A. Walpersdorf**, J.-P. Lafore, S. Janicot and F. Guichard, Assessment of GPS data over Africa: Analysis of precipitable water vapour, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, submitted, 2007.
- Brenot, H., V. Ducrocq, **A. Walpersdorf**, C. Champollion and O. Caumont, GPS zenith delay sensitivity evaluated from high resolution NWP simulations of the 8-9th September 2002 flash-flood over southeastern France, *J. Geophys. Res.*, Vol. 111, D15105, doi:10.1029/2004JD005726, 2006.
- Calais, E., **M. Vergnolle**, J. Déverchère, V. San'kov, A. Likhnev and S. Amarjargal, Are postseismic effects of the M=8.4 Bolnay earthquake (July 23, 1905) still influencing GPS velocities in the Mongolia-Baikal area?, *Geophys. J. Int.*, 149, 157-168, 2002.
- Calais, E., **M. Vergnolle**, V. San'kov, A. Likhnev, A. Miroshnichenko, S. Amarjargal, J. Déverchère, GPS measurements of crustal deformation in the Baikal-Mongolia area (1994-2002) : Implication for current kinematics of Asia, *J. Geophys. Res.*, 108, B10, doi:10.1029/2002JB002373, 2003.
- Calais, E., L. Dong, M. Wang, Z. Shen, **M. Vergnolle**, Continental deformation in Asia from a combined GPS solution, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L24319, doi:10.1029/2006GL028433, 2006.
- Champollion, C., F. Masson, J. van Baelen, **A. Walpersdorf**, J. Chéry and E. Doerflinger, GPS monitoring of the tropospheric water vapour distribution and variation during the September 9, 2002, torrential precipitation episode in the Cévennes (Southern France), *J. Geophys. Res., Atmospheres*, Vol 109, D24102, doi:10.1029/2004JD004897, 2004.
- Cotte N.**, H. A. Pedersen, M. Campillo, J. Ni, R. Kind, E. Sandvol and W. Zhao. Determination of the crustal structure in South Tibet by dispersion and amplitude analysis of surface waves, *Geophys. J. Int.*, 138, 809-819, 1999.
- Cotte N.**, H. A. Pedersen, M. Campillo, V. Farra and Y. Cansi. Off-great circle propagation of intermediate period surface waves as observed on a dense array in the French Alps, *Geophys. J. Int.*, 142, 825-840, 2000
- Cotte N.**, H. A. Pedersen and the TOR Working Group. Sharp transition of the lithospheric structure across the Tornquist Fan as inferred by Rayleigh wave analysis, *Tectonophysics*, 360, 85-88, 2001
- Cotte N.** and G. Laske. Testing group velocity maps for Eurasia, *Geophys. J. Int.*, 150, 639-650, 2002
- Cotte N.**, **A. Walpersdorf**, V. Kostoglodov, **M. Vergnolle**, J.A. Santiago, I. Manighetti and M. Campillo. Anticipating the next large silent earthquake in Mexico, *EOS (90)*, number 21, May 2009
- Laske G. and **N. Cotte**. Surface Wave Waveform Anomalies at the Saudi Seismic Network, *Geophys. Res. Lett.*, 28, 4383-4386, 2001
- Masson, F., M. Anvari, Y. Djamour, **A. Walpersdorf**, F. Tavakoli, M. Daignières, H. Nankali and S. Van Gorp, Large-scale velocity field and strain tensor in Iran inferred from GPS measurements: new insight for the Present-day deformation pattern within NE Iran, *Geophys. J. Int.*, submitted, 2007.
- Meric, O., Garambois, S., et **Orengo**, Y. (2006). "Large gravitational movement monitoring using a spontaneous potential network", SAGEEP, Seattle.
- Meric, O., Garambois, S., **Orengo**, Y., Duranthon, J.-P., et Pothérat, P. (2006). « SP monitoring of a huge rocky landslide (Séchilienne, The Alps, France) », EGU, Vienna.
- Pedersen H. A., O. Coutant, A. Deshamps, M. Soulage and **N. Cotte**. Measuring surface wave phase velocities beneath small broadband arrays: test of an improved algorithm and application to the French Alps, *Geophys. J. Int.*, 154, 903-912, 2003
- Pollitz, F.F., **M. Vergnolle**, E. Calais, Fault interaction and stress triggering of 20th century earthquakes in Mongolia, *J. Geophys. Res.*, 108, B10, doi:10.1029/2002JB002375, 2003.
- Pollitz, F.F. et **M. Vergnolle**, Mechanical deformation model of the western United States instantaneous strain-rate field, *Geophys. J. Int.*, doi: 10.1111/j.1365-246X.2006.03019.x, 167,421-444, 2006.
- Tatar, M., D. Hatzfeld, J. Martinod, **A. Walpersdorf**, M. Ghafory-Ashtiany, and J. Chéry, The present-day deformation of the central Zagros from GPS measurements, *Geophys. Res. Letters*, Vol. 29, No. 19, doi:10.1029/2002GL015427, 2002.
- Vergnolle, M.**, F.F. Pollitz, E. Calais, Constraints on the viscosity of the continental crust and mantle from GPS measurements and postseismic deformation models in Western Mongolia, *J. Geophys. Res.*, 108, B10, doi:10.1029/2002JB002374, 2003.
- Walpersdorf, A.**, C. Rangin and C. Vigny, GPS compared to long-term geologic motion of the north arm of Sulawesi, *Earth and Planetary Science Letters*, (159) 1-2, pp. 47-55, 1998a.
- Walpersdorf, A.**, C. Vigny, P. Manurung, C. Subarya and S. Sutisna, Determining the Sula block kinematics in the triple junction area in Indonesia by GPS, *Geophysical Journal International*, Vol. 135, Issue 2, pp. 351-361, Nov. 1998b.
- Walpersdorf, A.**, C. Vigny, C. Subarya and P. Manurung, Monitoring of the Palu-Koro fault by GPS, *Geophysical Research Letters*, Vol. 25, No. 13, pp. 2313-2316, 1998c.
- Walpersdorf, A.**, H.R. Nankali, F. Tavakoli, M. Tatar, D. Hatzfeld, P. Vernant, and J. Chéry, Oblique collision in the Northern Zagros observed by GPS, *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, Vol. 7, No. 3, 139-146, 2005.
- Walpersdorf, A.**, S. Baize, P. Tregoning, E. Calais and J.-M. Nocquet, Deformation in the Jura Mountains (France): First Results from Semi-Permanent GPS Measurements, *Earth Planet. Sci. Lett.*, Vol. 245, 365-372, 2006.
- Walpersdorf, A.**, D. Hatzfeld, H. Nankali, F. Tavakoli, F. Nilforoushan, M. Tatar, P. Vernant, J. Chéry and F. Masson, Difference in the GPS deformation pattern of North and Central Zagros (Iran), *Geophysical Journal International*, doi:10.1111/j.1365-246X.2006.03147.x, Vol. 167, Issue 3, 1077-, 2007a.
- Walpersdorf, A.**, M.-N. Bouin, O. Bock and E. Doerflinger, Assessment of GPS data for meteorological applications over Africa: Study of error sources and analysis of positioning accuracy, *J. Atm. Sol. Terr. Phys.*, submitted, 2007b.