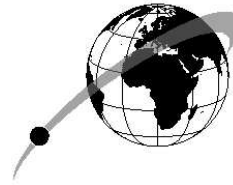


Année 2011 – 2012

Unité de Recherche : Laboratoire de géologie de L'ENS

Équipe(s) : Géodésie & Sismologie

Encadrant(s) : C. Vigny & R. Madariaga



**Master  
STEP**

GÉOPHYSIQUE

# Motogrammes de stations GPS haute fréquence au cours du séisme Mw 8,8 de Maule du 27 Février 2010 au Chili

Clio Meyer

## Résumé

Le séisme de Maule du 27 février 2010 offre un cadre privilégié pour analyser le nouvel outil que constitue le calcul cinématique de la position de stations GPS à haute fréquence (1 Hz). Ce séisme de grande magnitude (Mw 8.8) s'est produit proche des côtes chiliennes où un dense réseau de stations GPS est installé. Quel est la pertinence des courbes de position cinématique des stations à haute fréquence (que l'on appelle motogrammes) dans l'étude de la rupture sismique ? A quelle magnitude et quels déplacements est limité le calcul cinématique pour apporter encore des informations ? Quels sont les avantages des données GPS cinématiques par rapport aux données GPS statiques qui sont habituellement utilisées ? Y a-t-il eu un signal précurseur et/ou un signal post-sismique pour le séisme de Maule, et peut-on le détecter grâce au GPS cinématique ? Pour répondre à ces questions, nous avons tenté dans cette étude d'obtenir des motogrammes plus précis que ceux qui ont déjà été calculés, en améliorant d'abord le calcul (mené par le programme Track développé au MIT) puis en proposant un protocole de post-processing. Après ces deux étapes, nous avons obtenu une précision sur 500 s avant le séisme de 2.9, 7.2 et 7.3 mm pour les composantes Nord, Est et verticale de Cons (station à moins de 50 km de l'épicentre). Cela permet de détecter des déplacements cosismiques de 5 m à 50 km de l'épicentre jusqu'à 1 cm à 800 km sur une fenêtre de 600 s de l'épicentre du séisme de magnitude 8.8 de Maule. Le séisme de Mw 7.2 du 25 mars 2012 qui s'est produit au Nord de l'épicentre de Maule nous a enfin permis d'observer les limites du GPS cinématique. Des déplacements locaux sont cependant encore enregistrés, et permettent de suggérer que la rupture a eu lieu plus profondément que celle de Maule. Le GPS cinématique a le potentiel d'apporter de nouvelles informations pour l'étude de la rupture sismique, et mérite ainsi d'être largement développé.

**Mots clés :** GPS, 1 Hz, séisme, cosismique

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Le signal GPS, description et stratégies</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Track, le traitement des données</b>	<b>7</b>
<b>4</b>	<b>Le séisme de Maule sur la constellation GPS</b>	<b>9</b>
4.1	Calcul des motogrammes à haute fréquence . . . . .	9
4.1.1	Choix de la station de référence . . . . .	9
4.1.2	Le délai troposphérique . . . . .	11
4.1.3	La résolution des ambiguïtés . . . . .	12
4.1.4	Satellites . . . . .	14
4.2	Post-processing : le filtrage . . . . .	15
4.2.1	Filtrage sidéral . . . . .	15
4.2.2	Filtrage spatial : Stack . . . . .	16
4.2.3	Filtrage spectral . . . . .	16
4.3	Motogrammes haute-fréquence pour le séisme géant de Maule du 27 février 2010	17
<b>5</b>	<b>Discussion</b>	<b>19</b>
5.1	Application du GPS haute fréquence à l'étude de la rupture sismique : cadre pour de nouvelles études . . . . .	19
5.2	La réplique du 25 mars 2012 . . . . .	22
<b>6</b>	<b>Conclusion</b>	<b>24</b>

## 1 Introduction

Le 27 février 2010 à 6h34 TU s'est produit un séisme de magnitude Mw 8.8 au Nord-nord-est de Concepción au Chili (d'abord localisé à 36°S et 73°W). Rompant près de 140 km de faille sur presque 350 km de long (G. Hayes NEIC), ce séisme a pu être enregistré par le réseau sismologique mondial ainsi que par le réseau de stations Global Positioning System (GPS) permanentes installées dans la région entre 35°S et 37°S (Ruegg et al., 2002, 2009; Vigny et al., 2011). Ce réseau de stations GPS enregistre pour la plupart des données à la fréquence de 1Hz (GPS haute fréquence).

### CONTEXTE

Au centre de la convergence entre les plaques Nazca et Amérique du sud, le Chili enregistre des déformations importantes liées au cycle sismique de cette zone de subduction rapide ( $\sim 7$ cm/an). Lors d'un événement, le réseau sismologique et le réseau GPS (positions statiques et récemment positions cinématiques) permettent de documenter chaque séisme. Bien qu'un séisme majeur (Mw>8) a lieu en moyenne tous les dix ans sur chaque segment de faille de cette subduction (figure 1), aucun grand séisme n'avait été enregistré au niveau de Constitución-Concepción depuis  $\sim 175$  ans (Campos, 2002; Ruegg et al., 2002; premières descriptions du séisme : Darwin 1876; Lomnitz, 1971; Beck et al., 1998). Depuis le séisme Mw 8.5 de 1835 décrit par Darwin et Fitzroy, ce sont donc environ 12m qui se sont accumulés (Altamimi et al., 2007; Vigny et al., 2011) au niveau de cette lacune sismique de 400 km de long (Ruegg et al., 2009; Métois et al., 2012), bordée au Sud par la rupture de 1960 Mw 9,4-9,5 du Chili et au Nord par les séismes de Valparaíso de 1906 et 1985. La distribution des premières répliques (90 Mw>5 jusqu'à Mw 6.9) indique que la faille a rompu sur environ 600 km de long (compatible avec la Mw 8.8) sur une largeur d'au moins 100 km, ce qui n'est pas compatible avec les 350 km de long prédits par une première inversion de la source sismique de G. Hayes (NEIC). Par ailleurs, la localisation par l'USGS est certainement biaisée par le fait que le réseau sismologique a saturé durant ce séisme géant, puis s'est arrêté de fonctionner.

### PROBLEMATIQUES

L'enregistrement géodésique des déplacements cosismiques par le GPS haute fréquence (1Hz) apparaît essentiel pour accéder aux informations perdues puisqu'il ne sature pas. Les mesures GPS apportent de nouvelles informations pour contraindre la relocalisation du séisme et la dynamique cosismique de la rupture. Jusqu'où s'est propagée la rupture? Quelle a été la durée du séisme? Quel en a été le centroïde des déformations et où se situe-t-il? Y a-t-il eu un signal précurseur et/ou un signal post-sismique? Comment/pourquoi le séisme de Maule est devenu un séisme géant? Grâce au GPS haute fréquence, on peut calculer et tracer la position des stations au cours du temps pour chaque seconde (position cinématique). C'est ce qu'on appelle un motogramme. Dans la mesure où un motogramme est en fait l'équivalent d'un sismogramme de déplacement à basse fréquence, le GPS haute fréquence a-t-il le potentiel d'apporter de nouvelles clés pour résoudre des problématiques de sismologie?

Les deux avantages du GPS cinématique par rapport aux sismogrammes sont d'enregistrer directement le déplacement, ce qui permet de s'affranchir de l'erreur due à la double intégration des accélérogrammes, et de ne pas être contraint par une saturation d'amplitude dans l'enregistrement du déplacement. Ainsi, le GPS haute fréquence permet d'enregistrer des amplitudes de déplacement plus grandes, augmente la gamme de fréquences observée par les sismogrammes (Larson et al., 2003) et complète les données des sismomètres là où il en manque (Ji et al., 2004). Les mesures GPS à haute fréquence ont déjà été utilisées pour l'étude de la rupture sismique de séismes de magnitude Mw 6 à 8 (e.g. Larson et al., 2003; Ji et al., 2004; Miyazaki et al., 2004a, 2004b; Langbein et al., 2005; Kobayashi et al., 2006; Emore et al., 2007 et Wang et al., 2007). Les données GPS cinématiques peuvent par exemple être utilisées pour contraindre les instabilités de longue période au cours de l'intégration des accélérogrammes (pour le séisme Mw

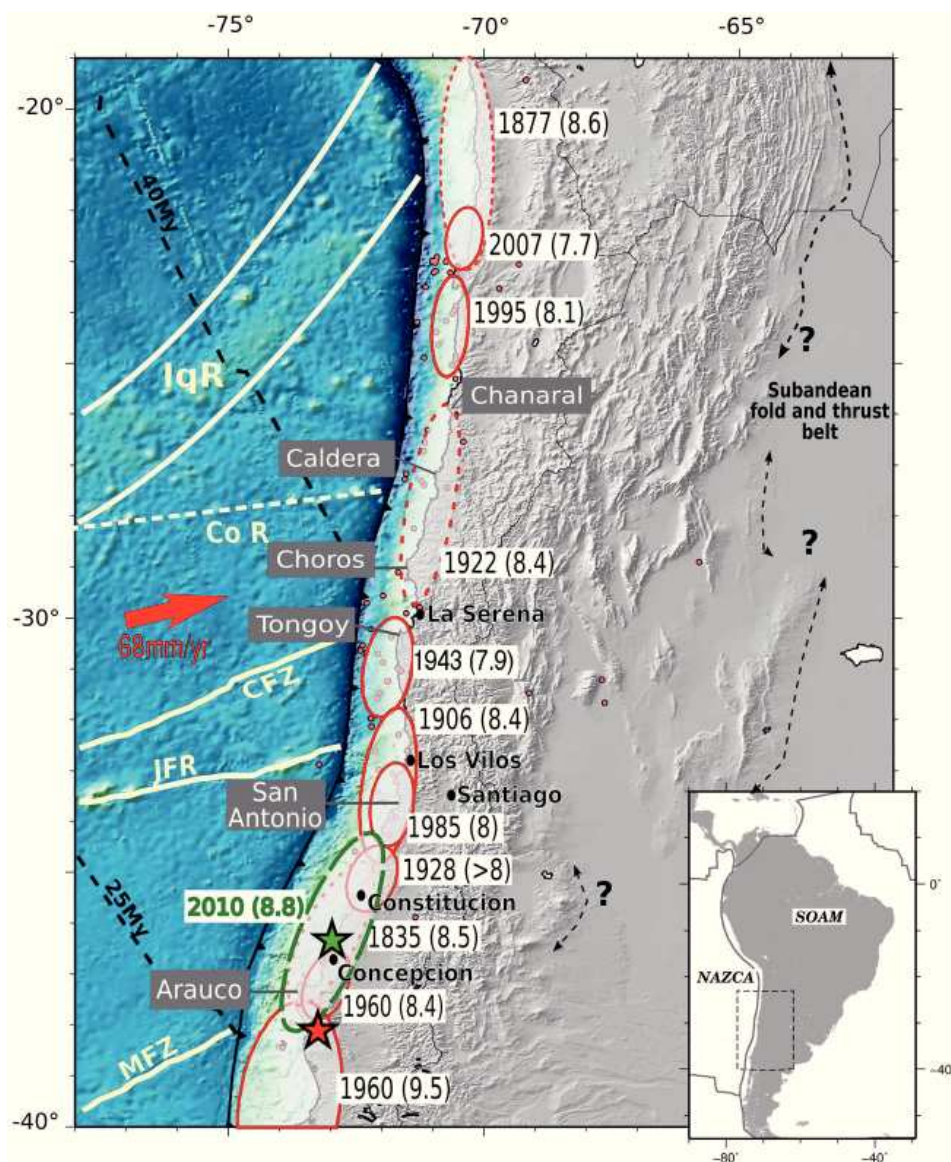


Figure 1. Seismotectonic background of the NAZCA-SOAM convergence zone and main geological features. Topography and bathymetry are from ETOPO1. The possible fronts of the sub-Andean fold and thrust belt are marked with black dashed lines. White lines: contours of bathymetric features of the Nazca subducting plate. IqR: Iquique ridge, Co R: Copiapo Ridge, CFZ: Challenger fracture zone, JFR: Juan Fernandez ridge, MFZ: Mocha Fracture Zone. Black dashed lines: isochrons of Nazca plate ocean floor extracted from [Muller et al., 1997]. The bold red arrow represents the convergence of NAZCA plate with respect to SOAM plate. Red contoured ellipses: maximal rupture zones of the  $M > 7.5$  historical (dashed) and instrumental (solid) earthquakes since 1830 (from Servicio Sismológico Nacional catalog (<http://ssn.dgf.uchile.cl/>) [Beck et al., 1998; Comte and Pardo, 1991; Biggs and Robinson, 2009] see also <http://earthquake.usgs.gov/research/data/centennial.php>). Green ellipse: rupture zone of the 2010 Maule earthquake. Green star: relocated hypocenter for the Maule event [Vigny et al., 2011]. Red circles:  $M_w > 6$  events since 1976 (<http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>). Peninsulas and coastal features are named on the grey rectangles.

FIGURE 1 – Contexte sismo-tectonique de la zone, par Métois et al. (2012).

8 de Tokachi-Oki de 2003 : Miyazaki et al., 2004a ; Emore et al., 2007 ; pour le séisme Mw 6.5 de San Simeon de 2003 : Wang et al., 2007). Miyazaki et al., 2004a ont montré qu'elles peuvent aussi être inversée pour modéliser l'évolution du glissement sur la faille pendant la rupture. Pour le séisme de Maule, le GPS cinématique, contraint par les données statiques a déjà permis de procéder à une nouvelle estimation du glissement cosismique sur la faille (Vigny et al., 2011 ; Ruiz et al. in press), et d'apporter des informations complémentaires aux sismogrammes sur la dynamique de la rupture, comme par exemple la vitesse de rupture et une relocalisation (dès lors nommée relocalisation "basse fréquence") de la source sismique (Vigny et al., 2011). En contrepartie, le signal GPS est pollué par un certain nombre de perturbations, ce qui rend difficile l'estimation du déplacement réel des stations. La précision du GPS cinématique sur les hautes fréquences est en effet inférieure à celle du sismomètre de plusieurs ordres de grandeur (Miyazaki et al., 2004a). Il est donc important de comprendre les sources des perturbations du signal GPS et de tenter de les éliminer des motogrammes au cours de l'étape de traitement des données, ou de les filtrer par la suite. Si toutes ces perturbations sont éliminées, le signal ne contient plus que le déplacement réel de la station. Dans la pratique, il reste toujours des oscillations dans le signal, liées à la complexité des sources d'erreurs (passage du signal à travers l'ionosphère et la troposphère ; les caractéristiques de son trajet et de son enregistrement) et à la faible capacité du calcul cinématique à s'en affranchir par rapport au calcul statique.

Les données GPS sont habituellement utilisées pour estimer le déplacement cumulé des stations pendant un séisme en retirant la position avant le séisme à la position après le séisme (position statique). La position des stations est calculée de manière plus précise dans le cadre d'un calcul statique : elle s'affranchit des erreurs qui perturbent le calcul cinématique puisqu'elle est moyennée avant et après un séisme sur plusieurs heures. Dans quelles mesures les données haute fréquence cinématiques apportent-elles de nouvelles informations par rapport aux données statiques ? Il est nécessaire de déterminer le plus précisément possible dans quelles mesures un déplacement lié à un séisme est détectable sur un motogramme à haute fréquence : à partir de quelle magnitude, de quelle durée, à quelle distance de l'épicentre,...

#### OBJECTIFS

Au cours de ce stage, l'objectif est de poser un cadre au nouvel outil que constitue le GPS haute fréquence pour l'étude des séismes de grandes magnitudes.

Nous tentons d'abord d'éliminer des motogrammes du séisme de Maule du 27 février 2010 les perturbations liées aux conditions d'enregistrement et de traitement au cours du traitement des données. Puis nous procédons au filtrage de ces motogrammes afin d'obtenir les positions cinématiques des stations les plus précises possibles. Enfin nous nous intéressons à la réplique du 25 mars 2012 de magnitude Mw 7.2, afin de déterminer dans quel cadre l'approche géodésique haute fréquence peut apporter des informations nouvelles par rapport aux données statiques pour contraindre des problématiques de sismologie.

## 2 Le signal GPS, description et stratégies

Chaque satellite GPS envoie un signal unique ambigu, appelé onde porteuse ou phase porteuse, à 2 fréquences (L1 : 1575,42 Hz et L2 : 1227,6 Hz ; longueurs d'onde respectives de 19 et 24,4 cm) (figure 2a). Ce signal est modulé par des pseudo-distances (C1, P1 et P2, portées respectivement par L1 et L2. P1 : 1,023 MHz et P2 : 10,23 MHz ; pseudo-longueur d'onde de 293 et 29,3 m) avec un code non-ambigu pendant une semaine. Le code S (Standard) ou C/A (course acquisition) pour coder C1 entraîne une précision de 10 m tandis que le code P (Precise) pour P1 et P2, entraîne une précision de 1 m. Le signal contient un message de navigation, comme les coordonnées des satellites en fonction du temps. Les phases porteuses autorisent une précision plus grande que les pseudo-distances (d'au moins 10 cm) et sont moins vulnérables aux effets multi-trajet, c'est-

à-dire aux trajets comprenant une ou des réflexions (King et al., 1985). Une horloge atomique embarquée à bord permet de connaître l'heure d'émission du signal. Aujourd'hui, environ 28 satellites sont en orbite, à une altitude de 20000 km.

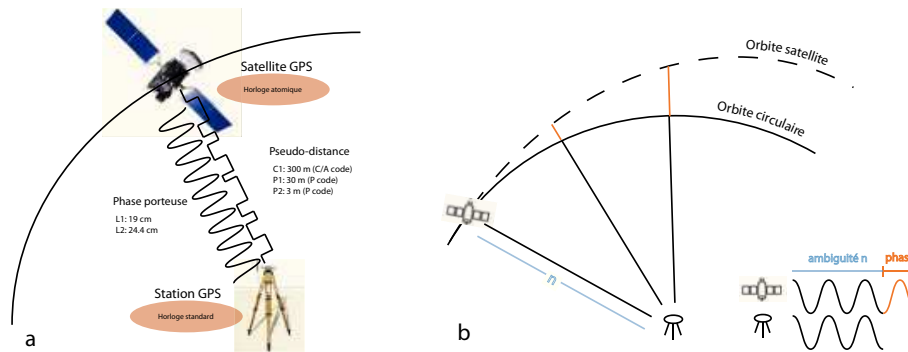


FIGURE 2 – a) Représentation schématique du signal GPS. b) Evolution de la phase du signal d'un satellite arrivant à une station au cours du trajet du satellite sur son orbite.

Chaque récepteur GPS (station) génère le même signal que celui envoyé par les satellites au même moment grâce à un oscillateur local (LO). Doté d'une horloge (oscillateur ou frequency standard), chaque récepteur peut donc calculer la différence de phase, c'est-à-dire la différence en nombre de cycles qu'il y a entre le signal émis par le satellite et le signal transmis enregistré à la station. La différence de phase est donc représentative de la position relative de la station par rapport au satellite, mais aussi du délai qu'il a fallu au signal pour traverser l'atmosphère (délai ionosphérique et délai troposphérique), du chemin emprunté par le signal (effet multi-trajet possible) ainsi que du bruit de mesure (figure 3).

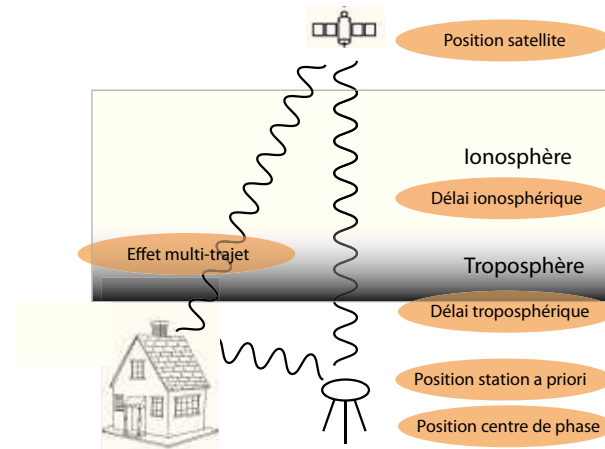


FIGURE 3 – Schéma des erreurs qui perturbent le calcul de la position d'une station

Cependant, le signal des phases porteuses L1 et L2 est un signal ambigu, c'est-à-dire un signal périodique, identique à lui-même à la fréquence  $f_1$  et  $f_2$ . La différence de phase observée n'est donc que la partie décimale de la différence de phase réelle existante entre le signal émis et le signal transmis, à laquelle on doit rajouter un nombre entier de cycles, appelé ambiguïté, pour obtenir la différence de phase réelle (figure 2b). L'estimation de l'ambiguïté se fait à partir des pseudo-distances qui ne sont pas ambiguës (pendant une semaine), au cours du traitement des données (cf partie 2). Connaître l'ambiguïté (associée à un couple satellite-station) permet de mieux déterminer les contributions de chaque perturbation à la phase.

La phase simple observée à une station  $j$  à partir du signal d'un satellite  $i$  s'exprime par :

$$\phi_{ij}(t_j) = \phi_{recue}(t_j) - \phi_{LO}(t_j) + n_{ij} + \phi_{bruit} \quad (1)$$

avec  $\phi_{LO}$  la phase produite par l'oscillateur local du récepteur,  $n_{ij}$  l'ambiguïté liée au couple satellite  $i$  – station  $j$ ,  $t_i$  le temps auquel le satellite envoie le signal et  $t_j$  le temps auquel la station réceptionne le signal :  $t_i = t_j - \tau_{ij}(t_j)$  avec  $\tau_{ij}$  le délai de temps de propagation. Connaissant la position de chaque station par rapport aux satellites, on est capable de calculer la position relative d'une station par rapport à une autre, aussi appelée vecteur baseline. Mais cette position est largement biaisée par le comportement des horloges des satellites et des stations, par l'erreur de positionnement des satellites (l'erreur sur la position d'un satellite  $\Delta h$  entraîne une erreur sur la baseline  $\Delta L$  :  $\Delta L/L \sim \Delta h/h$ ), par l'erreur faite sur le délai troposphérique ou ionosphérique ( $\sim 0,5\text{ppm}$  de nuit,  $\sim 2\text{ppm}$  de jour), ou sur la part du signal atteignant le récepteur via réflexion sur la Terre ou d'autres interfaces (effet multi-trajet). Le positionnement relatif à partir d'observations faites à deux stations GPS différentes permet de s'affranchir d'un certain nombre de ces erreurs à partir d'un calcul croisé des phases à chaque station (simples différences et doubles différences). La précision du positionnement est donc influencée par :

- La précision de la mesure et la géométrie récepteur-satellite
- La technique de processing des mesures adoptée, entre autres l'élimination des biais d'horloge et la résolution des ambiguïtés (cf partie 3)
- L'exactitude à laquelle les effets atmosphériques et ionosphériques sont modélisés
- La précision de la position des satellites et des stations a priori

Un récepteur GPS enregistre en continu la phase qu'il y a entre le signal envoyé par le satellite et le signal créé par l'oscillateur local. Ces informations sont enregistrées chaque jour à chaque station sous un format international appelé Rinex (Receiver Independant Exchange), qui sert d'entrée au traitement des données au cours duquel les positions relatives cinématiques sont estimées. On n'accède donc pas immédiatement à la position des stations.

### 3 Track, le traitement des données

Track est un programme issu de Gamit (créé au MIT) permettant de calculer le mouvement d'une ou de plusieurs stations mobiles au cours du temps par rapport à une ou plusieurs stations supposées fixes. C'est ce qu'on appelle le positionnement relatif cinématique. Ce calcul est plus simple et plus rapide que le calcul de la position absolue d'une station (Gamit), car il s'agit d'obtenir uniquement un mouvement relatif entre les stations. Le principe de Track est donc simple : il s'agit de construire les phases théoriques des signaux enregistrés par les stations GPS, sachant la position des stations a priori ainsi que celle des satellites, puis de les comparer aux phases observées en calculant le résidu des deux (RMS), et enfin d'ajuster la position des stations et les autres paramètres intervenant dans les calculs de manière à réduire ce résidu au maximum.

Track opère de façon similaire à Gamit, mais simplifiée (figure 4). Trois étapes sont successivement effectuées (un rapport des tâches effectuées par le programme a été détaillé pendant le stage et pourra être fourni au cours de la soutenance) :

1. Lecture des fichiers Rinex et assignement des ambiguïtés a priori (bias parameters)
  2. Résolution des ambiguïtés à des valeurs entières
  3. Calcul des trajectoires en utilisant les valeurs résolues des ambiguïtés (les deux dernières étapes sont réitérées jusqu'à obtenir des résidus acceptables)
1. Après une lecture des fichiers d'entrée, une ambiguïté est assignée à chacune des données. Une nouvelle ambiguïté est donnée à chaque fois que : un satellite se lève au-dessus de l'angle minimum d'élévation (par défaut :  $15^\circ$ ), il y a une lacune dans les données (chaque donnée manquante entraîne donc l'assignation d'une nouvelle ambiguïté), ou il y a un saut dans la phase ionosphérique (ou Extra-widelane) calculée. Des combinaisons linéaires des phases porteuses et des pseudo-distances, aussi appelées « widelanes », sont en effet

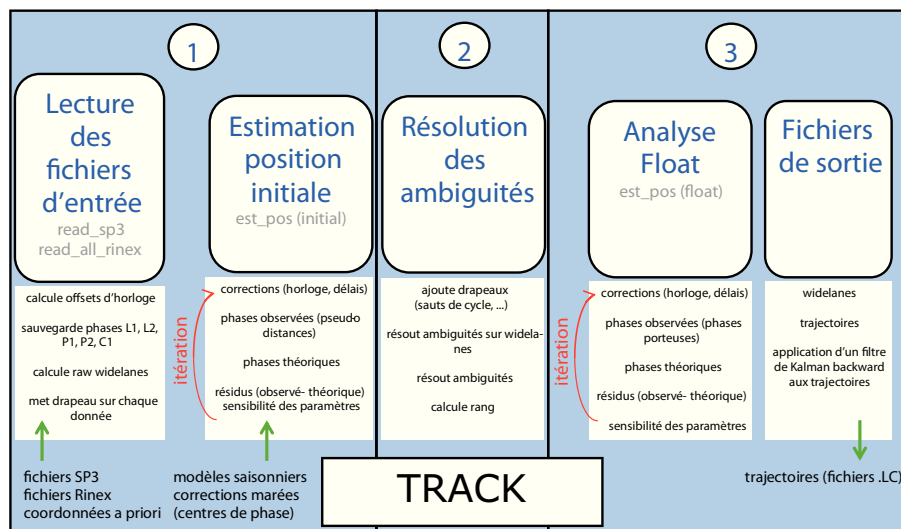


FIGURE 4 – Structure simplifiée de Track

calculées, entre autres afin de repérer rapidement les sauts de cycle et de calculer les délais ionosphériques.

Les corrections des horloges et les délais atmosphériques sont calculés, afin de calculer les phases théoriques. Des ambiguïtés initiales sont assignées. Une première trajectoire est calculée à partir des pseudo-distances de manière à minimiser l'écart entre les phases théoriques et les pseudo-distances.

2. La fixation des ambiguïtés est l'analyse qui permet d'estimer l'ambiguïté de phase (nombre entier) qu'il existe pour chaque couple satellite-station, et à chaque fois que le satellite est visible de la station (une ambiguïté pour une plage de temps).

Une première résolution d'ambiguïtés sur les widelanes permet de compléter les valeurs d'ambiguïtés initiales. L'analyse "float" cherche ensuite les valeurs non entières d'ambiguïtés qui entraînent des résidus minimum. Le programme tente ensuite de fixer les ambiguïtés assignées à des valeurs entières. La moyenne du résidu obtenu après que les ambiguïtés sont fixées aux valeurs entières est donnée. Deux critères limitent la fixation d'une ambiguïté à sa valeur entière proposée. Premièrement, il faut que son « rang » (Relative Rank  $RR = \text{rapport de l'incrément qu'il a fallu ajouter à l'ambiguïté pour obtenir la valeur proposée sur le deuxième incrément possible qui donne la deuxième meilleure valeur}$ ) soit acceptable c'est-à-dire au-dessous d'une certaine valeur. Deuxièmement, il faut que le sigma entraîné par le choix de cette valeur entière soit en dessous de la déviation standard limite indiquée par l'utilisateur. Par ailleurs, le poids des combinaisons linéaires pour la première résolution des ambiguïtés peut aussi être changé afin de minimiser les effets ionosphériques pour les longues baselines par exemple. L'analyse float est répétée jusqu'à ce que le plus d'ambiguïtés possible soient résolues.

3. A la fin de cette analyse, les paramètres importants sont écrits dans les fichiers de sortie, et un filtre de Kalman rétrograde peut être appliqué. Puis les trajectoires des stations mobiles sont calculées par rapport à la station de référence, en utilisant les dernières valeurs d'ambiguïtés fixées, même celles fixées avec de faibles certitudes. Un fichier TRACK\*.LC par station est créé (si les estimations sont basées sur la phase LC de combinaison linéaire), résumant les coordonnées cartésiennes (NEU) des stations à chaque époque de temps, leur incertitude, leur paramètre atmosphérique, le nombre de doubles-différences utilisées, etc ...



## 4 Le séisme de Maule sur la constellation GPS

Le GPS haute fréquence permet de calculer la position cinématique relative des stations du réseau chilien (carte 5), ce qui apporte des informations supplémentaires aux sismogrammes pour l'étude des grands séismes. Ce calcul, dont la méthode vient d'être présentée, peut être amélioré. Nous présentons ici les améliorations du calcul cinématique et les étapes de post-processing qui ont été menées au cours du stage pour obtenir des positions cinématiques les plus précises possibles.

### 4.1 Calcul des motogrammes à haute fréquence

Le but principal de cette étude est de comprendre l'influence de chaque paramètre sur le calcul de la position relative cinématique des stations, et l'importance des étapes du calcul de Track. Le choix de la station de référence, le modèle troposphérique utilisé, le choix des satellites utilisés dans le calcul, ainsi que celui d'autres paramètres ont été successivement analysés et optimisés lorsque les stations mobiles ne bougent pas (i.e. avant le séisme) pour obtenir des motogrammes à haute fréquence les plus précis et exacts possibles pendant le séisme.

#### 4.1.1 Choix de la station de référence

Lors d'un calcul cinématique relatif, la position d'une station est calculée par rapport à celle d'une autre station, c'est-à-dire que ce qui est calculé, c'est leur positionnement relatif ou leur vecteur baseline. C'est donc en choisissant une station fixe dans un repère, appelée station de référence, que l'on obtient le déplacement de l'autre station dans ce repère. Si la station de référence bouge, son déplacement sera compté comme celui de la station mobile (avec un signe opposé). Il est donc important que la station de référence soit immobile durant la période de mesure (même si elle "voit passer" les ondes sismiques du séisme à un temps donné).

Par ailleurs, d'autres paramètres peuvent être influencés par le choix de la station de référence, qui introduisent des erreurs dans le positionnement relatif. La phase observée à une station GPS est très sensible aux caractéristiques du chemin emprunté par le signal, comme l'épaisseur de l'ionosphère (en lien avec l'importance de la réfraction), le contenu en vapeur d'eau de la troposphère ou la présence d'obstacles sur lesquels le signal se réfléchit. Il est donc judicieux de choisir une station de référence pour laquelle les signaux empruntent quasiment les mêmes chemins que ceux arrivant à la station mobile, et donc avec laquelle les perturbations rencontrées sur le chemin s'annulent en formant les phases de doubles différences. Plus les stations mobiles sont proches de la station de référence, plus la phase observée ne dépend uniquement que de la position des stations mobiles par rapport aux satellites et à la station de référence.

La figure 6 représente le motogramme de la station dite "mobile" Cnba le 27 février 2010 six heures avant le séisme en fonction de la distance de la station de référence. Au cours des six heures avant le séisme, aucune station de référence n'est censée bouger et la position de la station Cnba est censée rester fixe. On remarque que le choix d'une station de référence à plus de 1000 km de distance (Uape) de la station mobile introduit des erreurs de positionnement très importantes (>50 cm), probablement dues au cumul de multiples sources : ionosphère et troposphère traversées très différentes, satellites utilisés très différents, effet multi-trajet non annulé, ambiguïtés non résolues ...

Jusqu'à 500 km de distance de la station de référence, on peut détecter des mouvements de plus de 5 cm sur la composante Est du signal, pour des périodes inférieures à 1 heure. Sur la composante Nord, ce sont des mouvements à partir de 10 cm, et à partir de 50 cm sur la composante verticale qui sont détectables. C'est pourquoi une distance maximale de 500 km

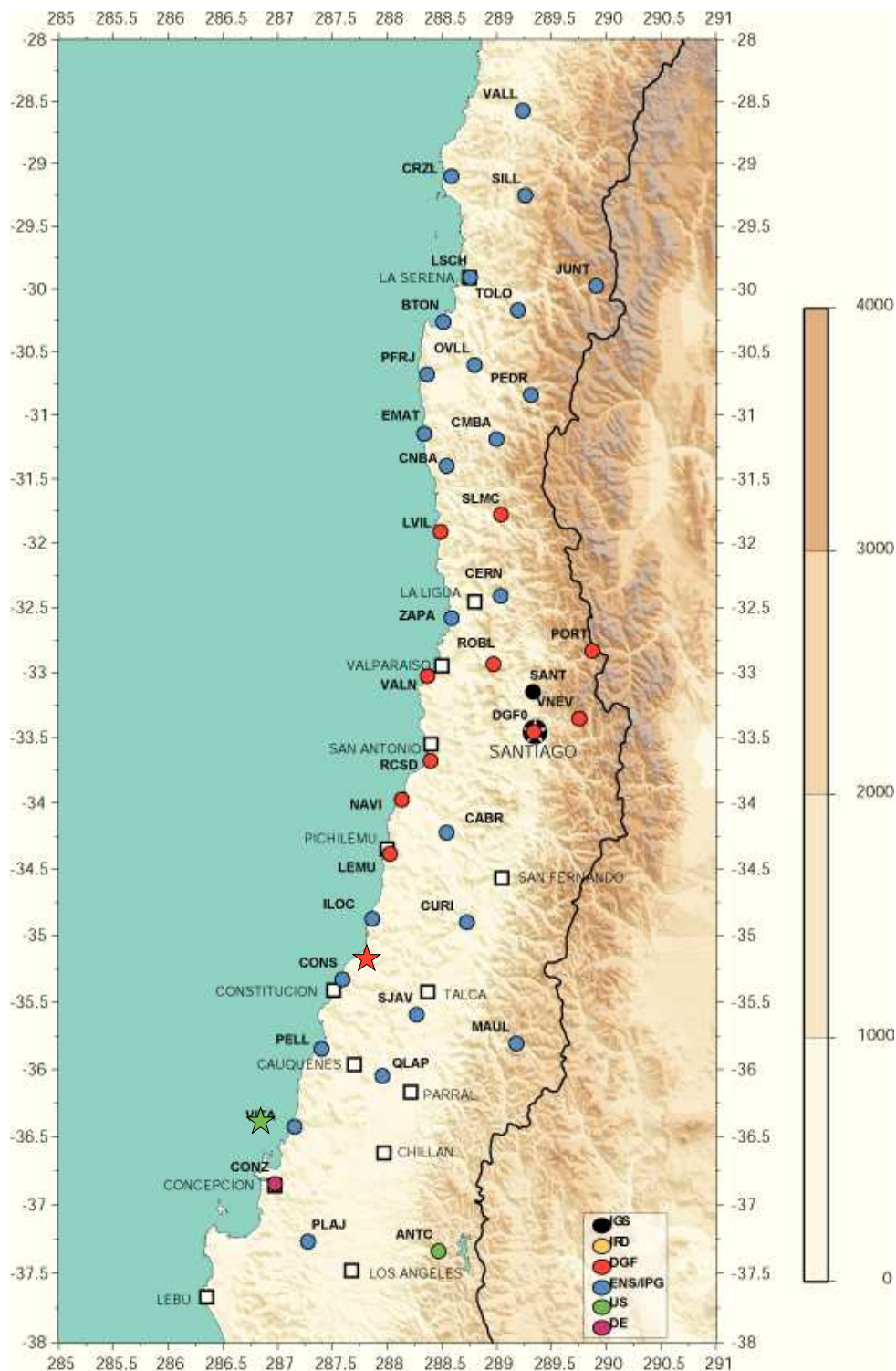


FIGURE 5 – Carte du réseau chilien de station GPS (par Christophe Vigny). L'étoile verte pointe l'épicentre du séisme de Maule (Vigny et al. 2011) et l'étoile rouge pointe l'épicentre de la réplique de 2012 (USGS).

entre la station de référence et les stations mobiles est conseillée pour l'observation de tels déplacements. Pour le séisme du 27 février 2010, le station Sill, qui se situe à moins de 500 km du réseau de stations GPS, a donc été choisie comme station de référence.

Il est cependant important de noter que des oscillations haute fréquence (<500s) subsistent, dues

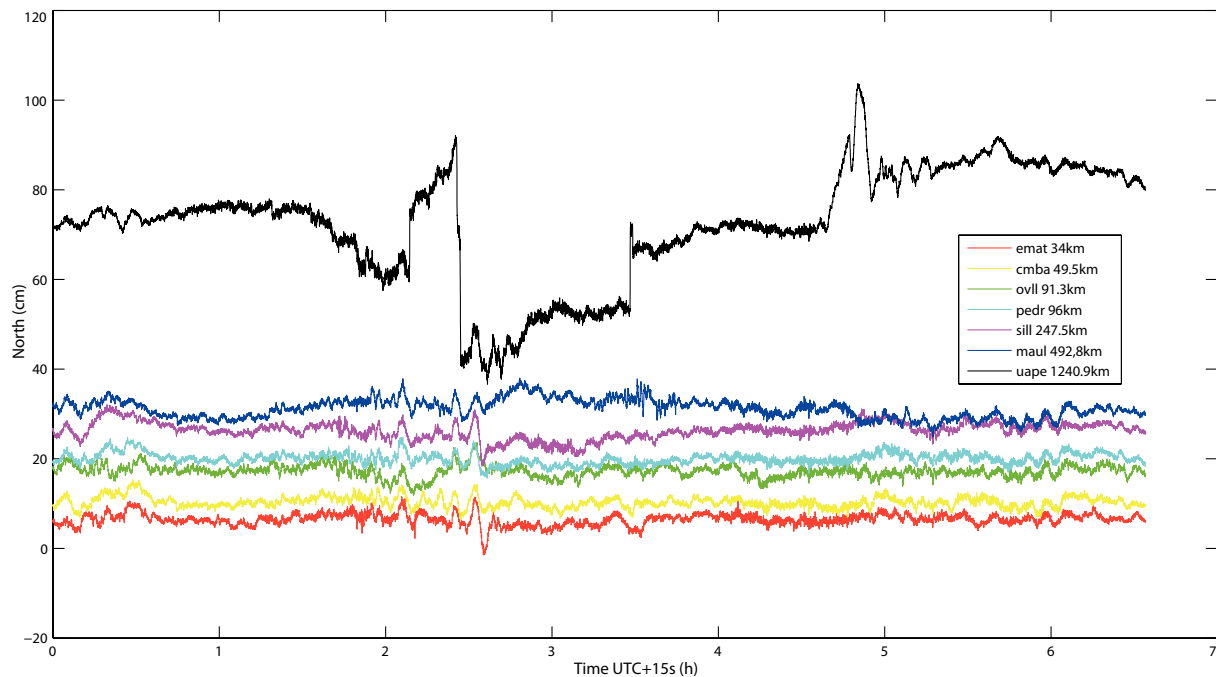


FIGURE 6 – Composante Nord du motogramme de Cnba du 27 février 2010 en fonction de la distance à la station de référence. Le calcul de ces motogrammes a été fait en choisissant une station de référence de plus en plus loin (à une distance de 34 à 1241 km de Cnba).

à la géométrie différente des satellites qu'il existe à deux stations espacées de 500 km. Même si ces oscillations deviennent plus rares à mesure que la station de référence est rapprochée de la station mobile, elles peuvent nuire aux observations. C'est pourquoi on cherche par la suite à les réduire en comprenant leur source.

#### 4.1.2 Le délai troposphérique

Au cours de l'estimation des phases théoriques obtenues aux stations mobiles et pour calculer une estimation de leur position, il est nécessaire de connaître au mieux la nature des couches traversées par le signal (i.e. l'épaisseur de l'ionosphère, son contenu en électrons, le contenu en vapeur d'eau de la troposphère ou la pression et la température de la troposphère, ...). Le programme Track estime un paramètre atmosphérique à chaque station, à chaque époque et pour chaque satellite. Composé d'un délai troposphérique « sec » comprenant l'effet des composants de la troposphère excepté l'eau et d'un délai troposphérique « humide » comprenant l'effet de la vapeur d'eau (modèle SAAS, Saastamoinen, 1972), le paramètre atmosphérique est un délai zénital projeté suivant l'angle d'élévation de chaque satellite grâce aux fonctions carte (« global mapping functions » ou GMF) qui tiennent compte de la latitude et de la longitude de la station ainsi que du jour de l'année pour modéliser au mieux l'épaisseur atmosphérique traversée. En effet, l'épaisseur et donc l'absorption de la troposphère étant plus importante aux faibles élévations, il est utile de tenir compte de la configuration dans laquelle on enregistre les signaux GPS. Les délais troposphériques a priori sont donc obtenus à partir d'un modèle saisonnier, celui de Herring de 1992 (MTT model) par défaut, ou bien celui de l'IERS par Boehm and Schuh de 2006 (Global Pressure and Temperature GPT model). Le paramètre atmosphérique n'est ensuite estimé à sa valeur finale (figure 7a) qu'à partir des données utilisées dans le calcul de Track, par minimisation des résidus finaux, au même titre que les trois composantes de la position des sites. C'est pourquoi on observe une grande variabilité de ce paramètre lorsque des stations de référence différentes sont utilisées (figure 7b). Ce paramètre est souvent mal

résolu. Cela a moins d'impact sur la précision des composantes horizontales car statistiquement il y a à tout moment autant de satellite au Nord et au Sud d'une station ainsi qu'à l'Est et à l'Ouest, et donc l'erreur sur le paramètre atmosphérique se compense. Ce n'est pas le cas pour la composante verticale, ce qui entraîne en général une moins bonne précision pour cette composante (figure 7a). Or le paramètre atmosphérique est utilisé dans le calcul de la position des

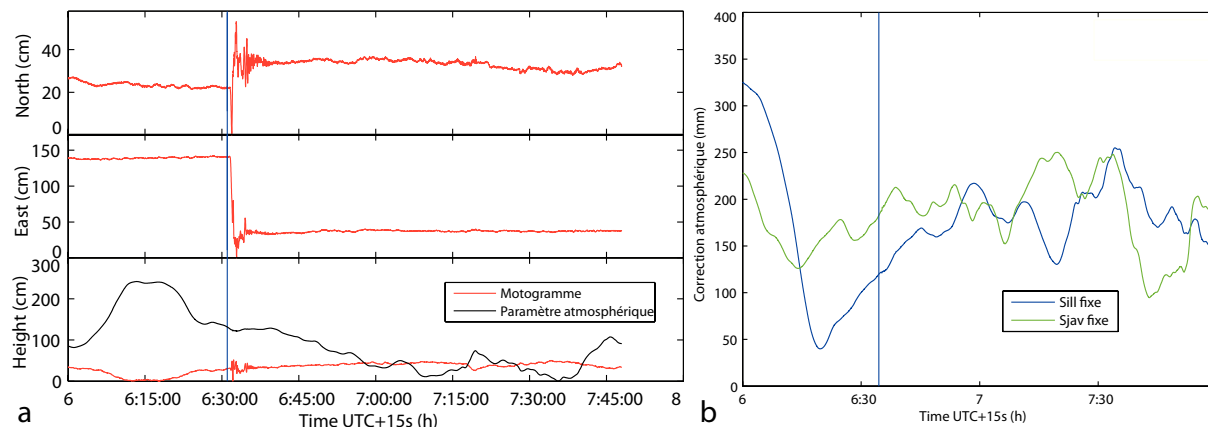


FIGURE 7 – a) Motogramme de Maul (en rouge) et son paramètre atmosphérique (en noir) le 27 février 2010. On voit que la composante verticale oscille à la même fréquence que le paramètre atmosphérique, et d'une amplitude plus élevée que les composantes horizontales, ce qui suggère montre que la composante verticale est plus influencée par la mauvaise résolution du paramètre atmosphérique (sinon, la station ne bougerait pas). b) Variation du paramètre atmosphérique de Cons le 27 février 2010 en fonction du choix de la station de référence dans le calcul de Track. Ce paramètre devrait être le même puisqu'il s'agit de la même station. Là encore, cela montre que ce paramètre est mal résolu.

stations a priori, puis dans le calcul de la position des stations finale. Il apparaît donc nécessaire d'approcher le plus justement possible ce paramètre. Le calcul statique de Gamit est dans ce cas très utile. Gamit calcule la position statique d'un réseau de stations GPS moyenné sur un jour de données, et donc estime un paramètre atmosphérique pour chaque station au cours du temps. Ce paramètre est théoriquement plus fiable que celui calculé par Track, entre autres parce que la position des stations est mieux connue (précision de l'ordre du millimètre). L'ajout, dans le calcul cinématique, du paramètre atmosphérique calculé par Gamit donne en effet de meilleurs résultats (figure ??b) : le résidu de la position de Cons pendant les 6 heures précédent le séisme (figure 8b) est divisé par deux sur la composante verticale et diminué d'un peu plus de 20% sur les composantes horizontales. Le paramètre atmosphérique de chaque station prédit par Gamit a donc été incorporé au calcul de Track pour chaque motogramme.

#### 4.1.3 La résolution des ambiguïtés

Le calcul d'un motogramme est fortement influencé par le programme de calcul utilisé en général, et par les conditions demandées par l'utilisateur en particulier. La figure 9 illustre un motogramme de la station Maul au jour 52 (21 février 2010) entre 2h et 3h du matin. La station a l'air de subir un déplacement vers le sud-est vers 2h30. Cependant, on remarque qu'à cette époque, plus de données ont été utilisées (9ème colonne en partant de la droite) tandis que le même nombre d'ambiguïtés restent non-résolues (3ème colonne en partant de la droite) et que le résidu RMS (10ème colonne en partant de la droite) est multiplié par 4. Ce déplacement est donc clairement un artefact. Le fichier Rinex de la station montre qu'à cette époque un satellite « se lève ». En se levant, le satellite a apporté de nouvelles informations mais aussi une nouvelle ambiguïté à résoudre. On peut donc supposer que l'ambiguïté résolue a mal été résolue, peut-être parce que les données de ce satellite à bas angle d'élévation ne sont pas bonnes. Comme

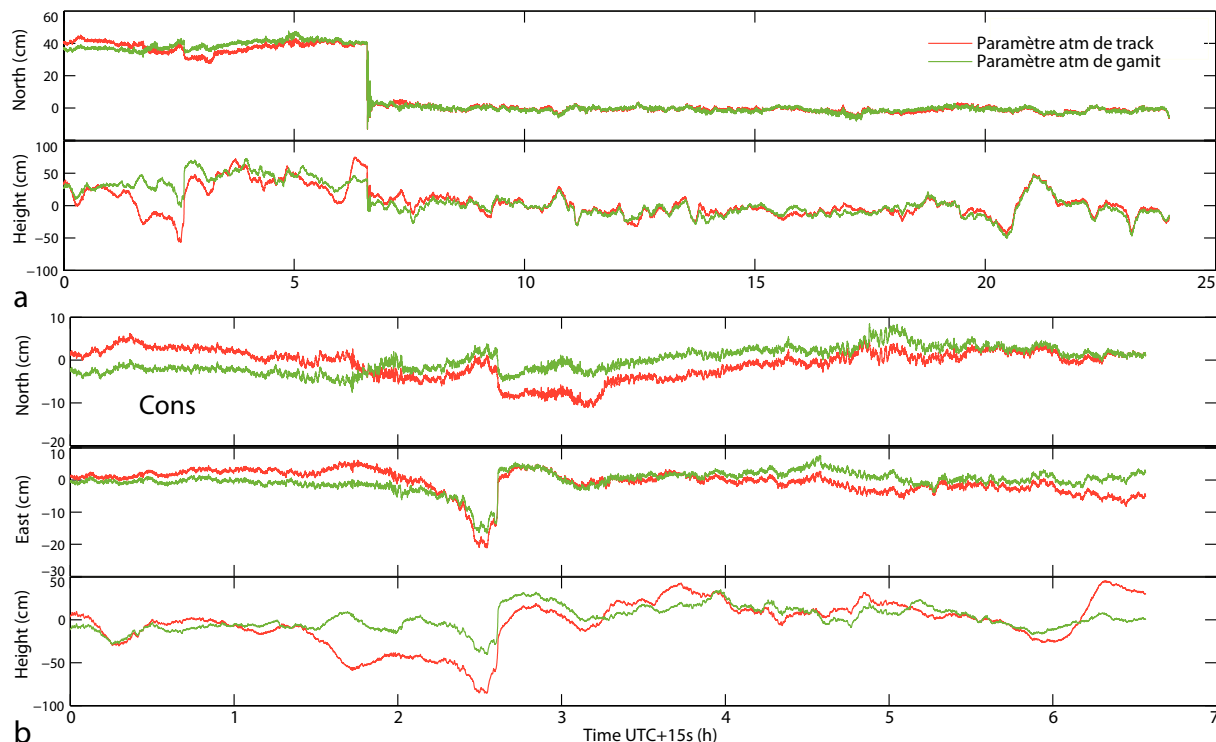


FIGURE 8 – a) Motogramme de Cons le 27 février 2010, estimé avec un paramètre atmosphérique calculé par Track (rouge) ou par Gamit (vert), sur une durée d'une journée, b) sur une durée de 6 heures avant le séisme. Avec le paramètre atmosphérique de Gamit, le résidu de la composante verticale est divisé par 2 et celui des composantes horizontales est diminué de 20%.

nous venons de le voir dans les parties précédentes, quelques critères de calcul Track sont modifiables par l'utilisateur pour améliorer le calcul d'un motogramme et ainsi enrayer ce genre d'artéfacts. Dans le calcul de Track, on peut contrôler l'algorithme de fixation des ambiguïtés.

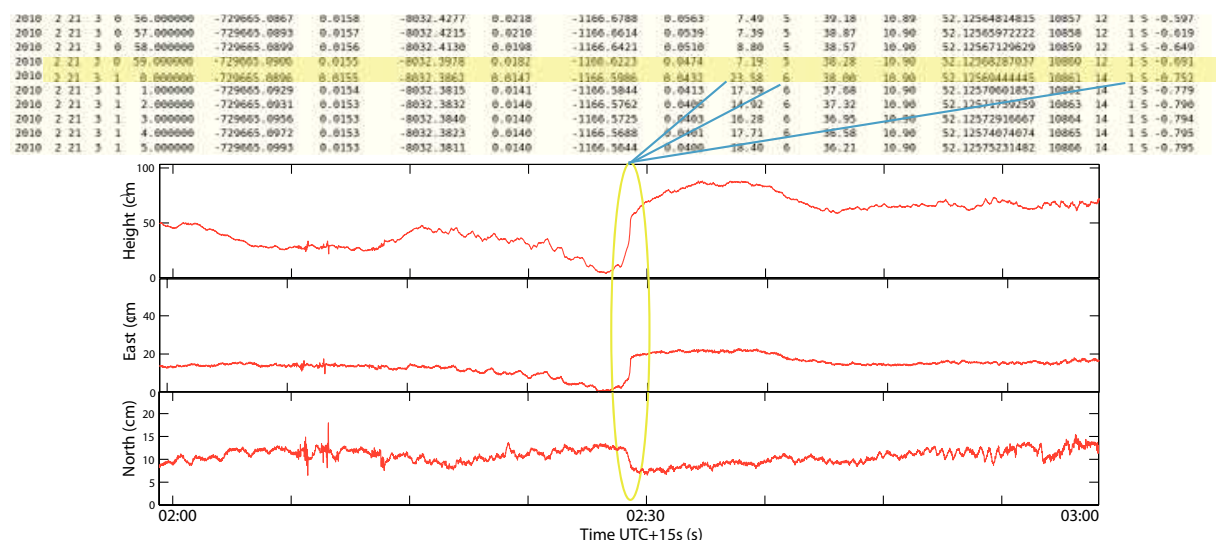


FIGURE 9 – Motogramme de Maul (Maule) le 21 février 2010 de 2h à 3h du matin, et extraits des fichiers de sortie du calcul Track associé. La troisième colonne en partant de la droite correspond au nombre d'ambiguïtés non-résolues à la fin du calcul, la dixième colonne le résidu RMS de la position.

La fréquence à laquelle les ambiguïtés sont estimées (à chaque époque ou toutes les 4 époques

par exemple), la limite de la déviation standard à laquelle une ambiguïté est considérée comme fixée, le poids donné à la déviation du délai ionosphérique de zéro, sont entre autres des critères malléables par l'utilisateur. Pour de longues baselines par exemple ( $>100\text{km}$ ), il est judicieux de diminuer le poids donné à la déviation du délai ionosphérique (par défaut ce poids est de 1). Le délai ionosphérique n'est pas bien connu lorsque les signaux traversent des épaisseurs de ionosphère très différentes (longues baselines), on peut donc l'autoriser à beaucoup varier. On peut aussi spécifier les caractéristiques de l'ionosphère. Le saut maximum autorisé dans la phase ionosphérique avant d'introduire un biais, l'épaisseur de l'ionosphère peuvent par exemple être modulés. En ajustant les critères listés plus haut à la configuration de l'enregistrement

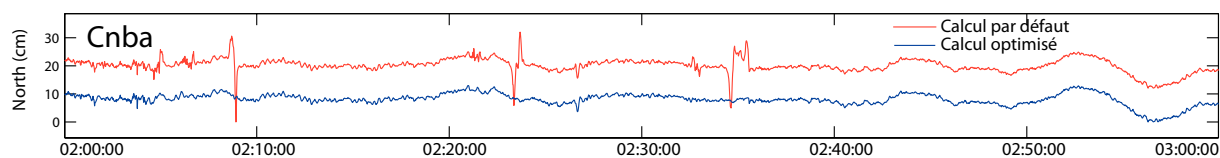


FIGURE 10 – Motogramme de Cnba (composante Nord) avec la station Emat comme référence. Ce motogramme a été calculé avec les critères de Track par défaut (en rouge) puis ces critères ont été ajustés à la configuration (en bleu). Le décalage d'offset entre les deux est uniquement dû à une différence de position minimum sur la durée de six heures à partir de minuit UTC.

(longueur de la baseline, qualité des fichiers Rinex, etc. . . ), on obtient de meilleurs motogrammes (figure 10). Pour le calcul des motogrammes du séisme de Maule en général, on a diminué le poids donné à la déviation du délai ionosphérique pour tenir compte de la longueur des baselines ( $>500\text{km}$ ) et on a durci les critères pour fixer les ambiguïtés pour améliorer la précision des motogrammes.

#### 4.1.4 Satellites

La position d'une station immobile peut osciller de manière fictive suivant : le nombre de satellites visibles à une station GPS, leur élévation ou la continuité des données provenant d'un satellite (lorsqu'un satellite se « couche » en dessous de l'angle d'élévation minimum accepté, Track n'utilise plus les données provenant de ce satellite). Cette configuration spécifique à chaque station s'appelle la géométrie des satellites. L'oscillation fictive d'une station reflète la dépendance

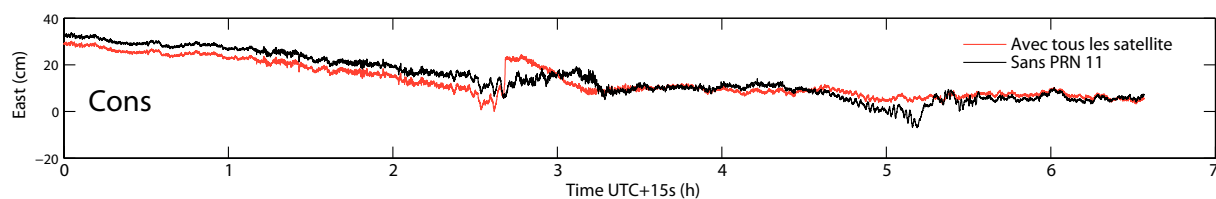


FIGURE 11 – Motogramme de Cons avec la station Sill comme référence, le 26 février 2010. Ce motogramme a été calculé avec les données de tous les satellites (en rouge), puis en éliminant du calcul les données apportées par le satellite 11 (en noir). D'après son fichier Rinex, ce satellite introduisait de mauvaises données aux environs de 3h du matin. En éliminant ces données, le déplacement fictif qu'elles impliquaient disparaît vers 3h du matin, mais un autre mouvement fictif apparaît vers 5h du matin, probablement parce que les données du satellite contraignaient bien la position de Cons à ce moment là.

du calcul cinématique de Track au nombre de données utilisées (nombre de satellites au-dessus de l'angle d'élévation minimum, mais aussi le nombre de phases enregistrées selon le type de code que le satellite peut décoder), à leur qualité et à leur provenance, c'est-à-dire à l'angle d'élévation du satellite émetteur, mais aussi à sa position dans l'espace par rapport aux autres stations et par rapport aux satellites. Une position est bien estimée lorsque les satellites sont

bien répartis autour des stations concernées par le calcul. Théoriquement, plus on a de données pour contraindre la position d'une station, meilleure en est son estimation. Cependant, si un satellite apporte de mauvaises données (i.e. s'il se trouve à un faible angle d'élévation durant tout le temps où il est visible, si ses données sont sujets aux effets multi-trajets, etc . . . ), cela peut détériorer l'estimation de la position des stations. Dans ce cas, l'utilisation des données d'un satellite dans le calcul de Track peut être interdite par l'utilisateur (figure 11). A Cons par exemple, on a retiré les informations provenant du satellite PRN 11. D'après son fichier Rinex, ce satellite introduisait un mouvement fictif de la station vers 3h du matin sur les trois composantes parce qu'il reste à un angle d'élévation très bas à cette période (il se lève et se couche très rapidement). En éliminant les données du satellite 11, on fait apparaître un autre mouvement fictif vers 5h du matin, probablement parce que ces données contraignaient bien la position de Cons à ce moment là. L'idéal serait d'associer chaque mouvement fictif des stations à de mauvaises données dans leur Rinex, de manière à les éliminer au cas par cas. Ce travail reste à faire pour améliorer encore plus finement la précision des motogrammes.

## 4.2 Post-processing : le filtrage

Au cours du post-processing des motogrammes, trois étapes inspirées de la méthode de Wang et al. (2007) ont été successivement suivies : un filtrage sidéral, un filtrage spatial et un filtrage spectral. Ces étapes sont décrites en détail ici.

### 4.2.1 Filtrage sidéral

Au cours des jours où les stations GPS ne bougent pas (i.e. pas lors d'un séisme), les variations fictives de la position des stations sont une combinaison d'un bruit haute-fréquence et des erreurs systématiques qui se répètent avec la géométrie des satellites (figure 12a), comme celle de l'effet multi-trajets par exemple (Larson et al., 2007). Si on arrive à déterminer précisément la période à laquelle se répètent ces relations géométriques à chaque site (nommées répétabilités géométriques ; leur période est connue pour être en moyenne 236s de moins qu'un jour julien), une correction (de premier ordre) de ces erreurs systématiques, dont l'effet multi-trajet, peut être appliquée à chacun des sites aux jours où un déplacement réel a lieu (i.e. Larson et al., 2007 ; Wang et al., 2007). Néanmoins, la démarche est plus compliquée qu'elle n'en a l'air. Reprenant la discussion de Choi et al. (2004), Larson et al. (2007) ont montré que chaque satellite suit une orbite distincte périodique qui varie elle-même d'environ 8s au cours d'une année. Or, comme chaque satellite contribue à la détermination de la position d'un site, l'estimation de la période de répétabilité géométrique d'un site n'est pas simple. D'autant que selon son élévation, chaque satellite ne contribue pas de la même manière à cette détermination (on dit que chaque satellite n'a pas le même « poids »). Les caractéristiques du bruit à chaque site ajoutent de surcroît une spécificité de la période de répétabilité géométrique au site. Il apparaît donc nécessaire de calculer une période de répétabilité pour chaque site, valable à un temps donné et pour chaque composante (Larson et al., 2007). On tente ici d'approcher la période de répétabilité moyenne pour chaque site et pour chaque composante : on procède à des cross-corrélations de chaque composante avec le signal du jour précédent, pour une gamme de répétabilité allant de 236 à 256 s de moins qu'un jour. Pour chaque site et chaque composante, on obtient donc une période de répétabilité (figure 12b) qui nous permet de corriger de l'effet multi-trajet et des autres perturbations qui se répètent avec la géométrie du satellite. Le filtrage sidéral améliore par exemple la précision du motogramme de Maul de 63% sur la composante Nord et de 66% sur la composante verticale (figure 13).

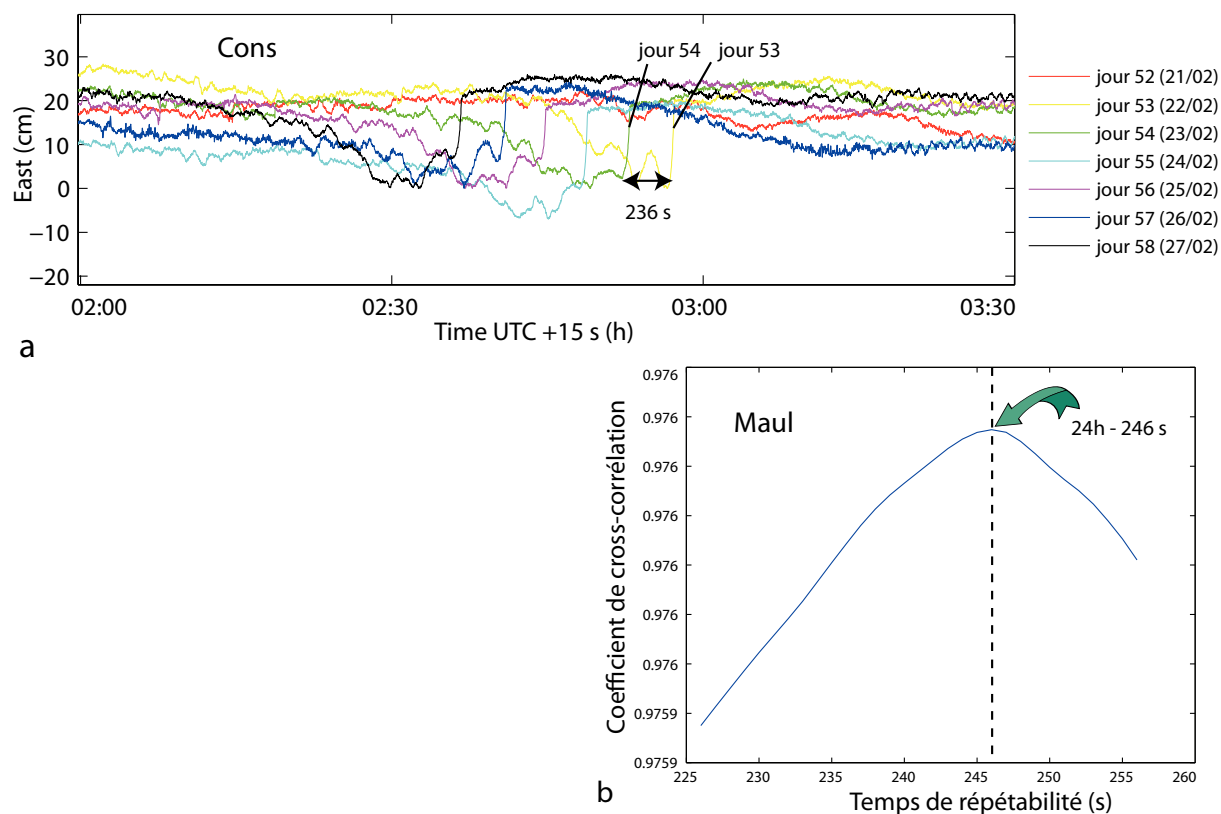


FIGURE 12 – Filtrage sidéral. a) Motogrammes de Cons une semaine avant le séisme, entre 2h et 3h30 du matin. La géométrie des satellite se répète chaque jour avec une période connue pour être environ 236 s de moins qu’un jour julien (période de répétabilité). On en voit ici une démonstration puisqu’une perturbation de la même forme se répète à Cons avec cette même période. b) Cross-correlation des signaux du 26 et 27 février 2010 à Maul, en fonction des périodes de répétabilité testées pour la composante Est. Le pic de corrélation se situe à 246s de moins qu’un jour julien, ce qui nous permet de corriger des perturbations qui se répètent à cette période avec la géométrie des satellites.

#### 4.2.2 Filtrage spatial : Stack

Si la station choisie comme référence n’est pas tout à fait immobile pendant la période où on calcule les motogrammes (i.e. elle ” voit ” passer les ondes de surface), son déplacement se retrouve dans tous les motogrammes. Elle est à une distance d’environ 847 km de la source, ce qui donne un temps d’arrivée des ondes de surface à 3 min 31 s pour des vitesses de 4 km/s. Les ondes de surface arrivent à 3 min 12 s, ce qui donne une vitesse moyenne de 4.4 km/s. C’est ce qui se produit à notre station de référence Sill. Pour enlever ce déplacement fictif, on procède à un stack des déplacements de 4 stations proches de Sill, que l’on enlève à chaque motogramme (figure 14). Les stations qui encerclent Sill voient en effet passer les ondes de surface à un temps similaire. On corrige donc les motogrammes de l’arrivée de ces ondes.

#### 4.2.3 Filtrage spectral

A la fin du calcul cinématique et des deux premières étapes du filtrage, le signal est censé être exempt de toutes les perturbations comprises si celles-ci ont bien été corrigées. Or il reste un bruit haute-fréquence dans les motogrammes, sans doute dû à la mesure GPS en elle-même. Genrich et Bock (2006) ont montré qu’avec une fréquence d’échantillonnage au-dessus de 0.5Hz, ce qui est le cas ici, le bruit observé à une station GPS est blanc. Quel qu’en soit la cause, il faut donc enlever le bruit haute-fréquence des motogrammes. On applique un filtre passe-bas ( $f_c=0.25\text{Hz}$ )



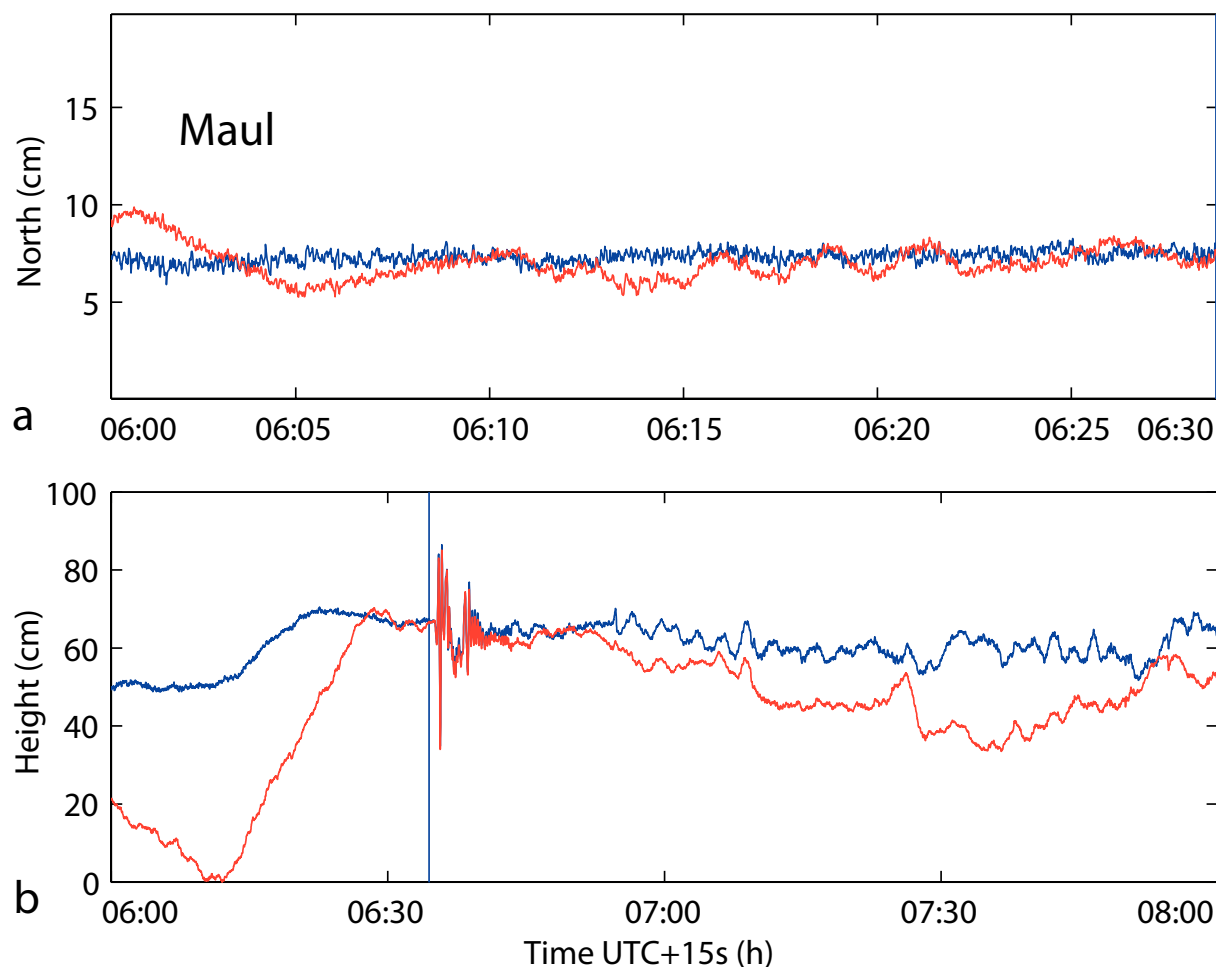


FIGURE 13 – Motogrammes de Maul le 27 février 2010 avant (rouge) et après (bleu) le filtrage sidéral. a) Composante Nord pendant 30 minutes avant le séisme. Le filtrage améliore la précision du motogramme sur 30 minutes de 63% (son résidu passe de 6.8 mm à 2.5 mm). b) Composante verticale pendant 2 heures au moment du séisme. Le filtrage sidéral améliore la précision du motogramme sur 2 heures de 66% (son résidu passe de 13.3 cm à 4.5 cm).

aux motogrammes de manière à éliminer le bruit haute-fréquence dû à l'enregistrement des mesures GPS. Le résultat des trois étapes de filtrage améliore la précision des motogrammes (sur 30 minutes avant le séisme, cette amélioration est de l'ordre de 30% sur toutes les composantes à Cons, de l'ordre de 67% sur toutes les composantes à Maul).

#### 4.3 Motogrammes haute-fréquence pour le séisme géant de Maule du 27 février 2010

A l'issue du calcul cinématique et du post-processing, on obtient de nouveaux motogrammes des stations GPS au cours du séisme de Maule de 2010 plus précis. La question importante de cette étude est de déterminer de combien est l'erreur maximale faite par ces motogrammes sur la position des stations au cours du temps (leur précision), mais aussi l'amplitude minimale des déplacements que l'on peut détecter grâce à ces motogrammes (leur résolution). Cette question est une question difficile, car la précision aussi bien que la résolution du GPS cinématique dépend de la période de temps que l'on regarde.

La précision des motogrammes dépend de l'intervalle ainsi que la période à laquelle elle est estimée. Avant le séisme, la précision de nos motogrammes sur un intervalle de 500 s avant

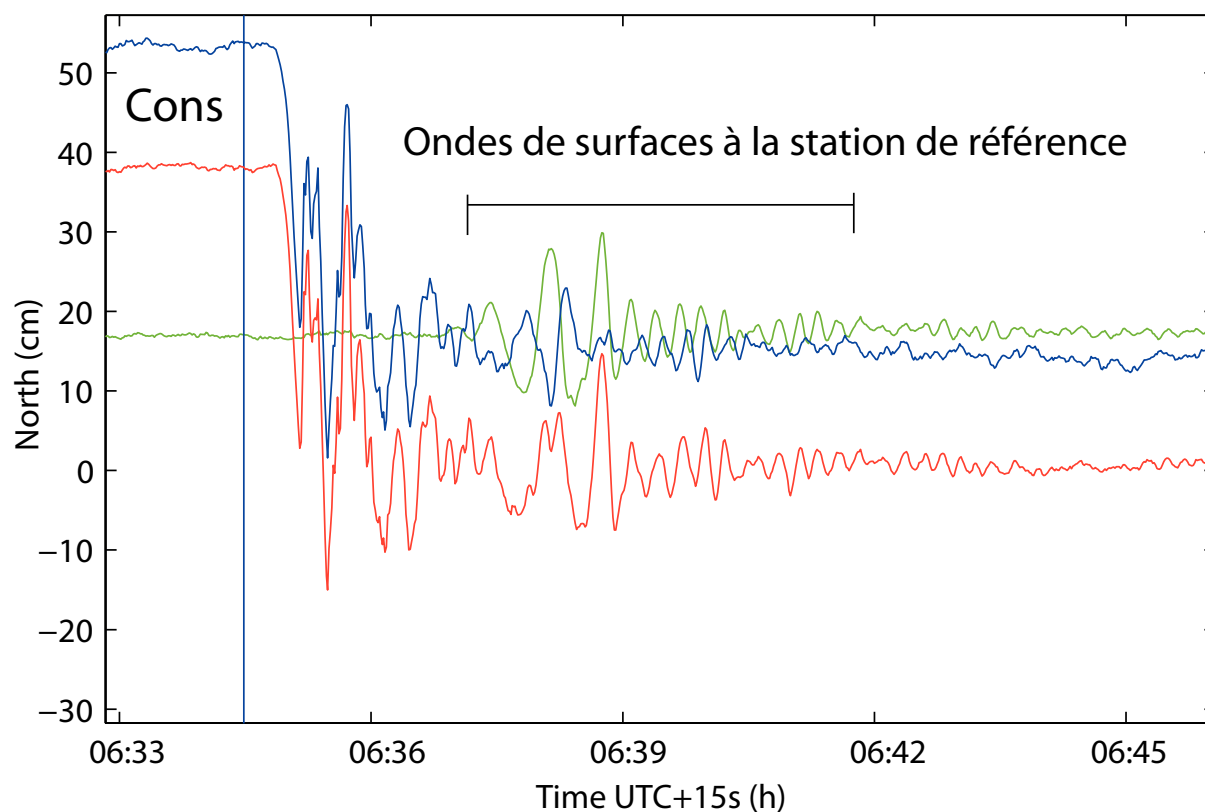


FIGURE 14 – Motogrammes de la composante Nord de Cons le 27 février 2010 avant (rouge) et après (bleu) le filtrage spatial, ainsi que le filtre utilisé (vert) (un offset a été retiré au motogramme rouge de manière à mieux lire la figure). Le filtre est un stack des motogrammes à 4 stations proches de Sill, dont l'arrivée des ondes de surface est similaire à leur arrivée à Sill.

le séisme est de 2.9, 7.2 et 7.3 mm pour la composante Nord, Est et verticale respectivement. Cette précision est meilleure que la précision estimée par Miyazaki et al. (2004a) dans leur étude du séisme Tokachi-Oki de 2003 est de 4.5, 8.4 et 15.3 mm pour une période de 500 s avant le séisme (pour les composantes Est, Nord et verticale respectivement). Ce qui montre que le GPS cinématique a une meilleure précision pour des courtes périodes et des hautes fréquences (relativement à la période d'échantillonnage à 1 Hz).

Tout comme la précision, la résolution des motogrammes, c'est-à-dire l'amplitude des déplacements détectables, dépend de la période des déplacements que l'on veut détecter. La résolution dépend aussi de l'amplitude et de la fréquence du bruit environnant : si le bruit environnant a une fréquence proche d'un déplacement et/ou une amplitude similaire, ce déplacement n'est pas détectable. Pour des petites périodes, les motogrammes calculés ici détectent des déplacements jusqu'à leur période d'échantillonnage de 1 s lorsque le bruit environnant est très faible (avant le séisme par exemple, lorsqu'il est inférieur à ). Wang et al. (2007) estiment que le GPS cinématique est en bon accord avec les données des sismogrammes (c'est-à-dire a une bonne précision) pendant une période de 200 s après le séisme (San Simeon Mw 6.5 de 2003) pour des fréquences inférieures à 0.5 Hz. Pour de grandes périodes, les motogrammes ne permettent pas de détecter de petits déplacements lorsque le bruit est de grande période aussi (après le séisme par exemple). Le déplacement des stations observé après le séisme ne permet pas de dire si les oscillations sont due à une dérive instrumentale ou à un signal post-sismique (figure 15). La plupart des déplacements avant et après le séisme, qui pouvaient être interprétés comme des signaux pré- et post-sismiques, disparaissent après optimisation du calcul de Track et après le post-processing. Avant le séisme, la grande majorité des motogrammes nous permettent de conclure qu'il n'y

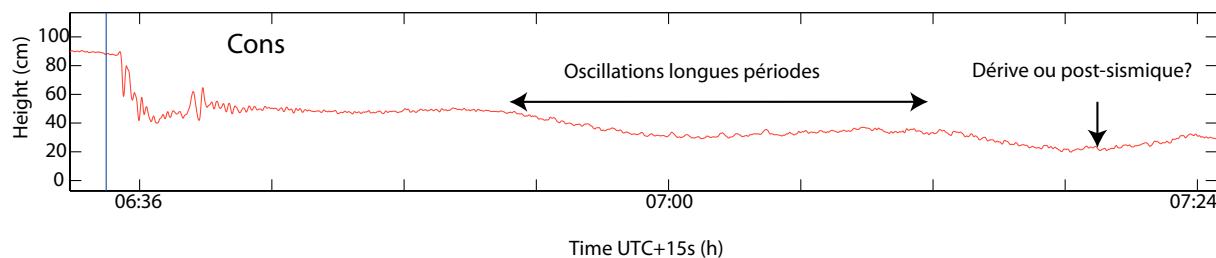


FIGURE 15 – Motogrammes de Cons après les étapes d’optimisation du calcul de Track et les étapes de filtrages, le 27 février 2010 après le séisme. Il y a beaucoup moins de bruit haute fréquence, mais les oscillations longues périodes de grande amplitude ne nous permettent pas de dire s’il y a un signal post-sismique ou simplement une dérive instrumentale.

a pas eu de signal précurseur. Après le séisme, les motogrammes sont moins stables, ce qui ne nous permet pas d’en déduire des informations fiables sur le comportement post-sismique des stations. Ce phénomène est sans doute dû au fait que le calcul de Track est perturbé par le contraste entre un déplacement très faible avant le séisme (dû au bruit de mesure par exemple) et un déplacement très important au moment du séisme. Le GPS statique donne de meilleurs résultats sur le signal post-sismique (Vigny et al., 2011).

Le déplacement statique des stations mesuré sur les motogrammes ne donne pas tout à fait le même résultat que celui mesuré par les calculs de positionnement statique. Dans le cadre d’un calcul statique, les données sont moyennées sur des temps beaucoup plus longs, ce qui paraît plus adapté à l’analyse du signal post-sismique. Cependant le déplacement mesuré par le calcul statique est un déplacement cumulé du déplacement des stations qui a lieu entre la dernière mesure prise avant le séisme et la première mesure prise après le séisme, qui peut donc contenir un signal post-sismique. Le GPS cinématique pourrait permettre de mieux distinguer les déplacements cosismique et post-sismique des stations pendant un séisme si la technique est encore améliorée (Miyazaki et al., 2004a ; Emore et al., 2007). Le GPS cinématique est pertinent sur des échelles de temps courtes et pour une gamme de fréquence plus haute que celle repérable par le GPS statique (cf partie 5). Ces nouveaux motogrammes confirment le potentiel du GPS cinématique à apporter de nouvelles informations pour l’étude de grands séismes.

## 5 Discussion

### 5.1 Application du GPS haute fréquence à l’étude de la rupture sismique : cadre pour de nouvelles études

L’enregistrement des données GPS à la fréquence de 1 Hz (1 donnée par seconde) par le réseau Chilien a permis de calculer les positions cinématiques des stations au cours du séisme géant de Maule Mw 8.8 de 2010 (figure 17). Ces données ont déjà été utilisées pour la relocalisation de l’épicentre (Vigny et al., 2011), en complément des données sismologiques et de GPS statique. Les mesures de déplacements statiques à partir des motogrammes (tableau 16) vont dans le même sens que les mesures de GPS statique, mais diffèrent parfois jusqu’à un peu moins de 30 cm (à Cons), surtout pour les stations enregistrant un déplacement cosismique important. Cette différence peut être due à un rapide after-slip après le séisme, ou bien à une perturbation du calcul GPS par les déplacements cosismiques importants. Cela confirme que le GPS cinématique est plus pertinent sur de plus courtes période de temps. Cependant, il est important de définir le cadre dans lequel les données GPS cinématiques apportent des informations pour l’étude de la rupture sismique.

Pour enregistrer les mouvements du sol par le GPS, il faut tout d’abord que le sol à l’endroit où

	Vigny et al. 2011			Cette étude		
	déplacement (mm)			déplacement (mm)		
	Long	Lat	Vertical	Long	Lat	Vertical
<b>CMBA</b>	-7	7	-1	-6	-2	2
<b>CNBA</b>	-2	9	-3	15	4	-12
<b>CONS</b>	-4696	-385	-367	-4988	-380	-350
<b>CRZL</b>	1	8	7	11	13	30
<b>MAUL</b>	-1047	126	5	-1061	113	-30
<b>OVLL</b>	4	10	-4	1,5	1,7	20
<b>RCSD</b>	-712	-345	-160	-700	-335	-135
<b>ROBL</b>	-169	-113	-38	-140	-113	-18
<b>SJAV</b>	-2340	277	-451	-2435	269	-440

FIGURE 16 – Tableau des déplacements statiques de quelques stations GPS après le séisme de Maule, calculés par Vigny et al. (2011) et par cette étude (positions moyennées sur 10 minutes avant le séisme et après le passage des ondes sismiques). Les mesures montrent la même tendance, mais différent. Bien que cette différence ne représente qu'environ 6% du déplacement cosismique, elle s'élève à un peu moins de 30 cm à Cons et 9 cm à Sjav, ce qui est beaucoup pour une station GPS. Les stations concernées enregistrent un fort déplacement cosismique. Il est possible que cette différence représente un rapide after-slip, mais cette surestimation des déplacements statiques est plus probablement dû au calcul GPS, qui pourrait ne pas avoir prévu de déplacements aussi grands.

est située la station GPS bouge, et ce d'un offset supérieur à la résolution des mesures (dans le cas des mesures 1Hz, la résolution est estimée à quelques cm pour les composantes horizontales et quelques dizaines de cm pour la composante verticale). Cela signifie à la fois que la station doit être suffisamment proche de l'épicentre du séisme, mais aussi que la magnitude du séisme doit être suffisamment élevée pour déclencher effectivement des mouvements du sol détectables. De manière intuitive, plus une station est proche de l'épicentre, plus les déplacements enregistrés sont grands par rapport à la résolution des mesures GPS, et donc plus ces déplacements sont détectables. De la même manière, plus la magnitude d'un séisme est grande, plus il a pu déclencher de grands déplacements par rapport à la résolution des mesures, et donc plus ces déplacements sont détectables. Dans le cas de Maule, la fosse de subduction étant proche de la côte, les stations sont à une distance proche (Cons, Sjav, Conz, Maul) et intermédiaire (Bton, Ovll, Cnba, Cmba, Pedr, ...) par rapport à la longueur de la faille (de l'ordre de 300 km). Par ailleurs l'importante magnitude du séisme (Mw 8.8) a engendré des déplacements largement détectables par l'ensemble des stations par rapport à leur résolution. Le séisme géant de Maule a donc fourni un cadre idéal à l'étude du GPS cinématique haute-fréquence.

Dans la mesure où la majorité des séismes ne sont pas d'une aussi grande magnitude et se produisent parfois loin des côtes, on peut se demander à partir de quelle magnitude et de quelle distance l'outil GPS cinématique haute-fréquence est encore pertinent pour répondre à des questions de sismologie. A une distance de 50 à 70 km de l'épicentre, Wang et al. (2007) obtiennent des résultats de GPS cinématique en bon accord avec les sismogrammes pour un séisme de magnitude Mw 6.5 (San Simeon de 2003). Ils parviennent à détecter un déplacement de 1 cm sur une période de 450 s de la composante Est d'une station située à 50 km de l'épicentre. Pour un séisme de magnitude Mw 7.9 (faille de Denali 2002), c'est à des distances d'environ 140 km de l'épicentre que Larson et al. (2003) enregistrent des déplacements GPS cinématiques de 2 cm sur une fenêtre de 250 s de la composante Est en accord avec les sismogrammes. Dans cette étude, les ondes de surface sont même détectées à des distances de 750 à 3800 km de l'épicentre par le GPS cinématique. Pour un séisme de magnitude comparable (Mw 7.9-8.3 2003 Tokachi-Oki), mais à une distance plus faible (inférieure à 100 km), Miyazaki et al. (2004a) observent un

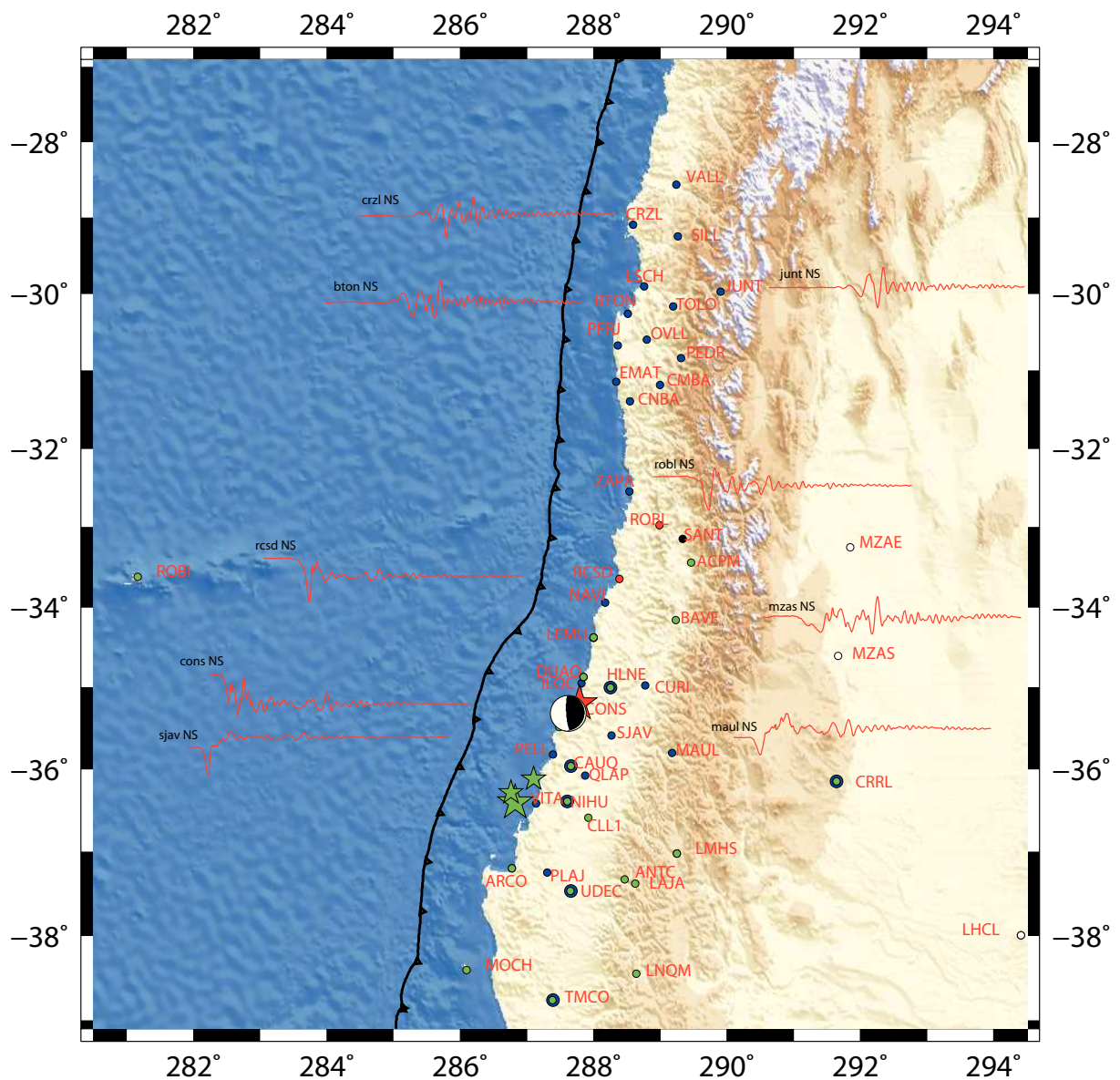


FIGURE 17 – Carte de la composante Nord de quelques motogrammes (les premières 600s après le séisme). Les deux petites étoiles vertes montrent l'épicentre de l'USGS et du SSN pour le séisme de Maule et la grosse étoile verte montre l'épicentre "basse fréquence" calculée par Vigny et al. (2011) grâce aux données GPS. La grosse étoile rouge montre l'épicentre de l'USGS pour la réplique de mars 2012 ; le mécanisme au foyer de ce séisme est aussi tracé. Le code de couleur des points marquant les stations est le même que celui de la figure 5 par Christophe Vigny.

déplacement d'environ 12 cm sur 150 s de la composante Nord grâce au GPS cinématique. Pour le séisme Mw 8.8 Maule de 2010, on peut encore détecter des déplacements de 1 cm d'amplitude sur une fenêtre de 600 s de la composante Nord à 800 km de l'épicentre (Junt). Mais la résolution de la composante verticale ne permet pas en général de détecter de tels déplacements. Des oscillations fictives de moins de 2 minutes perdurent sur les motogrammes après le filtrage. Il est évident que le calcul de Track ainsi que les trois étapes de filtrage n'éliminent pas l'intégralité des sources de perturbation des motogrammes. On peut imaginer par exemple que si l'orbite d'un satellite n'est pas bien contrainte a priori et qu'il est dévié par les anomalies du potentiel de gravité terrestre, sa déviation de l'orbite théorique se retrouve directement sur la position

des stations (en sens opposé). La vitesse d'un satellite étant d'environ 230 km/minute (166000 km en 12h), il parcourt environ 460 km en 2 minutes, ce qui correspond à environ au degré 100 du potentiel. Pour étudier si ces oscillations fictives de période de moins de 2 minutes sont dues à des anomalies du potentiel de gravité, il faut donc analyser l'amplitude de ces anomalies à de hauts degrés (36).

On a vu tout à l'heure que le GPS détecte mieux les déplacements lorsque les stations sont proches de la source. A l'inverse, si les stations sont très proches de l'épicentre (moins de 10 km), un problème de sous-échantillonnage peut avoir lieu. Le phénomène d'aliasing "replie" les fréquences supérieures à la fréquence de Nyquist sur les basses fréquences, ce qui détériore l'information. Ce phénomène a été évoqué pour souligner que l'échantillonnage à 1 Hz n'est pas un bon outil pour l'étude d'un séisme de magnitude de 6 à 7.4 à des stations très proches de l'épicentre (3 km), préconisant un échantillonnage supérieur à 10 Hz (Smalley, 2009). Néanmoins à des distances intermédiaires, la terre joue le rôle d'un filtre passe-bas, éliminant les hautes-fréquences susceptibles d'être sous-échantillonnées. Dans le cas de Maule, les stations ne sont pas aussi proches que dans l'étude de Smalley. On peut donc supposer que le phénomène d'aliasing est mineur à nos stations, probablement même en dessous de la résolution du GPS cinématique dans la plupart des cas. Par ailleurs, l'importance de l'aliasing dépend de où se situe le pic d'énergie du spectre des stations. Dans le cas de Maule, lorsque le séisme se propage vers le Nord et devient plus grand, le pic d'énergie de son spectre se déplace vers les basses fréquences. Les hautes-fréquences deviennent alors une part moins importante du spectre (figure 18).

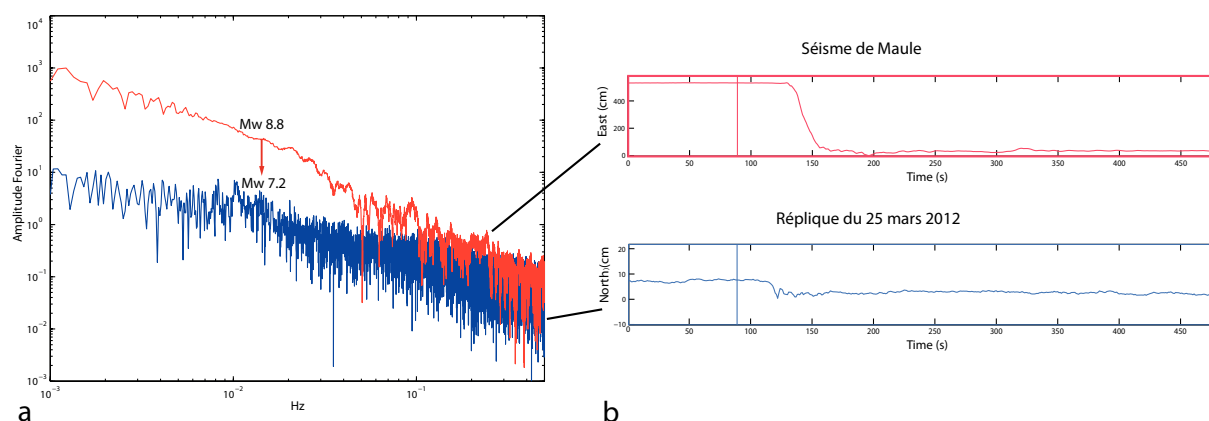


FIGURE 18 – a) Spectres du séisme de Maule (bleu) et de la réplique du 25 mars 2012 (rouge) à partir de 2 heures de données, respectivement sur la composante Est et sur la composante Nord de Cons. Le pic d'énergie du spectre de Maule s'est déplacé vers les basses fréquences lorsque la rupture s'est propagée vers le Nord et que le séisme est devenu grand. Les hautes-fréquences représentent donc une part moins importante du spectre. Lors de la réplique d'un ordre de magnitude plus faible que le séisme de Maule, le GPS cinématique enregistre moins de basses-fréquences. Le signal de champ proche est plus atténué pour la réplique, parce que le séisme est de plus faible magnitude et sans doute plus profond. b) Déplacement EW de Cons pendant le séisme de Maule (bleu) et déplacement NS de Cons pendant la réplique du 25 mars 2012 (rouge).

## 5.2 La réplique du 25 mars 2012

Le 25 mars 2012 s'est produit un séisme de magnitude Mw 7.2 à environ 34 km de Cons et à proximité de l'épicentre du séisme de Maule (environ 16 km avec la localisation de Vigny et al. (2011) pour Maule et celle de l'USGS pour la réplique). C'est l'occasion rêvée de tester l'aptitude du GPS cinématique à enregistrer les déplacements associés à un séisme de plus faible magnitude. Le GPS cinématique enregistre moins de basses-fréquences pour ce séisme d'environ un ordre de

magnitude plus faible que le séisme de Maule (figure 18). Le séisme entraîne un déplacement des

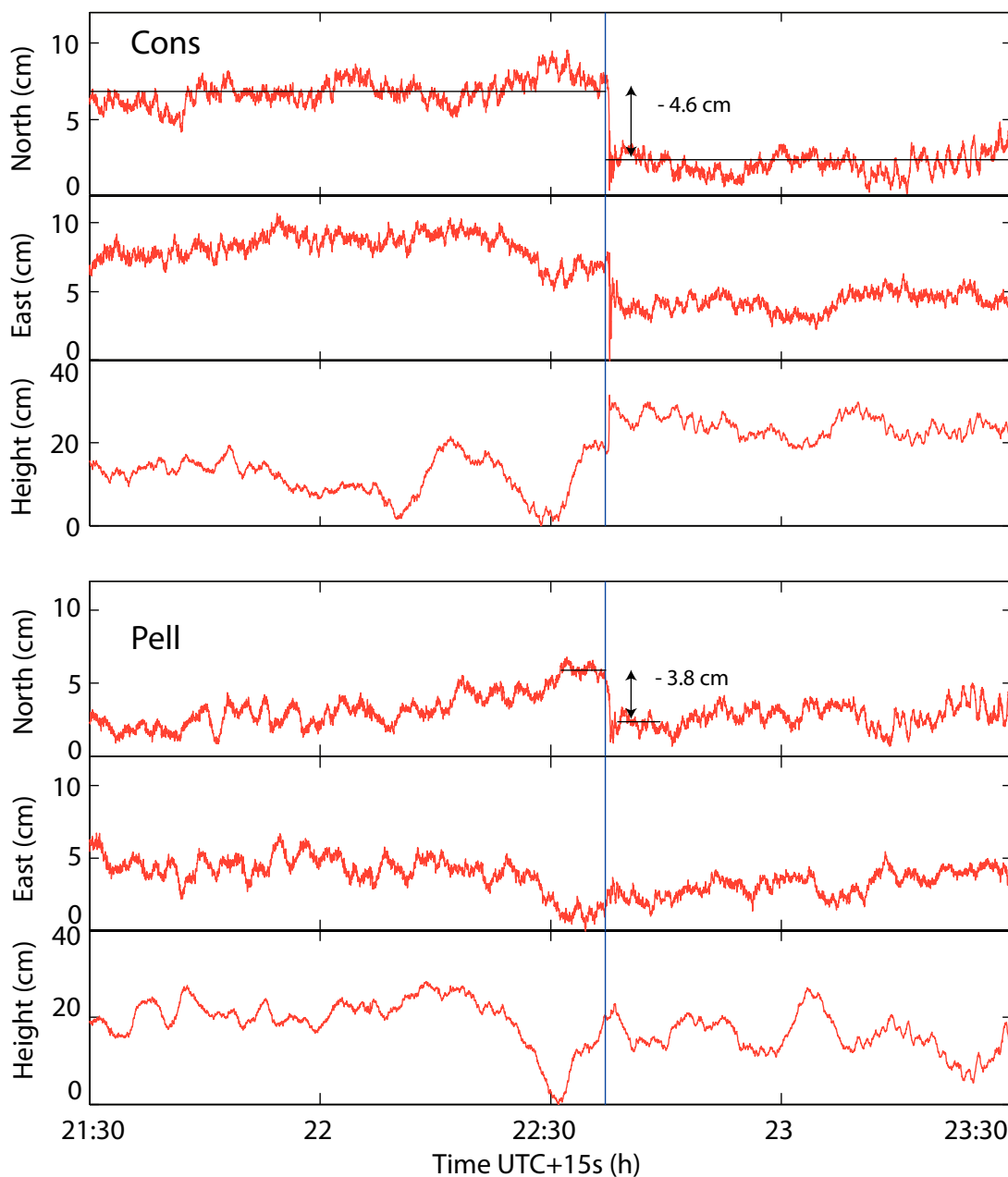


FIGURE 19 – Motogrammes des stations Cons et Pell pendant la réplique du 25 mars 2012. Le trait bleu indique l'heure du séisme (22 :37 :06). On détecte clairement un déplacement vers le Sud à ces deux stations car son amplitude est plus grande que celle du bruit environnant. On mesure un déplacement statique à Cons de -4.7, -3.9 et +11.9 cm (Nord, Est, vertical) si on moyenne la position de la station sur une heure avant et après le séisme (traits noirs horizontaux), et de -5.0, -2.8 et +10.3 cm si on la moyenne sur 5 min avant et 5 min après (en enlevant 60 s après le séisme pour ne pas prendre en compte l'arrivée des ondes de surface). A Pell, on mesure un déplacement statique de -3.8 cm (Nord) si on moyenne la position sur 5 min avant et 5 min après le séisme (traits noirs horizontaux). Sur les composantes Est de Pell et verticale de Cons et Pell, les déplacements sont difficilement détectable vu le bruit. Sur la composante verticale de Cons, le caractère instantané du déplacement nous permet d'estimer un déplacement cosismique d'environ 10 cm.

stations les plus proches de l'ordre du centimètre sur les composantes horizontales (figure 19), ce qui est dans la limite de résolution par rapport au bruit environnant qui a une amplitude

moyenne de 2 cm pour des périodes de 10 s au cours des 2 heures précédant le séisme. Le séisme est détectable par le GPS cinématique aux sites de Cons, Pell et Iloc, mais pas à une distance de plus de 150 km. Le motogramme de Cons pour ce séisme montre un déplacement vers le Sud de 4.6 cm, de 3.8 cm vers le Sud à Pell (figure 19) et presque aucun déplacement à Iloc. Par contre, le comportement vertical de la station Cons est frappant. Son déplacement cosismique estimé à 10 cm vers le haut montre que la station est "montée", contrairement à son déplacement vertical de 35 cm vers le bas lors du séisme de Maule de 2010, où la station était "descendue". Cette simple constatation suggère que l'épicentre du séisme du 25 mars 2012 s'est produit plus proche des côtes et donc plus profond que le séisme de 2010 et que celui proposé par l'USGS. Le déplacement vertical de très faible amplitude, quasi-indétectable, de la station Pell et des autres stations serait en accord avec un épiceutre profond pour ce séisme. La forte atténuation du signal de champ proche, visible sur le spectre de Cons, pourrait aussi valider cette hypothèse (figure 18). Bien qu'à la limite de sa résolution, le GPS cinématique enregistre encore des déplacements associés à un séisme de magnitude Mw 7.2 à des distances inférieures à 150 km, et permet encore d'apporter des informations intéressantes. On peut donc en conclure que le GPS haute fréquence permet d'étudier des séismes de magnitude supérieure à 7 dans les conditions de la zone de subduction du Chili, mais on est à la limite de la résolution car de tels séismes sont bien enregistrés uniquement par des stations situées à moins de 50 km de la source. Il faudrait une maille beaucoup plus dense de capteurs pour bien enregistrer ces événements, ou une meilleure résolution des motogrammes.

## 6 Conclusion

L'étude des données de GPS haute fréquence enregistrées lors du séisme de Maule de 2010 a permis d'éliminer un certain nombre de perturbations durant le traitement des données par le programme Track. L'utilisation d'un paramètre atmosphérique défini par les données de GPS statique permet par exemple de réduire par deux les résidus de la composante verticale sur une période de 6 heures avant le séisme. L'étape de filtrage (sidéral, spatial et spectral) permet ensuite d'obtenir une précision de 2.9, 7.2 et 7.3 mm pour les composantes Nord, Est et verticale des stations proches de l'épicentre. La précision des motogrammes a ainsi été améliorée de 30% (Cons) à 67% (Maul) sur une fenêtre de 30 minutes avant le séisme. Cette précision nous autorise à mesurer des déplacements cosismiques importants proche de l'épicentre, et jusqu'à une amplitude de 1 cm à 800 km de l'épicentre sur une fenêtre de 600 s. L'analyse du signal précédant le séisme de Maule suggère qu'il n'y a pas eu de déplacement précurseur détectable par les motogrammes. A l'inverse, l'analyse des motogrammes après le séisme ne permet pas de conclure sur l'existence ou non d'un signal post-sismique. Le calcul GPS statique donne de meilleurs résultats pour l'analyse du signal post-sismique, et paraît plus approprié dans la mesure où il s'intéresse à des temps beaucoup plus longs. Le GPS cinématique permet d'apporter de nouvelles informations pour l'étude de la rupture sismique des séismes de grande magnitude sur des échelles de temps courtes (supérieures à 20 s). L'enregistrement d'un séisme de magnitude Mw 7.2 (réplique du 25 mars 2012) sur les motogrammes donne une idée de la limite du GPS cinématique pour les séismes de plus faible magnitude. Néanmoins, les observations cinématiques mènent encore à des informations intéressantes. La méthode de tracé des positions cinématiques de stations GPS à haute fréquence a donc un avenir, et mérite de faire l'objet de prochaines recherches.

## Remerciements

Je remercie chaleureusement mes directeurs de stage Christophe Vigny et Raul Madariaga de m'avoir accueilli et transmis, au delà des connaissances scientifiques certaines, la précision, la



subtilité et la passion pour la géophysique. Je tiens à remercier tout particulièrement Sébastien Allgeyer et Sergio Ruiz, sans qui la maîtrise de l'outil informatique et des notions de sismologie auraient été un immense mur à franchir. Je remercie également Marianne Métois et toute l'équipe du Laboratoire de géologie de l'ENS, qui m'ont offert un environnement de travail particulièrement agréable. Je salue enfin Aurélien Nicolas et Benjamin Sauter, aux cotés desquels il est vraiment bon d'être.

## Références

- Z. Altamimi, X. Collilieux, J. Legrand, B. Garayt, and C. Boucher. ITRF2005 : a new release of the international terrestrial reference frame based on time series of station positions and earth orientation parameters. *Journal of Geophysical Research*, 112(B9), September 2007. ISSN 0148-0227. doi : 10.1029/2007JB004949.
- S. Beck, S. Barrientos, E. Kausel, and M. Reyes. Source characteristics of historic earthquakes along the central chile subduction askew et alzone. *Journal of South American Earth Sciences*, 11(2) :115–129, 1998.
- Kyuhong Choi. Modified sidereal filtering : Implications for high-rate GPS positioning. *Geophysical Research Letters*, 31(22), 2004. ISSN 0094-8276. doi : 10.1029/2004GL021621.
- C. Darwin. Journal os researches into the national history and geology of the countries visited during the voyage of the h.m.s. beagle round the world. *John Murray, London*, 29(11) :12–1, 1876.
- G. L. Emore, J. S. Haase, K. Choi, K. M. Larson, and A. Yamagiwa. Recovering seismic displacements through combined use of 1-Hz GPS and Strong-Motion accelerometers. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97(2) :357–378, April 2007. ISSN 0037-1106. doi : 10.1785/0120060153.
- G. Hayes. Finite fault model. updated result of the feb 27, 2010 mw8.8 maule, chile earthquake. URL [http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2010/us2010tfan/finite\\_fault.php](http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2010/us2010tfan/finite_fault.php).
- C. Ji, K.M. Larson, Y. Tan, K.W. Hudnut, and K. Choi. Slip history of the 2003 san simeon earthquake constrained by combining 1-hz gps, strong motion, and teleseismic data. *Geophysical research letters*, 31(17) :Art–No, 2004.
- R. King, Masters E., C. Rizos, A. Stolz, and J. Collins. *Surveying with GPS, Monograph 9, School of Surveying*. University of New South Wales, Kensington., 1985.
- R. Kobayashi, S. Miyazaki, and K. Koketsu. Source processes of the 2005 west off fukuoka prefecture earthquake and its largest aftershock inferred from strong motion and 1-hz gps data. *Earth, Planets, and Space*, 58(1) :57–62, 2006.
- J. Langbein, R. Borchardt, D. Dreger, J. Fletcher, J. L. Hardebeck, M. Hellweg, C. Ji, M. Johnston, J. R. Murray, R. Nadeau, M. J. Rymer, and J. A. Treiman. Preliminary report on the 28 september 2004, m 6.0 parkfield, california earthquake. *Seismological Research Letters*, 76(1) :10–26, January 2005. doi : 10.1785/gssrl.76.1.10.
- K.M. Larson, P. Bodin, and J. Gomberg. Using 1-hz gps data to measure deformations caused by the denali fault earthquake. *Science*, 300(5624) :1421–1424, 2003.
- K.M. Larson, A. Bilich, and P. Axelrad. Improving the precision of high-rate gps. *J. Geophys. Res*, 112 :B05422, 2007.

- C. Lomnitz. Grandes terremotos y tsunamis en Chile durante el periodo 1535–1955. *Geofis. Panamericana*, 1 :151–178, 1971.
- S. Miyazaki, K.M. Larson, K. Choi, K. Hikima, K. Koketsu, P. Bodin, J. Haase, G. Emore, and A. Yamagiwa. Modeling the rupture process of the 2003 september 25 Tokachi-Oki (Hokkaido) earthquake using 1-hz gps data. *Geophys. Res. Lett.*, 31(21) :L21603, 2004a.
- S. Miyazaki, P. Segall, J. Fukuda, and T. Kato. Space time distribution of afterslip following the 2003 Tokachi-Oki earthquake : Implications for variations in fault zone frictional properties. *Geophysical Research Letters*, 31 :4 PP., March 2004b.
- Shin'ichi Miyazaki. Modeling the rupture process of the 2003 september 25 Tokachi-Oki (Hokkaido) earthquake using 1-Hz GPS data. *Geophysical Research Letters*, 31(21), 2004. ISSN 0094-8276. doi : 10.1029/2004GL021457.
- M. Métois, A. Socquet, and C. Vigny. Interseismic coupling, segmentation and mechanical behavior of the central Chile subduction zone. *Journal of Geophysical Research*, 117 :16 PP., March 2012.
- JC Ruegg, J. Campos, R. Madariaga, E. Kausel, JB De Chabalier, R. Armijo, D. Dimitrov, I. Georgiev, and S. Barrientos. Interseismic strain accumulation in south central Chile from gps measurements, 1996-1999. *Geophysical research letters*, 29(11) :12–1, 2002.
- J.C. Ruegg, A. Rudloff, C. Vigny, R. Madariaga, J.B. de Chabalier, J. Campos, E. Kausel, S. Barrientos, and D. Dimitrov. Interseismic strain accumulation measured by GPS in the seismic gap between Constitución and Concepción in Chile. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 175(1-2) :78–85, June 2009. ISSN 00319201. doi : 10.1016/j.pepi.2008.02.015.
- Madariaga R. Maximiliano A. Rodolfo Saragoni G. Landeri M. Vigny C. Ruiz, S. and J. Campos. Short period rupture process of the 2010 Mw 8.8 Maule earthquake in Chile. *EERI*, in press.
- R. Smalley Jr. High-rate gps : How high do we need to go? *Seismological Research Letters*, 80 (6) :1054–1061, 2009.
- C. Vigny, A. Socquet, S. Peyrat, J.-C. Ruegg, M. Métois, R. Madariaga, S. Morvan, M. Lancieri, R. Lacassin, J. Campos, D. Carrizo, M. Bejar-Pizarro, S. Barrientos, R. Armijo, C. Aranda, M.-C. Valderas-Bermejo, I. Ortega, F. Bondoux, S. Baize, H. Lyon-Caen, A. Pavez, J. P. Vilotte, M. Bevis, B. Brooks, R. Smalley, H. Parra, J.-C. Baez, M. Blanco, S. Cimbaro, and E. Kendrick. The 2010 Mw 8.8 Maule Mega-Thrust earthquake of central Chile, monitored by GPS. *Science*, 2011. doi : 10.1126/science.1204132.
- G.Q. Wang, D.M. Boore, G. Tang, and X. Zhou. Comparisons of ground motions from collocated and closely spaced one-sample-per-second global positioning system and accelerograph recordings of the 2003 Mw 6.5 San Simeon, California, earthquake in the Parkfield region. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97(1B) :76–90, 2007.