

Acquisition et Analyse de données GPS haute fréquence

Alexandra Royer

Encadrante : Andrea Walpersdorf & Co-encadrante : Nathalie Cotte

Equipe cycle sismique et déformations transitoires

Laboratoire de Géophysique Interne et Tectonophysique, Grenoble

Février à Juin 2009

*Stage de recherche dans le cadre du
M2R Sciences de la Terre et de l'Environnement, Spécialité géophysique
Université Joseph Fourier , Grenoble*

Résumé

Le GPS (Global Positioning System) est devenu un outil incontournable dans les Sciences de la Terre pour l'observation des phénomènes tectoniques mais aussi pour les études liées aux risques (séismes, glissements de terrains, volcans, etc.). Les analyses GPS menées classiquement nous permettent de déterminer avec une précision optimale la position d'une station en moyenne sur 24h. De nouvelles applications ont commencé à se développer il y a quelques années avec une acquisition du signal GPS à plus haute fréquence, typiquement à 1Hz (par rapport aux 30s classiques). L'analyse de ce nouveau type de données permet d'accéder à des signaux sur des fréquences qui rejoignent celles des observations sismologiques. Ainsi nous pouvons combler les lacunes des observations pour des périodes intermédiaires au GPS classique (~1h - 1 jour) et à la sismologie (~0.1s - 100s). Afin d'exploiter le fait que la mesure GPS donne directement accès au déplacement total du sol occasionné par un séisme, l'équipe géodésique du LGIT (Laboratoire de Géophysique Interne et Tectonophysique) de Grenoble (Isère, France) a développé un dispositif expérimental permettant d'acquérir simultanément des données GPS haute fréquence et des données sismologiques à l'aide d'une plaque en mouvement (banc de test). À travers l'étude et l'analyse de données GPS 1Hz et 5Hz, nous montrons que nous pouvons atteindre une précision de l'ordre de quelques millimètres sur un déplacement de 9,5cm d'amplitude et d'une durée d'une soixantaine de secondes. Ces analyses ont été réalisées avec l'aide du logiciel TRACK développé par le MIT (Massachusetts Institute of Technology), conçu pour analyser des données GPS cinématiques.

The GPS (Global Positioning System) has become an essential tool in Earth Sciences for the observation of tectonic phenomena but also for studies related to risk (earthquakes, landslides, volcanoes, etc.). Classical GPS analyses allow us to determine the best position of a station averaged over 24h. A few years ago new applications developed a GPS signal acquisition at higher frequencies, typically at 1Hz. The analysis of this new type of data allows access to frequencies that rejoin the seismic observations. It enables us to fill gaps in observations for the interim periods between classical GPS (~1h - 1 jour) and seismology (~0.1s - 100s). In order to explore the fact that the GPS gives access to the total ground displacement caused by an earthquake, the geodetic team of LGIT (Laboratoire de Géophysique Interne et Tectonophysique) in Grenoble (Isère, France) has developed an experience to acquire simultaneous high-rate GPS and seismic observations of a moving plate. Through the study and the analyses of 1Hz and 5Hz GPS data, we show that we can achieve an accuracy of a few millimeters on a displacement of 9,5cm amplitude and a period of sixty seconds. These analyses have been realised with the TRACK software developed by MIT (Massachusetts Institute of Technology), designed to analyse kinematic GPS data.

Remerciements

Je tiens dans un premier temps à dire un grand Merci à Andrea Walpersdorf. Grâce à son expérience, sa patience sans faille et son calme incommensurable, j'ai pu mener à bien un projet scientifique du début à la fin en l'espace de quelques mois. Elle a réussi à m'éveiller dans mes recherches, mes questionnements et mes doutes afin d'entreprendre une démarche scientifique et à la mener à bien jusqu'au bout. Je n'oublierai pas l'énergie qu'elle a apporté à me faire poser les bonnes questions et à me garder dans le droit chemin.

Il est tout aussi important que je dise un grand Merci à Nathalie Cotte. Je suis admirative de sa patience, de sa gentillesse et de l'écoute qu'elle m'a consacré à chaque venue dans son bureau. J'ai particulièrement apprécié son expérience technique, que ce soit pour le matériel GPS ou le matériel sismologique, mais aussi pour ses compétences en informatiques. De plus, je n'oublierai pas toutes les opportunités que j'ai eu d'aller sur le terrain grâce à elle.

J'aimerai également remercier Mickael Langlais pour l'aide précieuse qu'il m'a apporté en traitement du signal et en sismologie. Je tiens aussi à le remercier pour le temps qu'il a consacré à mes problèmes d'analyses. Sans lui, mon rapport ne serait pas ce qu'il est aujourd'hui.

Et puis bien sûr je n'oublie pas de remercier mes compagnons de labo avec qui j'ai passé 5 mois dans la joie et dans la bonne humeur, dans les moments d'angoisse et les moments de rires.

Table des matières

1	Introduction	1
2	Fonctionnement du programme TRACK	4
2.1	Positionnement relatif	4
2.2	Mesure de phases	4
2.3	Sources d'erreur limitant la précision du GPS	6
2.3.1	Réfraction dans l'ionosphère	6
2.3.2	Réfraction dans la troposphère	7
2.3.3	Précision des orbites des satellites GPS	7
2.3.4	Horloges des satellites et des récepteurs	8
2.3.5	Multitrajets	9
2.3.6	Position du centre de phase et hauteur des antennes GPS	10
3	Acquisition des données GPS haute fréquence	11
3.1	Dispositif expérimental : banc de test	11
3.2	Stations de référence	11
4	Analyse des données avec le programme TRACK	13
4.1	Du GPS classique au GPS haute fréquence	13
4.2	Analyse des paramètres à travers différentes échelles de temps	15
4.2.1	Échelle de temps 24h	16
4.2.2	Échelle de temps 1h	17
4.2.3	Échelle de temps 1mn	19
5	Comparaison des données acquises lors de l'expérience du banc de test	21
5.1	Traitement des signaux	21
5.1.1	Fenêtre d'acquisition, calage en temps et orientation du banc de test	21
5.1.2	Filtrage	22
5.1.3	Dérivation et intégration	23
5.2	Superposition des mesures	23
5.2.1	Accélération	23
5.2.2	Déplacement	25
5.3	Précision des données GPS sur des basses et hautes fréquences	26
6	Conclusion	28

Bibliographie et références internet	30
Annexes	a
Annexe A : Principe de la mesure GPS	a
Annexe B : Format Rinex	d
Annexe C : Structure du fichier de commande <i>track.cmd</i>	e
Annexe D : Structure d'un shell type GMT pour la construction des graphiques	g
Annexe E : Programmes MATLAB pour le traitement des signaux	k
Annexe F : Logiciel GSAC pour le traitement des données sismologiques	n

1 Introduction

Dès le début des années 70, l'un des principaux soucis du Département de la Défense des Etats-Unis est de concevoir un outil permettant à tous les éléments de l'armée américaine (avions, navires, véhicules, troupes) de se positionner de manière précise et quasi instantanée n'importe où et n'importe quand à la surface de la Terre. Le GPS (Global Positioning System) a donc été conçu pour répondre à ces impératifs. L'arrivée dans le civil du positionnement par GPS dans les années 1980 n'a pas laissé les géophysiciens indifférents. L'avantage était grand par rapport aux méthodes géodésiques terrestres classiques car il devenait possible de s'affranchir de la condition d'inter-visibilité entre sites de mesure. De plus, la mise en œuvre de mesures GPS était bien plus aisée et bon marché que les mesures de géodésie spatiale alors disponible (par exemple la télémétrie laser ou la technique de radioastronomie par interférométrie). L'utilisation du GPS n'a ensuite cessé de se démocratiser, profitant de deux développements en parallèle. D'une part, la motivation des scientifiques à atteindre les meilleures précisions possibles a permis d'améliorer le traitement des données. D'autre part la pression d'utilisateurs non spécialistes a permis le développement d'équipement simple d'emploi, fiable, et relativement bon marché.

Très vite, les géophysiciens, habitués à mesurer la Terre et ses manifestations par des stations sismologiques, gravimétriques, magnétiques, etc... ont envisagé la mesure de ses déformations à l'aide de campagnes GPS. L'idée a germé en 1990 dans l'enceinte de deux instituts de Californie du Sud, précurseurs en matière d'application du GPS aux mesures de déformations de la croûte terrestre. Ces deux instituts partageaient un souci de taille : la faille de San Andreas. La première campagne GPS vit donc le jour en Californie du Sud en 1991 autour de cette faille, dans le but de mesurer ses déplacements par la répétition des mesures de positionnement.

Dans le même temps, quelques laboratoires de géophysique et de géodésie dans le monde s'équipaient de stations GPS permanentes, surtout au départ pour des raisons métrologiques et géodésiques. Le potentiel de fédérer ces stations au sein d'un réseau international apparut aussi très vite : cela donnait accès en continu à un référentiel géodésique global et à des orbites des satellites GPS précises. Un service international à vocation scientifique, l'IGS (International GPS Service for Geodynamics) vit donc le jour en 1992 (maintenant appelé GNSS incluant GLO-NASS et GALILEO), avec comme objectif de fédérer les stations GPS permanentes existantes, de favoriser l'implantation de stations nouvelles, de mettre en place un système de gestion et de traitement global des données, et de délivrer des « produits géodésiques » utiles à la communauté scientifique.

Depuis 1994, la géodésie spatiale par GPS a permis des progrès fondamentaux dans la connaissance des déformations de la croûte terrestre, depuis l'activité de failles jusqu'à la déformation

intracontinentale. Le GPS permet en effet de mesurer des déformations avec une précision de l'ordre du mm/an, voire mieux, sur des durées de l'ordre de quelques années et sur des échelles spatiales allant jusqu'à des milliers de kilomètres.

La stratégie particulière d'utilisation du GPS en observation permanente, a alors été mise en avant dans les géosciences. Elle permet de réduire une partie des erreurs de mesure par des antennes montées de manière permanente sur un monument géodésique stable et durable, abaissant de fait le seuil de détection d'un signal géophysique. De plus, elle fournit des séries temporelles continues qui permettent d'analyser en détail les processus qui affectent la détermination de la position des stations au cours du temps (déformations tectoniques, variabilité troposphérique liée aux conditions météorologiques et aux saisons, stabilité du monument géodésique, etc.). Les résultats de mesures GPS permanentes dans les régions sismiquement actives ont clairement démontré le potentiel de cette méthode. Des mesures GPS continues en Californie du Sud ont permis d'obtenir des précisions de 1 à 2 mm/an avec seulement deux ans de mesures en continu, pour des points séparés de 100 à 200 km (Bock et al., 1997). Une équipe française a démontré des précisions équivalentes en Europe à partir de 2 ans de mesures continues sur des sites GPS permanents encadrant les Alpes occidentales (Calais, 1999).

En outre, les applications du GPS s'ouvrent à une communauté plus vaste que celle initialement intéressée à la mesure des déformations tectoniques. Parmi les applications nouvelles, on peut citer : l'étude des surcharges océaniques et atmosphériques, l'estimation de l'humidité atmosphérique pour son assimilation dans les modèles météorologiques, la mesure du contenu électronique ionosphérique pour la physique de l'ionosphère, la détection et le suivi de subsidence et de glissements de terrain, la définition de référentiels géodésiques.

Une des applications scientifiques premières du GPS est la surveillance des failles actives. En mesurant la position de points répartis de part et d'autre de la faille, de façon répétée au cours du temps, il est possible de cartographier le champs de déformation autour de la faille. L'analyse de la déformation de la surface du sol dans la région de la faille donne des informations sur la profondeur de la fracture, la longueur des segments actifs, les zones où le risque de séisme est le plus important, etc. D'autre part, après un séisme, la mesure GPS donne accès au déplacement total du sol occasionné par celui-ci (en effet, les sismomètres enregistrent soit une accélération soit une vitesse, nous ne pouvons donc obtenir le déplacement total causé par un séisme qu'à une constante d'intégration près avec ce type de matériel). Cette information est particulièrement utile pour la compréhension des mécanismes fondamentaux de la rupture sismique. Enfin, il est même possible de mesurer la position de points GPS pendant un séisme. En calculant la position du point à chaque enregistrement des signaux satellites, on peut littéralement voir le point se déplacer pendant les quelques dizaines de secondes durant lesquelles

le train d'onde est enregistré. Ce type de mesure nécessite l'acquisition de données GPS haute fréquence, typiquement 1Hz-5Hz. Ainsi, en utilisant des données GPS 1Hz, plusieurs équipes géodésiques américaines ont pu mesurer les déformations (Larson et al, 2003) et détecter les ondes de surface (Bock et al, 2004) causées par le séisme de la faille Denali en Alaska le 3 Novembre 2002. Par ailleurs, le déplacement causé par le séisme de San Simeon en 2003 a pu être retracé en analysant des données GPS 1Hz et en les comparant à des données sismologiques (Ji et al, 2004). L'équipe de Miyasaki au Japon a pu, elle, modéliser la rupture du séisme de Tokachi-Oki du 25 septembre 2003 en utilisant des données GPS 1Hz (Miyasaki et al, 2004). D'autres observations ont été réalisées avec ce type d'acquisition, entre autres dans la zone de Parkfield (Langbein et al, 2004) ou encore autour du volcan Mt. Augustine en Alaska (Mattia et al, 2008). Ce type d'acquisition haute fréquence est en pleine expansion depuis plus de 5 ans et les équipes géodésiques se penchent notamment sur un meilleur traitement et une meilleure analyse des données pour améliorer la précision de résultats (Choi et al, 2004 ; Elosegui et al, 2006 ; Larson et al, 2007 ; Ragheb et al, 2006).

L'équipe GPS du Laboratoire de Géophysique Interne et Tectonophysique de Grenoble (LGIT) a développé un dispositif expérimental permettant d'acquérir simultanément des données GPS haute fréquence et des données sismologiques à l'aide d'une plaque mise en mouvement (banc de test) à différentes fréquences pour simuler le déplacement du sol lors d'un séisme. Des résultats concluants de l'analyse de ces données permettraient de valider les méthodologies d'analyse de ce type de données GPS haute fréquence au sein du laboratoire. L'objectif de ce stage est d'acquérir et d'analyser les données avec le programme TRACK développé par le MIT (Massachusetts Institut of Technology), conçu pour analyser des données GPS cinématiques. Dans une première partie de ce mémoire nous nous intéresserons au fonctionnement du programme TRACK. Nous parlerons du positionnement relatif par la mesure de la phase des signaux GPS et des sources d'erreur limitant la précision du GPS. Dans une deuxième partie, nous présenterons l'acquisition des données GPS haute fréquence. Nous détaillerons le dispositif expérimental (banc de test) et les stations de référence nécessaires au positionnement relatif. Une troisième partie s'adressera aux analyses des données avec TRACK. Nous montrerons le passage du GPS classique au GPS haute fréquence et les paramètres de TRACK à travers différentes échelles de temps. Finalement, dans une quatrième partie nous comparerons les données géodésiques et sismologiques acquises avec le dispositif expérimental. Nous présenterons le traitement des signaux nécessaire, la superposition des données géodésiques et sismologiques et la précision des données sur des mouvements périodiques du banc à différentes fréquences.

2 Fonctionnement du programme TRACK

2.1 Positionnement relatif

Le programme TRACK a été conçu par le MIT (Massachusetts Institute of Technology) pour traiter des données GPS cinématiques. Il se base sur le positionnement relatif par la mesure de la différence de phase entre une station A qui est fixe et dont on connaît les coordonnées et une station B mobile dont on cherche à déterminer les coordonnées à chaque époque d'observation. En d'autres termes, il cherche à déterminer le vecteur entre les deux points A et B, appelé ligne de base.

Si on appelle A le point fixe de référence, B le point dont les coordonnées ne sont pas connues et b_{AB} la ligne de base, on a alors :

$$b_{AB} = \begin{bmatrix} X_B - X_A \\ Y_B - Y_A \\ Z_B - Z_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X_{AB} \\ \Delta Y_{AB} \\ \Delta Z_{AB} \end{bmatrix} \quad (1)$$

X, Y et Z sont les coordonnées des points A et B.

Le positionnement relatif requiert d'avoir simultanément des observations d'un même satellite au point A et au point B.

Pour le positionnement relatif sur des lignes de base de plusieurs centaines de kilomètres, il est possible d'atteindre une précision millimétrique en exploitant les mesures de phases porteuses des signaux GPS.

2.2 Mesure de phases

Le positionnement relatif par la mesure des phases porteuses est ambiguë. En effet, comme l'illustre la figure 1, les phases sont des signaux identiques à chaque cycle. L'objectif est de comparer le signal enregistré, émis par un satellite, avec un signal reproduit par le récepteur. Le problème étant qu'au début de la mesure de cette différence, nous ne pouvons déterminer qu'une partie fractionnelle $\Delta\varphi$ d'un cycle. Le nombre de cycles entiers, qu'on appelle couramment ambiguïté, qui se trouve en plus entre le satellite et le récepteur ne peut être reconstitué qu'à l'aide d'un algorithme mathématique et un nombre suffisant de mesures.

L'avantage d'exploiter les mesures de phases porteuses est qu'il n'y a aucune restriction d'accès (et que la résolution de mesure est fonction de leur longueur d'onde (19cm et 24cm), donc très élevée (en comparaison aux codes qui ont une longueur d'onde variant entre 30 et 300m, donc faible résolution, voir Annexe A)

D'un point de vue mathématique, le principe de la mesure de phase est le suivant :

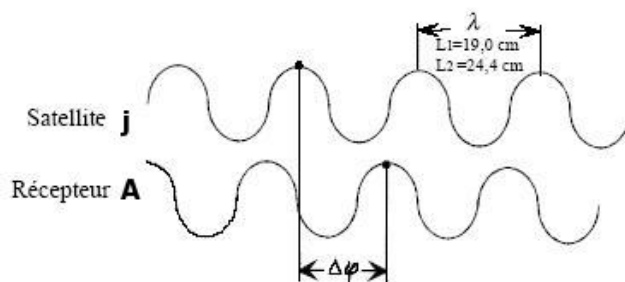


FIGURE 1 – Comparaison entre le signal enregistré, émis par le satellite et le signal reproduit par le récepteur. Source : Bottom et al, 1997

On considère que le récepteur A reçoit à l'instant t_R la phase du signal émis par le satellite j à l'instant t_E .

La mesure de phase est donnée par :

$$\Phi_A^j(t_R) = f * \Delta\delta_A^j(t_R) + \frac{1}{\lambda}\rho_A^j - N_A^j \quad (2)$$

où :

- $\Phi_A^j(t_R)$ est la phase mesurée à la station A à t_R , émise par le satellite j à t_E

-f est la fréquence émise par le satellite et le récepteur (on admet qu'elles sont égales)

- $\Delta\delta_A^j(t_R)$ est le décalage lié aux horloges.

- λ est la longueur d'onde de l'onde porteuse.

- ρ_A^j est la distance entre le récepteur et le satellite (quantité que l'on cherche à estimer).

- N_A^j est le nombre entier inconnu de cycles (ambiguïté). Pour un satellite et un récepteur donnés, N_A^j est la même pour toutes les mesures tant qu'il n'y a pas d'interruption du signal. Une interruption du signal provoque un saut de cycle, c'est-à-dire un changement de la valeur pour l'ambiguïté qui se traduit par l'introduction d'un paramètre supplémentaire dans l'analyse, ou des positions aberrantes à partir de l'époque de l'interruption.

La démonstration de cette expression de la mesure de phase est donnée dans le livre *GPS, localisation et navigation*, Bottom et al, 1997.

Parmi les termes de l'équation 2, Φ_A^j est mesurable précisément, $\Delta\delta_A^j$ peut être éliminé par double différence. Ce que l'on recherche à déterminer est la distance ρ_A^j , cela nécessite donc de calculer N_A^j .

Tout l'enjeu du programme TRACK est de résoudre au mieux les ambiguïtés N (cette résolution est plus difficile pour un positionnement cinématique que pour un positionnement statique car en statique on peut cumuler des mesures d'une même position pour diminuer le bruit). Connaître N veut dire connaître ρ à une fraction de la longueur d'onde (19cm) près (voir Annexe A, signal émis par les satellites), et par conséquent on obtiendrait une mesure ultra-précise de la distance entre satellite et récepteur (la différence de phase fractionnelle peut être mesurée très

précisément). Ainsi, si le nombre d'ambiguïtés est résolu, la longueur de la ligne de base entre les deux stations A et B sera obtenue de manière très précise. Notre objectif est d'analyser les paramètres que le programme propose afin de mettre en place les meilleures stratégies de positionnement cinématique. Ces stratégies sont identiques à celles qui résolvent au mieux un maximum d'ambiguïtés.

2.3 Sources d'erreur limitant la précision du GPS

En dehors de la dégradation volontaire du signal par les militaires américains (voir Annexe A), il existe des facteurs dits "naturels" qui limitent la précision du GPS. La figure 2 résume ces sources d'erreurs.

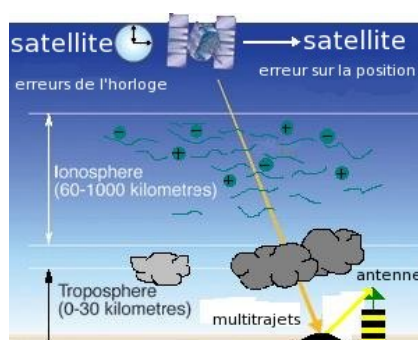


FIGURE 2 – Sources d'erreur limitant la précision du GPS. *Image modifiée de l'originale dont la source est : <http://reperageterrestre.free.fr/images/gps/erreurs-bilan.jpg>*

2.3.1 Réfraction dans l'ionosphère

L'ionosphère est une enveloppe constituée de particules chargées qui entourent la Terre entre 60km et 1000km d'altitude. L'onde porteuse du signal GPS doit traverser cette couche sur son trajet. Le fait que cette couche ne soit pas neutre entraîne une perturbation de la vitesse de l'onde électromagnétique qui se propage. Le temps mis par l'onde GPS est modifié d'une durée qui dépend de la densité d'électrons, qui elle, est inconnue. Cette durée est nommée délai ionosphérique. L'évaluation de la distance entre le satellite et la station sera faussée, la précision est donc diminuée par ce premier phénomène (voir figure 3). Cependant il est possible d'éliminer cet effet atmosphérique en faisant des mesures sur deux fréquences. Cette méthode suppose l'utilisation de récepteurs GPS bifréquence, utilisant les fréquences L1 et L2 du signal GPS (voir Annexe A : Principe de la mesure GPS). Le ralentissement d'un signal radio traversant l'ionosphère est inversement proportionnel à sa fréquence. Si l'on compare alors les heures d'arrivée des deux signaux, il est possible de réaliser une estimation précise du délai de propagation. TRACK utilise des données bifréquence afin de pouvoir éliminer cette erreur. Il calcul alors une

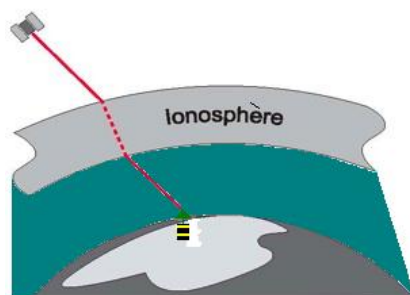


FIGURE 3 – Réfraction des ondes électromagnétiques dans la ionosphère. Image modifiée de l'originale dont la source est : http://www.precision-topo.com/images/GPS8%20Basics_fr_img_36.jpg

combinaison linéaire LC des phases de fréquence L1 et des phases de fréquence L2. Ce paramètre est le *mode long* mais il nécessite d'avoir une ligne de base longue (>10km). Sur de courtes distances (<10km), l'ionosphère est la même, TRACK peut alors mesurer que la phase de fréquence L1 (paramètre *mode court*), moins bruitée que LC sur des courtes distances.

2.3.2 Réfraction dans la troposphère

De la même façon, le temps de propagation de l'onde GPS est affecté par la densité de l'atmosphère neutre (la troposphère, de 0 à 20km d'altitude), et en particulier par sa teneur en vapeur d'eau. Il est nécessaire de connaître la densité atmosphérique avec précision tout le long du trajet de l'onde. En pratique cela se révèle très difficile, sinon impossible. En effet, le retard provoqué est plus compliqué qu'un simple rapport de proportionnalité avec la pression atmosphérique et le pourcentage d'humidité au sol. Ce problème est d'autant plus important que les conditions météorologiques et les épaisseurs troposphériques différent entre deux stations, même proches (>5km). Cette erreur de retard se retrouvera plus particulièrement sur la composante verticale, les composantes horizontales étant mieux contraintes du fait que les satellites couvrent toutes les directions de l'horizon, mais pas l'espace sous la station. TRACK calcule le délai troposphérique à chaque époque d'enregistrement. Il est alors possible de contraindre la variation de ce délai (paramètre atmosphérique *atm_stats*) en imposant une variation maximale entre deux époques. Ainsi, si on connaît les variations troposphériques attendues sur une période données, on est capable d'estimer des délais réalistes. Les analyses de ces paramètres sont présentées dans la partie 4.2.2.

2.3.3 Précision des orbites des satellites GPS

Si l'on se trompe d'une certaine quantité sur la position du satellite émetteur, cette erreur va se répercuter directement sur la position de la station réceptrice. La ligne de base entre deux stations sera moins affectée, la plus grosse partie de l'erreur étant éliminée par différentiation.

Néanmoins, bien que l'orbite des satellites GPS peut être calculée très précisément, a posteriori, elle est rendue publique en temps réel par les militaires américains avec une précision de l'ordre de 200 m. Sur 20000km cela donne une erreur de 10 cm sur une ligne de base de 10 km ! Cette erreur est totalement inacceptable pour le positionnement précis. Il est donc nécessaire de recalculer les orbites des satellites GPS à l'aide de programmes informatiques d'orbitographie. Les éphémérides précises des satellites GPS sont calculées à partir des données recueillies aux stations IGS du monde entier. Il est possible d'obtenir trois précisions différentes des éphémérides précises :

- Les éphémérides finales (+/- 2cm) peuvent être obtenues dans un délai de 15 jours.
- Les éphémérides rapides (+/- 5cm) peuvent être obtenues dans un délai de 24 heures.
- Les éphémérides ultra-rapides (+/- 15cm) peuvent être obtenues dans un délai de 2 heures.

Grâce aux éphémérides finales, on arrive à obtenir une erreur de seulement 1 mm pour une ligne de base de 1000 km de long.

TRACK demande de rentrer les éphémérides des satellites. Il est donc judicieux de rentrer les éphémérides finales pour minimiser l'erreur due à la précision des orbites des satellites.

2.3.4 Horloges des satellites et des récepteurs

L'expression de la mesure de phase décrite dans la partie 2.2 n'est pas directement utilisée dans le programme TRACK. En effet, celui se base sur le calcul des doubles différences. Calculer une double différence permet de s'affranchir des erreurs liées aux décalages des horloges des satellites et des récepteurs. Si les horloges des satellites et des récepteurs ne sont pas synchronisées, cette erreur va se répercuter sur la position de la station réceptrice. Une erreur d'horloge de 1ms donne une erreur de 300km en distance. On considère deux satellites j et k

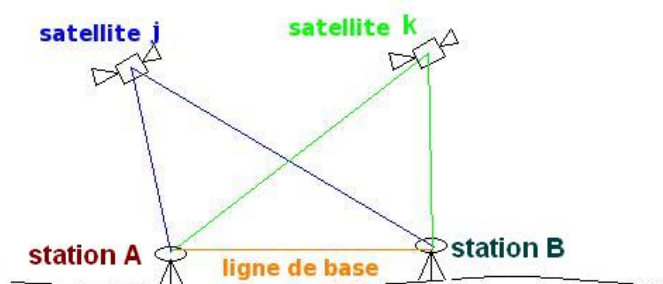


FIGURE 4 – Représentation de la double différence.

et les deux stations A et B, comme indiqués sur la figure 4.

Les stations A et B observent les deux satellites j et k simultanément. En s'imprégnant de l'équa-

tion 2, la mesure de phase par double différence s'écrit :

$$\Phi_{AB}^j(t) = \frac{1}{\lambda} \Delta \rho_{AB}^{jk} - \Delta N_{AB}^{jk} \quad (3)$$

avec

$$\Phi_{AB}^{jk}(t) = \Phi_B^k(t) - \Phi_B^j(t) - \Phi_A^k(t) + \Phi_A^j(t) \quad (4)$$

$$\Delta \rho_{AB}^{jk}(t) = \rho_B^k(t) - \rho_B^j(t) - \rho_A^k(t) + \rho_A^j(t) \quad (5)$$

$$\Delta N_{AB}^{jk} = N_B^k - N_B^j - N_A^k + N_A^j (\text{toujours une entiere}) \quad (6)$$

La démonstration de cette expression de la double différence est donnée dans le livre *GPS, localisation et navigation*.

On remarque bien que les $\Delta \delta_A^j$ de l'équation 2 sont éliminées par cette double différence.

2.3.5 Multitrajets

Tout objet réflecteur placé dans le voisinage de l'antenne de la station GPS peut renvoyer un signal provenant d'un satellite sur cette antenne où il est mélangé avec le signal du même satellite arrivant directement. Tout comme un miroir crée une image de soi même lorsque l'on se regarde dedans, le réflecteur crée une image de l'antenne GPS. C'est la position de cette antenne virtuelle que l'on risque alors de mesurer en lieu et place de la véritable antenne. Qui plus est, au fur et à mesure que le satellite se déplace sur son orbite, l'angle d'incidence sur le réflecteur change, et l'image se déplace d'autant. C'est donc finalement la position d'une antenne virtuelle mobile que l'on mesure. Au niveau du matériel, l'utilisation d' "anneaux concentriques" métalliques autour de l'antenne permet de limiter les réflexions venant d'en dessous de l'antenne en récupérant un maximum de signal provenant du satellite (voir figure 5). Au niveau



Antenne "Choke-Ring"

FIGURE 5 – Anneaux concentriques disposés autour de l'antenne pour limiter les multitrajets. Source : http://www.precision-topo.com/images/GPS%20Basics_fr_img_40.jpg

de l'analyse, le remède le plus simple en traitement statique est de mesurer pendant au moins une voire deux périodes de révolution (~12h ou ~24h) et moyenner la position, en espérant que l'ensemble des multitrajets s'annulent. Il est impossible d'utiliser cette méthode en cinématique (car on ne moyenne pas). On peut alors appliquer un filtre sidéral, un filtre Vondrak ou encore

utiliser le rapport signal/bruit (Ragheb et al, 2006) pour éliminer cette source de bruit.

TRACK ne fait rien pour éliminer les multitrajets. Sur une période de 1h, on sera capable de les identifier car ils peuvent provoquer une variation de l'ordre de quelques centimètres sur une ligne de base fixe. Les observations (éventuelles) des multitrajets sont présentées dans la partie 4.2.2).

2.3.6 Position du centre de phase et hauteur des antennes GPS

Premièrement, le coeur d'une antenne GPS est constitué d'une spire de fils conducteurs (un solénoïde) qui a pour mission de convertir l'onde électromagnétique en signal électrique. C'est la position du point même où la conversion se fait, que l'on nomme centre de phase de l'antenne, qui est donc mesurée. Malheureusement, ce point n'est pas matériellement défini, c'est un point "virtuel" dont la position dépend de l'incidence de l'onde par rapport au solénoïde, c'est à dire par rapport à l'antenne elle même. Le centre de phase, et donc la position mesurée de l'antenne, peut ainsi se déplacer de plusieurs centimètres, en fonction de l'élévation et de l'azimuth des satellites que l'on reçoit. Là encore, l'erreur de positionnement sera d'autant plus faible que les décalages introduits se compenseront en moyenne grâce à la bonne répartition spatiale des satellites. Néanmoins, les satellites ne couvrant que la demi-sphère supérieure, un décalage systématique de l'altitude de la station est inévitable. En pratique, on résout la difficulté en utilisant si possible des antennes identiques, orientées dans la même direction, ce qui annule le décalage de centre de phase entre les deux stations, soit en modélisant ce décalage grâce aux tables publiées pour les types d'antennes les plus répandues.

Deuxièmement, mal renseigner une hauteur d'antenne est aussi une source d'erreur. En effet, en se basant sur la figure 6, on se rend bien compte que la hauteur d'antenne a une influence directe sur la composante verticale d'une ligne de base. Il est donc important de vérifier ce paramètre.

La position du centre de phase et la hauteur des antennes sont deux paramètres que l'on peut rentrer dans le programme TRACK. Ainsi, ces deux sources d'erreurs peuvent être éliminées.

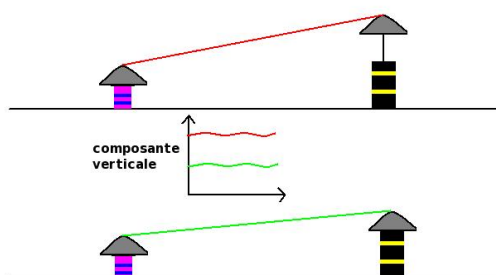


FIGURE 6 – Influence de la hauteur d'antenne sur la composante verticale d'une ligne de base

3 Acquisition des données GPS haute fréquence

3.1 Dispositif expérimental : banc de test

Le principe du banc de test consiste en une plaque mobile positionnée sur un support fixe (fléchée en rose sur la figure 7). Cette plaque peut être mise en mouvement grâce à une bielle. La bielle peut être actionnée soit par une manivelle, soit par un moteur. Ce dernier permet d'avoir des acquisitions haute fréquence supérieures à 1Hz et plus régulières. Le mouvement de la plaque peut être horizontal et/ou vertical. Sur cette plaque sont installés une antenne GPS reliée à un récepteur (fléchés en rouge sur la figure 7) et un capteur accélérométrique (fléché en bleu sur la figure 7) afin d'acquérir simultanément des données géodésiques et sismologiques. On peut contrôler le mouvement de la plaque à l'aide d'un capteur de position fixé à la plaque (fléché en vert sur la figure 7). Les données acquises par le capteur de position serviront de référence lors de la superposition avec les données GPS et sismologiques.

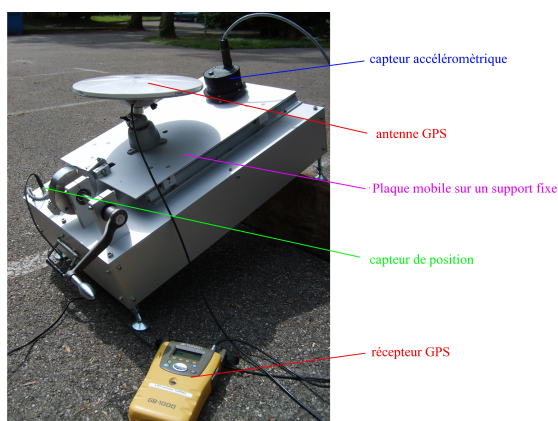


FIGURE 7 – Dispositif expérimental : Banc de test, dispositif GPS, capteur accélérométrique et capteur de position

3.2 Stations de référence

Le positionnement relatif nécessite d'inclure dans l'analyse des données GPS de stations stables dont les coordonnées sont connues et dont il est possible d'avoir des données haute fréquence. Acquérir des données 1Hz reste encore un problème pour certaines stations qui ne disposent pas d'un moyen de télémétrie haut-débit. En effet, pour 1,5Mo par jour de données toutes les 30s, téléchargées en 20mn, on passe à 45Mo par jours de données à télécharger en 15h (pour un même débit). La plupart des stations du Réseau GPS Permanent (RGP) se trouvant sur le toit des immeubles, il est facile d'obtenir des données 1Hz de stations de ce réseau. En revanche, la plupart des stations du Réseau National GPS permanent (RENAG) sont situées dans la nature et il est par conséquent plus difficile d'installer un système de transfert de

données haut-débit. Seules quelques stations du réseau RENAG fournissent des données GPS 1Hz mais ce réseau fournit principalement des données GPS toutes les 30s pour le positionnement ultra-précis appliqué à la mesure de la déformation alpine.

Les adresses internet de ces deux bases de données sont indiquées dans les références Internet.

En ce qui concerne l'acquisition de données GPS 5Hz, elle nécessite un réglage sur place car aucune station GPS permanente n'est configurée actuellement pour obtenir des données toutes les 0,2s par défaut. De plus, la quantité de données obtenue nécessite un transfert immédiat et rapide pour ne pas saturer le disque dur du récepteur. Il est donc difficile actuellement d'obtenir des données GPS 5Hz. Dans notre cas, nous avons demandé l'intervention de personnes sur quelques stations le jour où nous avons mis en marche le dispositif expérimental.

La figure 8(a) montre le réseau des stations utilisées durant ce stage pour l'analyse des données GPS. Les stations en rouge sont les stations où nous avons pu récupérer des données 1Hz et en vert les stations où nous avons pu récupérer des données 5Hz. La figure 8(b) représente une station GPS permanente du réseau RENAG située à l'Alpe d'Huez, en Isère.



(a) Réseau des stations utilisées dans l'analyse des données GPS haute fréquence. (b) Station permanente à l'Alpe d'Huez, Isère.

FIGURE 8 – Stations de référence. Sources de l'image de gauche : Google Earth.

4 Analyse des données avec le programme TRACK

4.1 Du GPS classique au GPS haute fréquence

Les analyses GPS menées classiquement nous permettent de déterminer généralement une position optimale en cumulant des données enregistrées toutes les 30s sur 24h. Ce type d'analyse se fait par exemple avec un logiciel de traitement statique, GAMIT (developpé lui aussi par le MIT). Ainsi on arrive à obtenir des lignes de base d'une précision de quelques dixièmes de millimètres sur quelques années, tel que le montre la figure 9. Cette figure représente la ligne de base Chamrousse(CHAM)-Marseille(MARS) entre début 2007 et fin 2008. Une application

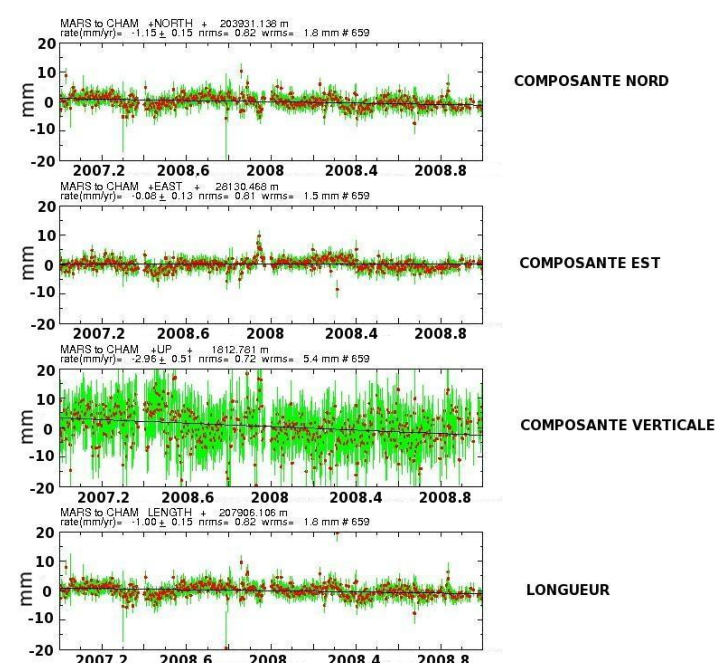


FIGURE 9 – Evolution des composantes Nord (en haut), Est (au milieu(1)), Verticale (au milieu(2)) et de la longueur (en bas) de la ligne de base Chamrousse(CHAM)-marseille(MARS), exprimées en mm, entre 2007 et 2008, obtenue avec le logiciel GAMIT. Le taux linéaire = la vitesse de déplacement = 0-3 mm/an pour N, E et U et $1,0 \pm 0.15$ mm/an pour la longueur L. *Source : adresse web du réseau RENAG : http://webrenag.unice.fr/cgis.php?Page=serie_temporelle.*

majeure de ces mesures GPS classiques est la mesure de la déformation tectonique (quelques mm/an).

Depuis quelques temps, des calculs sont faits cumulant des données sur des périodes de temps plus courtes afin d'étudier des phénomènes géophysiques plus rapides comme entre autres l'avancée des glaciers. La figure 10 montre une analyse faite toutes les 6h avec le logiciel GAMIT (graphique de gauche) d'une station qui se trouve sur le glacier d'Argentière (ARGG) dans le massif du Mont-Blanc (Haute-Savoie, France). Déterminer une position toutes les 6h est adapté car le glacier avance à une vitesse linéaire de l'ordre de 13cm par jour en haut du glacier, en

été. Le graphique de droite correspond à une analyse faite avec le logiciel TRACK. Ce dernier a calculé une position toutes les secondes. On se rend compte que notre analyse TRACK n'est pas encore adapté pour ce type d'analyse car les variations entre chaque époque d'observation sont encore bien trop grandes par rapport aux variations trouvées avec GAMIT.

Finalement, lorsqu'on s'intéresse à des sessions plus courtes et qu'on essaie de calculer

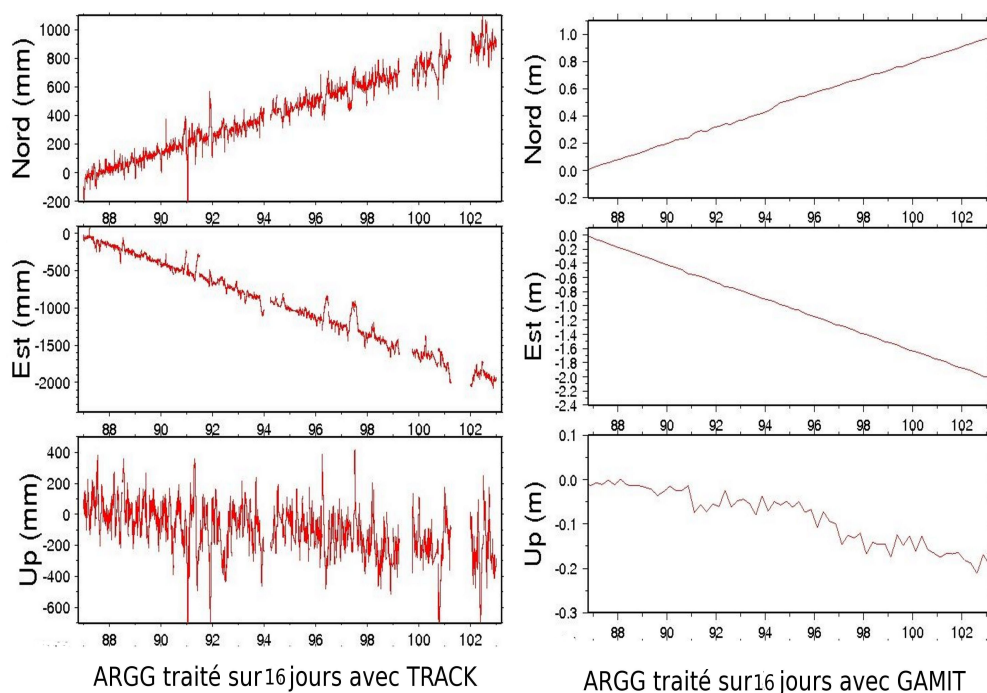


FIGURE 10 – Analyse de l'avancée du glacier d'Argentière (Haute-Savoie, France) avec le logiciel GAMIT (à droite) et TRACK (à gauche), sur une période de 16 jours.

une position d'une station par rapport à une autre station fixe, toutes les heures, avec le logiciel GAMIT (croix bleues sur la figure 11), les variations obtenues sont supérieures à celles obtenues avec le logiciel TRACK qui lui calcule une position toutes les secondes (courbe rouge sur la figure 11). Le problème vient de l'algorithme mathématique utilisé dans chacun des programmes pour résoudre les ambiguïtés : TRACK se sert des mesures faites à l'époque $i-1$ pour calculer une position à l'époque i pour assurer une certaine continuité des mesures au cours du temps. En revanche, les calculs fait avec GAMIT sont totalement indépendants les un des autres. Ainsi, la mesure d'une position calculée à l'époque $i+1$ n'a aucun lien avec celle calculée à l'époque i . Sur des périodes de 24h, cette indépendance de données n'a pas d'influence sur la position d'une station car les erreurs limitant la précision des données sont moyennées sur 24h. Par contre, sur des périodes de 3h, les sources d'erreurs comme, entre autres, les multitrajets ou la géométrie des satellites sont trop importantes pour que d'une session à l'autre la moyenne soit la même. On se retrouve ainsi avec une variation de la position d'une station de l'ordre de 2cm

pour la latitude, 12cm pour la longitude et 60cm pour la hauteur tandis qu'avec notre analyse on trouve une variation de l'ordre de 2cm pour la latitude et la longitude et de l'ordre de 5cm pour la hauteur. Le choix du traitement, statique (GAMIT) ou cinématique (TRACK), et le choix

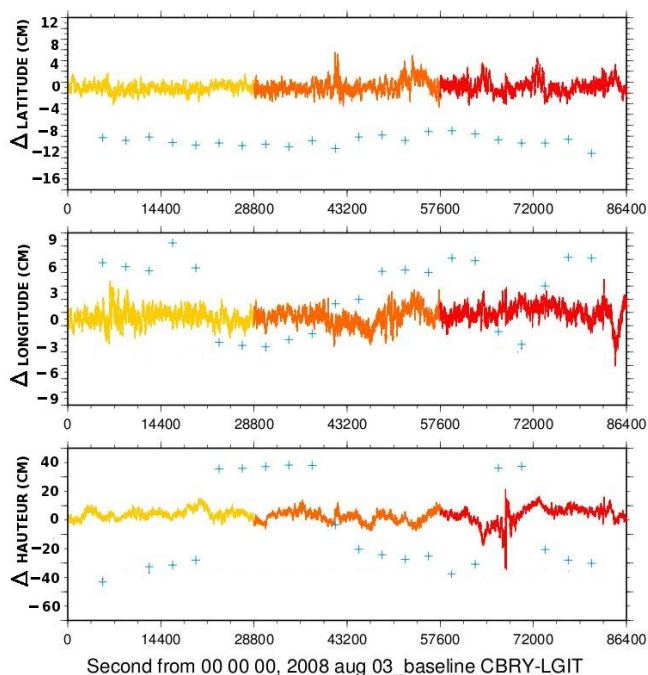


FIGURE 11 – Comparaison du traitement des données avec GAMIT (croix bleu) par rapport à un traitement TRACK (en traits continus orange) sur une période de 1 jour. La partie haute représente la variation de latitude en cm, la partie du milieu la variation de longitude en cm et la partie du bas la variation d'hauteur en m. La latitude, longitude et hauteur sont celles de la station CBRY par rapport à LGIT qui est fixée.

des fréquences utilisées, 30s ou 1s par exemple, dépend de « l'objet » étudié. Les deux choix dépendent de la durée de la mesure et de la précision que l'on cherche à obtenir.

4.2 Analyse des paramètres à travers différentes échelles de temps

L'analyse des données GPS avec TRACK n'est pas simple car de nombreux paramètres rentrent en jeu. Afin de pouvoir analyser l'influence des différents paramètres sur les données, nous avons choisi de les tester sur une ligne de base entre deux stations fixes du réseau RGP ou RENAG. En effet, le résultat attendu pour une ligne de base entre deux stations fixes est qu'il n'y ait aucune variation de celle-ci au cours du temps. Les données utilisées sont des données 1Hz.

Il est important de garder en tête que l'on souhaite étudier une période de temps relativement courte (de l'ordre de la centaine de secondes) afin de comparer les données GPS avec les données sismologiques acquises lors de l'expérience du banc de test (simulation du mouvement du sol d'une soixantaine de secondes). Or, pour ce faire, il est nécessaire de « dezoomer » dans

l'échelle de temps pour bien comprendre ce qu'il se passe dans l'heure ou dans la journée de l'enregistrement. En effet, les sources d'erreur pouvant limiter la précision du calcul d'une ligne de base (voir partie 2.3) sont perceptibles à des échelles de temps différentes. Par exemple, la disparition ou l'apparition d'un satellite peut provoquer une mauvaise résolution des ambiguïtés pendant plus de deux heures tandis qu'un multitrajet peut modifier une ligne de base sur une vingtaine de minutes environ.

À des échelles de temps de 24h, de 1h et de 1mn, nous allons voir comment observer et traiter au mieux ces sources d'erreur.

4.2.1 Échelle de temps 24h

- *Apparition/Disparition des satellites*

La figure 12 représente trois lignes de base sur une période de 24h le 5 août 2008. En bleu est représentée la ligne de base LGIT-CBRY, en jaune la ligne de base LGIT-ESAB et en rouge la ligne de base CBRY-ESAB. (Pour connaître la localisation des stations, se référer à la figure 8). Les trois parties du graphique représentent la composante Nord (en haut), Est (au milieu) et Verticale (en bas) des lignes de base. Afin de montrer que l'apparition ou la disparition de

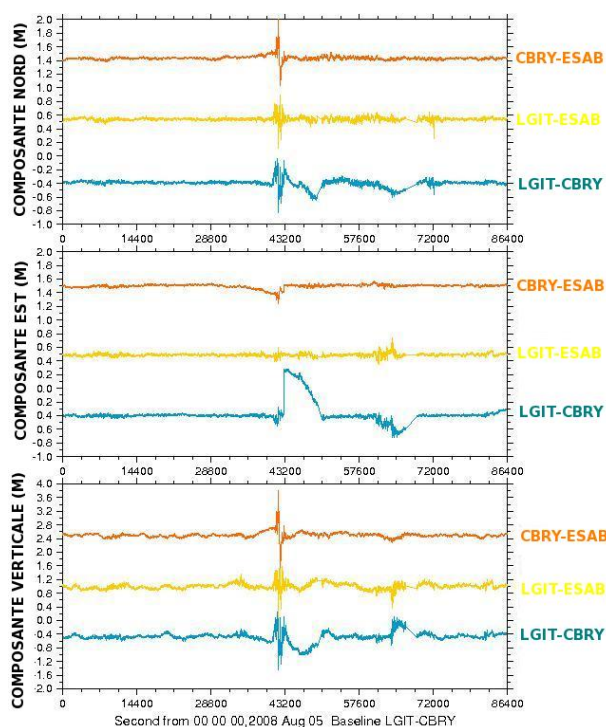


FIGURE 12 – Influence de la disparition ou l'apparition de satellites sur le calcul d'une ligne de base sur une période de 24h. Les trois parties représentent les composantes Nord (en haut), Est (au milieu) et Verticale (en bas), exprimées en mètre, de trois lignes de bases différentes : LGIT-CBRY (en bleu), LGIT-(ESAB) en jaune et CBRY-ESAB (en rouge).

satellites pouvaient influencer la résolution des ambiguïtés et par conséquent le calcul d'une

ligne de base, nous avons cherché à comparer les trois lignes de bases citées au dessus pour exclure la possibilité d'une défaillance d'une des trois stations. On se rend compte qu'il y a un saut dans les données entre 39600s et 50400s sur les trois lignes de base. L'amplitude de ce saut est de l'ordre de +/-20 cm pour la composante Nord et Est, et de +/- 50cm pour la composante verticale. Sachant que lorsque l'on se trompe d'une ambiguïté N dans les calculs, cela provoque une variation minimale entre 19cm et 24cm sur la distance station-satellite (voir Annexe A, signal émis par les satellites), ces variations sont vraisemblablement liées à l'apparition ou la disparition de satellite. On rappelle qu'une interruption du signal peut provoquer un saut de cycle, c'est-à-dire un changement de la valeur pour l'ambiguïté qui se traduit par des positions aberrantes à partir de l'époque de l'interruption. Au début de chaque nouvelle mesure d'ambiguïté, TRACK met un certain temps à retrouver N, il est effectivement nécessaire de traiter plus qu'une heure de données avant l'époque intéressante, ce qui n'est pas possible pour un satellite qui vient d'apparaître.

Malheureusement, il est difficile de s'affranchir de ces sauts de cycle et il n'y a actuellement aucune stratégie d'analyse pour les éviter.

4.2.2 Échelle de temps 1h

- *variations atmosphériques*

Comme nous l'avons expliqué dans la partie 2.3.2, TRACK calcule le délai troposphérique à chaque époque d'enregistrement. Il est alors possible de contraindre la variation de ce délai (paramètre atmosphérique *atm_stats*) en imposant une variation maximale entre deux époques. Ainsi, si on connaît les variations troposphériques attendues sur une période donnée, on est capable d'estimer un délai réaliste. La figure 13 représente l'influence de la variation atmosphérique sur les composantes de la ligne de base LGIT-CBRY (~40km) en fonction des contraintes imposées. L'échelle de temps est ici 1h, le 3 août 2008. Le graphique de gauche montre l'évolution du délai atmosphérique (en mm) dépendamment de la contrainte imposée : 0,01m/s (courbe jaune), 0,001m/s (courbe orange), 0.0001m/s (courbe rouge) et 0.00005m/s (courbe bleue). Les variations attendues sur une période de 60s sont de l'ordre du cm. Donc on s'attend à ce que le délai atmosphérique ne varie pas plus que 0.00015m par seconde, soit ce qui est montré par la courbe rouge. Si on regarde le graphique de droite qui représente les composantes Nord (en haut), Est (au milieu) et Verticale (en bas) de la ligne de base LGIT-CBRY, on se rend compte que les courbes rouge et bleue sont plus proches des résultats attendus que les courbes jaune et orange (on rappelle que la ligne de base doit être stable au cours du temps). Donc mal contraindre le délai atmosphérique a une influence directe sur la stabilité de la ligne de base. En revanche, trop contraindre le délai atmosphérique n'a aucune influence sur les mesures mais

on s'écarte alors des variations attendues sur 60s. De plus, si on regarde les 3 composantes séparément, on se rend compte que contraindre le délai atmosphérique a une influence plus marquée sur la composante verticale. Ces résultats sont en accord avec la théorie expliquée dans la partie 2.3.2.

Finalement, pas assez contraindre le paramètre atmosphérique (prenons l'exemple de 0.01m/s représenté par la courbe jaune) crée une variation sur la composante verticale de l'ordre de 20cm sur une période de temps de 20mn (entre 3000s et 3600s).

- *multitrajets*

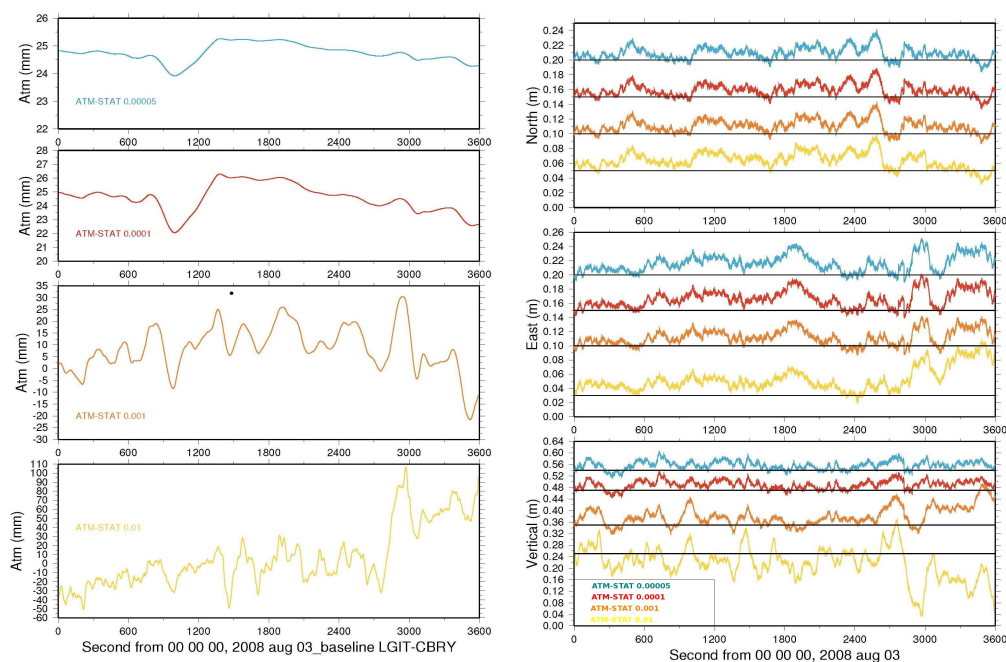


FIGURE 13 – Influence de la variation atmosphérique sur les composantes de la ligne de base LGIT-CBRY en fonction des contraintes imposées, sur une période de 1h

Lorsque la variation atmosphérique est bien contrainte (courbe rouge de la figure 13), on peut observer des variations dans la mesure de la ligne de base qui sont dues à des multitrajets. En effet, si on regarde entre 2850s et 3150s, on observe une variation de la composante Est de l'ordre de 4cm. On retrouve cette variation sur les deux autres composantes mais à des amplitudes moindres. Si on s'intéresse à la figure 14 qui représente différentes lignes de base (LGIT-stationX où station X représente une station de référence plus ou moins loin), on observe toujours cette variation entre 2850s et 3150s. Cette variations ne peut pas être due à l'erreur atmosphérique. La solution la plus plausible est qu'à cet instant de la journée, un ou plusieurs satellites sont perturbés par un objet dans lequel l'onde électromagnétique va se réfléchir avant de toucher l'antenne. On remarque que la période de temps pour laquelle la ligne de base est faussée est de l'ordre de quelques minutes, cette variation n'est donc pas perceptible sur une

échelle de temps de l'ordre du jour.

- *niveau de bruit*

La figure 14 montre l'influence de la distance de la station de référence sur la précision de la ligne de base. On se base sur une période de 1h, le 3 août 2008. Les lignes de bases, de la plus courte à la plus longue, sont les suivantes : LGIT-STEY (2km, courbe jaune), LGIT-CBRY (40km, courbe orange), LGIT-GLRA (100km, courbe rouge), LGIT-MARG (115km, courbe bleue foncée) et LGIT-MARS (215km, courbe bleue claire). Pour connaître la localisation des stations, se référer à la figure 8. On remarque que quelle que soit la longueur de la ligne de base, le niveau de bruit reste le même. La distance de la station de référence n'a donc aucune influence sur la variation de la ligne de base au cours du temps. Cependant, on retrouve un léger offset sur la composante verticale de la ligne de base LGIT-MARS (courbe bleue claire). Cet offset peut provenir du fait qu'à de très longues distances (ici 215km), l'atmosphère varie plus qu'à de courtes distances et qu'il faut dans ce cas contraindre différemment le délai atmosphérique. Ici nous avons contraint le délai atmosphérique des différentes lignes de base de la même valeur (0.0001m/s).

Le fait que le niveau de bruit reste le même, quelle que soit la ligne de base, est encourageant pour le traitement des données géodésiques du banc de test. En effet, si un séisme a lieu au niveau de la station mobile, l'analyse des données ne sera pas faussée si on choisit une station de référence assez loin pour qu'elle reste stable dans la minute qui suit le séisme (les ondes de surface, d'amplitudes relativement grandes, mettent environ 1mn pour traverser 200km). Il est donc préférable de choisir une ligne de base relativement grande pour la mesure d'un déplacement co-sismique.

4.2.3 Échelle de temps 1mn

Maintenant que toutes les sources d'erreur ont été traitées pour minimiser les variations d'une ligne de base fixe, il est intéressant de connaître la précision des mesures GPS sur une durée d'une soixantaine de seconde. Connaître cette précision est nécessaire pour l'exploitation des données géodésiques du banc de test.

La figure 15 représente la ligne de base LGIT-CBRY (~40km) en bleu et LGIT-MARS (~215km) en orange, sur une période de 60 secondes, le 3 août 2008. En se basant sur la variabilité totale de la ligne de base, nous atteignons les précisions suivantes pour les deux lignes de bases :

- de l'ordre de 10mm sur la composante Nord (partie en haut) pour les deux lignes de bases ;
- de l'ordre de 12mm sur la composante Est (partie au milieu) pour les deux lignes de bases ;
- de l'ordre de 8mm sur la composante Verticale (partie en bas) pour les deux lignes de bases ;

La distance de la station de référence n'a donc aucune influence sur la précision des mesures

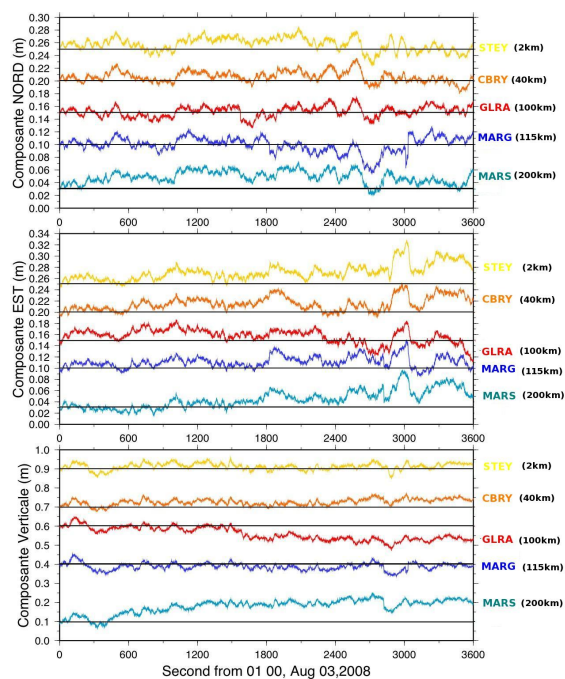


FIGURE 14 – Influence de la distance de la station de référence sur la précision de la ligne de base, sur une période de 1h

sur une échelle de temps de l'ordre d'une soixantaine de secondes. Nous nous attendons donc

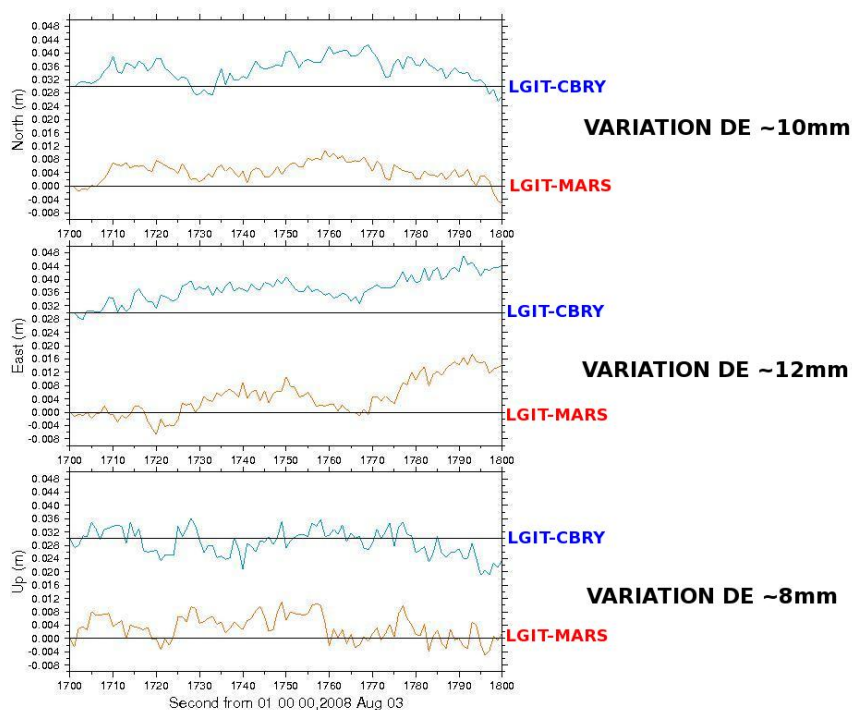


FIGURE 15 – Précision des calculs sur une période de 1mn

à obtenir ces ordres de grandeur en comparant les données GPS 5Hz et les données du capteur de position acquises lors de l'expérience du banc de test.

5 Comparaison des données acquises lors de l'expérience du banc de test

Nous venons de voir qu'il était possible d'atteindre une précision d'une dizaine de millimètres sur une durée d'une soixantaine de secondes d'une ligne de base entre deux stations fixes à des distances allant de quelques km à des centaines de km. Nous allons nous intéresser maintenant aux données géodésiques et sismologiques acquises lors de l'expérience du banc de test. Le principe consiste à traiter une ligne de base entre une station fixe (station de référence) et la station mobile posée sur la plaque en mouvement. Les données acquises sont des données 5Hz, on est donc capable d'obtenir une position toutes les 0,2 secondes.

Nous avons choisi de traiter deux lignes de base : tout d'abord la ligne de base BANC-Sophia Antipolis(SOPH), d'une longueur de 200km environ. La raison est la suivante : si un séisme a lieu au niveau de la station mobile, l'analyse des données ne sera pas faussée si on choisit une station de référence stable dans la minute qui suit le séisme. La vitesse de propagation des ondes de surface varient entre 3,5 et 4,5 km/s dans la croûte terrestre. Ainsi les ondes de surfaces mettrons environ une minute pour traverser 200km. Donc 200km semble être une distance approprié (une distance plus grande serait encore meilleure mais nous n'avons pas acquis de données GPS 5Hz à une station plus loin que Sophia-Antipolis). En choisissant également la ligne de base BANC-St Eynard(STEY), d'une longueur de 2 kilomètres environ, nous allons pouvoir comparer les effets de la longueur de la ligne de base sur la précision des mesures.

Pour le mouvement du banc, nous avons réalisé trois essais qui se différencient par la fréquence du mouvement : pour le premier essai nous avons effectué un mouvement de grande période, de l'ordre de 30s. Pour le deuxième essai le mouvement était de moyenne période, de l'ordre de 5s-6s. Pour le troisième essai, nous avons choisi un mouvement de petite fréquence, de l'ordre de 2s.

Tous les signaux acquis lors de l'expérience doivent être au préalable traités avant de comparer les trois types de données (données du GPS, du capteur de position et du capteur accélérométrique).

5.1 Traitement des signaux

5.1.1 Fenêtre d'acquisition, calage en temps et orientation du banc de test

Nous avons enregistré des mesures sur une période de quelques heures, tandis que nous avons mis la plaque en mouvement sur une période de quelques minutes tout au plus. Il faut donc sélectionner au préalable la fenêtre temporelle de l'acquisition avant d'effectuer un autre traitement. De plus, seule l'horloge du GPS est correctement synchronisée avec l'heure GMT

(Greenwich Mean Time). Il est donc nécessaire de recalculer les données de capteur de position et les données accélérométriques sur les données GPS. Une manière très précise de superposer les courbes est de faire une corrélation des deux signaux par rapport au signal GPS car la corrélation nous renseigne sur le décalage entre les deux courbes.

En effet, soient deux fonctions $S_a(t)$ et $S_b(t)=S_a(t-t_0)$ où t_0 est le décalage en temps entre les fonctions. La corrélation entre les deux diracs est donnée par :

$$\Gamma_{S_a S_b}(\tau) = \int S_b(t)S_a(t - \tau)dt = \int S_a(t - t_0)S_a(t - \tau)dt = \Gamma_{S_a S_a}(\tau - t_0) \quad (7)$$

Donc la position du maximum de $\Gamma_{S_a S_a}$ nous donne le retard t_0 de S_b par rapport à S_a .

Par ailleurs, le banc de test a été orienté vers le Nord magnétique à l'aide d'une boussole tandis que le capteur de position et le capteur accélérométriques sont orientés par rapport à la table. Comme le Nord géographique n'est pas le même que le Nord magnétique et que TRACK nous fournit les composantes "Nord géographique" et "Est géographique" des données GPS, il faut alors faire une somme vectorielle des deux composantes pour pouvoir comparer le "vecteur GPS" avec les données du capteur de position et les données accélérométriques.

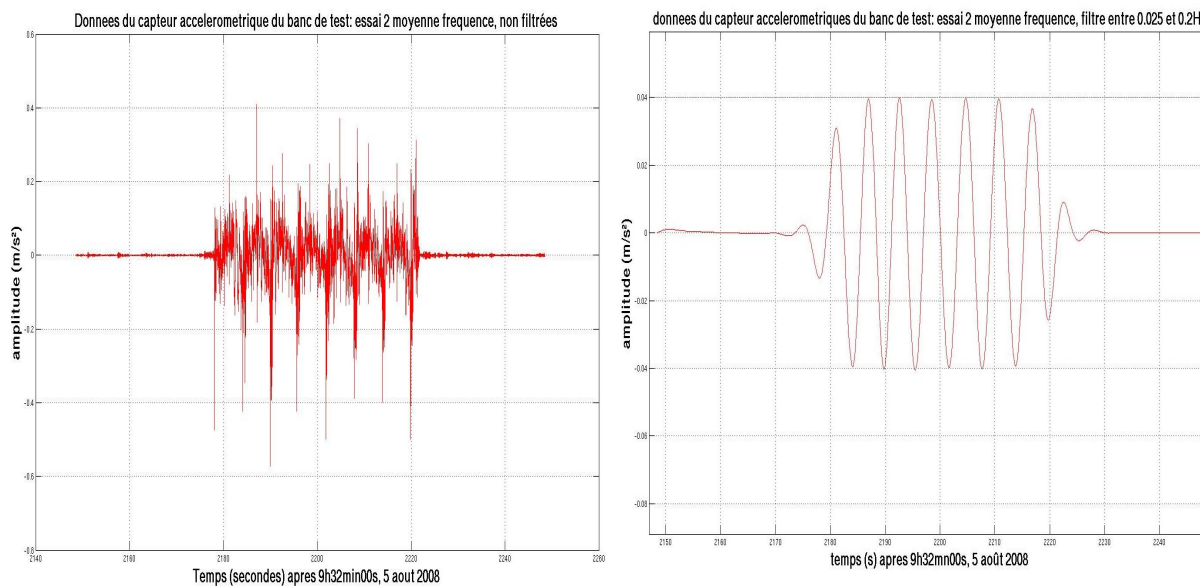
5.1.2 Filtrage

Il est nécessaire d'établir un filtrage des données sismologiques du banc de test, car celles-ci sont bruitées et non calées sur zero. Il est donc important d'enlever la moyenne, d'enlever la tendance et de filtrer dans la gamme de fréquence qui nous intéresse.

Ces trois étapes réalisées sur les données sismologiques doivent être également appliquées sur les données du capteur de position et les données GPS car la comparaison des trois types de données ne peut se faire que sur des données ayant subies le même traitement.

Le filtre utilisé est un filtre passe bande. Afin de sélectionner la bande de fréquence, il est nécessaire d'effectuer la transformée de Fourier du signal accélérométrique pour déterminer la bande de fréquence pour laquelle l'amplitude est la plus importante. Ainsi, pour le premier essai on trouve une bande de fréquence comprise entre 0.02Hz et 0.08Hz, pour le deuxième essai une bande de fréquence entre 0.025Hz et 0.2Hz, et pour le troisième essai une bande de fréquence entre 1.0Hz et 1,5Hz.

La figure 16 montre la comparaison entre le signal accélérométrique non filtré (figure 16(a)) et le signal filtré dans la bande de fréquence 0.025-0.2Hz (figure 16(b)) du deuxième essai réalisé en moyenne fréquence.



(a) Signal accélérométrique non filtré

(b) Signal filtré entre 0.025 et 0.2Hz

FIGURE 16 – Comparaison du signal accélérométrique avant et après filtrage de l'essai 2 du banc test à moyenne fréquence.

5.1.3 Dérivation et intégration

L'objectif est de comparer les déplacements mesurés par le capteur de position et le GPS. Il faut donc intégrer deux fois les données accélérométriques. Nous avons la fonction "cumtrapz" sous MATLAB qui calcule une approximation de l'intégrale cumulative d'une fonction à partir de la méthode des trapèzes.

Nous avons par ailleurs cherché à comparer l'accélération des 3 mesures. Il faut pour cela dériver deux fois les données du capteur de position ainsi que les données GPS. Nous avons utilisé la fonction "fourdiff" sous MATLAB, basée sur le processus de différenciation de Fourier (utilisation de la Transformée de Fourier pour dériver la fonction).

5.2 Superposition des mesures

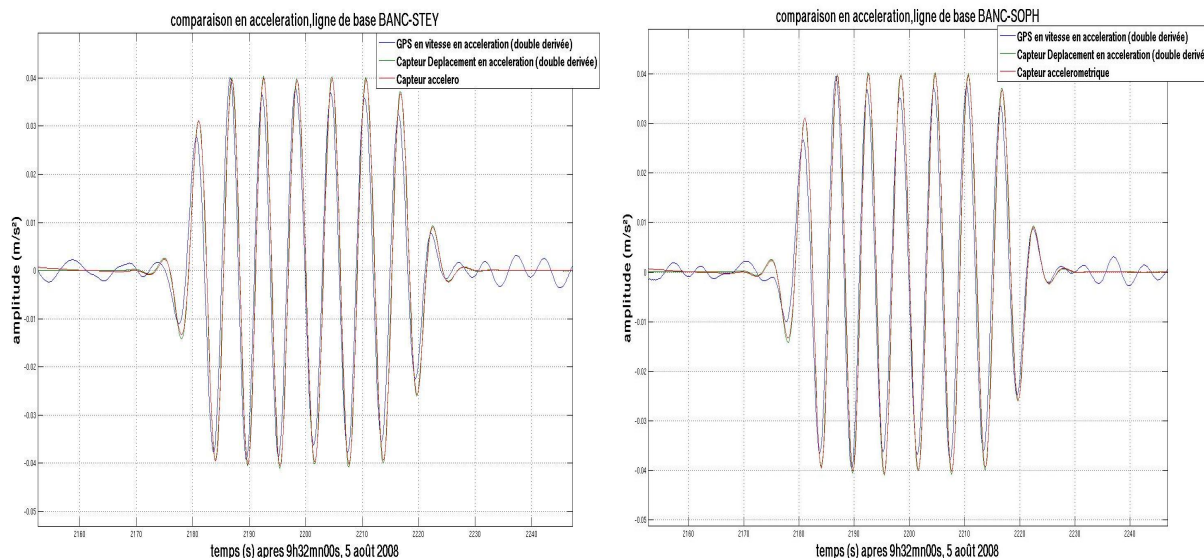
Nous avons choisi dans un premier temps de superposer les mesures du deuxième essai, correspondant à une fréquence du mouvement de l'ordre de 5.5s environ (le pic maximal de la Transformée de Fourier du signal est à une fréquence égale à $\approx 0.18\text{Hz}$).

5.2.1 Accélération

La figure 17 représente la superposition des accélérations (double dérivée des mesures du capteur de position et des données GPS et données accélérométriques) de l'essai moyenne fréquence, sur deux lignes de base différente : BANC-STEY (figure 17(a)) et BANC-SOPH (figure

17(b)).

Nous avons choisi dans un premier temps de superposer les mesures d'accélération car nous



(a) Ligne de base BANC-STEY

(b) Ligne de base BANC-SOPH

FIGURE 17 – Comparaison des accélérations obtenues à partir des trois types de données : données GPS en bleu, données du capteur de position en vert et données du capteur accélérométrique en rouge ;visualisation de deux ligne de bases différentes (BANC-STEY et BANC-SOPH)

perdons moins d'informations lorsque nous effectuons une dérivée par rapport à l'intégration où une constante d'intégration intervient.

Premièrement, nous remarquons qu'il n'y a aucune différence entre la courte (LGIT STEY) et la longue ligne de base (LGIT-SOPH). La distance de la station de référence n'a donc aucune influence sur les mesures d'accélération.

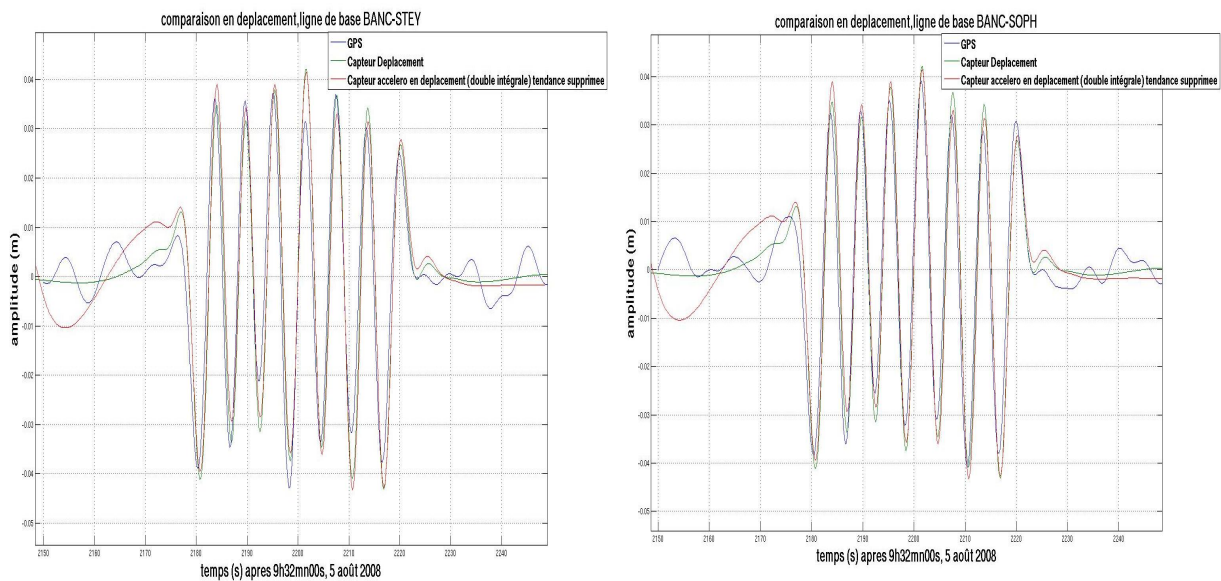
Deuxièmement, on peut observer que les mesures d'accélération du capteur de position et les mesures du capteur accélérométriques se superposent parfaitement tandis qu'il y a un léger déphasage des mesures d'accélérations des données GPS. Ce déphasage est un artefact dû à la décimation des données du capteur de position et des données accélérométriques. En effet, nous avons choisi d'avoir les 3 types de signaux avec une même fréquence d'échantillonnage pour que le filtre et les fonctions d'intégration/dérivation aient le même effet sur les signaux. Nous nous sommes donc rapporté à la fréquence d'échantillonnage des données GPS, soit 5Hz. On passe donc de 2500Hz à 5Hz (soit 1 point sur 500) pour le capteur de position et de 125Hz à 5Hz (soit 1 point sur 25) pour le capteur accélérométrique. De plus, aucune des mesures est synchronisée avec une autre. Bien que nous pouvons les caller en temps en effectuant une corrélation (voir partie 5.1.1), il y a quand même une source d'erreur qui peut créer ce déphasage lors de la décimation.

Finalement, en observant les pics d'amplitude, on observe une variation des mesures d'accélération des données GPS entre 3 et 5mm/s² sur une accélération totale de 4cm/s² (ce qui représente une imprécision des mesures d'accélération des données GPS de l'ordre de 5%) par rapport aux mesures du capteur de position et des données accélérométriques qui elles se superposent à 0.3mm près (ce qui représente une imprécision des données accélérométriques de l'ordre de 0,3%). Il serait intéressant d'acquérir des données GPS avec une fréquence similaire à celle de l'accéléromètre pour regarder si on arrive à atteindre la même précision de 0,3%.

5.2.2 Déplacement

La figure 18 représente la superposition des déplacements (double intégration des mesures du capteur accélérométrique, les mesures du capteur de position et les mesures du GPS) de l'essai moyenne fréquence, sur deux lignes de base différente : BANC-STEY (figure 18(a)) et BANC-SOPH (figure 18(b)).

Premièrement, nous remarquons qu'il n'y a qu'une légère différence concernant les mesures



(a) Ligne de base BANC-STEY

(b) Ligne de base BANC-SOPH

FIGURE 18 – Comparaison des déplacements obtenus à partir des trois types de données : données GPS en bleu, données du capteur de position en vert et données du capteur accélérométrique en rouge ; visualisation de deux lignes de bases différentes (BANC-STEY et BANC-SOPH)

GPS entre la courte (BANC-STEY) et la longue ligne de base (BANC-SOPH). En effet, l'amplitude de la ligne de base BANC-SOPH a une meilleure précision (en comparaison avec le capteur de position) que l'amplitude de la ligne de base BANC-STEY. Ce résultat nous conforte dans l'idée qu'il est possible de choisir une longue ligne de base pour que la station de référence soit stable lors du passage d'un train d'onde à la station mobile.

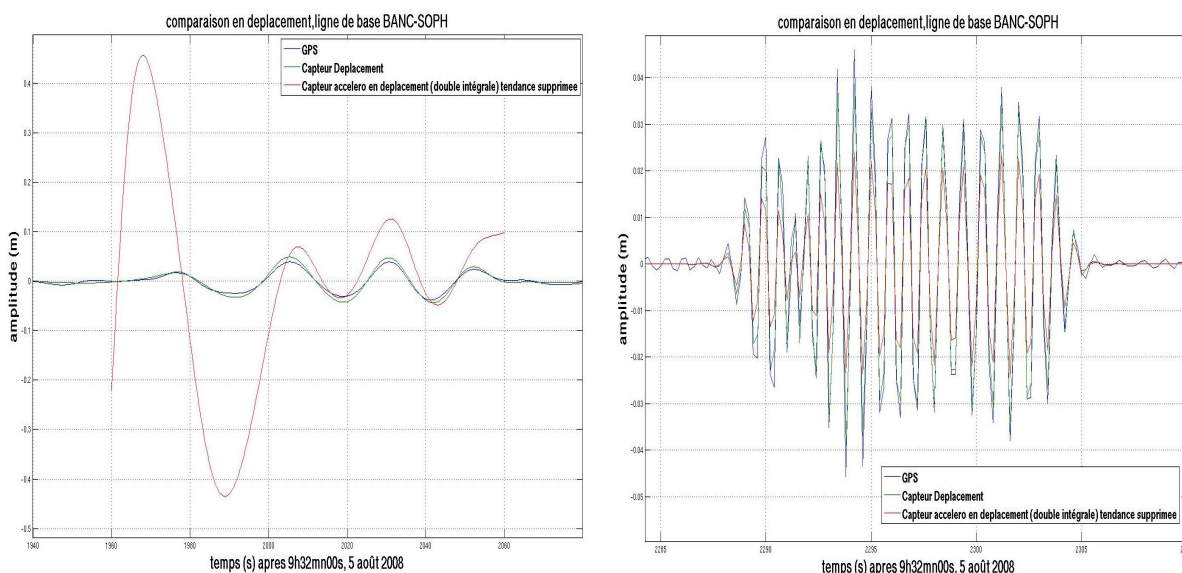
On observe également le déphasage entre les données GPS et les données du capteur de position et les mesures de déplacement des données accélérométriques. Comme nous l'avons expliqué dans la partie précédente, ce déphasage est dû à la décimation des données.

Finalement, en analysant les pics d'amplitudes, on observe une variation des mesures GPS entre 2 et 4mm sur un déplacement total de 9,5cm (ce qui représente une imprécision des données GPS de l'ordre de 3%) par rapport aux données du capteur de position, tandis que la variation des mesures de déplacement des données accélérométriques est entre 3 et 5mm (ce qui représente une imprécision des mesures de déplacement des données accélérométriques de l'ordre de 4%) par rapport aux données du capteur de position. Cette variation est liée à l'intégration des données accélérométriques car comme nous l'avons expliqué précédemment, intégrer un signal crée une perte d'information sur l'amplitude du signal à cause de l'apparition d'une constante d'intégration.

5.3 Précision des données GPS sur des basses et hautes fréquences

La figure 19 représente la superposition des déplacements de l'essai basse fréquence (figure 19(a)) et de l'essai haute fréquence (figure 19(b)) du mouvement du banc de test. Les mesures concernent la ligne de base BANC-SOPH.

En ce qui concerne les données basse fréquence, il est difficile d'obtenir un déplacement à



(a) Mouvement basse fréquence du banc de test

(b) Mouvement haute fréquence du bnc de test

FIGURE 19 – Déplacements obtenus à partir des trois types de données : données GPS en bleu, données du capteur de position en vert et données du capteur accélérométrique en rouge

partir des données accélérométriques parce qu'on se trouve dans la gamme de fréquence qui

correspond au bruit électronique de l'accéléromètre. Pour obtenir un signal exploitable, il faudrait soit générer un mouvement de plus grande amplitude, soit utiliser un sismomètre large bande. En effet, ce dernier possède un seuil de sensibilité plus élevé que le sismomètre utilisé pour l'expérience et peut ainsi enregistrer des basses fréquences sans être perturbé par le bruit électronique. En revanche, on remarque qu'il y a une bonne corrélation entre les données du capteur et les données GPS. On obtient une variation des données GPS de l'ordre de +/-10mm (par rapport aux données du capteur de position) sur un déplacement totale de 9,5cm (soit une imprécision des données GPS de l'ordre de 10%).

En ce qui concerne les données haute fréquence, on remarque que l'amplitude du déplacement obtenu après double intégration des données accélérométriques est plus faible que ce que l'on devrait obtenir (en comparant avec les données du capteur de position). Cette différence est peut-être liée au filtrage. Pour le vérifier, il serait intéressant d'effectuer des comparaisons sur les spectres d'amplitudes en filtrant les signaux moins sévèrement, voir pas du tout. Normalement nous aurions dû obtenir des raies très semblables aux fréquences principales des signaux générés.

En revanche, on remarque qu'il y a une bonne corrélation entre les données du capteur et les données GPS. On obtient une précision des données GPS de l'ordre de +/-2,5mm (par rapport aux données du capteur de position) sur un déplacement de 9,5cm (soit une imprécision des données GPS de l'ordre de 2,5%).

6 Conclusion

À partir de l'acquisition de données GPS obtenues à partir de stations GPS stables du réseau RGP et RENAG, nous avons testé l'analyse des données à l'aide du logiciel TRACK. Grâce à l'exploitation des paramètres de ce programmes, nous avons pu minimiser les erreurs pouvant limiter la précision des mesures GPS cinématiques en nous plaçant à différentes échelles de temps car les sources d'erreur limitant la précision du calcul d'une ligne de base sont perceptibles à des périodes de temps différentes. Ainsi, nous avons pu atteindre une imprécision de l'ordre de 10mm sur une ligne de base entre deux stations stables séparées de 200km.

D'après les résultats obtenus en comparant les données géodésiques et sismologiques acquises lors de l'expérience du banc de test, nous avons montré qu'à partir de mesures GPS haute fréquence, nous pouvons reconstituer des mouvements du sol à différentes fréquences et d'une amplitude de 9,5cm, avec une imprécision de l'ordre de 3% de l'amplitude pour les moyennes et hautes fréquences et de l'ordre de 10% pour les basses fréquences.

Si on est capable de reconstituer le déplacement statique total occasionné par un séisme à l'aide d'une analyse de données GPS haute fréquence avec la même précision que le déplacement généré par le mouvement du banc de test, cette information serait un atout considérable pour les géologues et les sismologues. En effet, ils pourront améliorer la compréhension des mécanismes fondamentaux de la rupture sismique, améliorer les cartes de vulnérabilité des sites environnants ou encore améliorer la grille des magnitudes qui relie une magnitude d'un séisme aux dimensions de la faille ou encore à l'énergie libérée par le séisme.

De plus, il est important de noter que l'apport du GPS en sismologie est un point à ne pas négliger car contrairement aux accéléromètres qui saturent lorsque qu'un séisme génère de très grandes amplitudes, les mesures GPS, elles, ne présentent aucune saturation quelle que soit la magnitude du séisme. Une autre raison est que si un accéléromètre subit une rotation en plus d'une translation au cours du mouvement sismique, les données sont affectées par la rotation alors que la mesure GPS n'est pas affectée car elle se fait par rapport à un référentiel externe (les orbites des satellites). Nous serons même capable de déterminer le degré de rotation de la station sismique grâce à la comparaison des données GPS. Ainsi l'acquisition et l'analyse de ce type de données GPS haute fréquence ouvrent de nouvelles perspectives et de nouvelles collaborations entre sismologues et géodésiens.

Dans l'avenir, on pourrait apporter de nombreuses améliorations pour augmenter la précision des données GPS haute fréquence. Dans un premier temps, il serait intéressant d'améliorer l'analyse avec TRACK en utilisant un filtrage sidéral pour réduire les erreurs liées aux multi-trajets. Dans un deuxième temps, il serait intéressant d'améliorer la précision des mesures

acquises lors de l'expérience du banc de test en synchronisant l'horloge du GPS avec le capteur de position et le capteur accélérométrique en utilisant par exemple une carte d'acquisition. Grâce à cette carte d'acquisition, on pourrait visualiser simultanément les trois types de mesures en intégrant un GPS qui libère un pulse toutes les secondes. On éliminerait ainsi le problème de phase. Il serait par ailleurs intéressant d'améliorer le filtre ainsi que la fonction d'intégration pour minimiser les erreurs d'amplitudes entre le capteur accélérométrique et le capteur de position. Finalement, il y a plusieurs perspectives d'analyses :

- Actuellement, avec le banc de test nous mesurons un déplacement comparable à celui généré par la propagation des ondes d'un séisme d'une magnitude importante. Il serait alors intéressant d'analyser des mesures qui simulent un déplacement plus faible, ou encore d'analyser des mesures qui simulent un déplacement total statique post-sismique.
- L'analyse des données GPS va pouvoir être testée sur des cas réels. En effet, l'équipe "cycle sismique et déformation transitoire " du LGIT va mettre en place dans quelques semaines un réseau au Mexique qui regroupera des stations GPS haute fréquence et des sismomètres afin d'enregistrer un éventuel séisme de grande amplitude. De plus, des stations GPS haute fréquence sont en train d'être mises en place dans les Alpes, en utilisant un système Wifi des transferts de données.

Références

- [Bock et al,1997a] Y. BOCK, S. WDOWINSKI, P. FANG, J. ZHANG, S. WILLIAMS, H. JOHNSON, J. BEHR, J. GENRICH, J. DEAN, M. VAN DOMSELAAR, D. AGNEW, F. WYATT, K. STARK, B. ORAL, K. HUDNUT, R. KING, T. HERRING, S. DINARDO, W. YOUNG, D. JACKSON, W. GURTNER *Southern California Permanent GPS Geodetic Array : continuous measurments of regional crustal deformation between the 1992 Landers and 1994 Northridge earthquakes*. J. Geophys. Res, 102(B8),18,013-18,033,1997.
- [Bock et al,1997b] Y. BOCK, S. WDOWINSKI, P. FANG, J. ZHANG, S. WILLIAMS, H. JOHNSON, J. BEHR, J. GENRICH, H. CECIL, M. IDA *Southern California Permanent GPS Geodetic Array : errors analysis of daily position estimates and site velocities*. J. Geophys. Res, 102(B8),18,035-18,055,1997.
- [Bock et al,1997c] Y. BOCK, S. WDOWINSKI, P. FANG, J. ZHANG, J. GENRICH, H. CECIL, M. IDA *Southern California Permanent GPS Geodetic Array : Spatial filtering of daily positions for estimating coseismic and postseismic displacements induced by the 1992 landers earthquake*. J. Geophys. Res, 102(B8),18,057-18,070,1997.
- [Bock et al,2004] Y.BOCK, L.PRAWIRODIRDJO, T. I. MELBOURNE *Detection of arbitrarily large dynamic ground motions with a dense high-rate GPS network*. Geophys. Res., 31, L06604, doi :10.1029/2003GL019150, 2004.
- [Botton et al,1997] S.BOTTON,F.DUQUENNE,Y.EGELS,M.EVEN, P.WILLIS *GPS, localisation et navigation*. Lavoisier, 1997.
- [Brenot,2006] H. BRENOT *Potentiel de la mesure GPS Sol pour l'étude des pluies intenses méditerranéennes*. PhD,University Joseph Fourier, Grenoble (France), 2006.
- [Calais,1999] E. CALAIS *Continuous GPS measurements across the Western Alps, 1996-1998*.Geophys. J. Int., ,138,221-230,1999.
- [Choi et al,2004] K. CHOI, A.BILICH, K. M. LARSON, P. AXELRAD *Modified sideral filtering : implications for high-rate GPS positioning*. Geophys. Res., 31, L22608, doi :10.1029/2004GL021621, 2004.
- [Elosegui et al,2006] P. ELOSEGUI, J.L.DAVIS, D. OBERLANDER, R. BAENA, G. EKSTROM *Accuracy of high-rate GPS for seismology*. Geophys. Res., 33, L11308, doi :10.1029/2006GL026065, 2006.
- [Hofmann-Wellenhof et al,2001] B.HOFMANN-WELLENHOF,H.LICHTENEGGER,J.COLLINS *GPS, Theory and Praticce*. SpringerWienNewYork, 2001.
- [Ji et al,2004] C. JI, K. M.LARSON, Y. TAN, K. W. HUDNUT, K. CHOI *Slip history of the 2003 San Simeon earthquake constrained by combining 1Hz GPS, strong motion, and teleseismic data*. Geophys. Res., 31, L17608, doi :10.1029/2004GL020448, 2004.
- [King,2009] M. A. KING, *The GPS contribution to the error budget of surface elevations derived from airborne LIDAR*. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, vol.47, No.3, 2009.
- [Langbein et al,2004] J. LANGBEIN, Y.BOCK *High-rate real-time GPS network at Parkfield : Utility for detecting fault slip ans seismic displacements*. Geophys. Res., 31, L15S20, doi :10.1029/2003GL019408, 2004.

- [Larson et al,2003] K. M. LARSON, P.BODIN, J. GOMBERG *Using 1-Hz GPS data to measure deformations caused by the Denali fault earthquake*. Scienceexpress, 10.1126, science.1084531, 2003.
- [Larson et al,2007] K. M.. LARSON, A.BILICH, P. AXELRAD, R. *Improving the precision of high-rate GPS*. Geophys. Res., 112, B05422, doi :10.1029/2006JB004367, 2007.
- [Mattia et al,2008] M. MATTIA,M. PALANO, M. ALOISI V. BRUNO, Y. BOCK *High rate GPS data on active volcanoes : an application to the 2005-2006 Mt Augustine (Alaska, USA) eruption*. Terra Nova, vol.20, p.134-140,doi :10.1111/j.1365-3121.2008.00798.x, 2008.
- [Miyasaki et al,2004] S. MIYASAKI, K. M.LARSON, K. CHOI *Modeling the rupture process of the 2003 September 25 Tokachi-Oki (Hokkaido) earthquake using 1Hz GPS data*. Geophys. Res., 31, L21603, doi :10.1029/2004GL021457, 2004.
- [Ragheb et al,2006] A.E. RAGHEB, P.J. CLARKE, S.J. EDWARDS *GPS sidereal filtering : coordinate- and carrier- phase-level strategies*. J Geod 81 :325-335,DOI 10.1007/s00190-006-0113-1, 2006.

Références internet

- Application du GPS dans le domaine des Sciences de la Terre :
<http://www.geologie.ens.fr/~vigny/articles/gps-f.html> (Site visité en Juin 2009).
- Les réseaux GPS permanents : De nouveaux outils de mesure géophysique
<http://kreiz.unice.fr/regal/ARTICLES/GeometresWeb.htm> (Site visité en Juin 2009)
- Survol du système de positionnement GPS, site Internet de R. Santerre :
http://www.scg.ulaval.ca/gps-rs/fr/cadre_fr.htm (site visité en Juin 2009)
- Les composantes du système GPS :
<http://reperageterrestre.free.fr/elements.html> (site visité en Juin 2009)
- Les signaux GPS :
http://h0.web.u-psud.fr/gpstar/index2.php?page=signaux_recept (site visité en Juin 2009)
- Banque de données GPS du Réseau GPS Permanent (RGP) français :
<http://rgp.ign.fr/> (visité en 2009)
- Banque de données GPS du Réseau National GPS permanent (RENAG) français :
<http://webrenag.unice.fr/> (visité en 2009)
- Site du GMT (Global Mapping Tool) :
<http://gmt.soest.hawaii.edu/> (visitée en 2009)

Annexe A : Principe de la mesure GPS

Historique

Le GPS est à l'origine un système de navigation par satellite mis en place par le Département de la Défense des Etats-Unis au début des années 70. Il a été développé dans le contexte de la Guerre Froide, conçu pour des fins de navigation des missiles, il a donc à la base une utilisation militaire. Cependant le système GPS a vite été utilisé pour des fins de localisation et de positionnement tant pour les civils que pour les militaires. Les détails des procédures et les conditions d'utilisation sont publiés en 1986 par le Département de la Défense des États-Unis.

Le GPS comporte actuellement une constellation de 31 satellites (NAVSTAR, *Navigation Satellite Timing and Ranging*) qui gravitent autour de la Terre. Ils suivent une orbite quasi circulaire à une altitude d'environ 20 000 km qu'ils parcourent en 11h 58 min et 02 secondes (un demi jour sidéral).

Il y a eu jusqu'à présent 2 Blocs de satellites :

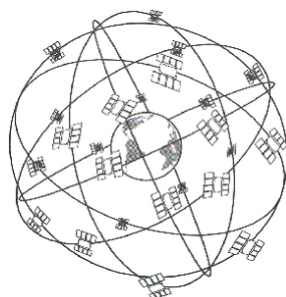


FIGURE 20 – Constellation des satellites GPS. Source : <http://hugoclave.free.fr/Constellation.GIF>.

- Le Bloc I constitué de 11 satellites mis en orbites entre 1978 et 1985 et dont la durée de vie est de 5 ans en moyenne. Leur principale mission était de valider les différents concepts du système GPS. Il n'y a actuellement plus aucun satellite du bloc I en service.
- Le Bloc II constitué de 9 satellites mis en orbites entre 1989 et 1990. De nombreuses améliorations ont été apportées à ces satellites par rapport au Bloc I, entre autres en ce qui concerne leur autonomie. Il n'y a actuellement plus aucun satellite du bloc II en service.
- Le Bloc IIA constitué de nombreux satellites mis en orbites à partir de 1990. A la différence des satellites des Blocs I et II, ils ont la capacité de dégrader le signal. Ces satellites sont équipés de 2 horloges atomiques au Césium et de 2 au Rubidium. Il y a actuellement 13 satellites du Bloc IIA actifs.
- Le Bloc IIR constitué de 18 satellites mis en orbites à partir de 1996. Ces satellites sont dotés d'une meilleure autonomie et sont capables de communiquer entre eux sans aucun contact au sol. Ils sont également équipés de 3 horloges atomiques au Rubidium qu'il est nécessaire de synchroniser car elles sont soumises à des décalages. Tous les satellites de ce Bloc sont actifs aujourd'hui.

De nouveaux satellites sont en cours de réalisation. Deux satellites sont prévus d'être mis en orbite en 2009, ils constitueront le Bloc IIF. Les satellites d'un nouveau Bloc, le Bloc III, sont en phase de développement. 32 satellites doivent être lancés à partir de 2014.

Signal émis par les satellites

Le système GPS permet de calculer la position tridimensionnelle (longitude, latitude, altitude) d'un lieu ou d'une personne, en temps réel et en tout endroit sur la Terre. Il fonctionne grâce au calcul de la distance qui sépare un récepteur GPS et plusieurs satellites. Les ondes émises par les satellites ont une fréquence comprise entre 1 et 2GHz et une longueur d'onde d'environ 20cm. Leur célérité est la même que celle de la lumière, soit environ 300000km/s, car ce sont des ondes électromagnétiques.

Les satellites GPS utilisent plusieurs bandes de fréquence mais seules 2 bandes sont utilisées dans le positionnement civil et scientifique :

- La bande L1 de fréquence 1575,42 MHz (soit une longueur d'onde de 0,19m) ;
- La bande L2 de fréquence 1227,60 MHz (soit une longueur d'onde de 0,24m) ;

Le choix des fréquences dans la bande L a été fait de manière à avoir un compromis entre les effets d'atténuation et de dispersion que subit une onde électromagnétique quand elle se propage dans l'atmosphère. En effet, le phénomène de dispersion nécessite d'avoir un signal suffisamment haute fréquence pour permettre l'estimation des vitesses de déplacement des satellites par effet Doppler. Le phénomène d'atténuation nécessite d'avoir un signal dont la fréquence n'est pas trop élevée car la puissance du signal devient d'autant plus faible que la fréquence est grande. La bande L est donc un bon compromis entre ces deux effets. Le satellite module l'onde envoyée à l'aide de la modulation de phase : il peut ainsi envoyer des données binaires. Les données suivent un code qui est spécifique à l'utilisation de l'onde. Les signaux GPS sont modulés par deux codes principaux :

- Le code P (*Precision code*), en libre accès ;
- Le code C/A (*Clear/Acquisition Code*), utilisé par les militaires et plus performant ;

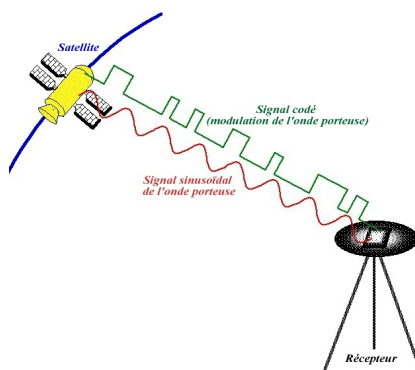


FIGURE 21 – Signaux émis par les satellites. Source : <http://www.geologie.ens.fr/vigny/images/gps-cours3.jpg>

Réception et traitement des signaux

Le GPS permet de déterminer la 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 récepteurs GPS bi-fréquence de qualité géodésique mesurent des signaux de code et de phase sur les

deux fréquences L1 et L2. Les mesures très précises sont réalisées à partir des données de la phase de l'onde porteuse, au moyen d'algorithmes sophistiqués de traitement informatique. Une précision de l'ordre de 10 mm est obtenue par le positionnement relatif de points situés à plusieurs dizaines voire à des centaines de kilomètres les uns des autres, bien que la précision soit fonction de la distance entre stations. Le problème de mesure de la phase demeure dans des ambiguïtés caractérisées par des multiples de 2π ou à un nombre arbitraire de cycle d'ondes, puisque les récepteurs ne mesurent que la partie fractionnaire de la distance entre le satellite GPS et l'antenne du récepteur. La résolution rapide et fiable des ambiguïtés de phase GPS fournit la précision millimétrique ultime pour le positionnement ainsi que la détermination de l'altitude. Le mode statique permet une estimation rapide et facile des paramètres des ambiguïtés. Le mode cinématique exige l'estimation simultanée des paramètres des ambiguïtés, ce qui entraîne un faible degré de liberté dans le filtre d'optimisation.

Annexe B : Format Rinex

Lors de l'acquisition des données GPS, le format des fichiers est en format brut (de la forme ssssdddf.T01 pour un récepteur NetRS de Trimble par exemple). Pour exploiter ces fichiers à l'aide du logiciel TRACK, il faut dans un premier temps les convertir en format RINEX (Receiver Independent Exchange Format). Le format RINEX a été conçu pour faciliter l'échange des données GPS produites par des récepteurs construits par des fabricants différents. La plupart des fabricants de récepteur GPS offrent des logiciels qui permettent de transformer les données brut en format RINEX mais on peut également utiliser des logiciels tiers (par exemple, le logiciel TEQC d'UNAVCO pour les récepteurs de type géodésique, ou encore le logiciel GRINGO pour les récepteurs portables Garmin).

Il existe 6 types de fichiers RINEX différents :

- Un fichier contenant les données d'observation. Il se présente sous la forme ssssdddf.yyo.
- Un fichier contenant les messages de navigation. Il se présente sous la forme ssssdddf.yyn.
- Un fichier contenant les données météorologiques. Il se présente sous la forme ssssdddf.yym.
- Un fichier contenant les messages de navigation Glonass. Il se présente sous la forme ssssdddf.yyg.
- Un fichier contenant les messages de navigation des satellites géostationnaires. Il se présente sous la forme ssssdddf.yyh.
- Un fichier contenant des informations sur les horloges des récepteurs et des satellites. Il se présente sous la forme ssssdddf.yyc.

En ce qui concerne la nomenclature, *ssss* est l'acronyme de la station, *ddd* est le jour de l'année du premier enregistrement, *f* est le numéro de la session dans le jour (avec 0 pour une journée complète), *yy* est l'année et la dernière lettre représente le type du fichier (par exemple *o* pour observation).

L'utilisation du logiciel TRACK nécessite d'obtenir les fichiers RINEX contenant les données d'observation.

Annexe C : Structure du fichier de commande *track.cmd*

Dans les lignes qui suivent, tous les paramètres sont écrits en rouge. Il est important de mettre un espace avant chaque paramètre pour que le programme le prenne en compte. Le reste est du commentaire et doit commencer par une * pour ne pas être pris en compte.

Structure de *track.cmd*

* Example track command file for processing Banc de test Data

runstring :

```
track -f track.cmd -d 216 -w 14913
```

* OBS_FILE

* Give the rinex file names to be processed, The obs_file command must be given first. At least one site must be named as F which means the position of the site is fixed. It is recommended to have only one fixed site. The other sites are denoted K for kinematic. The site_stats command determines if a site position will be able to change during the processing.

* NOTE : At least one blank line must follow the last station in the list and there can be no blank lines between the station list.

obs_file

```
lgit reff<day>.08o F
```

```
cbry cbry<day>.08o K
```

* NAV_FILE

* An orbit file must be given. In this case we are using the mit GPS week 1491 day 3 SP3 orbit file. NOTE : when 24-hours of data are processed the sp3 files from day before and after need to be concatenated with the sp3 file from the day being processed to ensure that there are ephemeris entries before and after the last data points.

```
nav_file igs_long.sp3 sp3
```

* MODE

* A quick method for setting up track is select a mode. In this case since the baselines are up to 300 km long we used mode long. Defaults set in this mode can be changed with commands after setting the mode.

mode long

* The commands below are optional and are used to specify specific output files and change some defaults

site_pos

```
cbry 4448143.82972 460394.36385 4533028.60588
```

```
lgit 4479377.59868 452790.86510 4503071.48765
```

pos_root CBRY<day>

res_root CBRY<day>

sum_file CBRY<day>.sum

atm_stats

cbry 0.1 0.0001 0.00023

lgit 0.1 0.0001 0.00023

atm_file ATM_ZEN

ante_off

cbry 0.0000 0.0000 0.0000 0.0905 0.0010 0.0003 0.1183 -0.0003 -0.0003

reff 0.0533 0.0000 0.0000 0.1060 0.0009 0.0001 0.1128 -0.0005 -0.0008

* Select the output coordinate type. For quick assessment and looking at relative motions North, East and Up (all in meters) are convenient.

* Use NEU+GEOD to get both NEU output and geodetic lat, long and height.

* Use GEOD to get just geodetic coordinates.

out_type GEOD+NEU

* Running the smoothing filter is recommended on long baselines because this uses all the data for atmospheric delay estimation and any non-integer biases (non-resolved biases) are constant

back_type smooth

* If the sampling interval is in the rinex files this is not needed unless a longer sampling interval is desired

interval 1.0

* By default and gap in the data introduces a new bias flag in track For high rate, telemetered data there are often gaps due to missed telemeter. For this data set, these gaps are less than 2-seconds and here we set gap size before a bias parameter is added to 2-seconds.

bf_set 2 60

Annexe D : Structure d'un shell type GMT pour la construction des graphiques

Si le shell s'appelle `sh_plot216`, alors pour l'exécuter il faut taper la commande :

```
> sch sh_plot
```

Pour ouvrir `sh_plot` dans un éditeur de texte tel que Emacs, il faut taper la commande :

```
> emacs sh_plot216 &
```

Il est nécessaire d'avoir le fichier `.gmtdefaults` dans le dossier où le shell est exécuté. Ce fichier contient entre autres de nombreuses informations sur les dimensions et les unités des abscisses et des titres.

Dans les lignes suivantes, tout ce qui contient un `#` en début de ligne est un commentaire, est tout ce qui est en bleu fait partie du shell.

→ Création du `sh_plot216`

* Dans un premier temps, pour pouvoir exécuter le shell dans un terminal, celui-ci doit comporter la première ligne suivante :

```
#!/bin/csh -f
```

* Si on souhaite travailler à partir d'un fichier existant, il est plus facile de l'appeler par un nom de variable simple tel que `f1`, `f2`, etc On utilise alors la commande `set` :

```
set f1 = nom_du_fichier
```

```
set f2 = nom_du_fichier_2
```

* Pour créer un postscript dans lequel seront introduits les graphiques, on utilise également la commande `set` :

```
set ps=nom_du_postscript.ps
```

* La manipulation des fichiers se fait principalement avec la commande `awk`. Voici un exemple qui montre comment créer un nouveau fichier `t.1`. Dans ce nouveau fichier, la première colonne correspond à la 15^{ème} colonne de `f1`, et la deuxième colonne correspond à la 4^{ème} colonne de `f1` multipliée par 1000. `NR>2` signifie qu'on ne prend en compte les manipulations qu'à partir de la troisième ligne et `OFMT="%.8f"` signifie que dans le fichier de sortie, les nombres flottants (`f`) seront affichés jusqu'à 8 chiffres après la virgule :

```
awk 'NR>2{OFMT="%.8f" ;print $15,$4*1000}' $f1 > ! t.1
```

* Pour créer un graphique, on utilise la commande *psxy* de GMT (Global Mapping Tool). cette commande comprend plusieurs options indispensables à la construction du graphique :

```
psxy nom_du_fichier -Rxmin/xmax/ymin/ymax -JXxscale/yscale ...  
...-Bainterval_xaxisinterval_xticks : "titre_axe_absisse :"/ ...  
...interval_yaxisinterval_yticks : "titre_axe_ordonnée" : /SWen ...  
...-Xxshift -Yyshift -Wtaille_trait/rouge/vert/bleu > ! $ps
```

Il est nécessaire de rajouter -K si il y a un autre *psxy* à la suite, -O il y a un *psxy* avant lui, -P pour lui préciser qu'on veut le format portrait plutôt que le format paysage. SWen signifie que les axes ne seront que sur un seul côté du rectangle.

De plus, > ! signifie que c'est la première fois que l'on crée le fichier sortant et » signifie qu'on rajoute par dessus.

* Pour créer une légende, on utilise la commande *pstext* qui peut être mise soit dans le graphique, soit à l'extérieur du graphique. Dans le cas où elle se trouve à l'intérieur du graphique, voici un exemple de la mise en forme :

```
pstext -R -JX -Grouge/vert/bleu -K -O « ! » $ps  
x-coordonnée y-coordonnée 10 0 0 ML titre_légende  
!
```

Dans le cas où la légende est à l'extérieur du graphique, voici un exemple de la mise en forme :

Il faut dans un premier temps créer un rectangle dans lequel sera intégré les symboles et le texte de la légende :

```
psxy -Rxmin/xmax/ymin/ymax -JXxscale/yscale -Wtaille_trait -Grouge/vert/bleu -L -A -P -K -O -Xxshift  
-Yyshift « ! » $ps  
x-coordonnée_bas_gauche y-coordonnée_bas_gauche  
x-coordonnée_haut_gauche y-coordonnée_haut_gauche  
x-coordonnée_haut_droit y-coordonnée_haut_droit  
x-coordonnée_bas_droit y-coordonnée_bas_droit  
x-coordonnée_bas_gauche y-coordonnée_bas_gauche  
!
```

Les symboles et le texte peut alors être rajouté :

```
psxy -R -JX -Ssymbole & taille -Wtaille_trait/rouge/vert/bleu -L -K -O -P « ! » $ps
```

```
x-coordonnée y-coordonnée
```

```
!
```

```
pstext -R -JX -Grouge/vert/bleu -O « ! » $ps
```

```
x-coordonnée y-coordonnée 10 0 0 ML titre_légende
```

```
!
```

* **Voici un exemple concret à partir d'un fichier *exemple.txt* :**

le fichier *exemple.txt* contient les données suivantes :

```
56 5 1
```

```
12 8 2
```

```
75 7 3
```

```
54 6 4
```

```
48 4 5
```

```
65 2 6
```

```
82 3 7
```

```
44 1 8
```

```
13 9 9
```

Je souhaite créer un graphique qui représente la colonne 1 et 2 en fonction de la colonne 3 :

J'édite donc un shell qui à la forme suivante :

```
#!/bin/csh -f
```

```
set f1 = exemple.txt
```

```
set ps = exemple.ps
```

```
awk 'OFMT="%.8f"; print $3,$1' $f1 > ! t.1
```

```
awk 'OFMT="%.8f"; print $3,$2' $f1 > ! t.2
```

```
psxy t.1 -R0/10/0/90 -JX6.5/6.5 -Ba2f1 : "titre_abcisse" : : "titre du graphique" : / ...
```

```
...10f5 : "titre_ordonnee" : /SWen -X1 -Y2 -P -K -W2/0/153/204 > ! $ps
```

```
psxy t.2 -R -JX -K -O -P -W2/255/102/0 » $ps
```

```
pstext -R -JX -G255/102/0 -K -O « ! » $ps
```

```
5 10 10 0 0 ML legende du trait orange
```

```
!
```

```
pstext -R -JX -G0/153/204 -K -O « ! » $ps
5 45 10 0 0 ML legende du trait bleu
!
```

```
psxy -R0/10/0/10 -JX2/1 -W3 -G255/255/255 -L -A -P -K -O -Y7.7 « ! » $ps
0 0
0 10
7 10
7 0
0 0
!
```

```
pstext -R -JX -G0/153/204 -K -O « ! » $ps
2 7 10 0 0 ML trait bleu
!
```

```
pstext -R -JX -G255/102/0 -O « ! » $ps
2 4 10 0 0 ML trait orange
!
```

J'obtiens alors le postscript *exemple.ps* suivant :

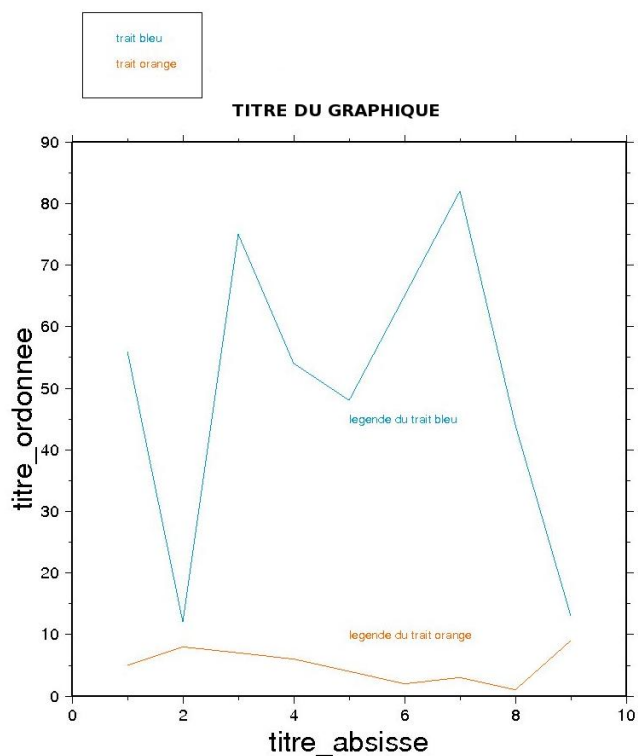


FIGURE 22 – Exemple de la création d'un graphique à partir d'un shell type GMT

Annexe E : Programmes MATLAB pour le traitement des signaux

programme principal

Dans les lignes qui suivent, tous les commentaires sont écrits en vert.

```
clear all ;  
hold off ;  
clc ;  
close all ;
```

```
%loading des données
```

```
a=load('donnees.txt');
```

```
absisse=a(1 :1 :2500,1);
```

```
d=a(1 :1 :2500,2);
```

```
%—————%Pour supprimer une moyenne et une tendance linéaire d=d-mean(d);%on enlève la  
moyenne
```

```
d=detrend(d);%on enlève la tendance linéaire
```

```
%—————%transformée de Fourier pour regarder le spectre en fréquence sfft=fft(d); f=freqEch/length(d):fre-  
qEch/length(d):FreqEch; plot(f,sfft);
```

```
%—————%filtrage de données avec un filtre passe-bande %filtrage des données entre fréquence  
passe-haut (ex 0,025Hz) et fréquence passe-bas(ex 0,2Hz)
```

```
freqEch=5;%frequence d'échantillonnage ;
```

```
Fcl=0.2;%frequence de coupure du filtre passe bas
```

```
Fch=0.025;%frequence de coupure du filtre passe haut
```

```
wcl=2*Fcl/freqEch; %freq normalisee pour filtre passe bas
```

```
[bl,al]=butter(4,wcl,'low');
```

```
d_bas=filter(bl,al,d); % filtrage pass bas du signal brut
```

```
wch=2*Fch/freqEch; %freq normalisee pour filtre passe haut
```

```
[bh,ah]=butter(4,wch,'high');
```

```
d_filtre=filter(bh,ah,d_bas);%filtrage passe haut du signal filtre passe bas=passe bande
```

```
%—————%Dérivation simple
```

```
v = fourdiff(d_filtre,1,5);
```

```
%—————%Intégration simple
```

```
z = cumtrapz(df_filtre,1,5);
```

```
%—————%exportation des donnees
```

```
A=[absisse' ;d_filtre'];  
fid=fopen('d.txt','wt');  
fprintf(fid,'% -8.10f % -8.10f\n',A);  
fclose(fid);
```

```
B=[absisse' ;v_filtre'];  
fid=fopen('v.txt','wt');  
fprintf(fid,'% -8.10f % -8.10f\n',B);  
fclose(fid);
```

```
C=[absisse' ;z_filtre'];  
fid=fopen('z.txt','wt');  
fprintf(fid,'% -8.10f % -8.10f\n',C);  
fclose(fid);
```

fonction *fourdiff*

La fonction *fourdiff* a été réécrite par un chercheur en 2005, C.Michel pour le traitement du signal en sismologie d'ingénieur. Il est difficile de trouver cette fonction dans les boîtes à outil de MATLAB.

```
function Dmf = fourdiff(f,m,Fs)  
% Dmf = fourdiff(f,m,Fs) computes the m-th derivative of the function  
% f(x) using the Fourier differentiation process.  
% The Fast Fourier Transform is used.  
%  
% Input :  
% f : Vector of samples  
% m : Derivative required (non-negative integer)  
% Fs : Frequency of sampling (Hz)  
% Output :  
% Dmf : m-th derivative of f  
%  
% S.C. Reddy, J.A.C. Weideman 2000. Corrected for MATLAB R13 by JACW, April 2003.  
% Corrected by C. Michel, October 2005 for easiest data processing in earthquake engineering.
```



```
f = f(:); % Make sure f is a column vector
N = length(f);
```

```
N1 = floor((N-1)/2); % Set up wavenumbers
N2 = (-N/2)*rem(m+1,2)*ones(rem(N+1,2));
wave = [(0 :N1) N2 (-N1 :-1)]*Fs/N;
```

```
Dmf = ifft(fft(f).*((2*pi*i*wave).^m)); % Transform to Fourier space, take deriv,
% and return to physical space.
```

```
if max(abs(imag(f))) == 0; Dmf = real(Dmf); end % Real data in, real derivative out
```

Annexe F : Logiciel GSAC pour le traitement des données sismologiques

GSAC est un logiciel de traitement des données sismologiques utilisable sous Unix. Pour l'ouvrir, il suffit de taper GSAC sous un système d'exploitation UNIX qui possède ce logiciel.

GSAC arrive à lire les formats de fichiers .sac. Pour cela, il suffit de taper la commande :

```
> r nom_du_fichier.sac
```

ou

```
> r *.sac
```

si on souhaite que GSAC lise tous les fichiers .sac contenu dans le dossier.

Pour que GSAC ne prenne pas 1 point sur 5 mais tous les points, il faut taper la commande

```
> qdp off
```

Pour visualiser le ou les différentes figures séparément, il faut taper la commande :

```
> p1
```

car sinon GSAC superposera les différentes courbes.

Pour ne voir qu'une partie du graphique affiché, il existe la commande :

```
> xlim x_minx_max
```

où x_min et x_max sont les deux bornes en abscisse de la fenêtre que l'on souhaite visualiser.

Si l'on souhaite ne garder qu'un bout du graphique et l'enregistrer dans un nouveau fichier, il faut faire la commande :

```
> cut b x_minx_max
```

```
> w nouveau_fichier.sac
```

```
> r nouveau_fichier.sac
```

```
> p1
```

On visualise alors nouveau_fichier.sac à l'écran.

Pour enlever la moyenne puis la tendance aux données, il faut taper la commande :

```
> rmean
```

```
> rtrend
```

Pour filtrer les données avec un filtre passe bande d'ordre 4 qui effectuera deux passages (aller-retour), il faut taper la commande :

```
> bp bu co f_min f_max n 4 p 2
```

où f_min est la fréquence de coupure du filtre passe haut et f_max est la fréquence de coupure du filtre passe bas.

Pour intégrer les données, il faut taper la commande :

```
> int
```

Pour multiplier les données par un certain coefficient, il faut taper la commande :

```
> mul X
```

où X est le coefficient avec lequel on veut multiplier les données.

Il est important d'enregistrer les modifications faites à l'aide de la commande :

```
> w nom_du_fichier2.sac
```

Pour quitter GSAC, il faut taper la commande :

```
> exit
```

Il est important d'avoir en tête que le format de fichier .sac est un format particulier. Pour pouvoir lire les données dans un fichier ascii, il faut dans un terminal UNIX taper la commande `<sac2asc -f nom_du_fichier.sac > nom_du_fichier.asc>`, ce qui convertira le fichier .sac en fichier .asc lisible par n'importe quel éditeur de texte. Ce dernier contient une colonne avec les valeurs d'amplitude. Pour connaître le pas d'échantillonnage, il faut taper la commande suivante dans GSAC :

```
> list header
```

Cette liste contient l'heure du début de l'enregistrement, le pas d'échantillonnage, et d'autres informations qui peuvent être utiles.