



Mémoire de soutenance de Diplôme d'Ingénieur INSA
Spécialité TOPOGRAPHIE

**Géodésie multi-technique pour la
surveillance haute fréquence de
glissements de terrains**

Présenté le **23 Septembre 2015** par **Pierre BOETZLE**

EOST : Ecole et Observatoire des Sciences la Terre
5 rue Descartes
67084 STRASBOURG

Directeur de PFE :

M. MALET Jean-Philippe
Chargé de recherche
CNRS / IPGS

Correcteur :

M. FERHAT Gilbert
Maître de conférences
INSA / IPGS

Avant-propos

Ce projet de fin d'étude au sein de l'EOST et de l'IPGS m'a permis de me confronter au monde de la recherche et de côtoyer des chercheurs, des enseignants-chercheurs, des post-doctorants, des thésards et des ingénieurs de recherche... un monde particulier et intéressant à mes yeux.

Au cours de ce projet, j'ai été amené à développer un programme informatique « d'envergure », qui a nécessité une certaine organisation et qui m'a permis de découvrir un nouveau langage, le Bash. J'ai aussi eu à me familiariser avec Linux et j'ai ainsi pu avoir un aperçu des potentialités de ce système.

Les missions sur le terrain m'ont amené à découvrir des techniques de mesure géophysique qui m'étaient jusqu'alors inconnues. J'ai aussi pu voir du matériel moderne et varié, allant du LiDAR au radar-sol, en passant par le tachéomètre S6 de Trimble ou encore des drones. J'ai également pu me confronter à la difficulté physique des missions sur le terrain. En ce sens, ce projet a été une expérience très riche.

Le projet très orienté GNSS m'a permis de développer mes connaissances en la matière. J'ai utilisé différents matériels (Leica, Trimble, Novatel, GEOMON) et réalisé des levés en temps réel sur des zones difficiles d'accès. J'ai aussi été amené à mener à bien seul des levés terrain.

Enfin, ce stage de fin d'étude a été une expérience humaine enrichissante. J'ai pu rencontrer des personnes de formations et d'horizons différents qui ont su me transmettre une part de leur expérience scientifique et humaine.

Remerciements

Je tiens à remercier Monsieur Jean Philippe Malet, chargé de recherche CNRS à l'IPGS et à l'EOST et membre de l'équipe OMIV de m'avoir proposé de réaliser ce projet de fin d'étude, de m'avoir suivi tout au long du projet de m'avoir permis de me confronter au domaine des glissements de terrain et de la géophysique, un domaine qui a constitué une nouveauté pour moi.

J'adresse également mes remerciements à Monsieur Gilbert Ferhat qui m'a suivi au cours du projet et qui m'a prodigué ses conseils.

Je souhaite remercier tout particulièrement Monsieur Patrice Ulrich pour son soutien, notamment technique. Il a su faire preuve de patience et de pédagogie pour m'expliquer Linux et il a réussi à réparer l'ordinateur qui contenait tous mes traitements.

Mes remerciements vont aussi à André Stumpf qui m'a permis d'améliorer les résultats de la partie photogrammétrie et qui a été très présent pour la prise en main de la bibliothèque OpenCV.

Enfin je tiens à remercier Julien Gance et Floriane Provost avec lesquels j'ai eu l'occasion de réaliser deux missions sur le terrain sur le glissement de Super-Sauze.

I.	INTRODUCTION : CONTEXTE DE L'ETUDE ET OBJECTIFS	1
1.	Contexte	1
2.	Objectifs	2
II.	ETAT DE L'ART	4
1.	Les techniques classiques de suivi des mouvements de terrain	4
2.	Suivi par GPS	5
2.1.	Principe	5
2.2.	Cahier des charges de la méthode PPP	6
2.3.	Matériel disponible	7
2.3.1.	Antennes et récepteurs géodésiques	7
2.3.2.	Récepteurs à bas coût	8
3.	Suivi photogrammétrique	8
3.1.	Principe	8
3.2.	Matériel disponible	9
III.	SITES D'ETUDES ET PRESENTATION DES DONNEES	10
1.	Présentation de l'OMIV	10
1.1.	L'observatoire	10
1.2.	Glissements lents	11
1.2.1.	Villerville	11
1.2.2.	Le mas d'Avignonet	11
1.3.	Glissements rapides	11
1.3.1.	La Clapière	11
1.3.2.	Super-Sauze	12
1.3.3.	La Valette	12
1.4.	Autres glissements	12
2.	Présentation des données disponibles	13
2.1.	Données GPS	13
2.1.1.	Données bi-fréquence	13
2.1.2.	Données mono-fréquence	13
2.2.	Données photographiques	13
IV.	TRAITEMENTS GNSS	14
1.	Méthodes de calcul	14
1.1.	Positionnement absolu, mesure de phase et mesure de code	14
1.2.	Positionnement relatif	15
1.3.	Positionnement absolu avec la méthode PPP	16
2.	Les logiciels	17
2.1.	Présentation synthétique des logiciels	17

2.2.	SCRS-PPP.....	19
2.3.	RTKLIB.....	20
2.4.	gLAB.....	20
2.5.	GINS.....	21
2.6.	GAMIT-GLOBK.....	21
3.	Données bi-fréquence.....	21
3.1.	Performance des logiciels sur les données bi-fréquence.....	21
3.1.1.	Test de SCRS-PPP.....	21
3.1.1.1.	Comparaison GINS, SCRS-PPP et GAMIT.....	21
3.1.1.2.	« Kinematic » vs « static ».....	24
3.1.1.3.	Effets des données rapides et finales.....	26
3.1.1.4.	Influence de la durée d'observation.....	29
3.1.1.5.	Traitement en mode « L1 only ».....	32
3.1.1.6.	Données dynamiques ultra rapides.....	33
3.1.2.	Test de RTKLIB et comparaison avec SCRS-PPP.....	34
3.1.3.	Test de gLAB et comparaison avec SCRS-PPP.....	35
3.2.	Validation de la solution SCRS-PPP.....	37
3.3.	Mise en place d'une chaîne de traitement : la solution OMIV.....	37
3.3.1.	Principe général des scripts.....	37
3.3.2.	Choix des langages.....	39
3.3.3.	Programmes de traitement des résultats SCRS-PPP.....	39
3.3.4.	Traitement général.....	40
3.3.5.	Les fichiers en sortie.....	42
3.3.6.	Les figures en sortie.....	42
4.	Test opérationnel de récepteurs GPS mono-fréquence à bas coût.....	43
4.1.	Performance des logiciels sur les données mono-fréquence.....	43
4.1.1.	Présentation des récepteurs GEOMON.....	43
4.1.2.	Choix de la méthode de calcul.....	44
4.1.3.	Test de RTKLIB en différentiel « L1 only ».....	44
4.2.3.1.	Stabilité du calcul.....	44
4.2.3.2.	Test sur les données GEOMON.....	46
4.2.	Mise en place du réseau à Super-Sauze.....	47
4.3.	Stratégie de calcul.....	48
4.3.1.	Présentation de la méthode.....	48
4.3.2.	Influence de la longueur des lignes de base.....	49
4.4.	Mise en place d'une chaîne de traitement.....	52
4.4.1.	Automatisation des prétraitements (conversion, tri).....	52
4.4.2.	Lien avec le traitement des données bi-fréquence.....	52
4.5.	Mise en route et test de récepteurs NOVATEL.....	53
5.	Conclusion.....	55
V.	TRAITEMENTS PHOTOGRAMMETRIQUES.....	56
1.	Présentation de l'équipement et des données.....	56
2.	Calibration de l'appareil photographique.....	57
2.1.	Utilisation de la méthode Tsai.....	57

2.2.	Utilisation des outils de calibration de la bibliothèque OpenCV	58
2.3.	Résultats	58
3.	Génération d'images épipolaires	59
4.	Génération de cartes de profondeur	60
5.	Génération de nuages de points	62
6.	Conclusion	62
VI.	CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	63
VII.	TABLE DES ILLUSTRATIONS	65
VIII.	TABLE DES TABLEAUX.....	67
IX.	BIBLIOGRAPHIE	68
X.	TABLE DES ANNEXES.....	71
XI.	ANNEXES	72

I. Introduction : Contexte de l'étude et objectifs

1. Contexte

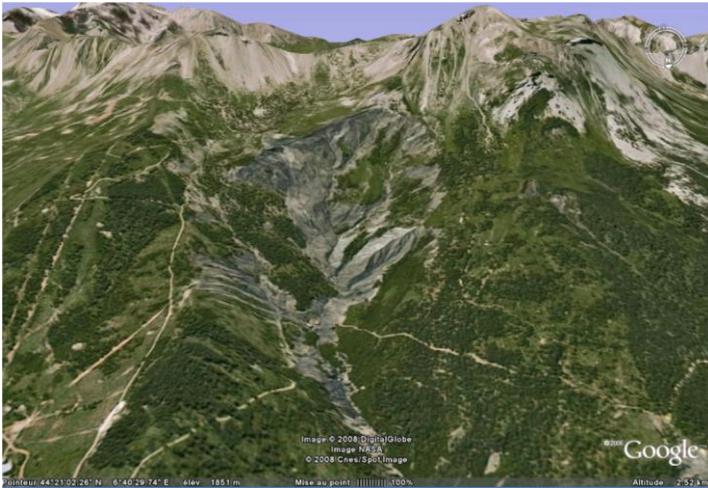


Figure 1 : vue du glissement de Super-Sauze (source site OMIV)

Les glissements de terrain font partie des aléas et risques naturels qui se produisent régulièrement en France et dans le monde, principalement en régions montagneuses. Ces phénomènes sont complexes et difficiles à étudier car de nombreux facteurs contrôlent leur déclenchement et leur propagation (relief, lithologie, facteurs hydro-climatiques, nature du sol). De fait, il est difficile de prévoir où, quand et comment de tels phénomènes peuvent se produire.

En France, les glissements de terrain peuvent avoir des conséquences importantes comme le glissement-coulée de Gazost (Hautes-Pyrénées) en février 2015 qui a privé le village de tout accès, ou plus récemment l'écroulement rocheux du Chambon (Isère) qui nécessite la mise en place de rotations d'hélicoptères pour assurer le déplacement des habitants. La surveillance et la prévision d'un mouvement de terrain est donc un enjeu majeur. Il est essentiel de préserver les populations et les infrastructures alentour.

Une meilleure connaissance des glissements de terrain nécessite la mise en place d'une stratégie de surveillance multi-paramètres, multi-technique en surface et en profondeur. La surveillance haute fréquence (temporelle et spatiale) de glissements connus permet de mieux comprendre les processus physiques élémentaires de contrôle du phénomène, de quantifier la réponse cinématique du versant aux forçages internes (circulation de fluide, sismicité) et externes (pluviométrie), de proposer des modèles numériques de comportement, et de définir des mesures de protection. En France, l'observatoire national OMIV (Observatoire Multidisciplinaire des Instabilités de Versants) est dédié à la surveillance des mouvements de terrain depuis 2007, et regroupe cinq équipes de recherche à Strasbourg, Grenoble, Nice, Besançon et Avignon.

L'EOST (Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre), qui coordonne l'ensemble des mesures géodésiques pour l'observatoire OMIV, accueille ce projet de fin d'étude. L'établissement regroupe une école d'ingénieurs spécialisée en géophysique, un master et une licence en Sciences de la Terre ainsi qu'une activité de recherche. L'activité enseignement est sous la tutelle de l'Université de Strasbourg. La recherche à l'EOST est divisée en deux unités mixtes (tutelle du CNRS et de l'Université de Strasbourg). Il s'agit de l'IPGS, l'Institut de Physique du Globe et du LHyGes, le Laboratoire d'hydrologie et de géochimie de Strasbourg. C'est au sein de l'IPGS et de l'équipe « Dynamique Globale et Déformation Active » qu'a eu lieu ce stage. Des informations plus exhaustives sont disponibles sur le site internet de l'EOST (<http://www.eost.unistra.fr>).

2. Objectifs

La complexité du suivi et de l'étude de glissements de terrain implique qu'elle fait appel à de multiples sciences telles que la géographie, la géomorphologie, la géologie, l'hydrologie ou encore la topographie, la géodésie et la photogrammétrie.

Ce projet de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur géomètre a essentiellement fait appel aux sciences appliquées à l'étude des déplacements des masses rocheuses en surface (géodésie, topographie, photogrammétrie) et à l'informatique. Les objectifs multiples du projet sont présentés dans la figure 2 :

A. Mesures ponctuelles des déplacements à haute fréquence

1. Test de la méthode de calcul PPP sur des données bi-fréquence puis mise en place d'un traitement automatique
2. Evaluation de la qualité de données GPS bas coût pour un suivi scientifique de glissements de terrain (Novatel, GEOMON)

B. Mesures distribuées des déplacements à basse fréquence

3. Recherches exploratoires sur un traitement photogrammétrique automatisable en vue de l'obtention d'un champ distribué de vitesse

Figure 2 : présentation schématique des objectifs

Dans un premier temps, le projet a consisté à travailler sur des mesures ponctuelles et à haute fréquence (une mesure par jour). Il s'agissait de tester les potentialités de la méthode de calcul de positionnement GNSS PPP (*Precise Point Positioning*) en comparant plusieurs logiciels en vue de son intégration dans une chaîne de traitement automatique pour le suivi en quasi temps réel des versants instables.

Jusqu'à présent les séries temporelles (de position et de variation de lignes de base) étaient calculées avec le logiciel GAMIT-GLOBK en mode différentiel. Cette solution offre des résultats précis et stables, cependant elle est surtout adaptée au calcul de stations permanentes dont le mouvement est faible. En effet, le calcul repose sur l'emploi d'un filtre prédictif de Kalman. Or les déplacements observés sur les glissements de terrain peuvent être importants, et surtout très variables d'un jour à l'autre avec de fortes accélérations. Tout l'intérêt de cette première partie du projet est donc de répondre à la problématique suivante : une méthode de traitement des observations GNSS en PPP est-elle plus adaptée au suivi de glissements de terrain que les méthodes en mode différentiel avec GAMIT-GLOBK ?

Pour répondre à cette question, une batterie de tests a été réalisée avec trois logiciels de calcul en PPP : SCRS-PPP, gLAB et RTKLIB. Une fois la méthode de calcul PPP validée, le but était de recalculer les solutions de positionnement pour les observations GNSS bi-fréquence existantes (2008 -2015) pour les cinq glissements de terrain OMIV, puis de mettre en place une chaîne de traitement automatique des données qui permette de calculer quotidiennement les positions des récepteurs bi-fréquence GNSS OMIV.

Dans un second temps, l'exercice a consisté à étudier et tester les performances de récepteurs mono-fréquence bas coût GEOMON puis à les mettre en place en réseau sur un glissement de terrain. Les récepteurs utilisés étant en phase de développement, ce projet a été mené en lien étroit avec la société InfraSurvey qui les a conçus. De plus, une fois le réseau installé, il a été convenu de mettre en place une chaîne de calcul automatisé des positions et de l'intégrer dans le système de traitement automatique des données bi-fréquence.

Enfin, après s'être intéressé longuement à l'utilisation du GNSS pour le monitoring de glissements de terrain, le dernier objectif était de tester des algorithmes de reconstruction photogrammétrique open source pour la génération automatique de nuages de points à partir de couples de photographies stéréo issues d'appareils installés de façon permanente sur le glissement de Super-Sauze. Là encore, l'idée à terme est d'automatiser le processus en vue de générer automatiquement et de façon régulière des MNT (Modèles Numériques de Terrain), et d'étudier l'évolution de ces modèles sur l'année afin de dégager des champs de vitesse.

Pour mettre en pratique ces notions, et appréhender un peu mieux les méthodes concrètes de suivi de glissements de terrain, deux campagnes de terrain ont également fait partie de ce projet. Ces dernières avaient pour objectifs précis la mise en place du réseau de récepteur GNSS à bas coût, la réalisation de levés GPS en vue de la calibration d'appareils photographiques permanents et l'utilisation du nouveau matériel utilisé par OMIV (LiDAR, tachéomètre, radar-sol, etc.) pour le suivi de glissements.

Le présent rapport se décomposera de la façon suivante : un premier chapitre décrira les techniques existantes qui sont mises en œuvre pour suivre en surface les mouvements des versants instables, en particulier les techniques liées à l'utilisation du GNSS et de la photogrammétrie et mettra en évidence leurs limites. Un deuxième chapitre présentera les travaux réalisés sur le traitement des données GNSS OMIV, qu'elles soient bi-fréquence ou mono-fréquence et sur le développement de la solution de traitement automatique. Un inventaire de logiciels permettant de réaliser des calculs différentiels ou en PPP sera présenté et des tests sur la méthode PPP seront réalisés. Enfin, un troisième chapitre présentera les traitements photogrammétriques réalisés au cours de ce stage.

II. Etat de l'art

1. Les techniques classiques de suivi des mouvements de terrain

La surveillance des mouvements de terrain est une science qui a su évoluer avec le temps. Cartier (1981) présente une méthodologie de l'époque utilisée par le laboratoire des Ponts et Chaussées pour l'étude et le suivi de glissements de terrain attenants aux chaussées. Les matériels de mesures in situ d'alors étaient la nivelle de précision, l'inclinomètre et les jauges de déformation.

L'évolution des techniques de topographie et d'imagerie a permis d'assurer un suivi de plus en plus complet et précis des glissements de terrain en surface, en proposant des données avec une grande résolution spatiale et/ou temporelle. Maisse (2014) présente un tableau récapitulatif (tableau 1) des différentes techniques actuelles.

Méthode	Utilisation	Mesure	Etendue de mesure	Précision
Mesures ponctuelles				
Nivelle à vis micrométrique	déplacement angulaire en surface	da	0,125 rad	A.10-4 rad
Fissuromètre à pige centrale	mouvement de compartiments	dD	<20 mm	± 0,1mm
Mire à vernier	ouverture de petites fissures	dD	<200mm	± 0,5mm
Extensomètre à base courte	ouverture de fissures	dD	25-450 mm	± 0,1 mm
Extensomètre à base longue en fil invar	déplacement de points mobiles	dD	jusqu'à 100m	± 0,5 mm
Niveau de chantier	variation d'altitude	dZ	variable	2cm
Distance mètre électro-optique	déplacement de cibles mobiles	dD	1-10km	7mm ± 5ppm ³
Théodolide et distancemètre électro-optique	déplacement de cibles mobiles	dX,dY,dZ	1-10 km	± 1mm*
DGPS par campagnes	déplacement de points mobiles	dX,dY,dZ	variable*	± 0,5mm*
DGPS par installations permanentes	déplacement de points mobiles	dX,dY,dZ	variable	
Mesures distribuées (image)				
Photogrammétrie optique terrestre	déplacement de cibles mobiles, comparaison de MNT ⁴	dX,dY,dZ	<200 m	40 mm
Photogrammétrie optique aérienne	déplacement de cibles mobiles, comparaison de MNT ⁴	dX,dY,dZ	Hvol <500m	100 mm
Corrélation d'images optiques terrestre	champ de déplacement 2D	dX, dY	<500 m	
Corrélation d'images optiques satellite	champ de déplacement 2D	dX, dY	500-1000 km	±2000 mm**
Interférométrie radar INSAR satellite ¹	distance à un point cible	dD	500 -1000 km	5 -10 mm
Interférométrie radar INSAR terrestre ¹	distance à un point cible	dD	1-3km	1 - 2 mm
Scanner laser terrestre (LiDAR TLS ²)	comparaison de MNT ⁴	dX,dY,dZ	<500 m	± 20mm
Scanner laser aérien (LiDAR ALS ²)	comparaison de MNT ⁴	dX,dY,dZ	<1000m	± 30mm

1. INSAR : Interferometric Synthetic Aperture Radar 2. LiDAR :Light Detection and Ranging 3. ppm : part per million

4: MNT: Modèle numérique du terrain

* selon configuration du réseau, du site de mesure et du type de récepteur (mono ou bi fréquence)

** selon résolution spatiale du satellite

Tableau 1 : Caractéristiques des principales méthodes de suivi de déplacements. (D'après Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (1985), Laboratoire central des Ponts et Chaussées (1994), Gili et al. (2000), modifié par Malet et al. (2002), Depréz (2010), Maisse (2014))

Il convient de préciser que depuis les années 2000, l'utilisation du GPS est venue apporter un complément intéressant aux techniques conventionnelles. De plus l'évolution des technologies a réduit considérablement les temps de traitement et d'occupation des récepteurs GNSS.

Malet et al. (2000) réalisent une étude comparative entre un suivi par GPS et par méthodes topométriques. Pour ce faire ils implantent des GPS sur des piliers tachéométriques connus. Ils en concluent que le GPS permet d'atteindre une précision infra-centimétrique. Le réseau étudié est celui de Super-Sauze. Les distances entre piliers tachéométriques sont au maximum de cinq cent m.

2. Suivi par GPS

2.1. Principe

Il existe deux méthodes différentes permettant d'obtenir des informations sur la cinématique d'un glissement de terrain avec le GNSS.

- La première consiste à lever des points particuliers sur un glissement à intervalles de temps réguliers, au cours de campagnes de mesures GNSS. Gili et al. (2000) présentent la technique de réoccupation. Le principe est de lever les mêmes points sur plusieurs jours et à des périodes différentes de la journée de manière à obtenir des résultats avec des constellations de satellites différentes. Cette technique pourrait s'apparenter à un levé topographique classique que l'on réaliserait régulièrement. Elle a l'avantage d'être relativement accessible. Seuls une base et un mobile sont nécessaires. Cependant, elle nécessite beaucoup de temps et ne permet pas d'obtenir des mesures avec une grande résolution temporelle.
- La seconde, plus complexe et coûteuse à mettre en œuvre, consiste à installer des stations permanentes, judicieusement placées sur le glissement, et à effectuer des mesures sur des longues sessions temporelles (plusieurs années). Malet et al. (2011) présentent une méthode de suivi cinématique de glissements de terrain en quasi temps réel, grâce à la mise en œuvre de stations GNSS permanentes. Une station « fixe » est placée à proximité du glissement, sur une zone stable. D'autres stations (en général deux ou trois) sont placées sur la zone instable. L'étude de la variation des lignes de base entre station sur site stable et instable et la réalisation de séries temporelles de position permet de caractériser des déplacements de l'ordre du m/an jusqu'à quelques cm/an.

Sur son site internet, le laboratoire OMIV donne accès aux séries temporelles de position et de variation de lignes de base de l'ensemble des stations GNSS permanentes qu'il gère. Le traitement des données d'observation était réalisé jusqu'à présent avec le logiciel scientifique GAMIT-GLOBK et de façon quotidienne. Deprèz (2010) présente le traitement ainsi que le test des options du logiciel. Cette solution offre des résultats précis (positionnement au centimètre près), cependant il a été constaté que dans le cas de glissements rapides, le calcul a du mal à converger lorsque les déplacements sont trop importants d'un jour à l'autre. La figure 3 permet de mettre en évidence ce phénomène. Il apparaît que pour la ligne de base LVAL-saz2 il y a manifestement un mouvement rapide fin octobre

2011. Ce mouvement engendre la présence de quelques points aberrants en novembre 2011 avant un retour à la position effective.

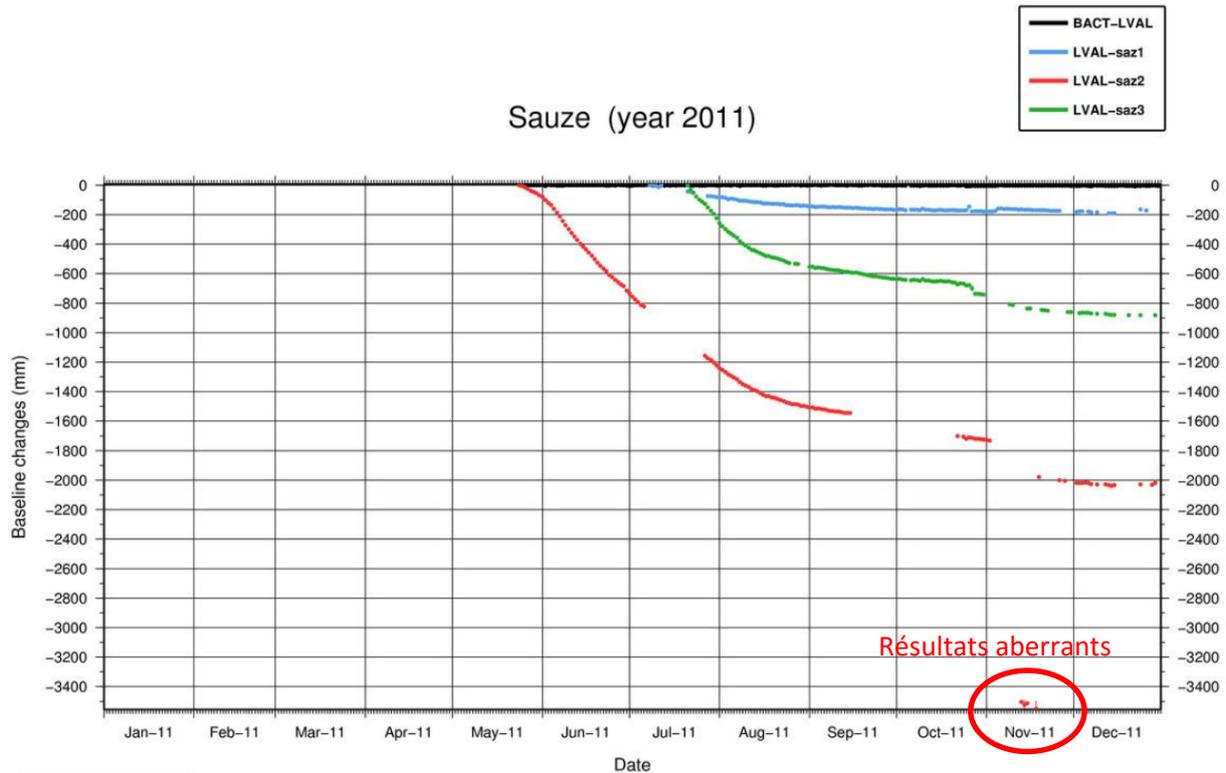


Figure 3 : exemple d'une incohérence au niveau du calcul des stations sur un glissement rapide due à l'utilisation de la méthode différentielle. (Source site OMIV)

Ces incohérences inhérentes aux mouvements importants d'un jour à l'autre posent un réel problème pour le suivi de glissements de terrain. Le choix de la méthode différentielle utilisée jusqu'à présent est remis en cause pour l'étude des glissements rapides.

Dans cette optique, il convient de tester la pertinence de la méthode PPP pour le suivi de glissements rapides. En effet, il s'agit d'une méthode qui propose des solutions indépendantes chaque jour. Il paraît légitime de penser qu'il s'agit d'un bon moyen de pallier l'influence des mouvements importants d'un jour à l'autre.

2.2. Cahier des charges de la méthode PPP

Partant de la constatation que la méthode PPP est une bonne alternative à la méthode différentielle, il convient de définir un cahier des charges qui doit être rempli pour que la méthode puisse être validée pour le suivi de glissements de terrain. Plusieurs critères devront être vérifiés, notamment des critères de précision, de temps de calcul, de délai de calcul, etc. Le tableau 2 présente les différents critères. Les critères ainsi que les tolérances ont été établis en tenant compte des résultats obtenus avec GAMIT et des besoins liés au suivi de glissements de terrain.

Critère	Tolérance
Précision	1-2cm
Fréquence	1 position par jour au moins
Temps de calcul	0,5 minute pour 1 jour
Délai du calcul	1 semaine après la mesure au plus tard

Tableau 2 : cahier des charges à respecter pour valider la méthode PPP

2.3. Matériel disponible

2.3.1. Antennes et récepteurs géodésiques

Parmi les antennes et récepteurs utilisés pour la surveillance des glissements de terrain, on trouve différents modèles Leica, Topcon et Trimble (voir figure 4). Ces antennes bi-fréquence ont été installées sur le terrain entre 2008 et 2014. D'autres modèles sont en cours de test, notamment des récepteurs et antennes NOVATEL.

Le principal inconvénient de ce type d'équipements que l'on peut qualifier de récepteurs géodésiques est leur coût. De plus, ces stations permanentes restent à l'extérieur tout au long de l'année, sur des zones instables où coulées de boue et chutes de pierres sont fréquentes. Il y a donc un fort risque de perte ou de casse si les déformations de terrain sont importantes.

Par ailleurs, l'EOST dispose de quelques antennes et récepteurs GNSS dans le but de réaliser des levés topographiques. Trois antennes Leica AR10 et trois récepteurs Leica GR10 sont disponibles. L'un d'entre eux est équipé d'une antenne radio UHF et peut être utilisé comme pivot. Il est présenté dans la figure 4. Un mobile Leica Viva AS10 lui est associé.

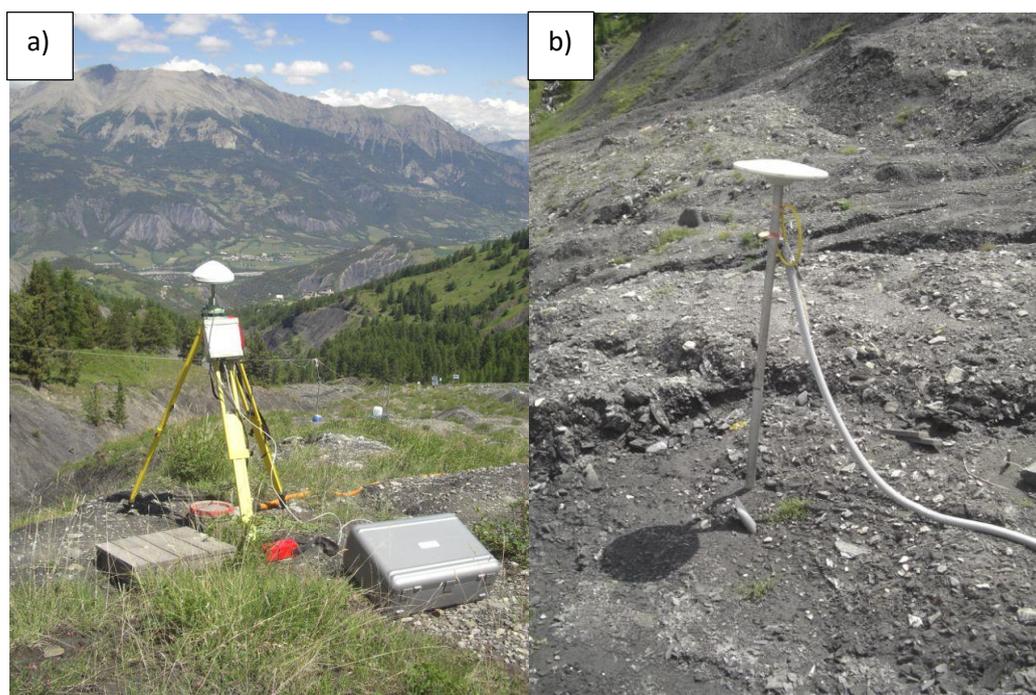


Figure 4 : a) pivot Leica (AR10) et b) antenne permanente Trimble à Super-Sauze

2.3.2. Récepteurs à bas coût

Des études récentes ont été menées sur des nouveaux systèmes GPS (récepteurs + antennes) « low cost » qui peuvent être déployés pour l'étude des glissements de terrain. Benoit et al. (2013, 2015) présentent un réseau de récepteurs mono-fréquence (les Géocubes) qui peut être mis en place pour l'étude de petites zones de glissement.

Evéquo et al. (2012) ont développé un autre système de récepteurs GNSS « low cost » mono-fréquence dédié au suivi de glaciers. La précision annoncée est de cinq centimètres. Leur solution est sous la forme de boîtiers contenant une antenne, une puce GPS et un système de transmission des données par GSM.

D'autres équipes de chercheurs travaillent sur le développement de systèmes à bas coût pour le suivi de mouvements de terrain. Cattin et al. (2011) présentent un système dédié au suivi des dangers naturels. Le principe de l'équipement qu'ils développent est qu'une station de base collecte et traite les données de plusieurs stations GPS mono-fréquence « filles » réparties autour de la base. Le principe est le même que le système GEOMON développé par la société InfraSurvey. Tout l'intérêt de ce type de matériel est qu'au vu de son coût diminué, il est envisageable de densifier les réseaux de stations permanentes. De plus, le matériel va pouvoir être installé sur des zones bougeant beaucoup et présentant un fort risque de perte. Le système GEOMON sera donc présenté et étudié plus tard dans ce rapport.

3. Suivi photogrammétrique

3.1. Principe

La photogrammétrie, qu'elle soit aérienne ou terrestre, peut être appliquée au suivi de versants instables dans le but de générer des MNT, des courbes de niveaux, des cartes, etc. Girault et al. (1994) présentent l'utilisation de la photogrammétrie pour le suivi de plusieurs glissements dans les Alpes du sud et proposent des résultats. Ils étudient le déplacement de masses rocheuses en comparant des MNT réalisés à différentes périodes.

Henry et al. (2001) détaillent l'avantage de la photogrammétrie pour la génération de MNT de glissements de terrains par rapport aux méthodes de topographie classique. En effet, la réalisation d'un levé tachéométrique n'est pas aisée sur des zones escarpées, et le nombre de stations à réaliser est non négligeable compte tenu de la topographie difficile. De même, l'utilisation du DGPS peut vite rencontrer ses limites : les masques aux signaux GNSS sont nombreux du fait de la présence de fortes pentes, escarpements et falaises. La photogrammétrie, notamment aérienne, est une bonne alternative à ces techniques. Elle permet de générer des MNT denses et relativement précis (Henry et al. atteignent une précision planimétrique inférieure à trente centimètres et précision altimétrique inférieure à cinquante centimètres) de façon extrêmement rapide.

L'utilisation de la photogrammétrie a le double avantage qu'elle permet d'obtenir des nuages denses de points, c'est-à-dire des résultats largement distribués, en un temps restreint et qu'il est plus abordable financièrement d'installer des appareils photographiques que des récepteurs GNSS topographiques haut de gamme.

Travelletti (2012) présente une méthode de corrélation d'images monoscopiques permettant à partir d'images issues d'un appareil de photographie permanent et d'un MNT de générer des champs de vitesse. Il réalise un test grandeur nature sur le glissement de Super-Sauze, où il obtient des résultats intéressants. Il analyse la cohérence des résultats en comparant le déplacement de cibles calculé avec sa méthode avec le déplacement mesuré en DGPS au cours de différentes campagnes. Cependant, sa méthode nécessite d'avoir un MNT. De plus, il utilise le même modèle numérique de terrain pour une série temporelle de deux ans. Ceci représente une limite à sa méthode car les glissements de terrain rapides comme celui de Super-Sauze bougent de plusieurs mètres par an. Il semble donc nécessaire de réactualiser régulièrement le MNT sur lequel la méthode s'appuie.

La solution réside peut-être en l'emploi de deux appareils de photographies. En effet, à partir de couples de photographies stéréoscopiques, il est possible de générer directement un MNT et donc a fortiori de calculer des vitesses de déplacements. Deux appareils Canon étant installés sur le glissement de Super-Sauze, il paraît opportun d'essayer de mettre en place une méthodologie permettant de calculer des champs de déplacement à partir d'images stéréoscopiques. Pour cette raison, des « recherches exploratoires » seront présentées en fin de projet.

3.2. Matériel disponible

Pour le suivi de glissements de terrain, OMIV dispose de plusieurs appareils de photographie. Certains sont laissés de façon permanente sur le terrain, dans des coffrets équipés de vitres, comme c'est le cas pour deux appareils Canon EOS REBEL Digital XS qui sont installés sur le glissement de Super-Sauze. C'est d'ailleurs sur les photographies réalisées avec ces appareils qu'une étude sera présentée en fin de rapport. Ces derniers ont une résolution de 10.1 Mégapixels pour une taille d'image de 3888 x 2592 pixels.

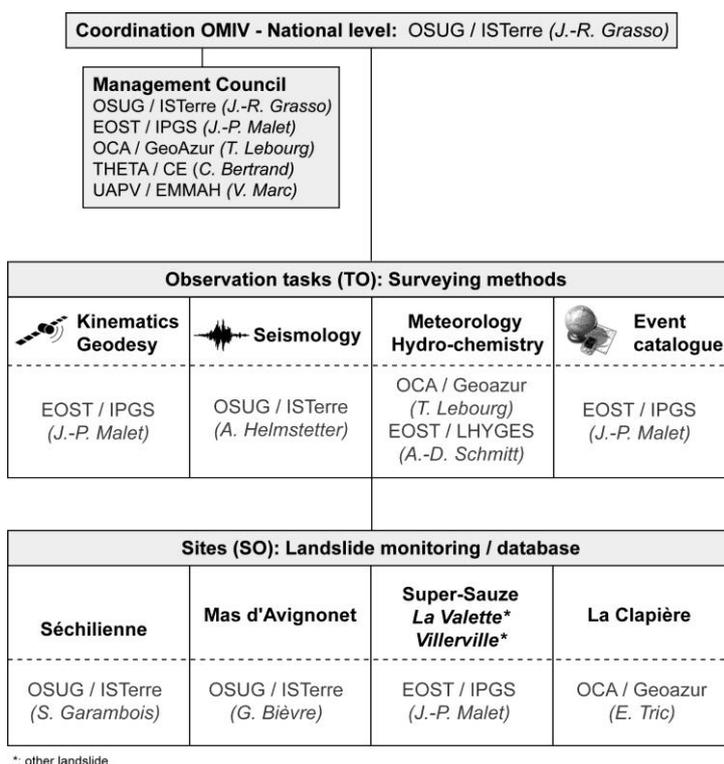
Un appareil de photographie Nikon D700 est également utilisé pour la réalisation de campagnes de mesures autour des glissements de terrain.

III. Sites d'études et présentation des données

1. Présentation de l'OMIV

1.1. L'observatoire

L'OMIV (Observatoire Multidisciplinaire des Instabilités de Versants) regroupe cinq équipes de recherche à travers le territoire français dont l'EOST-IPGS à Strasbourg, l'Observatoire GéoAzur à Nice, l'EMMAH à Avignon, ISTERRE à Grenoble et le Laboratoire Chrono-Environnement à Besançon. L'organisation et la structure de l'observatoire est décrite dans la figure 5.



*: other landslide

Figure 5 : Organisation de OMIV (Source site OMIV <http://eost.u-strasbg.fr/omiv/>)

L'objectif de cette association d'observatoires est de mettre en place une surveillance à long terme de trois catégories différentes de paramètres (d'après page web d'OMIV : <http://omiv.osug.fr/>) :

- Observations de la cinématique des glissements (en surface et en profondeur)
- Observations hydrométéorologiques
- Observations sismiques

OMIV assure la surveillance de nombreux glissements de terrain en France, dont celui de Villerville (Normandie), de La Clapière, de Super-Sauze, de La Valette et du Mas d'Avignonet (Alpes de Haute-Provence). Les sites sont ou ont été équipés par des installations permanentes (stations totales, GPS, appareils de photographie, équipements d'étude sismique, etc.). Des campagnes de mesures diverses et variées (LiDAR, imagerie satellites, photogrammétrie, levés GPS, etc.) y ont régulièrement lieu.

Malet et al. (2013) détaillent l'ensemble des activités et techniques in situ mises en œuvre par OMIV.

Par la suite, les glissements suivis par OMIV seront présentés. Le nom des stations GNSS et leur répartition seront détaillés. C'est avec les données de ces stations que les tests de la méthode PPP ont été réalisés.

1.2. Glissements lents

1.2.1. Villerville

Le glissement de Villerville se situe en Normandie, directement en bord de mer. Il est étudié depuis 1991. Trois stations GNSS permanentes y sont installées (figure 6). La station du RGP (Réseau GNSS Permanent) la plus proche est la station de CAEN. La station VLRV située sur une zone stable est utilisée comme station de référence. Les récepteurs VLRB (pour Villerville-Bas) et VLRH (pour Villerville-Haut) sont situés sur la zone instable. Le glissement de Villerville est lent (quelques centimètres par an).

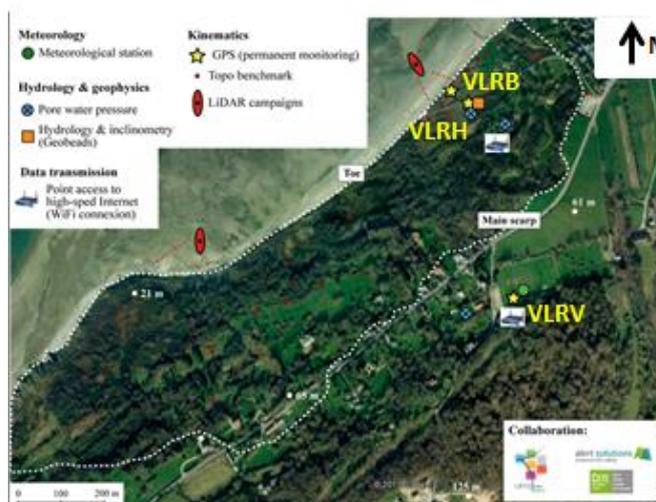


Figure 6 : plan d'équipement du glissement de Villerville (Source site OMIV)

1.2.2. Le mas d'Avignonet

Le site d'étude du mas d'Avignonet se trouve dans le sud de la France. Trois récepteurs y sont installés. Il s'agit du récepteur de référence, AVR1, ainsi que deux stations sur zone instable, AVP2 et AVN3. La station du RGP la plus proche est la station CBRY. Ce glissement est lent (quelques centimètres par an).

1.3. Glissements rapides

1.3.1. La Clapière

Le glissement de La Clapière se situe dans les Alpes. La station CLAP est celle utilisée comme référence. Deux stations, CLP1 et CLP2 tournent depuis 2011 (figure 7). Enfin une troisième station, CLP4 a été installée courant 2014 : elle est opérationnelle depuis début 2015. La station du RGP la plus proche est la station BACT. Le glissement de La Clapière est un glissement rapide

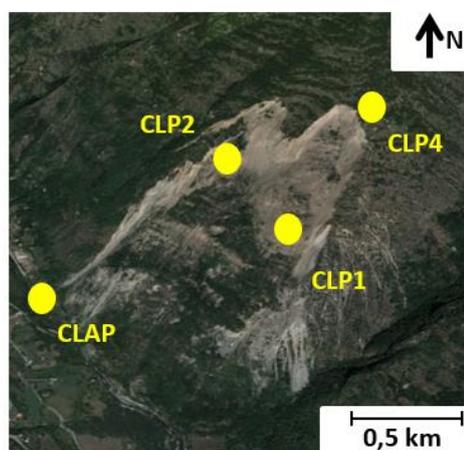


Figure 7 : plan d'équipement du glissement de La Clapière (Source site OMIV)

(quelques mètres par an). Pour ce projet, de nombreux tests de calculs ont été réalisés à partir des données de La Clapière.

1.3.2. Super-Sauze

Le site de Super-Sauze situé dans les Alpes de Haute-Provence à proximité de Barcelonnette est étudié depuis 1991. Plusieurs stations GNSS permanentes y ont été installées. La station du RGP la plus proche est la station BACT située à Barcelonnette. La station de référence LVAL est située sur une zone stable tandis que les stations SAZ1 et SAZ2 sont localisées sur le glissement. LVAL ne se trouve pas à proximité directe du glissement. La station SAZ3 a été en service en 2011 et 2012 sur la zone instable, mais elle a été ensevelie par une coulée de boue. Il s'agit d'un glissement rapide (déplacements d'un mètre par an environ).

Par ailleurs, plusieurs appareils de photographie sont ou ont été mis en place de façon permanente. C'est notamment le cas des appareils CAM Haut et CAM Bas, dont les données seront traitées en fin de projet.

De nombreuses thèses, articles et travaux ont été réalisés et publiés au sujet de ce glissement de terrain. Parmi ces travaux, on peut citer Malet et al. (2000), Deprez (2010), etc. Une liste plus exhaustive peut être consultée sur le site internet de l'OMIV. C'est d'ailleurs sur ce glissement que les missions de terrain de ce PFE ont eu lieu et que le réseau de récepteurs à bas coût GEOMON a été installé.

1.3.3. La Valette

Le glissement de La Valette se trouve dans les Alpes de Haute-Provence, en face de celui de Super-Sauze. Il est surveillé depuis 1988. Le matériel GPS installé est composé de trois stations. La station de référence LVAL, et deux stations pour l'étude des déplacements, les stations LVA1 et LVA2. La station du RGP associée au site est la station BACT. Il s'agit d'un glissement rapide (quelques mètres par an).

1.4. Autres glissements

D'autres glissements sont également étudiés, mais ne sont pas présentés officiellement sur le site internet d'OMIV.

On peut par exemple citer le glissement de Pont-Bourquin, en Suisse près d'Aigle dans le Valais. Il s'agit d'un glissement miniature (200 m x 30 m), facile d'accès et qui est étudié depuis quelques années. Des récepteurs GNSS y ont été installés au cours de ce PFE. Enfin, des expérimentations sont également en cours à Draix (près de Digne-les-Bains) ou sur le glissement de Sanières, près de Barcelonnette.

2. Présentation des données disponibles

2.1. Données GPS

2.1.1. Données bi-fréquence

Le suivi de glissements de terrain étant réalisé depuis quelques années en France et OMIV existant depuis 2007, de nombreuses données ont été collectées. Il s'agit entre autre des fichiers RINEX (*Receiver Independant Exchange Format*) vingt-quatre heures d'observation et de navigation de l'ensemble des stations permanentes installées sur les glissements étudiés par le laboratoire. Les récepteurs sont bi-fréquence (L1 et L2) et les mesures sont cadencées à trente secondes. La plupart des équipements ont été installés entre 2008 et 2009, ce qui permet de réaliser des séries temporelles sur des plages de temps relativement conséquentes.

Les données sont transmises au format brut (T02, tps, etc.) sur le FTP de l'EOST de façon quotidienne. Des applications comme TEQC de l'UNAVCO ou « *Convert to RINEX* » de Trimble permettent de convertir des données directement au format RINEX.

Par ailleurs, deux récepteurs Novatel ont été installés sur le glissement de Pont-Bourquin à la mi-mai 2015. Les données de ces récepteurs seront également collectées et traitées en vue de la validation de la qualité de ce nouveau matériel.

2.1.2. Données mono-fréquence

Dans le cadre de ce stage, des récepteurs à bas coût GEOMON ont été acquis par OMIV. Une station mère collectant les données et trois récepteurs sont disponibles et en test à l'EOST depuis mai 2015. Trois récepteurs supplémentaires ont été reçus début juin 2015. L'ensemble du matériel est installé sur le glissement de Super-Sauze depuis la mi-juin 2015.

Depuis leur installation, les récepteurs transmettent des données brutes de façon quotidienne. Cependant, le matériel étant en cours de test, quelques bogues et pannes ont été détectés. Il y a donc encore quelques « trous » dans les mesures. En fin de projet, il y avait à peu près un mois de données RINEX de cinq récepteurs disponibles. Les GEOMON sont équipés de récepteurs mono-fréquence et les mesures sont cadencées à dix secondes.

La conversion des données brutes en fichiers RINEX d'observation et de navigation s'effectue avec l'outil « *Convbin* » du logiciel RTKLIB.

2.2. Données photographiques

De la même manière que pour les stations GNSS permanentes, des appareils de photographie réflexes sont installés sur plusieurs glissements de terrain (Super-Sauze, Sanières). Ces appareils sont paramétrés pour prendre des photos quotidiennement, en général toutes les heures entre 8h et 18h. Les données sont à récupérer directement sur le terrain. Les photographies collectées sont utilisées pour générer des nuages de points ou pour réaliser des analyses qualitatives.

IV. Traitements GNSS

1. Méthodes de calcul

Le raisonnement et les explications citées dans les paragraphes 1.1 et 1.2 sont issus des travaux de Henrion (2013) et Lagnoux (2010).

1.1. Positionnement absolu, mesure de phase et mesure de code

Le positionnement absolu peut être calculé à partir des mesures de codes. Le satellite génère un code pseudo-aléatoire. Ce code arrive au récepteur avec un certain temps de retard. Le récepteur génère également un signal. La comparaison et la synchronisation des deux signaux au niveau du récepteur va permettre de déterminer ce retard.

On peut modéliser cela par l'expression suivante : $\Delta t_i^j = tR_i - tE^j$ (1)

Avec Δt_i^j : le retard entre émission et réception du signal (en secondes)
 tR_i : le temps au moment de la réception au récepteur i
 tE^j : le temps au moment de l'émission au satellite j

Cependant, il faut tenir compte du fait que l'horloge du récepteur est biaisée et décalée par rapport à celle des satellites.

On a donc les expressions suivantes :

$$tR_i + dt_i = tR \quad (2)$$

$$tE^j + dt^j = tE \quad (3)$$

Avec dt_i : le décalage d'horloge du récepteur (inconnu, en secondes)
 dt^j : le décalage d'horloge du satellite (contenu dans le message de navigation)

On sait par ailleurs que la distance récepteur – satellite est donnée par l'expression :

$$R_i^j = c \cdot \Delta t_i^j \quad (4) \text{ où } c \text{ désigne la célérité.}$$

En combinant les expressions (1), (2), (3), et (4) on obtient l'expression suivante :

$$R_i^j = c \cdot (tR - tE) + c \cdot (dt^j - dt_i) + dt_{\text{tropo}} + d_{\text{iono}} \quad (5)$$

Avec dt_{tropo} et d_{iono} les biais dus à la traversée par le signal de la troposphère et de l'ionosphère.

En développant l'expression de la distance géométrique dans la relation (5), on aboutit à la relation finale :

$$Ri^j = \sqrt{(X^j - Xi)^2 + (Y^j - Yi)^2 + (Z^j - Zi)^2} + c(dt_i - dt^j) + diono + dtropo \quad (6)$$

Avec X_i, Y_i, Z_i : les coordonnées du récepteur (inconnues)
 X^j, Y^j, Z^j : les coordonnées du satellite (connues)

Quatre variables sont inconnues dans cette équation. Il s'agit des coordonnées en X, Y et Z du récepteur et du décalage d'horloge du récepteur par rapport à l'horloge satellite. Il faut donc au minimum quatre satellites pour obtenir la position du point i. Si le récepteur capte le signal de plus de quatre satellites, le problème peut être résolu par la méthode des moindres carrés.

De plus, l'erreur liée aux mesures de code étant de 1% de la longueur d'onde du code (~30m), ce type de positionnement sera donc affecté d'une erreur de 1 à 3 m. Il est évident que cette précision n'est pas suffisante pour les besoins du suivi de mouvements de terrain.

Afin d'améliorer la précision du positionnement, il est possible d'utiliser les mesures de phase. Le principe est similaire à celui de la mesure de code, à ceci près que l'on va mesurer un déphasage sur les ondes porteuses (L1 et L2) au lieu d'un retard avec le code. La distance satellite récepteur correspond donc au nombre de cycles entiers (ambiguïté entière) auquel il faut ajouter le déphasage.

De plus les ondes porteuses L1 et L2 ont des longueurs d'ondes qui valent respectivement 19,0 et 24,4 cm. Si l'on considère que l'erreur liée aux mesures est de 1%, il apparaît que la précision du positionnement obtenue avec cette méthode avoisine les 1 à 2 mm. Lorsque l'on est en mesure de résoudre l'ambiguïté entière, l'utilisation des mesures de phase offre donc des meilleurs résultats qu'avec les informations contenues dans le code (pseudo distance).

Cependant, il n'est pas simple de résoudre les ambiguïtés entières. De plus de nombreuses erreurs viennent entacher la précision du positionnement absolu. Bevy (2014) liste les erreurs qui influent sur la qualité du traitement GPS. Celles qui ont le plus fort impact sur le positionnement final sont les erreurs dues à la traversée de la troposphère et de l'ionosphère (plusieurs mètres).

1.2. Positionnement relatif

Pour pallier ce manque de précision, une première solution consiste en l'utilisation de deux récepteurs GPS dont l'un est connu en coordonnées. Dans une circulaire, le Ministère de l'écologie (2008) décrit de manière claire et synthétique le principe du GPS différentiel (DGPS, RTK, RTK réseau). Le principe est le même que le positionnement absolu (résolution d'un système d'équations), mais le fait d'utiliser un deuxième récepteur connu en coordonnées va permettre d'envoyer des corrections au récepteur « mobile ».

Si les deux récepteurs observent au moins deux mêmes satellites (méthode de la double différence), les décalages des horloges des récepteurs sont éliminés. De plus on est en mesure de lever les ambiguïtés entières. Selon Henrion (2013), l'utilisation d'un deuxième récepteur va permettre de déterminer facilement les ambiguïtés entières et de s'affranchir des erreurs ionosphérique, troposphérique, d'orbite et du décalage d'horloge du récepteur. Cette technique est d'ailleurs également très répandue en topographie classique. Elle permet d'obtenir une précision de l'ordre du centimètre.

1.3. Positionnement absolu avec la méthode PPP

Une autre technique qui permet d'obtenir un positionnement avec une précision proche du centimètre est le PPP (*Precise Point Positioning*). Cette méthode, également appelée « GPS zéro différence » est relativement récente. Lagnoux (2010) et Bevy (2014) expliquent brièvement le principe du calcul en PPP. Les erreurs citées précédemment sont corrigées par l'emploi de modèles et de données supplémentaires :

- orbites précises des satellites (fichiers .SP3 de l'IGS)
- paramètres de rotation de la Terre (fichiers .ERP de l'IGS)
- les décalages d'horloge des satellites (fichiers .CLK de l'IGS)
- les fonctions de projections, qui permettent de ramener le délai troposphérique au zénith (Lagnoux, 2010).
- modèles atmosphériques (ionosphère) sous forme de grille
- des modèles de marée terrestre (par exemple le modèle FES2004)

De plus, les algorithmes PPP récents permettent de réaliser des calculs à l'aide d'ambiguïtés entières fixées à partir des biais de propagations internes aux satellites (Lagnoux, 2010).

Morel et al. (2014) présentent le PPP et donnent quelques aspects politiques sur le développement de cette technique par rapport à celui du calcul en différentiel. Le principal avantage du PPP est qu'il ne nécessite l'utilisation que d'un seul récepteur. Dans les zones habitées et équipées, on trouve facilement des points connus, des stations permanentes voire même des réseaux RTK. Cependant, en mer ou dans certaines zones inhabitées, on se trouve souvent en difficulté pour utiliser le positionnement relatif, les stations de référence étant inexistantes. L'utilisation du calcul en PPP permet de pallier ce problème.

D'autres études comparent les résultats obtenus avec un calcul par double différence et un calcul en PPP. Soycan et al. (2010) obtiennent des écarts de un centimètre en latitude et en longitude et de deux centimètres sur la hauteur ellipsoïdale entre les deux techniques. Milcent (2014) compare les logiciels GAMIT-GLOBK (calcul différentiel) et SCRS-PPP (calcul PPP) et propose une méthode d'estimation robuste, en s'appuyant sur le calcul des vitesses de déplacement de stations d'un réseau. Ces vitesses sont obtenues à partir de séries temporelles.

Dans le domaine des glissements de terrain, Maisse (2014) a comparé des lignes de base et des séries temporelles de position calculées d'une part par double différence avec le logiciel GAMIT-GLOBK et d'autre part en PPP avec le logiciel GINS développé par le CNES. Il obtient des écarts entre les deux solutions de l'ordre de la dizaine de centimètres en Est et Nord.

2. Les logiciels

2.1. Présentation synthétique des logiciels

Pour le calcul en double différence, de nombreuses applications allant des logiciels à vocation scientifique (GAMIT-GLOBK, Bernese), aux logiciels commerciaux (Leica Geo Office, TBC) en passant par des applications gratuites (RTKLIB) sont utilisables. Ces applications ne proposent pas les mêmes options (modèles atmosphériques, utilisation des orbites précises ou non) et ne donnent pas non plus la même qualité de résultats.

Pour le calcul en PPP, un certain nombre d'applications open source sont accessibles en ligne. Pour la plupart d'entre elles, l'utilisateur envoie ses données (fichiers RINEX) par mail ou par téléchargement direct sur le site de l'application et les résultats lui sont retournés ultérieurement. Gakstatter (2013) propose une comparaison de plusieurs applications PPP en ligne parmi lesquelles SCRS-PPP, AUSPOS, GAPS, APPS, SCOUT, magiGNSS et CenterPoint RTX. Ses critères de comparaison sont les résultats finaux (justes ou faux), la méthode de calcul des précisions renvoyées par l'application ou encore l'écart des résultats à la moyenne.

Il existe également des applications utilisables de façon locale. On peut citer par exemple le logiciel GINS, développé par le CNES et décrit par Marty et al. (2011), ou SCRS-PPP, application locale du service SCRS-PPP développée par le service des ressources naturelles du Canada et qui sera étudiée plus en détails par la suite, ou encore RTKLIB et gLAB (Hernandez-Pajares et al., 2010).

Dans le cadre de ce PFE plusieurs applications ont été testées. Ces dernières permettent le calcul par double différence, en PPP, voire les deux. Elles sont énumérées dans le tableau 3. Pour la comparaison plusieurs critères ont été retenus. Ils sont techniques (constellations utilisées, type de données en entrée, en sortie) ou pratiques (temps de calcul, automatisation sous linux possible, etc.)

Au vu des critères étudiés (cf. tableaux 3) et de plusieurs articles et mémoires (Lagnoux, 2010 ; Milcent, 2014 ; Petit et al., 2015) il semble que la solution SCRS-PPP proposée par le service des ressources naturelles du Canada soit une solution fiable pour le calcul en PPP. De plus cette solution est déjà utilisée par des chercheurs de l'EOST pour le calcul de stations permanentes (RENAG) et par des chercheurs de Montpellier.

Il semble donc intéressant de tester plus en détail les potentialités de cette solution. Les tests seront présentés ultérieurement.

Traitements GNSS

		SCRSSPPP	g-LAB	RTKLIB	GINS	Bernese	LGO/TBC	GAMIT/GLOBK
		NRCan/Canada		T.Takasu/Japan	CNES/ FR	AIUB / CH	Commercial	MIT/U.S.A
Satellite constellation	GPS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	GLONASS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Data format	Input	RINEX	RINEX	RINEX	RINEX	RINEX	RINEX, Raw	RINEX
Processing	PPP	✓	✓	✓	✓	✓		
	DD	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓
	Static	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Kinematic	✓	✓	✓	✓		✓	✓
Type of observation	L1 only	☐	✓	✓	✓		☐	☐
	L1 +L2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Output coordinate system (LLH/XYZ)	Reference system	ITRF2008 NAD83		WGS84	ITRF2008	ITRF2008	ITRF, WGS84, local geodetic systems	ITRF2008
Satellite clocks		☐	✓	✗	✓	✗	✗	✗
Satellite orbits	Ultrarapid, Rapid, Final (IGS)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Tide model		FES2004		✓	✓	✓	✓	FES2004
Earth rotation	Ultrarapid, Rapid Final (IGS)	✓	☐		✓	✓	✓	✓
Atmosphere models	Tropo delay estimate	✓	☐	☐	✓	✓	✓	✓
	Iono delay input model		✓	☐	✗	✓	✗	✓
Processing time	24h/30 s RINEX file	~20 min / 1 yr		~25 min / 1 yr	~90 min / 1 yr	~120 min / 1 yr	~0.5 min for 1 day	~120 min / 1 yr
Horiz. Accuracy (PPP)	cm	~ 1-2	~ 40	~ 3-4		~ 1-2	~ 1-2	
Vert. Accuracy (PPP)	cm	~ 4	~ 30	~ 4		~ 4	~ 1-2	
Quality indicators		covariance matrix	formal	standard deviation	✗	Global RMSE	Global RMSE	Covariance matrix
Full automation	Bash / shell script	✓	✓	✓	✓		✗	✓
Price		Open-source	Open-source	Open-source	Open-source	€€€€	€€€€	Open-source

2.2. SCRS-PPP

SCRS-PPP est une solution gratuite utilisable en ligne ou de manière locale et développée au Canada. L'objectif étant de valider un logiciel en vue de son intégration dans un traitement automatisé, seule la version locale de SCRS-PPP sera présentée. Cette dernière fonctionne en effet sous Linux et est donc entièrement automatisable. Le calcul sous SCRS-PPP nécessite la préparation au préalable d'un dossier contenant les fichiers suivants :

- Les orbites précises des satellites (fichiers .sp3)
- Les biais d'horloge des satellites (fichiers .clk)
- Les fichiers de rotation du pôle (fichiers .erp)
- Les fichiers fonction de projection (fichiers .vmf)
- Un fichier contenant les coefficients de marées terrestres selon le modèle FES 2004. (fichier. BLQ)
- Deux fichiers de configuration contenant respectivement les coordonnées approchées géographiques et cartésiennes de la station à calculer (fichiers sta_rdvvmf.txt et ITRFPGCA.CRD).

Après avoir collecté les données nécessaires, le calcul est lancé en ligne de commande. Par ailleurs l'Université de Montpellier a développé une automatisation du processus sous Linux, permettant, après avoir téléchargé et structuré l'ensemble des fichiers nécessaires, de calculer automatiquement une station sur une année entière. Il faut en moyenne une vingtaine de minutes pour calculer une année.

Le service des ressources naturelles du Canada est réactif et répond rapidement et précisément aux questions. Lagnoux (2013) présente le fonctionnement de SCRS-PPP de façon schématique (Figure 8).

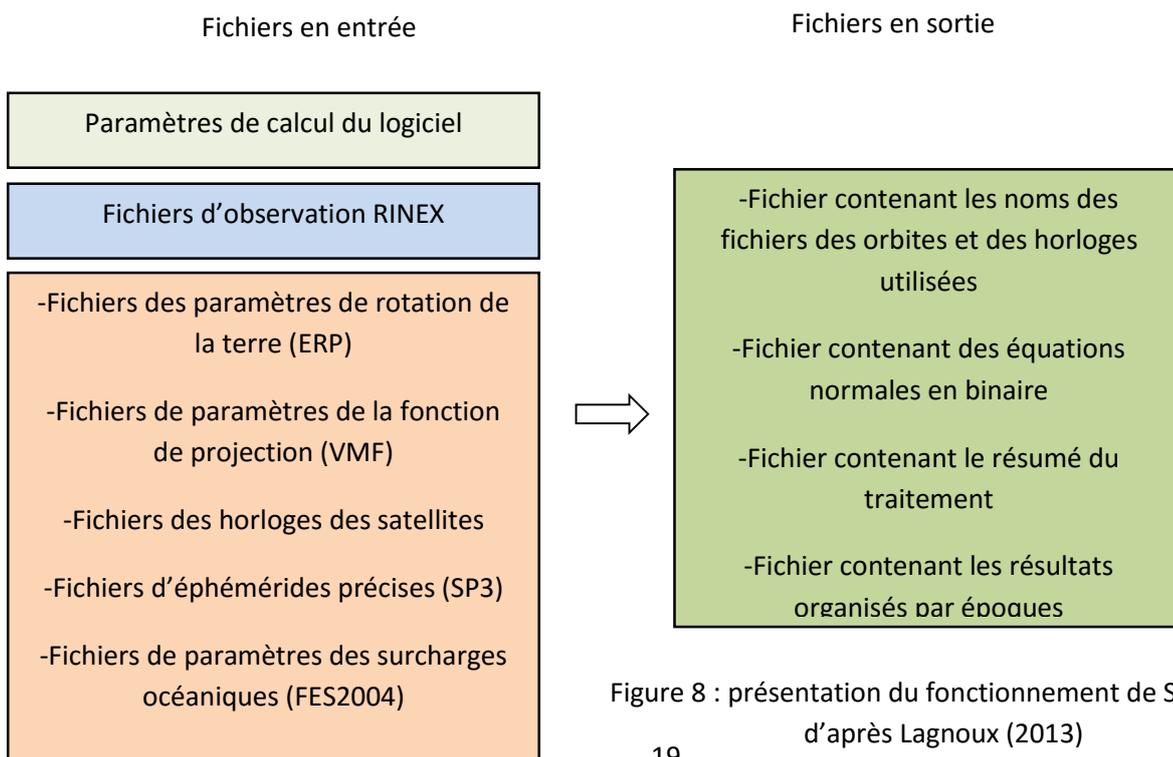


Figure 8 : présentation du fonctionnement de SCRS-PPP d'après Lagnoux (2013)

Il se trouve que SCRS-PPP est déjà utilisé à l'EOST pour le calcul des stations GNSS RENAG. La fiabilité des résultats a donc déjà été validée, notamment en les comparant avec ceux obtenus avec GAMIT pour les mêmes jeux d'observations.

Partant de cette constatation, il a paru judicieux de tester les différentes options du logiciel sur des données issues de récepteurs GNSS permanents, situés sur les glissements de terrains suivi par OMIV et de comparer les résultats obtenus avec ceux de GAMIT.

Les tests ont été réalisés en fonction des besoins actuels et futurs du suivi de glissements de terrain.

2.3. RTKLIB

RTKLIB est une solution open source très complète, développée par T. Takasu, et qui permet notamment le calcul de positionnement GPS différentiel et en PPP. La solution permet également la conversion de fichiers bruts « constructeurs » binaires au format RINEX.

RTKLIB est disponible sous Windows en interface graphique et en lignes de commande et sous Linux en ligne de commande. Le processus est donc entièrement automatisable, notamment par l'emploi d'un fichier de configuration. On retrouve les mêmes principaux paramètres que dans SCRS-PPP (orbites des satellites, modèles de marée, modèle de correction des décalages liés au passage des ondes dans l'atmosphère, etc.)

La version Linux est relativement classique à prendre en main. Les commandes sont de la forme « programme – option fichier ». Plusieurs calculs ont été réalisés avec RTKLIB, que ce soit en mode PPP ou différentiel (statique) et les résultats ont été comparés avec ceux obtenus par SCRS-PPP. Les détails de ces comparaisons seront donnés ultérieurement.

2.4. gLAB

La solution gLAB est développée par l'Université Polytechnique de Barcelone. Elle permet le calcul en PPP et offre un panel d'options proche de celui de SCRS-PPP et de RTKLIB. Le logiciel est disponible sous Windows avec une interface graphique et sous Linux en ligne de commande. Il est possible d'utiliser un fichier de configuration. L'utilisation de ce logiciel est proche de celle de ses homologues SCRS-PPP et RTKLIB.

Une documentation détaillée est disponible et les développeurs espagnols répondent rapidement et précisément à toute question.

Pour réaliser un calcul, il faut disposer d'un fichier d'observation, d'un fichier de navigation, d'un fichier d'orbite précise des satellites et de biais des horloges des satellites. Le calcul est très rapide (environ 8 minutes pour une année).

Plusieurs résultats de calcul sous gLAB seront présentés dans la suite de ce rapport.

2.5. GINS

GINs est un logiciel scientifique très complet, qui permet notamment de réaliser des traitements de données VLBI, DORIS, etc. Il comporte un module de calcul en PPP. Marty et al (2011) présentent le programme de façon plus détaillée. Le calcul repose sur la méthode des moindres carrés.

Paul Maisse (2014) a réalisé son mémoire d'ingénieur à l'EOST et a testé les potentialités de la solution GINS. Il semble par son retour d'expérience que le programme soit complexe à utiliser.

Dans le cadre de ce projet, seuls quelques résultats existants obtenus avec GINS à partir de données OMIV ont été utilisés et comparés à d'autres programmes. Aucun nouveau calcul n'a été effectué.

2.6. GAMIT-GLOBK

GAMIT-GLOBK est un logiciel scientifique de traitement de données GNSS, développé au MIT (Massachusetts Institute of Technology). Depréz (2010) présente le logiciel et décrit les différentes fonctions et programmes intervenant dans le processus de calcul GAMIT. Elle présente également quelques résultats obtenus sur les données OMIV. Elle compare les options et type de calculs disponibles et présentent les différences sur les résultats en fonction du choix de ces options.

De la même manière que pour GINS, aucun calcul n'a été réalisé avec GAMIT au cours de ce projet. Seuls des résultats existants et obtenus au cours de projets réalisés à l'EOST ont été comparés avec ceux de SCRS-PPP en vue de valider la méthode PPP.

3. Données bi-fréquence

3.1. Performance des logiciels sur les données bi-fréquence

Après avoir brièvement présenté quelques logiciels de calcul GNSS, il semble nécessaire de les tester, en particulier ceux permettant le calcul en PPP. Dans cette optique, et en gardant à l'esprit que le logiciel SCRS-PPP est déjà utilisé à l'EOST, un panel de tests va être présenté.

3.1.1. Test de SCRS-PPP

3.1.1.1. Comparaison GINS, SCRS-PPP et GAMIT

Le premier test qui a été réalisé avait vocation à valider le choix de SCRS-PPP et à confirmer les différentes analyses du logiciel trouvées dans la littérature scientifique. Pour ce faire les résultats de SCRS-PPP ont été mis en parallèle avec ceux de GAMIT-GLOBK sur une année.

Par ailleurs OMIV disposait également de quelques résultats obtenus à partir des mêmes observations avec le logiciel GINS (PPP) par Paul Maisse (2014), au cours de son projet de fin d'études. Ces données ont également été intégrées à la comparaison.

Les stations qui ont servi à la comparaison sont les stations VLRB, sur le glissement lent de Villerville et CLP2, située sur le glissement rapide de La Clapière. Les figures 9 et 10 présentent les résultats obtenus.

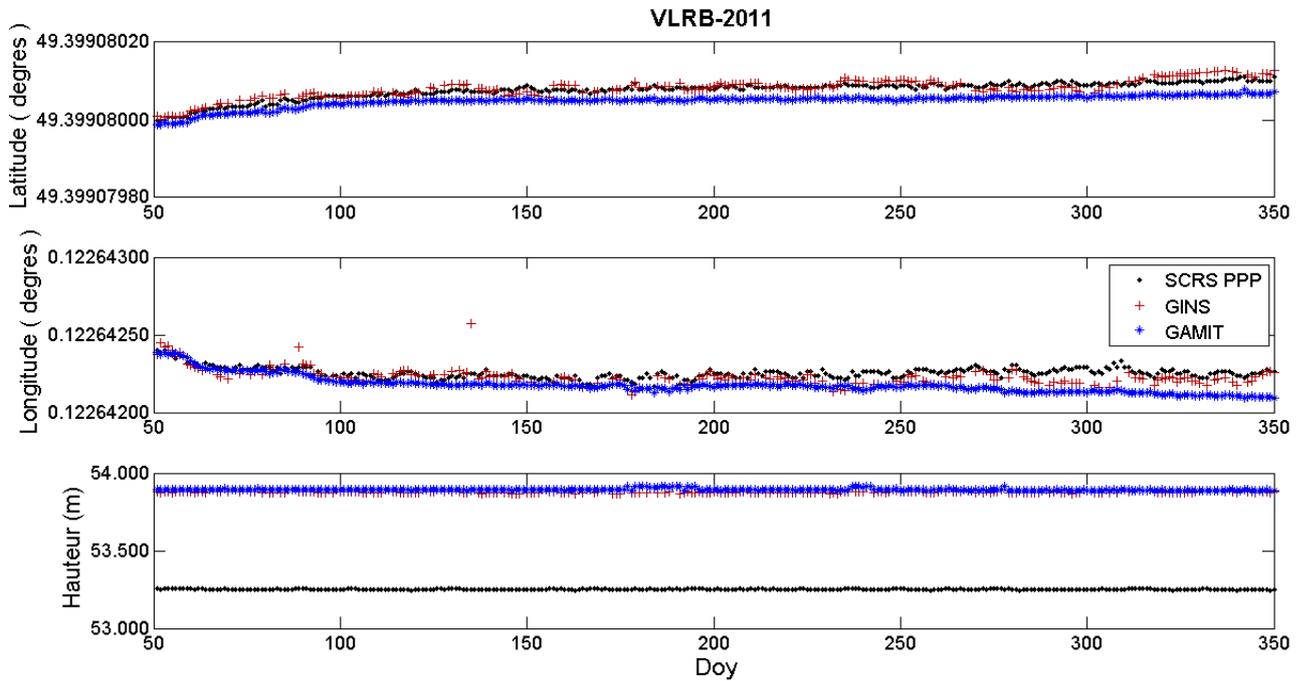


Figure 9 : Comparaison des solutions SCRS-PPP, GINS et GAMIT sur VLRB 2011. Résultats en latitude, longitude et hauteur ellipsoïdale.

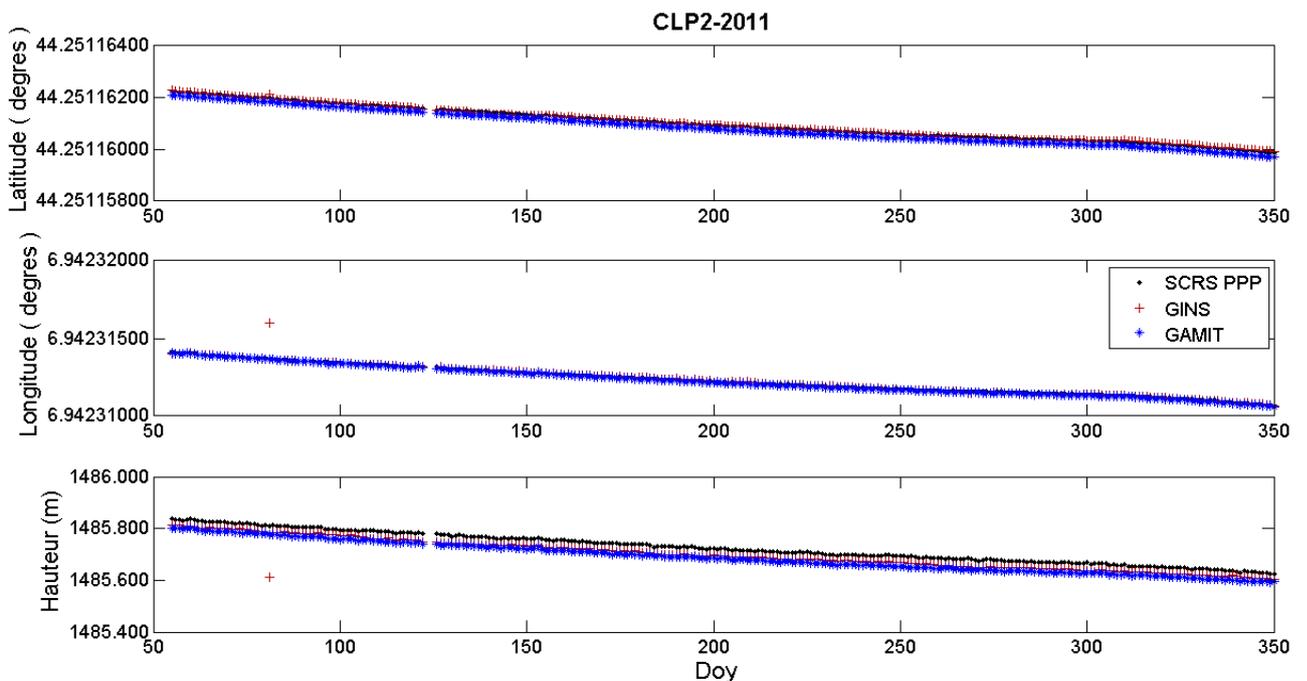


Figure 10 : Comparaison des solutions SCRS-PPP, GINS et GAMIT sur CLP2 2011. Résultats en latitude, longitude et hauteur ellipsoïdale.

Les mêmes tendances apparaissent pour les trois logiciels. La solution GINS semble légèrement plus bruitée. Il est également à noter que les hauteurs obtenues avec SCRS-PPP pour la station VLRB sont « décalées » par rapport aux deux autres solutions. Les statistiques présentées dans le tableau 4 confirment cette constatation, avec un écart moyen de l'ordre de un mètre trente centimètres en hauteur entre les résultats GAMIT et SCRS-PPP pour la station VLRB.

	CLP2			VLRB		
	latitude (m)	longitude (m)	hauteur (m)	latitude (m)	longitude (m)	hauteur (m)
Moyenne des écarts	0,043	0,015	0,093	0,014	0,015	1,283
Ecart type	0,004	0,010	0,006	0,005	0,013	0,011
Ecart maximum	0,026	0,000	0,045	0,000	0,000	1,261
Ecart minimum	0,057	0,072	0,109	0,025	0,044	1,326

Tableau 4: Statistiques des écarts entre les solutions SCRS-PPP et GAMIT pour les stations CLP2 et VLRB 2011.

A priori, il n'y a pas d'explication particulière à ce biais vertical. Les trois solutions fournissent des résultats dans le même système de coordonnées. Les hauteurs ellipsoïdales sont donc calculées par rapport au même ellipsoïde pour les trois logiciels. Le problème est peut être spécifique à ce jeu de données, d'autant que les écarts obtenus avec la station CLP2 sont beaucoup plus faibles (environ 10 centimètres sur la hauteur).

Au vu de ces tests, on peut affirmer que les trois solutions sont très proches avec des écarts en moyenne de l'ordre de quelques centimètres. On constate cependant des résultats étonnants au niveau des hauteurs obtenues avec SCRS-PPP pour la station VLRB.

Pour poursuivre l'analyse, une autre comparaison a été réalisée, cette fois-ci uniquement entre SCRS-PPP et GAMIT. Le principe est le suivant : toutes les stations de deux glissements, ceux de Villerville et de La Clapière, ont été calculées sur l'année 2013. Les lignes de base, c'est-à-dire la distance géométrique, ont été calculées entre la station hors glissement et les stations sur glissement. Les lignes de base calculées ont ensuite été comparées à celles obtenues suite au calcul avec GAMIT.

Pour l'exemple du site de Villerville, les écarts moyens calculés entre les lignes de base obtenues avec les deux logiciels sont de l'ordre du centimètre. On constate des écarts similaires pour La Clapière.

Les résultats obtenus sur la comparaison des lignes de base viennent confirmer que la solution SCRS-PPP semble tout à fait adaptée au suivi de glissements de terrains. En effet, les positions du logiciel canadien sont très proches de celles calculées avec GAMIT-GLOBK qui peut être considéré comme une référence.

3.1.1.2. « Kinematic » vs « static »

SCRS-PPP offre la possibilité de réaliser un calcul en mode statique ou dynamique. Certaines des stations permanentes, les stations « mobiles » étant placées directement sur les zones instables et certaines se déplaçant jusqu'à plusieurs mètres par an (notamment pour les sites de La Clapière ou de Super-Sauze), il a semblé judicieux de tester l'influence du choix de l'option « *static* » ou « *kinematic* » sur le résultat lors d'un calcul avec SCRS-PPP.

D'un point de vue théorique, le choix de l'option « *kinematic* » va impliquer qu'une solution indépendante sera calculée pour chaque époque du fichier de données.

Pour réaliser la comparaison, deux stations ont été calculées sur les mêmes périodes, mais une fois avec l'option « *static* » et l'autre fois avec l'option « *kinematic* ». Le test a été réalisé sur CLP1 2013 (station sur glissement) et VLRV 2012 (station hors glissement). Les résultats sont présentés dans les figures 11 et 12.

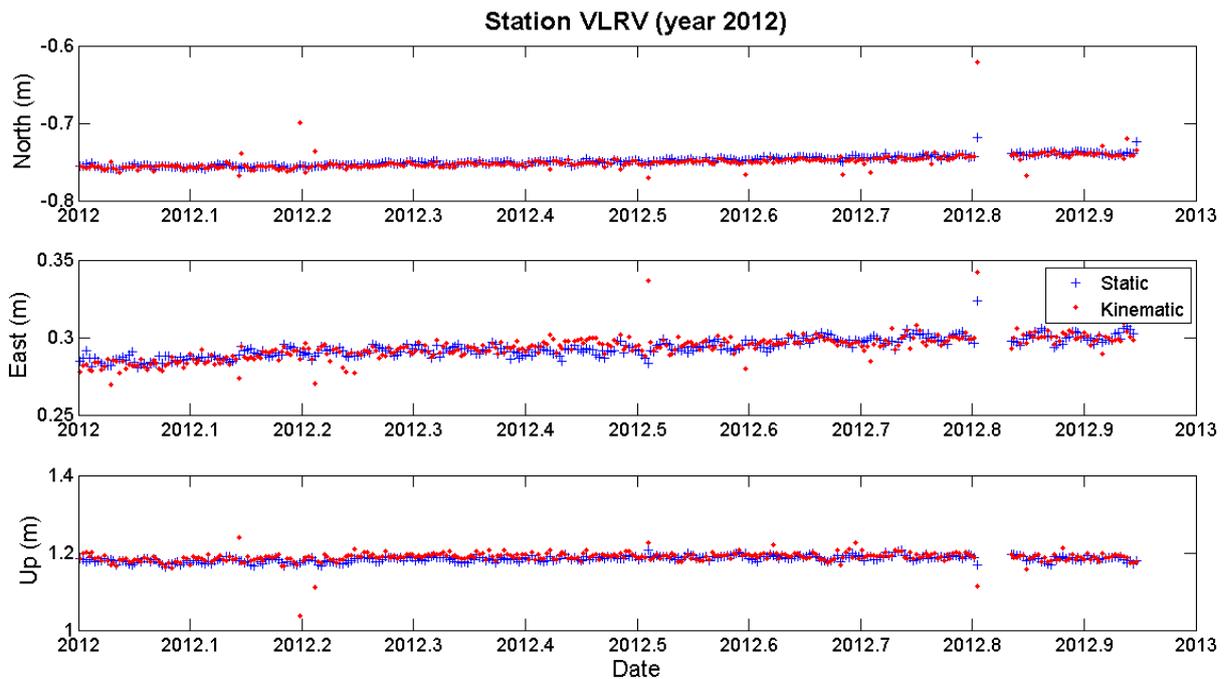


Figure 11 : séries temporelles de position obtenues avec les options « *static* » et « *kinematic* » sur la station VLRV 2012.

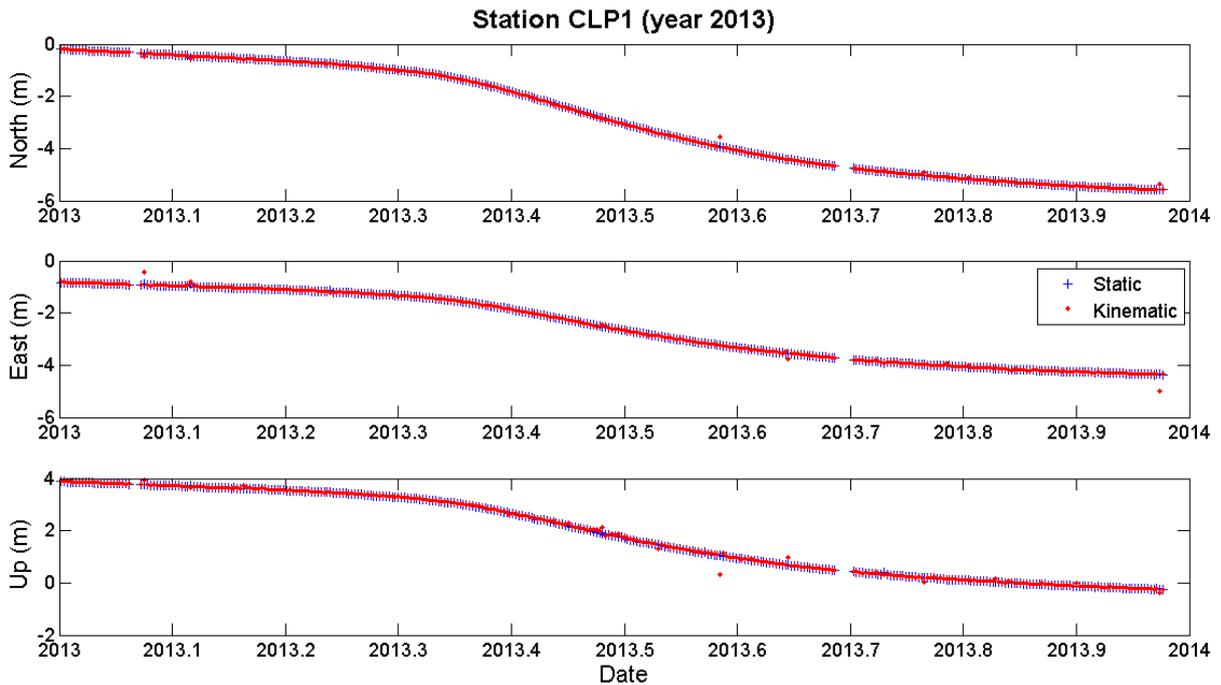


Figure 12 : séries temporelles de position obtenues avec les options « static » et « kinematic » sur la station CLP1 2013.

Les résultats sont très proches en East, North et Up. Visuellement, il est difficile de mettre en évidence des différences, si ce n'est que pour quelques points, l'option « *kinematic* » semblent fournir des résultats légèrement plus bruités.

Afin de mieux quantifier les écarts, des écarts moyens en East, en North et en Up ainsi que les écarts types sur ces écarts ont été calculés. Les résultats sont présentés dans le tableau 5. Il apparaît que les écarts sont négligeables d'une option à l'autre (quelques millimètres).

	CLP1 2013			VLRV 2012		
	North	East	Up	North	East	Up
Ecart moyen (mm)	-0,94	-5,85	-11,26	1,18	0,00	-4,21
Ecart type (mm)	27,30	46,40	54,00	7,27	5,30	12,00

Tableau 5 : statistiques des écarts entre les options « static » et « kinematic » pour CLP1 2013 et VLRV 2012

Un autre résultat intéressant est présenté dans la figure 13. Si l'on s'intéresse aux erreurs (EMQ) calculées par le logiciel, il apparaît que pour la solution avec l'option « kinematic », les erreurs sont significativement (facteur cinq) plus importantes qu'avec l'option « static ». Avec la première option, les erreurs sont proches du centimètre, tandis qu'avec la seconde elles se rapprochent des cinq centimètres.

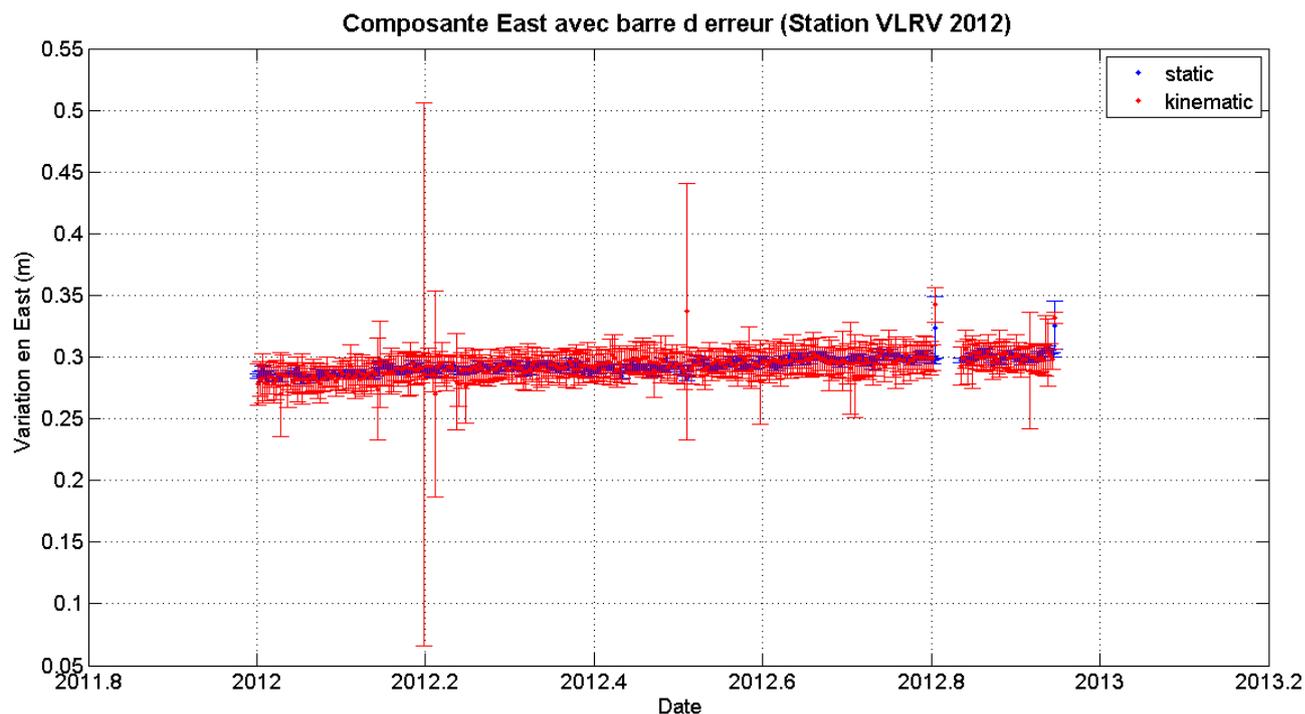


Figure 13 : erreurs moyennes quadratiques sur les positions en fonction de l'option choisie (« *kinematic* » ou « *static* ») pour VLRV 2012.

Les résultats sont très proches entre les deux options, avec un écart moyen maximal atteint sur la composante verticale Up et qui avoisine le centimètre. Les résultats obtenus avec l'option « *kinematic* » paraissent légèrement plus bruités et présentent des erreurs moyennes quadratiques plus grandes. Par la suite, les traitements seront donc réalisés avec l'option « *static* ».

3.1.1.3. Effets des données rapides et finales

Il a été vu dans l'état de l'art, que le calcul en PPP, notamment avec SCRS-PPP nécessitait de disposer de mesures complémentaires aux fichiers d'observation. Il s'agit dans le cas du logiciel canadien des orbites précises des satellites (fichiers. sp3), des décalages d'horloges des satellites (fichiers. clk) et des fichiers de paramètres de rotation du pôle (fichiers. erp).

Ces fichiers sont disponibles sur le site de l'IGS. Plusieurs « versions » de ces fichiers existent. Les orbites et horloges satellites « Broadcast » (radiodiffusées) disponibles en temps réels, les orbites et horloges satellites « *Ultra-Rapid* », disponibles instantanément pour la partie prédite et au bout de quelques heures (trois à neuf heures d'après le site de l'IGS) pour la partie calculée, les orbites et horloges satellites « *Rapid* » disponibles au bout de quelques jours (dix-sept à quarante et une heures selon l'IGS) et enfin les orbites et horloges satellites précises (ou « *Final orbits* »), disponibles au bout de quelques semaines (douze à dix-huit jours sur le site de l'IGS).

Il va de soi que plus on est patient, plus les fichiers disponibles seront précis. Le tableau 6 présente les précisions sur l'orbite du satellite et sur le biais d'horloge du satellite en fonction du type de fichier. Le

tableau 7 présente la précision des paramètres ERP (*Earth Rotation Parameter*) en fonction du type de fichier.

Type	Précisions des orbites	Précision des horloges	Temps
Broadcast	~1m	~ 5 ns RMS ~2.5 Sdev	temps réel
Ultra rapide prédites	~5cm	~3 ns RMS ~1.5 Sdev	temps réel
Ultra-rapide observées	~3cm	~150 ps RMS ~50 ps Sdev	3-9 heures
Rapides	~2.5 cm	~75 ps RMS ~25 ps Sdev	17 - 41 heures
Précises (<i>final orbits</i>)	~2.5 cm	~75 RMS ~20 ps Sdev	12-18 jours

RMS : Root Mean Square= Valeur moyenne quadratique

Sdev : Standard Deviation = écart type

Tableau 6 : différents types de produits (orbites et horloges satellites) disponibles sur le site de l'IGS (source site de l'IGS)

Type	Précisions des orbites	Temps
Ultra rapide prédites	PM ~200 yas	temps réel
	PM rate ~300 yas/day	
	LOD ~50 ys	
Ultra-rapide observées	PM ~50ys	3-9 heures
	PM rate ~250 yas/day	
	LOD ~10 ys	
Rapides	PM ~40 yas	17 - 41 heures
	PM rate ~200 yas/day	
	LOD ~10 ys	
Finales	PM ~30 ys	11-17 jours
	PM rate ~150 yas/day	
	LOD ~10 ys	

Tableau 7 : différents de paramètres ERP disponibles sur le site de l'IGS (source site de l'IGS) PM : *Polar Motion*, PM rate : *Polar Motion-Rate*, LOD : *Length of Day*, 100 yas = 3.1 mm de la rotation équatoriale, 10 ys = 4.6 mm de la rotation équatoriale

La surveillance de glissements de terrain ayant vocation de permettre une réaction rapide donc à anticiper et à éviter ainsi des drames, il est nécessaire de pouvoir calculer les déplacements des stations GNSS permanentes dans un délai bref. Cependant, le choix des orbites et horloges ultra-rapides, rapides ou finaux affecte-t-il la précision des résultats ?

Pour tenter de répondre à cette question, une comparaison entre les orbites et horloges satellites ultra-rapides, rapides et finaux a été réalisée.

Ce test a permis de mettre rapidement en évidence que les fichiers .clk, c'est-à-dire les fichiers de biais d'horloge des satellites ne sont pas calculés de façon ultra-rapide. Ils sont uniquement disponibles à

partir des produits rapides. Les données ultra-rapides n'ont donc pas pu être intégrées au test. Cependant, la comparaison a tout de même été réalisée entre les données rapides et finales. L'étude a été menée sur CLAP 2013 et VLRV 2013. Les figures 14 et 15 présentent les résultats.

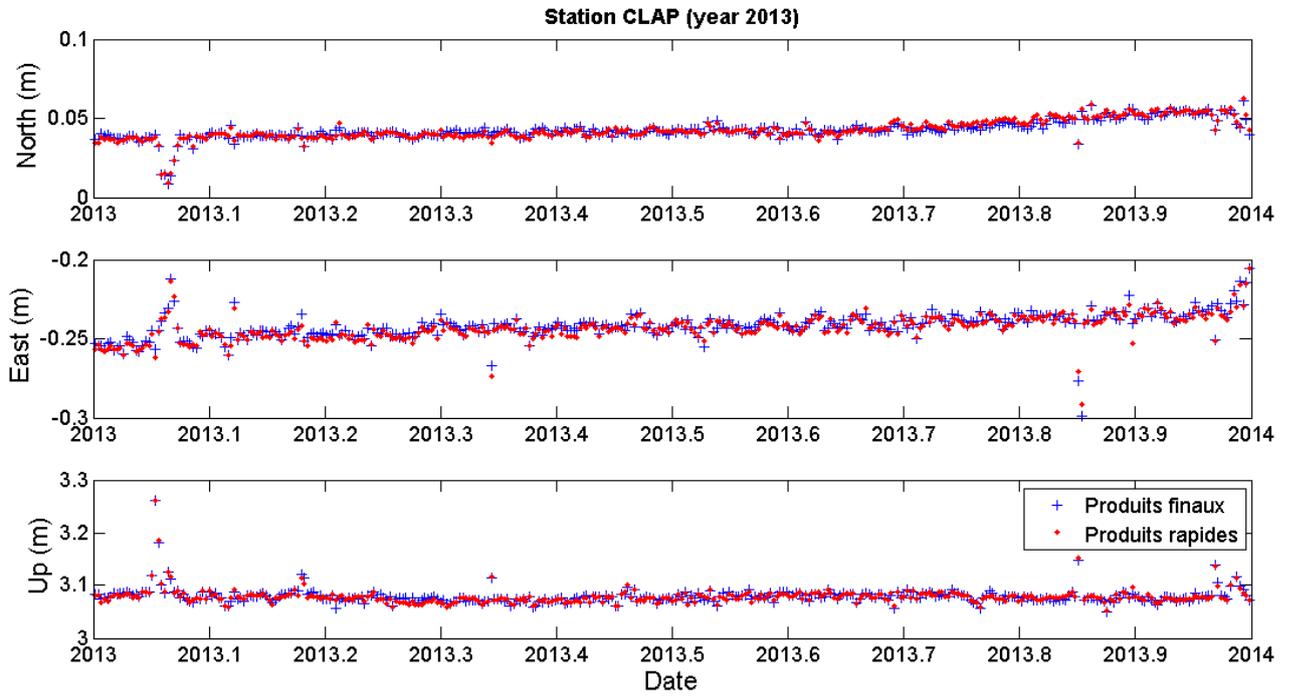


Figure 14 : Influence du type de produits IGS utilisés (orbites rapides ou finales) sur le positionnement : station CLAP 2013

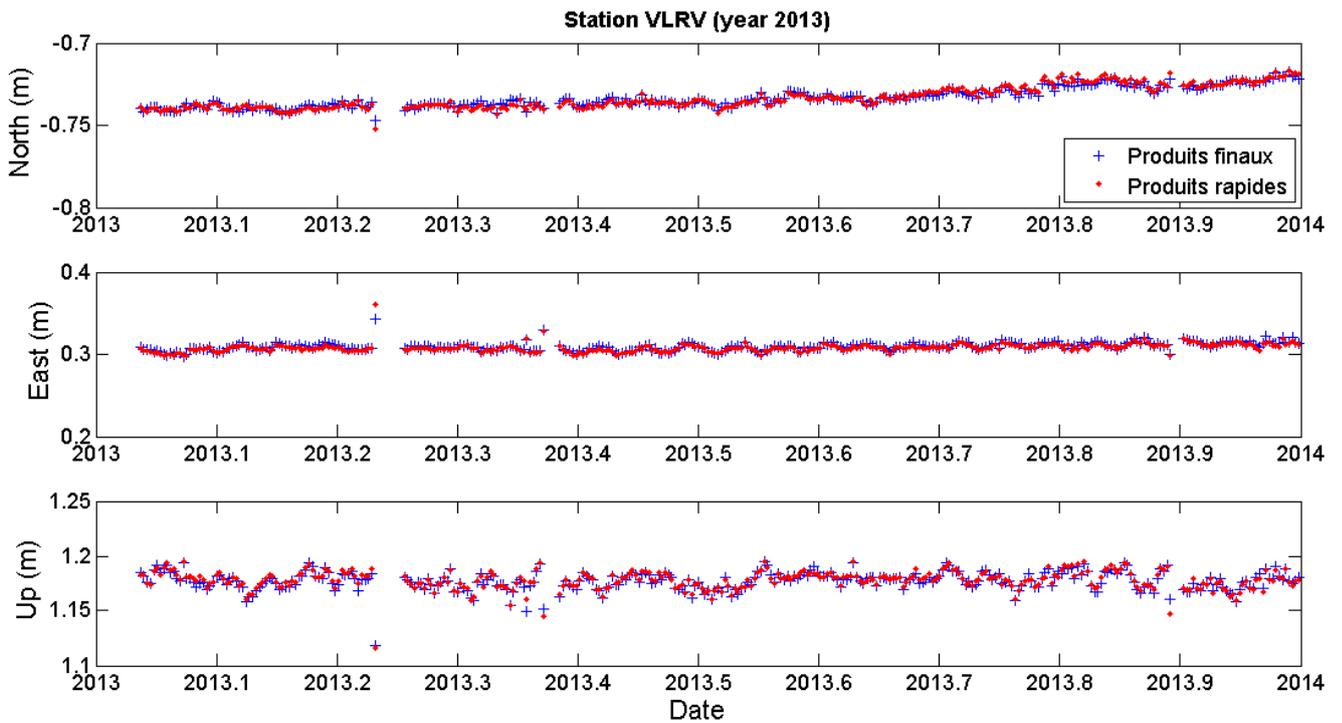


Figure 15 : Influence du type de produits IGS utilisés (orbites rapides ou finales) sur le positionnement : station CLAP 2013

Visuellement, il apparaît que les résultats sont très proches. Une analyse statistique confirme cette affirmation. Le tableau 8 présente les écarts obtenus.

	CLAP 2013			VLRH 2013		
	North	East	Up	North	East	Up
Écarts moyens (mm)	-0.09	1.19	0.49	-0.08	1.23	-0.62
Écarts type des écarts (mm)	1.4	1.9	3.5	1.3	1.6	2.2

Tableau 8 : statistiques sur les écarts entre les positions calculées avec les orbites rapides et les orbites finales sur CLAP 2013 et VLRH 2013.

Les écarts obtenus peuvent être qualifiés de négligeables dans la mesure où l'écart moyen avoisine le millimètre, voire est nettement inférieur au millimètre. De plus si l'on étudie les erreurs moyennes quadratiques, on ne distingue pas non plus de différence entre les deux calculs.

Ce que l'on peut retenir de ce test est que les résultats ne présentent pas de grande différence selon que l'on utilise les produits rapides ou finaux. Depréz (2010), dans une étude réalisée avec l'outil GAMIT-GLOBK, en était d'ailleurs arrivée à la même conclusion.

Par la suite les deux types de données seront utilisés pour la mise en place d'une solution de traitement quotidienne automatique. Plus de détail seront donnés ultérieurement.

3.1.1.4. Influence de la durée d'observation

Après avoir traité les données de quelques stations sur plusieurs années, il est apparu que de temps en temps, certains points semblaient plus bruités que d'autres. Certains de ces bruits ont pu être expliqués par des raisons météorologiques (possibilité de présence de neige sur les antennes), mais pour d'autres, ces bruits ne semblaient pas avoir d'explications. Une analyse des fichiers RINEX a donc été réalisée à l'aide de l'outil TEQC de l'UNAVCO et il est ressorti que pour plusieurs points bruités, la durée d'observation sur la journée était inférieure à deux heures. De plus, ces mêmes jours, les erreurs moyennes quadratiques calculées par SCRS-PPP étaient plus élevées que les autres jours. Ainsi pour une journée avec vingt-quatre heures d'observation, l'erreur moyenne quadratique avoisine en général les deux centimètres. Pour une durée d'observation de cinq heures seulement, cette erreur passe à cinq centimètres.

Il a donc semblé assez clair qu'il y avait une corrélation entre durée d'observation et précision du résultat du calcul.

Il paraissait alors intéressant de déterminer plus précisément l'influence de la durée d'observation sur le résultat.

Le procédé choisi est le suivant :

- Sélection d'un fichier RINEX vingt-quatre heures pour une station (CLP1)
- Traitement avec SCRS-PPP de ce fichier
- Troncature manuelle de ce RINEX observation : on enlève les trois dernières heures de façon à avoir un fichier RINEX de vingt-et-une heures.
- Traitement avec SCRS-PPP de ce nouveau fichier RINEX
- Etc.

On obtient ainsi des coordonnées East, North, Up ainsi que les erreurs associées en fonction de la durée d'observation.

La figure 16 présente les résultats de ce test. Les coordonnées sont données de manière relative.

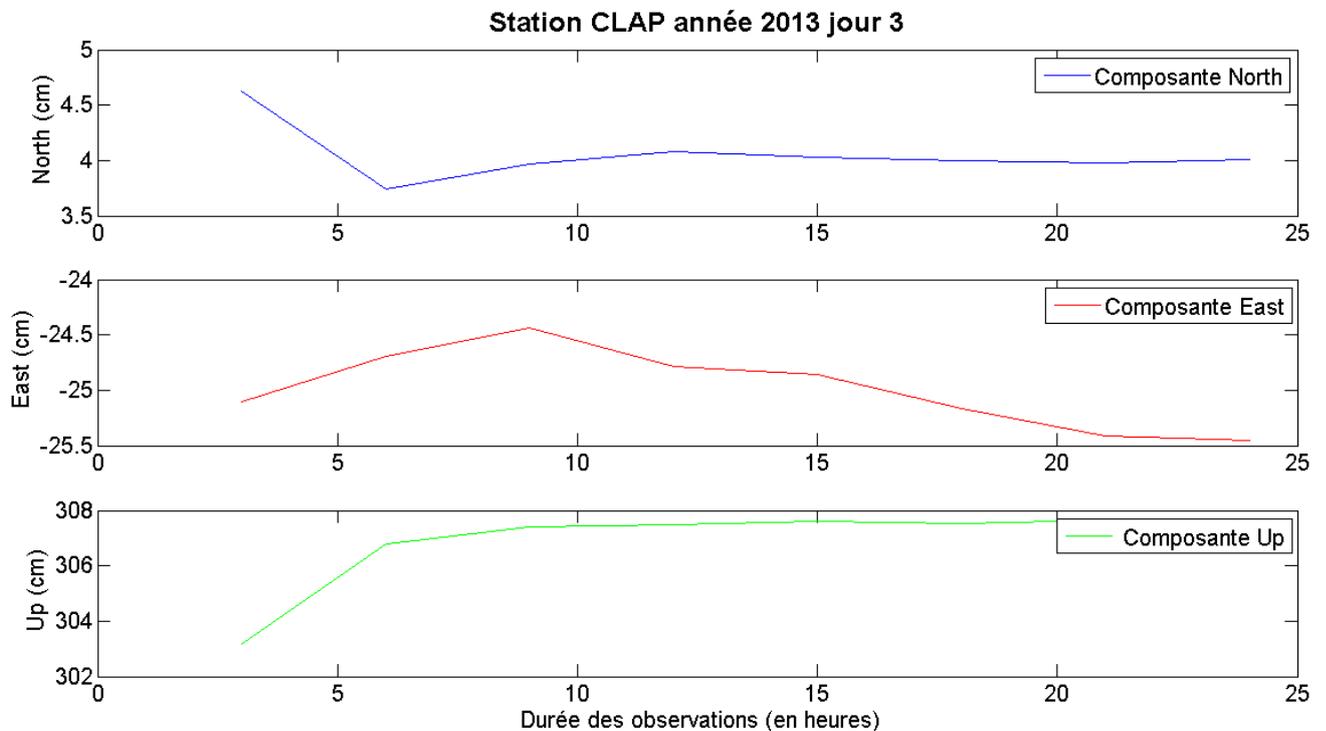


Figure 16 : Variation de la position en fonction de la durée des observations sur la station CLAP le 3 janvier 2013.

Il semble que la position converge après quinze heures d'observations. De même, les erreurs sur chaque composante n'évoluent plus passées les quinze heures de mesure. C'est ce qui peut être vérifié sur la figure 17 :

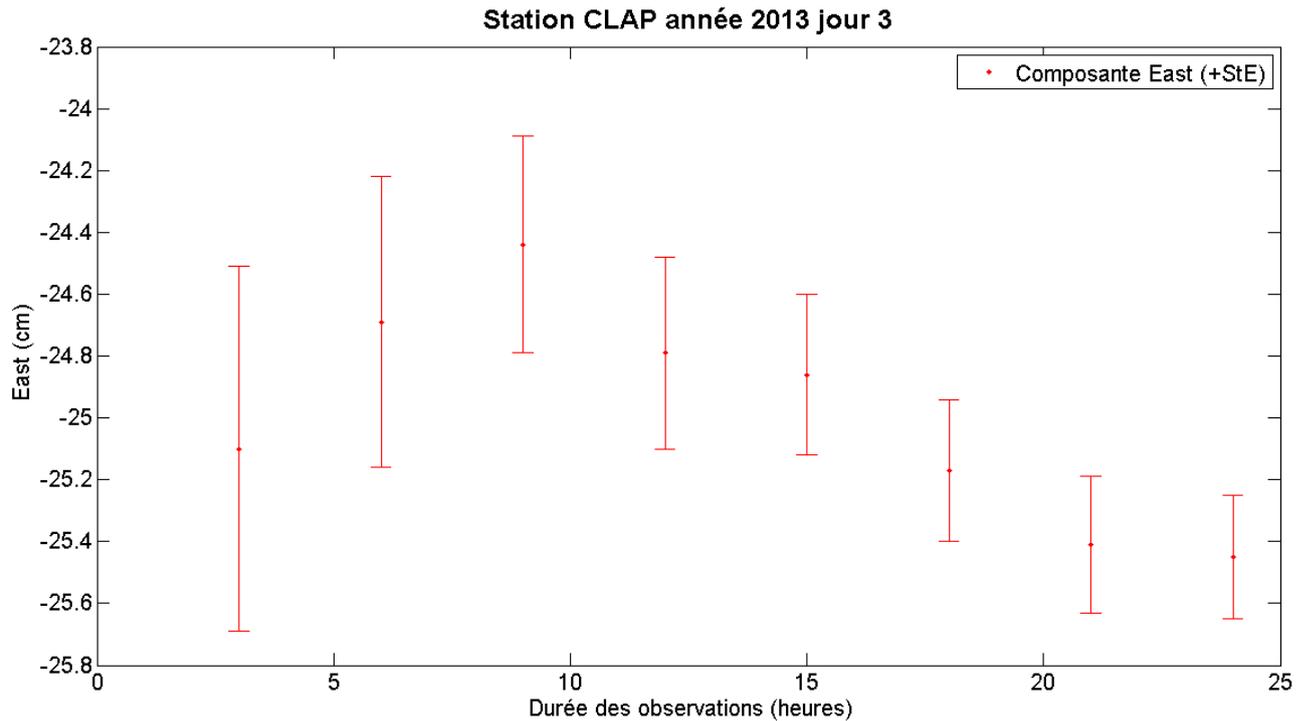


Figure 17 : évolution de l'erreur moyenne quadratique sur la précision en fonction de la durée des observations sur la station CLAP le 3 janvier 2013.

Afin de confirmer cette hypothèse, l'option « Forward/ Backward » de SCRS-PPP peut être un argument intéressant. Elle permet de réaliser un calcul « aller », puis un calcul « retour » en considérant la dernière position du calcul aller comme optimale. Il s'agit là d'un calcul de contrôle.

Des « paliers » sont visibles sur le calcul retour dès lors que la durée d'observation est inférieure à quinze heures. En revanche, lorsque la durée d'observation est supérieure à quinze heures, ces paliers sont moins marqués voire inexistantes (voir figure 18). En général, lorsque la durée d'observation est supérieure à quinze heures, la solution finale du calcul retour est la même que la solution finale du calcul aller.

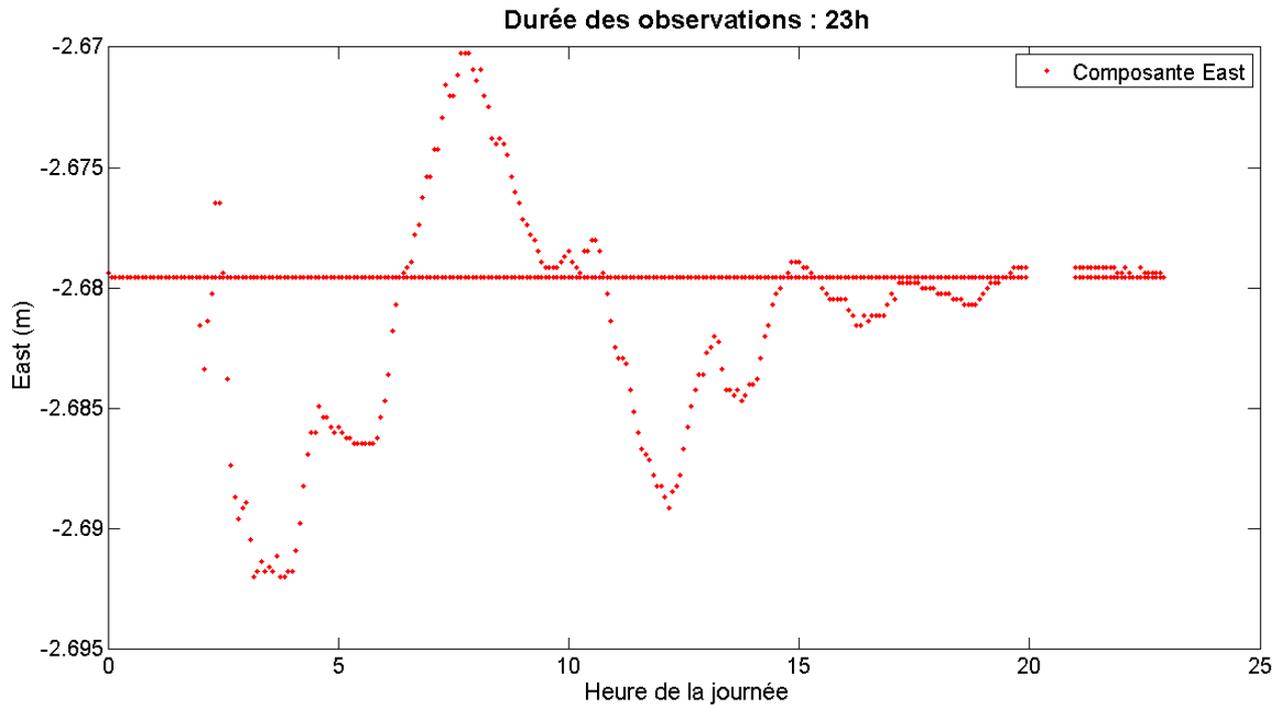


Figure 18 : Présentation d'une solution de calcul « forward-backward » sous SCRS-PPP. La durée d'observation est ici de 23h.

Pour la suite des traitements, notamment en vue de la mise en place d'un traitement automatique, tous les points ayant été calculés à partir de fichiers RINEX dont la durée d'observation est inférieure au seuil de quinze heures seront éliminés.

3.1.1.5. Traitement en mode « L1 only »

SCRS-PPP dispose d'une option « L1 only ». Dans l'optique de réaliser ultérieurement des mesures avec des récepteurs mono-fréquence à bas coût, il a semblé judicieux de tester la pertinence et la qualité des calculs de SCRS-PPP avec des données comportant uniquement des mesures sur L1.

Pour réaliser ce test les observations L2, C2 et P2 de tous les fichiers RINEX de la station CLP1 (site de La Clapière) ont été éliminées sur l'année 2013 (outil TEQC) puis une comparaison visuelle a été effectuée par rapport aux résultats obtenus avec des observations bi-fréquence. La figure 19 présente les résultats obtenus.

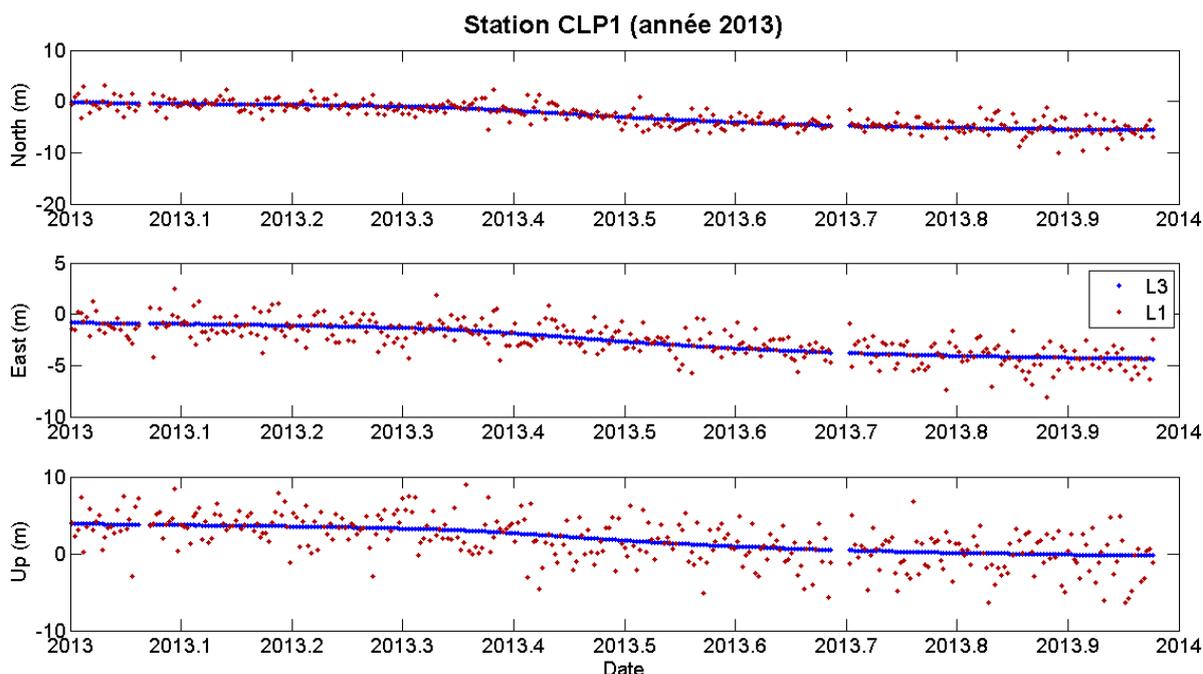


Figure 19 : Comparaison entre un calcul en « L1 only » et en L1 +L2 avec SCRS-PPP sur la station CLP1 2013.

Les résultats obtenus avec l'option « L1 only » sont très bruités et varient parfois de plusieurs mètres du jour au lendemain. Au vu de cette constatation, il ne semble pas pertinent de réaliser une comparaison statistique plus poussée. De plus, les erreurs résiduelles fournies par SCRS-PPP en sortie de calcul (matrice des variances-covariances) donnent des erreurs sur East, North et Up de l'ordre de un à deux mètres. Le positionnement obtenu avec l'option « L1 only » ne semble donc guère mieux qu'une solution de navigation.

Le service des ressources naturelles du Canada, qui développe SCRS-PPP a par la suite confirmé que dans le cas d'un calcul « L1 only », seules les mesures de code étaient utilisées.

L'option « L1 only » de SCRS-PPP ne permet donc pas d'obtenir des résultats suffisamment précis pour la surveillance de glissements de terrain.

3.1.1.6. Données dynamiques ultra rapides

Dans le cadre de leur PRT (Projet de Recherche Technologique) sur la détermination de la précision d'un positionnement mobile (Boetzlé et Berson, (2015)) des mesures GPS ont été réalisées à des vitesses élevées allant de 15 à 50 km/h. Les mesures n'ayant pas abouti au cours du PRT, une nouvelle campagne d'acquisition a été réalisée au cours du PFE, avec la participation de la société Géotopo. Dans ce cadre, des données RINEX dynamiques de récepteurs se déplaçant très rapidement ont été acquises. La faisabilité d'un calcul en PPP sur ce type de données a été étudiée.

Trois logiciels de traitement différents ont été testés : il s'agit de SCRS-PPP, RTKLIB et gLAB.

SCRS-PPP a réalisé un calcul. Cependant, seuls deux points ont été calculés et les résultats de positionnement sont très différents entre le calcul *forward* et le calcul *backward*. Les deux autres solutions n'ont fourni aucun résultat. Le choix de l'option « *kinematic* » n'a pas amélioré les calculs. Au vu de ces quelques tests, il semble que le calcul en PPP, du moins avec les trois logiciels testés, n'est pas adapté au calcul de données dynamiques « ultra-rapides ».

3.1.2. Test de RTKLIB et comparaison avec SCRS-PPP

Après avoir étudié les différentes options proposées par SCRS-PPP et tenté ainsi de sélectionner la meilleure combinaison possible, il semble intéressant de comparer les résultats avec d'autres logiciels, notamment RTKLIB.

Dans un premier temps, un calcul a été réalisé avec RTKLIB sur une série temporelle d'une année. C'est le site de Villerville et en particulier la station de VLRV qui est située en dehors du glissement et dont la position varie très peu au cours de l'année (variations de l'ordre de quelques mm) qui a été choisi.

Pour le calcul, l'option « *precise* » pour les orbites des satellites a été choisie et les fichiers .sp3 ont été nécessaires. Après avoir réalisé des tests avec plusieurs combinaisons possibles, le fichier de configuration qui paraissait apporter les meilleurs résultats possibles a été choisi. Il figure en annexe 2.

La variation de position sur l'année obtenue est représentée sur la figure 20. Les coordonnées sont en relatif. Les valeurs minimales de position sur l'année en East, North et Up ont été mises en évidence. Les valeurs obtenues ont ensuite été soustraites aux autres coordonnées.

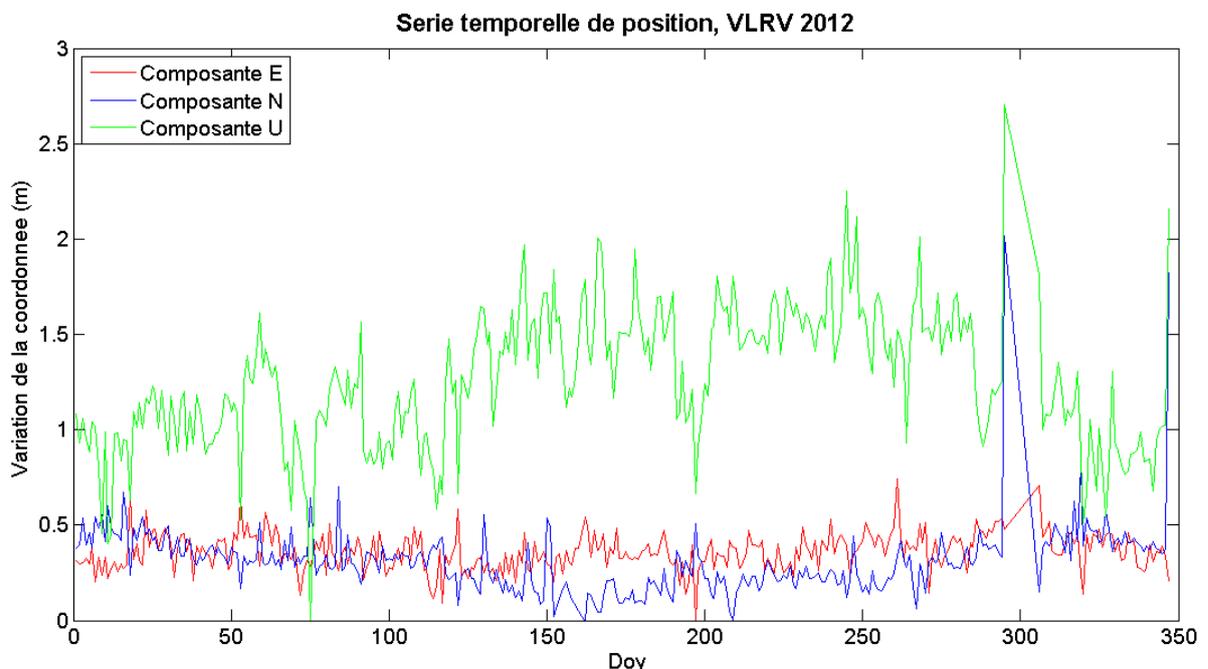


Figure 20 : variation de la position de la station VLRV 2012 obtenue suite à un calcul en PPP avec le logiciel RTKLIB.

Les positions calculées sont très instables. Quelle que soit la composante, les valeurs varient de plusieurs dizaines de centimètres d'un jour à l'autre, alors que la station ne bouge que de façon négligeable. A l'échelle de l'année, les variations sont même de l'ordre du mètre pour la composante Up.

Lorsque les résultats obtenus avec RTKLIB en PPP et avec SCRS-PPP sont comparés, il ressort que les écarts en X, Y et Z sont relativement faibles. En effet, ces derniers sont inférieurs au mètre. De plus ces écarts peuvent s'expliquer par la différence des systèmes de coordonnées, RTKLIB donnant des résultats dans le système WGS84 et SCRS-PPP dans l'ITRF 2008. Ces deux systèmes sont localement très proches (écarts de l'ordre de la vingtaine de centimètres par endroit) mais il n'existe pas de modèle pour passer de l'un à l'autre.

Cependant, l'instabilité des résultats de RTKLIB en PPP constatée grâce au calcul de VLRV, et confirmée avec le calcul des stations VLRB et VLRH, ne permet pas de retenir la solution RTKLIB PPP pour le calcul GNSS appliqué au suivi de glissements de terrain.

3.1.3. Test de gLAB et comparaison avec SCRS-PPP

Un test similaire à celui de RTKLIB en PPP a été réalisé pour la solution gLAB. Une station a été calculée sur une année. Pour ce faire, il a été nécessaire de réaliser un script en Bash faisant intervenir gLAB. Avant de calculer la station sur une année, plusieurs tests ont été réalisés sur une seule journée, de façon à déterminer la combinaison d'options qui offrait les meilleurs résultats. La combinaison choisie peut être consultée en annexe 1.

La figure 21 présente les positions relatives obtenues avec gLAB. Elles sont mises en parallèle avec celles obtenues avec SCRS-PPP.

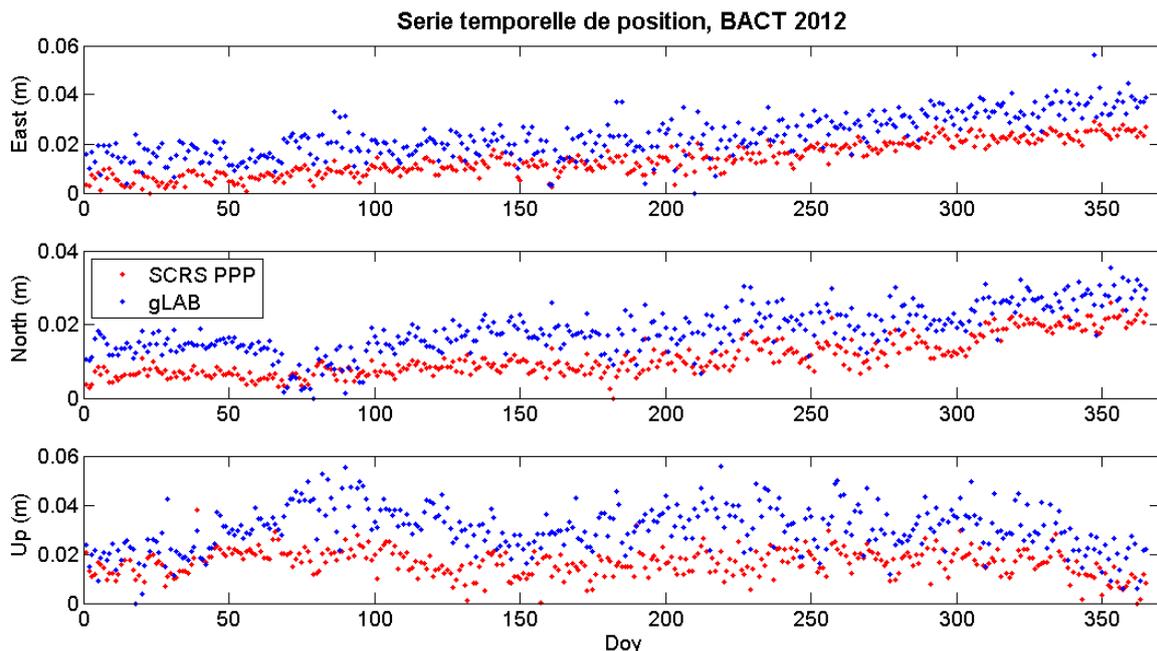


Figure 21 : variation de la position de la station BACT 2012 obtenue suite à un calcul en PPP avec le logiciel gLAB.

Les deux courbes (gLAB et SCRS-PPP) ont des tendances similaires quelle que soit la coordonnée. gLAB semble cependant fournir des résultats plus bruités. Afin d'obtenir des résultats quantitatifs, une analyse statistique des écarts entre gLAB et SCRS-PPP a été menée. La figure 22 présente la variation des écarts sur l'année.

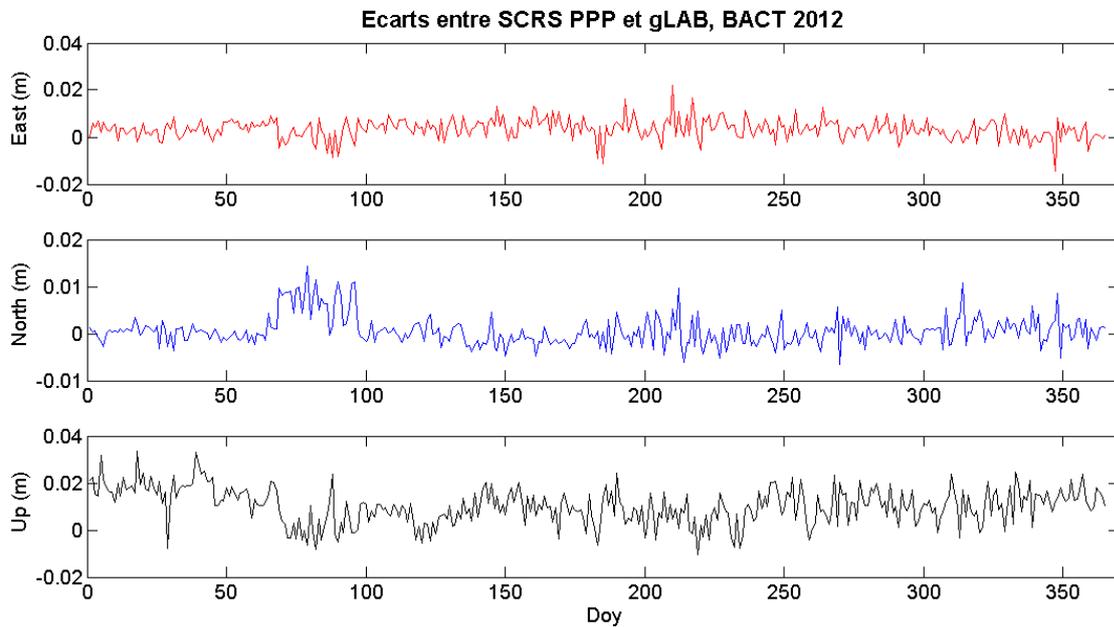


Figure 22 : écarts de positions entre les résultats gLAB et SCRS-PPP sur la station BACT 2012

Le tableau 9 présente les statistiques obtenues pour la station BACT sur l'année 2012.

	East (mm)	North (mm)	Up (mm)
Moyenne des écarts	3,5	0,5	10,0
Ecart type	4,2	3,1	7,6
Maximum	21,9	14,3	33,7
Minimum	0,0	0,0	0,0

Tableau 9 : statistiques des écarts entre les solutions de positionnement gLAB et SCRS-PPP sur BACT 2012.

Ce test démontre que les résultats obtenus avec gLAB sont très proches de ceux obtenus avec SCRS-PPP, avec des écarts en moyenne inférieurs au centimètre. Cependant gLAB semble légèrement plus bruité que son homologue canadien. La composante présentant les plus grandes différences est la composante verticale (Up).

De plus, une seule série temporelle, celle de la station BACT 2012 a été calculée avec gLAB. Les calculs avec les autres stations et sur d'autres années n'ont pas abouti et a priori, aucune explication n'a été trouvée. La solution gLAB ne sera donc pas retenue pour la mise en place de calculs automatiques de séries temporelles.

3.2. Validation de la solution SCRS-PPP

Au vu des analyses trouvées dans la littérature spécialisée (Lagnoux, 2010 ; Bevy, 2014), et des expériences réalisées sur les données GNSS OMIV, la solution SCRS-PPP semble avoir fait ses preuves. Elle est déjà utilisée à l'EOST, et c'est celle qui a fourni les résultats les plus constants et stables.

Les nombreux tests réalisés ont par ailleurs permis de déterminer la combinaison d'options de SCRS-PPP qui semble la plus adaptée aux besoins du suivi de glissement de terrain.

SCRS-PPP permet de réaliser des calculs rapidement (environ quatre jours après les mesures) et offre une précision affichée inférieure au centimètre. De plus les résultats obtenus avec SCRS-PPP sont très proches de ceux obtenus avec GAMIT-GLOBK, utilisé jusqu'à présent par OMIV, et qui peut s'apparenter à une référence en la matière, en particulier pour les glissements lents.

Le calcul avec SCRS-PPP est très rapide. A titre indicatif, il faut une vingtaine de minutes pour calculer une position chaque jour, pour une station sur une année. Cependant, si l'on compare les résultats obtenus en différentiel avec GAMIT-GLOBK, il apparaît que la méthode PPP fournit des résultats légèrement plus bruités et instables, surtout en ce qui concerne les glissements lents. Malgré cette constatation, la solution SCRS-PPP reste très intéressante pour le calcul des stations permanentes affectées au suivi de mouvements de terrain. En effet, sa mise en œuvre est vraiment aisée en comparaison à celle de GAMIT-GLOBK. De plus il est possible d'améliorer les résultats, notamment pour les stations se déplaçant peu, par l'usage de filtres. Un filtrage est d'ailleurs réalisé à l'EOST pour le calcul des stations RENAG.

La solution SCRS-PPP vérifie tous les critères du cahier des charges et peut donc être validée et intégrée dans un traitement automatisé.

3.3. Mise en place d'une chaîne de traitement : la solution OMIV

3.3.1. Principe général des scripts

Le réseau de stations permanentes OMIV représente une vingtaine de stations réparties sur cinq sites et qui transmettent quotidiennement des données sur un serveur FTP situé à l'EOST.

Ces données une fois acquises et transmises, il reste à les traiter, de la façon la plus automatique possible, dans le but de pouvoir proposer des résultats tous les jours. De plus, si des résultats sont calculés quotidiennement, il est possible de mettre en place un système d'alerte qui viendrait envoyer un message à partir du moment où un déplacement d'une grandeur supérieure à une tolérance fixée est détecté.

L'objectif de la solution OMIV est de calculer les positions précises de chacune des stations OMIV, de façon quotidienne, puis de proposer des séries temporelles de position et de variation de lignes de base entre stations. Ces données seront mises à jour quotidiennement sur le site de OMIV.

L'objectif de proposer un traitement entièrement automatique augmente la complexité du problème. De plus, comme il a été vu au paragraphe IV, 2., 2.2, le calcul avec SCRS-PPP nécessite des données

complémentaires, dont la version finale, c'est-à-dire la plus précise, n'est disponible qu'au bout de deux semaines environ. Comment envisager alors, la mise en place d'un système d'alerte ? De plus, si l'on réalise un traitement quotidien, on ne peut se protéger entièrement d'une coupure de transmission des données, qui engendrerait un « trou » dans les résultats.

Il est assez rapidement apparu que la solution OMIV devait se décomposer en deux résultats distincts. D'une part une solution rapide (quotidienne), calculée avec les produits rapides de l'IGS et disponible quatre jours après le jour d'acquisition, et d'autre part une solution OMIV finale temporaire, calculée tous les cinquante jours avec les produits finaux de l'IGS. Enfin, un calcul annuel viendra apporter une solution finale.

La frise chronologique suivante (figure 23) présente les différents calculs liés à la solution OMIV au cours d'une année.

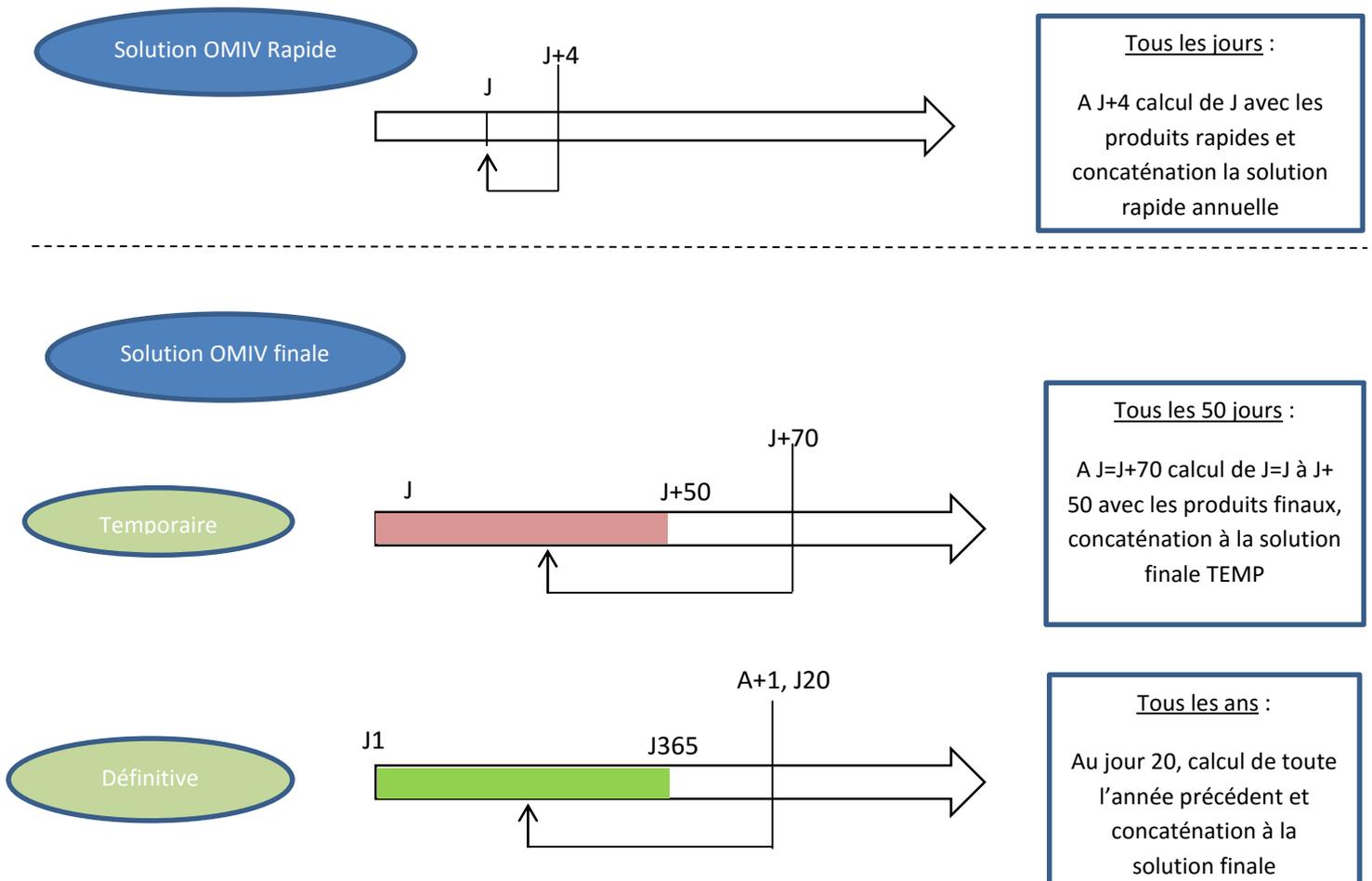


Figure 23 : chronologie du traitement automatique des données bi-fréquence

3.3.2. Choix des langages

Les premiers tests de traitement des résultats obtenus avec SCRS-PPP ont été réalisés avec Matlab. Il s'agit d'une solution qui gère assez facilement les fichiers textes (.txt) et la génération de courbes.

Au fur et à mesure de l'avancement du processus, il a fallu faire appel à plusieurs traitements Matlab, couplés à une conversion de coordonnées avec CIRCE. Pour lancer automatiquement ces processus, plusieurs scripts en Bash ont été écrits. Le langage Bash permet en effet de lancer Matlab. Cependant, il s'agit là d'une opération assez longue. De plus Matlab est une solution payante. Le langage Python a donc été choisi pour remplacer Matlab. Il s'agit d'un langage relativement aisé à prendre en main, open source et qui peut être couplé à des scripts en Bash.

La partie graphique (génération de courbes) est gérée en Python, et utilise une bibliothèque java Script. Elle est développée par Véronique Mendel, consultante extérieure à l'EOST.

3.3.3. Programmes de traitement des résultats SCRS-PPP

Dans sa version automatisée par les chercheurs de Montpellier et modifiée au fur et à mesure au cours de ce projet, SCRS-PPP permet d'obtenir trois fichiers synthétiques de résultats en sortie :

- Un fichier de position dans le système East, North et Up avec les erreurs moyennes quadratiques sur chaque position.
- Un fichier contenant les coordonnées géographiques de chaque point calculé dans le système ITRF 2008 et des erreurs moyennes quadratiques sur ces coordonnées.
- Un fichier contenant les appoints en X, Y et Z par rapport à des coordonnées de référence dans un système cartésien (dans l'ITRF 2008), là encore avec les erreurs moyennes quadratiques sur ces appoints.

Il est donc nécessaire de traiter ces fichiers « bruts » de façon à obtenir des séries temporelles de position et de variations de lignes de base. Chaque sous-programme du traitement va être détaillé.

- Calcul des coordonnées : Un premier programme (dxdydz2XYZ.py) additionne les appoints obtenus en sortie de SCRS-PPP aux coordonnées de référence, de façon à obtenir les coordonnées XYZ de chaque station, chaque jour de l'année.
- Concaténation avec la durée d'observation : en parallèle du calcul SCRS-PPP un script a été développé de manière à calculer pour chaque jour la durée des observations contenues dans le fichier RINEX. La durée d'observation est ensuite concaténée aux coordonnées de chaque station, pour chaque jour, par le programme « XYZwithObsTime.py ». De plus, une sélection de qualité est effectuée à cette étape du processus. Tous les points ayant une emq en X, Y et/ou Z supérieure à une tolérance fixée (la valeur a été choisie à deux centimètres) sont éliminés. De même, tous les points dont la durée d'observation est inférieure à quinze heures sont supprimés.

- Reductecto : au cours de tests réalisés en début de projet, il a été mis en évidence que les mouvements tectoniques avaient une influence sur les coordonnées (déplacements de quelques centimètres par an pour les stations en France). Le troisième programme de traitement a donc vocation à corriger l'effet du mouvement tectonique. La correction est calculée selon le modèle d'Altamimi (2012).
- Passage de l'ITRF à l'ETRF (itrf2etrf.py) : Dans le but de calculer à terme, les coordonnées de chaque station, pour chaque jour, dans le système géodésique de la NTF (Nouvelle triangulation Française) en projection Lambert 1, 2 ou 3 en fonction du glissement, il est nécessaire de transformer les coordonnées issues du calcul de SCRS-PPP. Les coordonnées sont transformées de l'ITRF2008 avec comme époque la date du jour, à l'ETRF 2000 époque 2009.0, qui correspond au RGF93. Le passage au système géodésique NTF en projection Lambert s'effectue à l'aide du logiciel CIRCE. Ce dernier est en effet disponible sous Linux en ligne de commande.
- Concaténation des résultats CIRCE avec les coordonnées cartésiennes ITRF 2008 : une fois la conversion avec CIRCE effectuée, le programme « gpspppANDcirce.py » concatène les coordonnées Lambert et cartésiennes ITRF2008, de manière à fournir un fichier synthétique.
- Calcul de la date et intégration dans le fichier position : le sous-programme suivant, « positionANDdate.py » calcule la date, le « DOY » c'est-à-dire le Day of Year, le jour GPS de l'année, et les concatène aux positions dans le système East, North, Up.
- Calcul des lignes de base : un dernier programme, « LBase.py » calcule la ligne de base, c'est-à-dire la distance géométrique entre deux stations, une référence située hors glissement et une station sur le glissement.

3.3.4. Traitement général

Le calcul avec SCRS-PPP a été décrit, le traitement des résultats de SCRS-PPP également. Ces deux étapes constituent la nouveauté essentielle apportée par ce projet au traitement des données GNSS pour une application au suivi de versants instables.

La suite du processus consiste à préparer l'ensemble des « briques » nécessaires au calcul de SCRS-PPP puis au traitement des résultats, le tout, de façon automatique, pour aboutir au final à des fichiers en sortie de traitement. Une représentation sous forme graphique du principe semble plus parlante qu'une lourde description détaillée de la chaîne de traitement. La figure 24 présente l'ensemble du processus.

Traitements GNSS

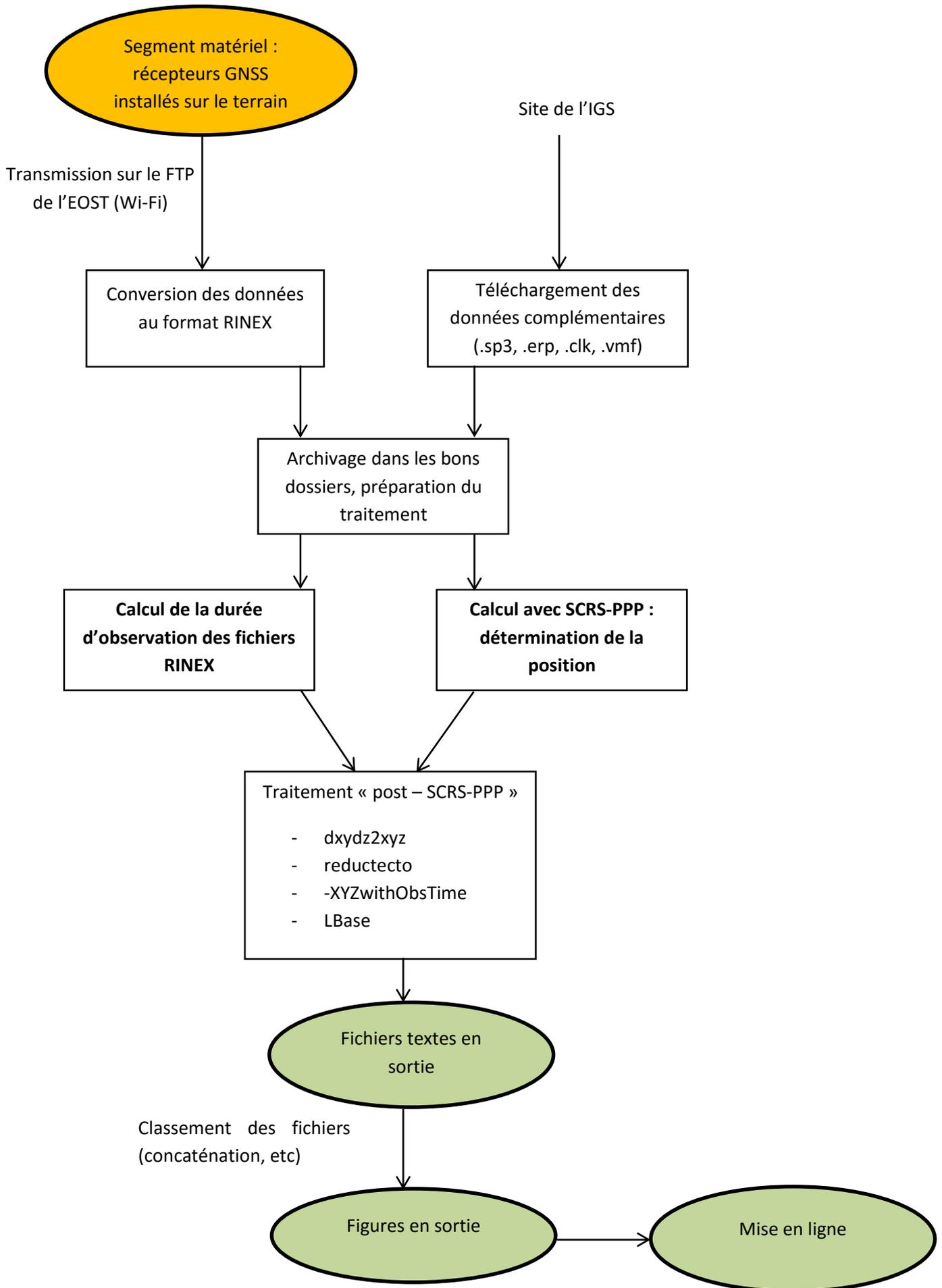


Figure 24 : Principe du traitement automatique

3.3.5. Les fichiers en sortie

Chaque sous-programme génère un fichier texte qui est conservé. Pour chaque station d'un glissement, le programme va sortir :

- Un fichier stationXYZ.txt contenant les coordonnées cartésiennes de la station pour chaque jour.
- Un fichier station_withTIME.txt contenant les coordonnées cartésiennes et les durées d'observations pour chaque jour.
- Un fichier station_corr.txt contenant les coordonnées corrigées de l'influence tectonique de la station pour chaque jour.
- Un fichier station_rgf93.txt contenant les coordonnées cartésiennes RGF93 de la station pour chaque jour.
- Un fichier position_station.txt contenant les positions en East North Up et le doy pour chaque jour.
- Un fichier synthétique STATION__traite.txt contenant les coordonnées cartésiennes dans l'ITRF2008 corrigées du mouvement tectonique, les coordonnées projetées en Lambert zone et les durées d'observation.

Enfin des fichiers contenant les lignes de base entre stations sont également générés. L'annexe 5 présente un exemple de certains fichiers générés.

3.3.6. Les figures en sortie

Sur le site internet d'OMIV, l'utilisateur pourra disposer d'un certain nombre de figures. En ce qui concerne la solution journalière, une série temporelle de position sera disponible pour chaque station permanente. De plus, pour chaque glissement, une série temporelle de variation de lignes de base sera accessible. Enfin, une carte de mouvement de la forme $N=f(E)$ pourra également être visualisée.

En ce qui concerne la solution annuelle, elle comportera également des séries temporelles de position et de variation de lignes de bases. Superposée à ces variations de lignes de base, l'utilisateur pourra visualiser l'évolution des précipitations. Cette superposition permettra éventuellement de mettre en évidence une corrélation entre mouvement rapide et précipitations élevées.

Les versions définitives de ces figures ne sont pas encore disponibles. Néanmoins, au cours de ce PFE, plusieurs ébauches ont été réalisées. Elles sont présentées en annexe 4.

4. Test opérationnel de récepteurs GPS mono-fréquence à bas coût
 - 4.1. Performance des logiciels sur les données mono-fréquence
 - 4.1.1. Présentation des récepteurs GEOMON

Le système GEOMON est développé par la société suisse InfraSurvey. Cette dernière est née en 2009 et travaille en partenariat avec l'école d'ingénieur HEIG-VD, basée à Yverdon. Le principe de leur système est de proposer des stations antenne/récepteur GNSS à bas coût, tout en garantissant une précision centimétrique. Les mesures sont réalisées au sein de stations « filles » et les informations sont collectées au niveau d'une station « mère » qui est connectée à internet.

Les récepteurs sont mono-fréquence. Chaque « GEOMON fille » se compose d'une petite antenne GNSS, d'une puce GNSS, d'un accéléromètre et d'un système de transmission des données par radio. Une carte mémoire micro SD est également embarquée, de manière à assurer la sauvegarde des données en cas de coupure radio. Le « GEOMON mère » est lui aussi équipé d'un système radio, d'une carte SD, d'un *beaglebone* (contrôleur électronique) et d'une antenne GPRS. Le site internet de la société présente le produit (<http://www.infrasurvey.ch/fr/>). La figure 25 offre une vision schématique du principe du système GEOMON.

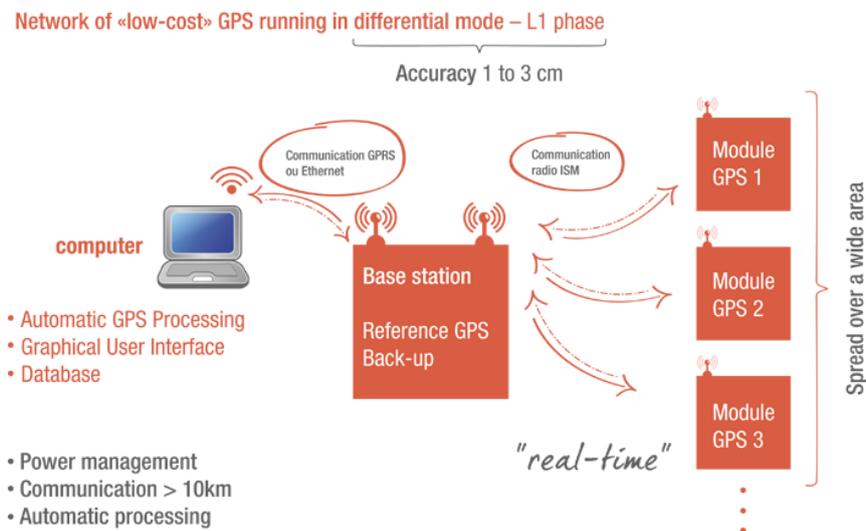


Figure 25 : principe de fonctionnement du système GEOMON développé par la société InfraSurvey. (Source : site d'InfraSurvey)

4.1.2. Choix de la méthode de calcul

Après avoir validé la méthode PPP, et en particulier le logiciel SCRS-PPP dans le cadre du traitement des données bi-fréquence, il a semblé opportun de tester la faisabilité d'un calcul en PPP avec des données mono-fréquence. Ce test semblait d'autant plus intéressant que plusieurs logiciels proposent une option « utilisation de données mono-fréquence ». C'est le cas de SCRS-PPP, RTKLIB et gLAB.

Des calculs ont donc été réalisés sur des données issues de récepteurs GNSS mono-fréquence avec les trois logiciels cités précédemment. Dans les trois cas, les résultats (lorsque les calculs aboutissent) sont extrêmement instables avec des positions qui varient de plusieurs mètres d'un jour à l'autre. Le test de SCRS-PPP a d'ailleurs déjà été détaillé dans le paragraphe III. 3).

Au vu de cette analyse, il est apparu que la méthode PPP utilisée avec des données mono-fréquence ne permet pas d'obtenir des résultats suffisamment précis pour être exploités dans le cadre du suivi de mouvements de terrain.

Pour le traitement des données mono-fréquence, seul le calcul en GPS différentiel semble rester en lice pour les besoins de ce projet. Cependant, les logiciels proposant de réaliser ce type de calcul sont rares. RTKLIB en fait partie.

4.1.3. Test de RTKLIB en différentiel « L1 only »

Avant de réaliser une mise en place en conditions réelles sur le glissement de Super-Sauze, il paraissait nécessaire de tester la solution de calcul qui intervient en aval des mesures avec les GEOMON. La solution proposée par le constructeur Suisse est RTKLIB. De plus, il s'agit là d'une des rares solutions permettant le calcul en différentiel « L1 only ». Des tests ont donc été réalisés sous RTKLIB, en particulier pour déterminer si le calcul est stable.

4.2.3.1. Stabilité du calcul

Afin de vérifier la stabilité du calcul RTKLIB sur une longue série temporelle, le test a été réalisé sur des données de La Clapière. Les stations CLP1 et CLP2 ont été calculées sur l'année 2013 avec RTKLIB. Les stations de La Clapière étant équipées de récepteurs bi-fréquence, un premier calcul a été réalisé en utilisant les observations L1 et L2. Puis toutes les observations liées à L2 (L2, P2, C2) ont été éliminées à l'aide de l'outil TEQC, avant de réaliser un calcul en « L1 only ». Par ailleurs, les stations CLP1 et CLP2 2013 avaient déjà été calculées en PPP avec le logiciel SCRS-PPP. Les résultats des trois calculs ont donc été comparés.

Pour les calculs sous RTKLIB, plusieurs combinaisons d'options ont été testées. La combinaison qui semblait la plus pertinente pour le calcul en « L1 only » est disponible en annexe 3. La station de base utilisée pour le calcul en différentiel est la station CLAP. Cette dernière n'a pas été choisie au hasard. En effet, elle est située à moins de cinq kilomètres des stations CLP1 et CLP2. Les trois stations étant

en montagne (forte variation d'altitude) et les tests portant sur des données mono-fréquence, il fallait réaliser les calculs sur des courtes lignes de base.

La figure 26 présente les résultats obtenus sur CLP2 2013. Les tendances sont les mêmes pour CLP1 2013.

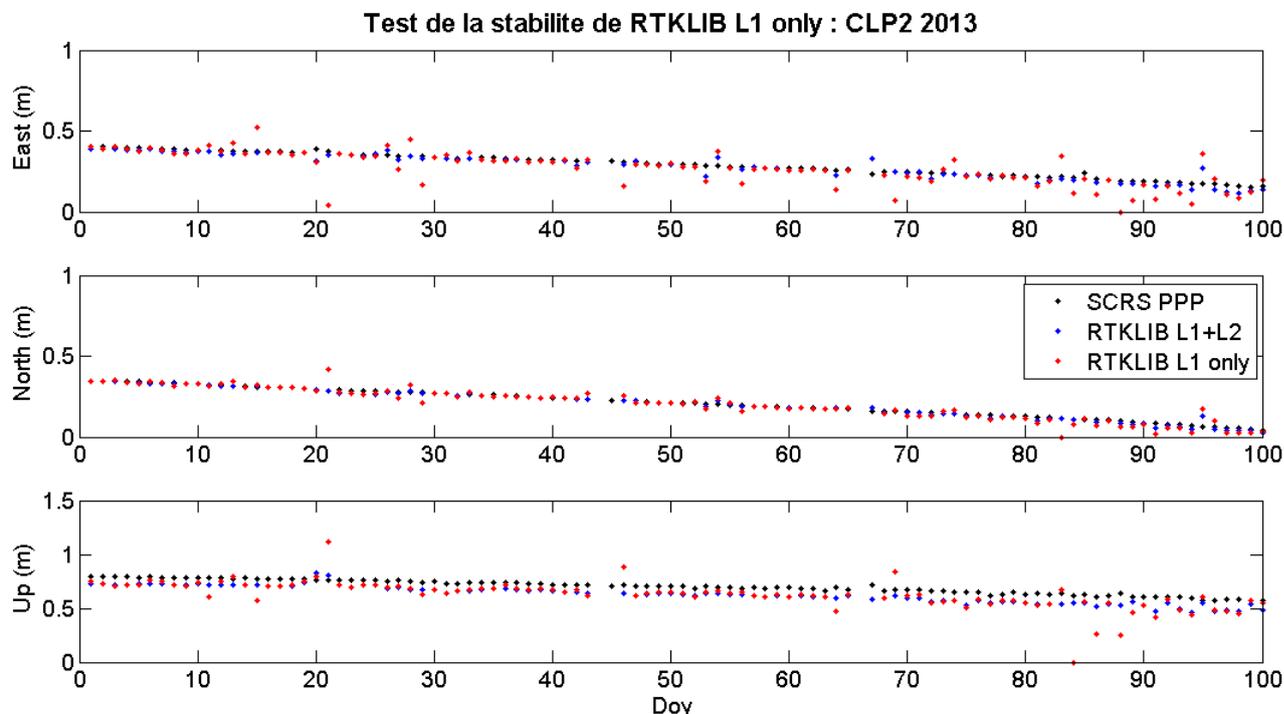


Figure 26 : comparaison de la stabilité des positions d'un jour à l'autre de la station CLP2 2013 entre les calculs SCRS-PPP, RTKLIB différentiel « L1 only »

Visuellement, les trois calculs semblent donner des résultats similaires. Les courbes ont les mêmes tendances et les écarts semblent être inférieurs en moyenne à dix centimètres. Le calcul RTKLIB sur les données mono-fréquence est légèrement plus bruité. Le tableau 10 présente les statistiques réalisées sur les écarts entre SCRS-PPP et RTKLIB « L1 only » et entre RTKLIB « L1 only » et RTKLIB L1 +L2.

	SCRS PPP vs RTKLIB L1 only			RTKLIB L1 only vs L1 +L2		
	East	North	Up	East	North	Up
Moyenne des écarts (mm)	21	5	72	9	2	1
Ecartes types (mm)	68	29	99	60	24	89
maximum (mm)	332	135	617	309	133	546
minimum (mm)	0	0	7	0	0	0

Tableau 10 : statistiques des écarts entre les solutions de positionnement SCRS PPT et RTKLIB différentiel L1 only, et entre RTKLIB

Les résultats confirment les hypothèses émises suite à l'analyse visuelle. Les trois solutions sont très proches. Les écarts entre RTKLIB « L1 only » et SCRS-PPP sont inférieurs ou égal en moyenne à cinq

centimètres, sauf pour la composante verticale. Or la qualité des résultats SCRS-PPP a été démontrée précédemment. Les écarts types proches de sept centimètres et les maximums avoisinant les soixante centimètres mettent en évidence les « sauts » dans le traitement des données mono-fréquences.

Ces « sauts » sont relativement rares (une quinzaine de points sur l'année). Si l'on élimine ces quelques points erronés, et si l'on applique un filtre à la fin de l'année, par exemple un filtre médian comme le suggère la société InfraSurvey, il semble que RTKLIB soit une solution tout à fait acceptable pour le traitement des données mono-fréquence, dans le but de suivre des mouvements de terrain. Il faut néanmoins garder à l'esprit que la précision obtenue avec de telles données reste moins bonne (environ quelques centimètres) que celle obtenue avec les récepteurs bi-fréquence et la méthode PPP (environ un à deux centimètres).

4.2.3.2. Test sur les données GEOMON

Une fois la solution de calcul RTKLIB « L1 only » validée sur une série temporelle longue, avec des données bi-fréquence tronquées manuellement, il a semblé judicieux de réaliser un calcul directement sur les données issues des récepteurs GEOMON. Pour ce faire, deux GEOMON ont été placés sur le toit de l'EOST pendant quelques jours. La figure 27 présente l'installation. Le système étant en cours de test et le temps de prise en main étant réduit, seul deux jours ont pu être calculés et comparés.



Figure 27: vue du système de fixation provisoire de deux récepteurs mono-fréquence GEOMON sur le toit de l'EOST.

La station de référence choisie pour le calcul est la station ETOI du RGP, située place de l'Etoile à Strasbourg, c'est-à-dire à moins de deux kilomètres de l'EOST.

Sur deux jours, le traitement des données GEOMON semble stable avec des écarts en position (en X, Y et Z) de l'ordre de quelques millimètres. De plus, un contrôle sommaire a été réalisé sur le terrain avec la mesure au mètre ruban de la distance entre les deux antennes GEOMON. L'écart entre distance mesurée et distance calculée (distance géométrique) est de un centimètre. A l'imprécision de détermination de la position du centre de phase près, ces résultats semblent tout à fait encourageants et permettent d'envisager la mise en place du système à plus grande échelle, sur le glissement de Super-Sauze.

4.2. Mise en place du réseau à Super-Sauze

Le site d'étude choisi pour mettre en place un réseau de récepteurs GEOMON est le glissement de Super-Sauze. Ce dernier a été choisi parce que c'est un glissement rapide, sur lequel un récepteur GNSS haut de gamme (Trimble) a déjà été perdu. De plus, les déplacements étant de l'ordre de plusieurs mètres par an, l'utilisation de récepteurs offrant a priori un positionnement avec une précision moins bonne que celle obtenue avec des récepteurs classiques ne semble pas poser problème. Il serait en effet plus problématique d'essayer de caractériser les déplacements d'un glissement lent de l'ordre de quelques centimètres par an, avec des récepteurs qui offrent d'après le constructeur une précision de positionnement de un à trois centimètres.

En ce qui concerne la mise en œuvre sur le terrain, six stations « filles » ont été installées. La solution consistant à les fixer sur des poteaux métalliques enfoncés d'au moins un mètre dans le sol a été retenue. Le système de serrage assurant le lien entre les GEOMON et les poteaux a été développé dans les ateliers de l'EOST (voir figure 28).



Figure 28 : Un GEOMON sur le glissement de terrain de Super-Sauze, connecté à une batterie et à un panneau solaire.

Cinq récepteurs « filles » ont été installés sur le versant instable. Le sixième récepteur a été placé lui en dehors du glissement, pour pouvoir servir de station de référence. Il se trouve à proximité de la

station mère et d'une connexion Wi-Fi (voir figure 29). En ce qui concerne l'alimentation, chaque GEOMON est branché à une batterie neuf ampères, elle-même reliée à un panneau photovoltaïque par l'intermédiaire d'un contrôleur solaire.

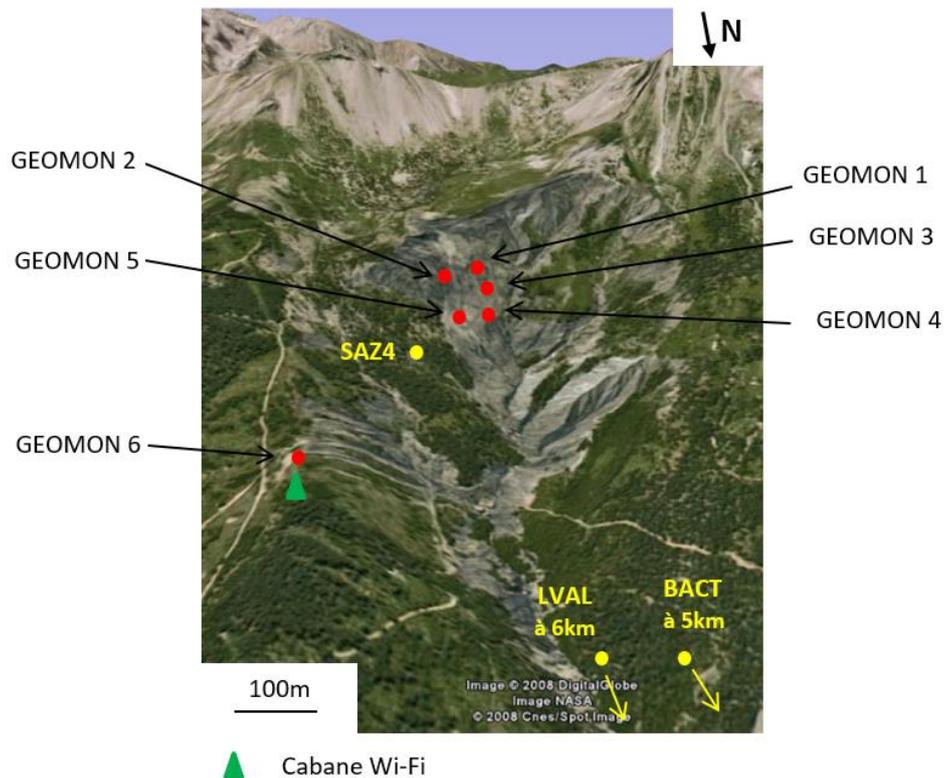


Figure 29 : Répartition des six récepteurs GNSS GEOMON sur le glissement de Super-Sauze

4.3. Stratégie de calcul

4.3.1. Présentation de la méthode

La première solution envisagée pour calculer les positions des GEOMON a été de réaliser un calcul en différentiel de chaque récepteur avec comme référence la station BACT située à Barcelonnette. Les GEOMON sont cependant des récepteurs mono-fréquence et la station BACT étant située dans la vallée, la dénivellée entre la référence et la station sur glissement (700 m). La précision que l'on peut atteindre en choisissant la station BACT comme base est-elle alors suffisante ? Les résultats sont-ils meilleurs en prenant pour référence la station LVAL ? Pour tenter de répondre à ces questions, des calculs test ont été réalisés afin de déterminer l'influence de la longueur de la ligne de base sur la précision de positionnement, dans le cas de récepteurs mono-fréquence. Ils seront présentés dans le paragraphe suivant.

Il est rappelé que cinq récepteurs se trouvent sur le glissement et qu'un sixième a été placé à proximité de façon à servir de référence. Cependant, les coordonnées de cette éventuelle référence ne sont pas

connues. Tout le problème est donc de trouver un moyen, une stratégie de calcul pour le traitement de l'ensemble des stations du réseau GEOMON.

Dans un premier temps, il a été imaginé de calculer les coordonnées de la station de référence GEOMON une bonne fois pour toute, sur une session temporelle d'une semaine, à partir d'un pivot mis en place le temps de la mission de terrain du mois de juin. Il suffirait de supposer que la position calculée et moyennée sur la semaine est invariante, quitte à faire chaque année une mesure de contrôle, sur une semaine. Cependant l'hypothèse que la position du GEOMON référence est fixe semble trop optimiste, même pour une station située hors glissement. En effet il faut tenir compte du déplacement lié à la tectonique des plaques. Pour la réalisation de tests, la station SAZ4 a été installée sur un pilier en béton à proximité du glissement et a été laissé sur place de juin à septembre.

Afin d'arrêter la stratégie à adopter, plusieurs calculs ont été réalisés.

4.3.2. Influence de la longueur des lignes de base

Suite à des problèmes techniques rencontrés sur le terrain, le GEOMON numéro six qui avait vocation à servir de référence étant tombé en panne, seuls trois calculs ont été réalisés sur une session temporelle d'un mois. Chaque GEOMON a été calculé en différentiel avec le logiciel RTKLIB et depuis trois stations de référence différentes.

- Depuis la station BACT située à Barcelonnette, dans la vallée et à une distance spatiale d'environ cinq kilomètres du glissement. La dénivelée moyenne entre BACT et le glissement est de sept cent cinquante mètres.
- Depuis la station LVAL située sur un versant en face du glissement de Super-Sauze et distante d'environ sept kilomètres du glissement. La dénivelée moyenne entre LVAL et le glissement est de cinq cent mètres.
- Depuis la station SAZ4 installée temporairement à proximité du glissement (à environ trois cents mètres). La dénivelée moyenne entre SAZ4 et le glissement est d'environ cinquante mètres.

Malgré de nombreuses tentatives et après avoir fait varier les paramètres de traitement (modèle troposphérique, modèle ionosphérique, types d'orbites,...), le calcul depuis LVAL n'a pas permis d'obtenir un positionnement précis sur aucun des GEOMON. Les solutions obtenues sont des solutions de navigation variant de plusieurs dizaines de centimètres d'un jour à l'autre et présentant des erreurs moyennes quadratiques de l'ordre de quelques mètres sur chaque composante. Le fait que la ligne de base est supérieure à cinq kilomètres permet certainement d'expliquer la mauvaise qualité de ces résultats.

Les calculs depuis BACT et SAZ4 ont permis eux d'obtenir des séries temporelles de positions beaucoup plus stables (variations de quelques centimètres d'un jour à l'autre). De plus les erreurs renvoyées par RTKLIB avoisinent le millimètre (erreurs données en coordonnées cartésiennes géocentriques). Les résultats sont présentés dans les figures 30 et 31.

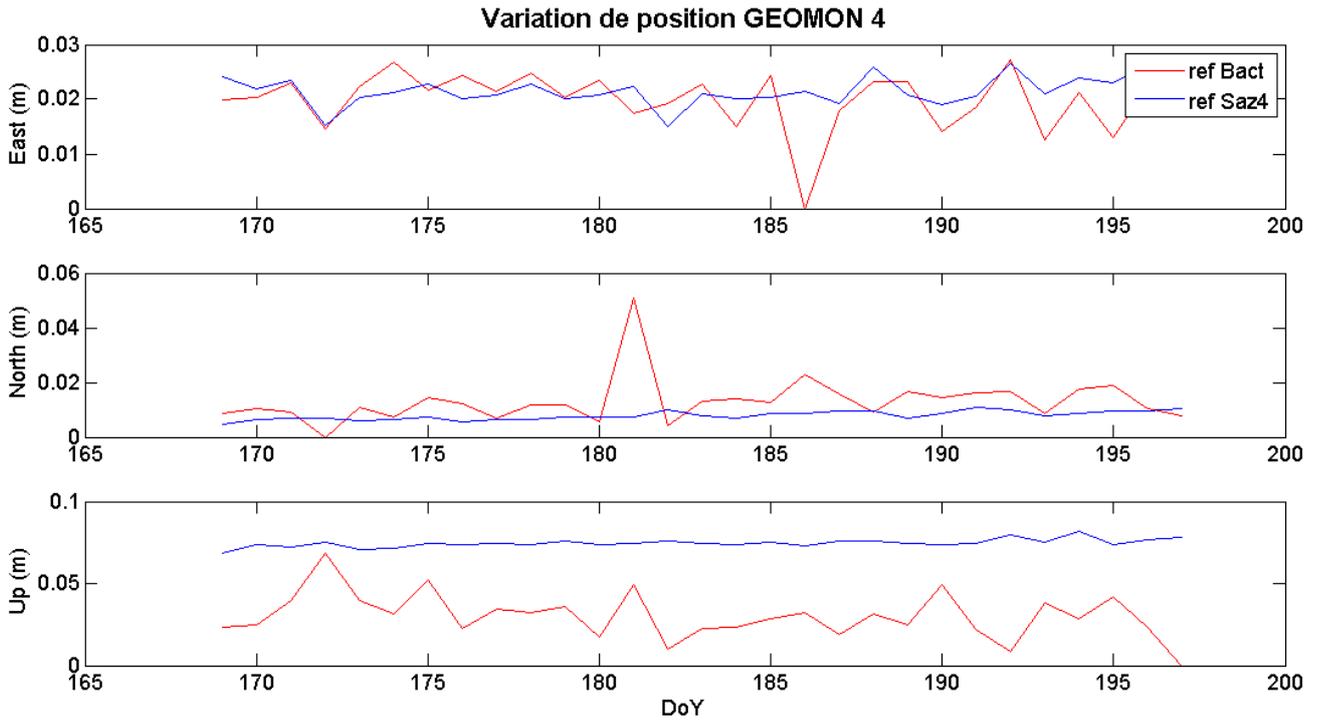


Figure 30 : Comparaison des positions du GEOMON 4 en fonction de la station de référence (BACT ou SAZ4)

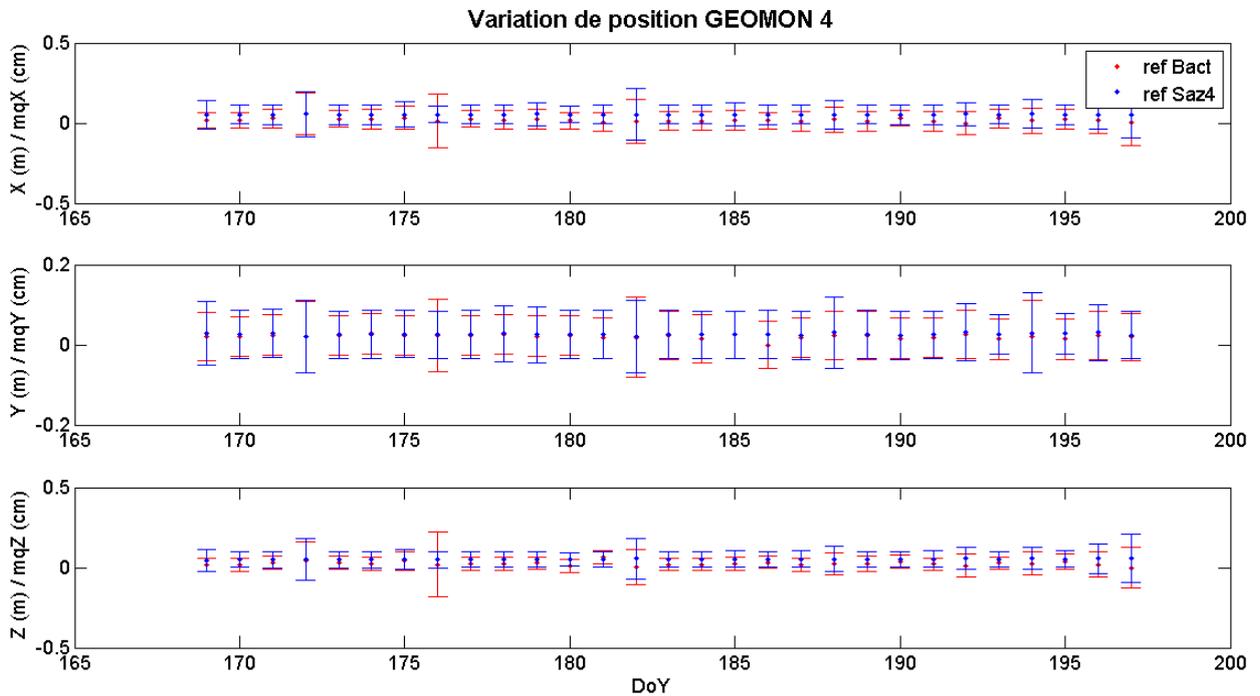


Figure 31 : erreurs moyennes quadratiques sur les positions du GEOMON 4 en fonction de la station de référence (BACT ou SAZ4). Les résultats sont donnés en coordonnées cartésiennes géocentriques.

Les deux courbes ont les mêmes tendances générales quelle que soit la composante. La solution obtenue depuis BACT semble cependant plus bruitée. L'écart entre position depuis BACT et position depuis SAZ4 est en moyenne de l'ordre de trois à dix centimètres sur X, Y et Z. Au niveau des erreurs moyennes quadratiques, elles sont similaires quelle que soit la station de référence.

Ces résultats semblent intéressants et stables malgré la présence de quelques pics, y compris pour la série temporelle de position calculée depuis SAZ4. Pour tenter de trouver une explication à ce phénomène, une analyse de la durée d'observation a été réalisée. En effet, il paraissait légitime de penser que les pics pouvaient s'expliquer par des durées d'observations plus courtes sur certaines journées. La figure 32 présente les résultats de l'analyse.

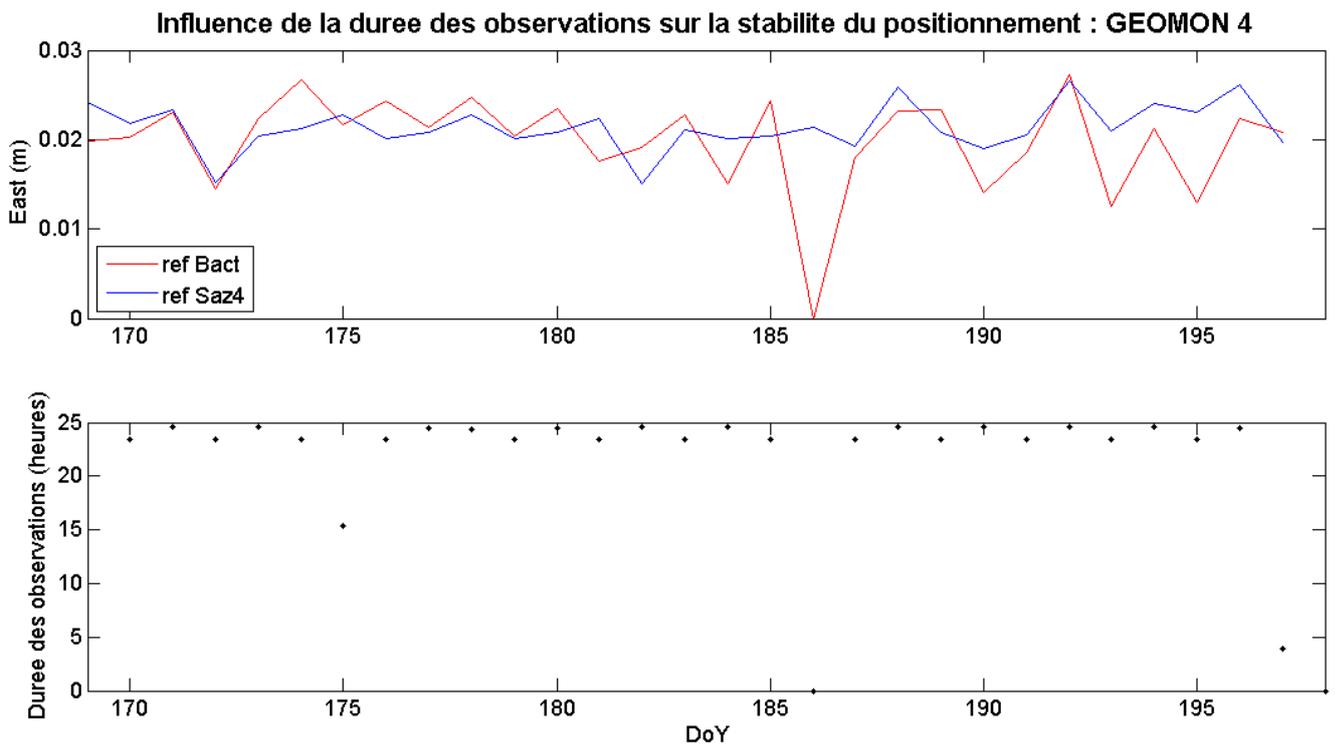


Figure 32 : lien entre la durée des observations du récepteur et la stabilité des positions pour le GEOMON 5.

Le test présenté dans la figure 32 a été réalisé sur le GEOMON 4. C'est la composante East qui est mise en parallèle avec la durée des observations car c'est cette dernière qui semble varier le plus d'un jour à l'autre. A priori, les pics ne s'expliquent pas par une durée écourtée d'observation, sauf peut-être pour les jours cent quatre-vingt-dix. Seules les durées d'observations du GEOMON 5 ont été calculées pour ce test. Il est possible que les pics s'expliquent par l'absence de mesure au niveau de la station de base (BACT ou SAZ4). Cependant, les positions calculées depuis SAZ4 sont stables et la station BACT étant une station du RGP, il est légitime de penser que les données sont transmises de manière fiable.

Au vu des tests réalisés, il apparaît que la meilleure solution pour le traitement des données GEOMON est de les calculer depuis une station permanente située le plus proche possible du glissement. Cependant la station SAZ4 a été placée de façon temporaire. Elle est alimentée par une batterie elle-même connectée à un panneau solaire. En hiver l'exposition au soleil y est faible et la neige recouvrirait

l'antenne placée à un mètre du sol. Il a donc été envisagé de déplacer la station SAZ1 ou la station SAZ2 (situées sur le glissement) et de les mettre en place de façon pérenne aux abords du glissement, au niveau de la cabane Wi-Fi (là où le GEOMON numéro six a été mis en place). Cette station pourrait alors être calculée quotidiennement en PPP (dans le cadre du traitement automatique des données bi-fréquence) puis servir de référence. Cela aurait un double avantage et permettrait d'une part de disposer d'une station de référence proche et d'autre part d'installer le sixième GEOMON sur le glissement. De plus, la cabane Wi-Fi étant équipée de quatre panneaux solaires, l'alimentation du récepteur ne serait pas problématique.

Au cours de la mission de terrain de juillet, un pilier en béton a été construit à côté de la cabane WiFi en vue de l'installation d'une antenne avant l'hiver. Le pilier a une hauteur d'environ deux mètres cinquante. De plus au vu des traitements réalisés, il apparaît que le calcul avec RTKLIB en différentiel sur des données mono-fréquence et lorsque la station de référence est relativement proche des stations « mobiles » est applicable pour le suivi de glissements de terrain rapides. RTKLIB sera donc retenu par la suite pour traiter les données GEOMON.

4.4. Mise en place d'une chaîne de traitement

4.4.1. Automatisation des prétraitements (conversion, tri)

Avant tout calcul, il est nécessaire de convertir les données brutes issues des GEOMON (fichiers binaires) en fichiers RINEX navigation et observation. Pour ce faire, la fonction « Convbin » de RTKLIB est disponible. De plus, la station de base des GEOMON a été paramétrée de telle sorte que les données brutes des stations filles soient regroupées en fichiers horaires. Chaque heure, il y a donc six fichiers bruts qui sont créés pour être transmis par la suite sur le FTP de l'EOST. Cela implique que pour chaque récepteur, il faudra créer un fichier RINEX pour chaque heure, puis concaténer les vingt-quatre fichiers de la journée de façon à obtenir un fichier RINEX vingt-quatre heures d'observation et un fichier RINEX vingt-quatre heures de navigation.

De plus il est important de générer des fichiers RINEX « propres », c'est-à-dire dont les fichiers en-tête sont complets (marker name, etc). Le nom des fichiers doit également respecter une certaine forme et comporter quatre lettres pour le nom de la station, le jour GPS de l'année, un zéro et une extension .15o ou .15n, dans le cas de l'année 2015. Pour gérer automatiquement ces transformations et classer les données, un script a été codé en Bash.

4.4.2. Lien avec le traitement des données bi-fréquence

La solution de calcul trouvée, il paraît intéressant de l'intégrer dans une chaîne de traitement automatique. De la même manière que pour les données bi-fréquence, il serait alors possible d'avoir un suivi quotidien des stations GEOMON.

Cette automatisation pourrait se faire de la même manière que pour les données bi-fréquence (préparation des données nécessaires, calcul de positionnement, post-traitement des résultats de positionnement, classement des résultats, mise en ligne). La seule différence se trouverait au niveau du calcul qui ne se ferait plus avec SCRS-PPP mais en différentiel avec un autre programme, RTKLIB. Pour l'instant, aucune automatisation du traitement des données mono-fréquence n'a été réalisée.

4.5. Mise en route et test de récepteurs NOVATEL

L'objectif de cette partie est de présenter un matériel récemment acquis par un partenaire suisse d'OMIV, et de réaliser quelques tests sur la qualité de ce matériel, des récepteurs GNSS utilisant une puce NOVATEL et assemblés par la société allemande PPM GmbH (*Precise Positioning Management*).

Dans un premier temps les récepteurs ont été installés sur le toit de l'EOST et de l'INSA (figure 33). Ils ont été connectés à des antennes LEICA AR10 et ont mesuré sur une session temporelle d'environ deux semaines. L'objectif de cette première manipulation était de vérifier que les données étaient bien enregistrées. Il a d'ailleurs été rapidement constaté que le système ne fonctionnait pas et une modification des fichiers de configuration a été nécessaire pour finalement obtenir des fichiers bruts exploitables. Les données collectées lors de cette première « campagne de mesure » ont été calculées en PPP, à l'aide de l'outil SCRS-PPP. Un contrôle sommaire sur le terrain, avec la réalisation d'une mesure au ruban entre les deux antennes a permis de constater un écart très faible (environ un centimètre) entre la distance mesurée et la distance calculée à partir des mesures GNSS séparant les deux antennes. Ces premiers tests ont donné l'occasion de se familiariser avec le matériel et de valider, a priori, sa qualité.



Figure 33 : deux récepteurs NOVATEL connectés à des antennes LEICA AR 10 et installés sur le toit de l'EOST.

Dans un deuxième temps, le matériel a été installé sur le glissement suisse de Pont Bourquin le 13 mai 2015. Les deux récepteurs ont été mis en association avec des antennes NOVATEL (NOVHaut et NOVBas). Aucun système de transmission automatique des données sur le FTP de l'EOST n'a été mis en place. En effet, bien que le glissement soit couvert par un réseau Wi-Fi, les récepteurs ne sont pas

adaptés à ce type de réseau. Le seul moyen permettant de transmettre des données est l'utilisation d'une carte SIM.

Après deux semaines de mesures, les données ont été récupérées « manuellement » sur le terrain et la stratégie de calcul adoptée a été la suivante : dans un premier temps la série temporelle de position des deux antennes GNSS a été calculée en PPP avec SCRS-PPP, puis un second calcul a été réalisé en différentiel bi-fréquence avec RTKLIB en prenant comme référence la station permanente du réseau AGNES (le réseau automatique GNSS Suisse) la plus proche, SAA2. Ce deuxième calcul avait pour objectif de comparer les résultats obtenus avec RTKLIB avec ceux de SCRS-PPP.

Le calcul en PPP a permis de révéler que les données issues de la station NOVHaut, située en haut du glissement n'étaient que peu exploitables. En effet, les observations sont « normales » du 13 au 16 mai, avec en permanence une petite dizaine de satellites en visibilité, cependant à partir du 17 mai autour de 8:33 GMT, le nombre de satellites en visibilité diminue considérablement (deux satellites en visibilité). A partir du 18 mai, les données ne sont plus exploitables (plus de satellites en visibilité). Une défaillance du matériel est certainement à l'origine de ce problème.

Toutefois, les données du récepteur NOVBas (situé en bas du glissement) étaient, elles, exploitables. Les positions obtenues avec SCRS-PPP sont stables (aux mouvements liés au glissement près) et présentées sur la figure 34. Le deuxième calcul avec RTKLIB n'a pas permis d'obtenir des résultats utilisables pour le suivi de glissements de terrain. En effet, les positions calculées par ce deuxième logiciel sont comparables à des solutions de navigation (erreur moyenne quadratique de quelques mètres et variation de coordonnées non négligeables, de l'ordre de plusieurs mètres d'une époque à l'autre). La seule explication qui a été trouvée pour expliquer ces mauvais résultats est la différence de cadence de mesure entre les récepteurs NOVATEL cadencés à dix secondes et la station de base SAA2 cadencée à une minute.

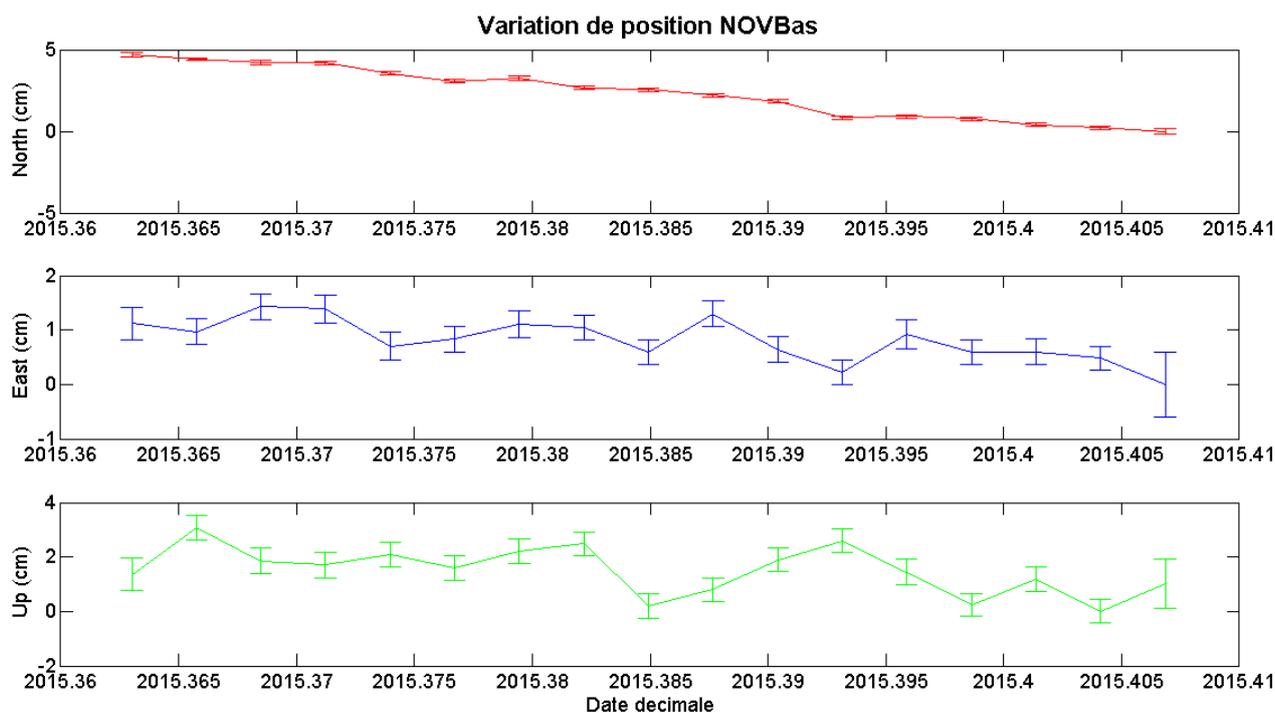


Figure 34 : série temporelle de position du récepteur bi-fréquence NOVBas installé sur le glissement de Pont-Bourquin, Suisse (solution SCRS-PPP, 13 au 27 mai 2015)

La variation de position sur dix-sept jours est de cinq centimètres en North et avoisine le centimètre pour East et Up. Ces valeurs semblent cohérentes au vu du glissement de Pont-Bourquin. Les erreurs moyennes quadratiques sont également proches de un centimètre sur les trois composantes et sont similaires à celles obtenus sur les données issues de récepteurs Trimble et Topcon utilisées précédemment. Le calcul avec SCRS-PPP sur des données NOVATEL semble donc offrir des résultats intéressants.

Au vu des tests réalisés sur les données issues de récepteurs équipés de puces NOVATEL, il apparaît qu'un certain nombre de problèmes techniques persistent. L'un des récepteurs ne fonctionne pas et les données du second récepteur n'ont pas pu être traitées avec le logiciel RTKLIB. Afin de poursuivre les tests, une mission de maintenance du matériel sur le terrain est nécessaire. De plus, il serait intéressant de vérifier si le calcul sous RTKLIB en différentiel bi-fréquence avec des fichiers RINEX de la station SAA2 cadencés à 10 secondes aboutirait à des résultats exploitables.

A l'heure actuelle, il semble peu fiable d'équiper les glissements de terrain avec ce matériel.

5. Conclusion

Au cours de ce chapitre, un soin particulier a été apporté au test de la méthode PPP. Une comparaison avec la méthode différentielle a été réalisée en mettant en parallèle des résultats obtenus avec GAMIT-GLOBK, SCRS-PPP et GINS. Les options du logiciel canadien SCRS-PPP ont été testées afin de déterminer la meilleure combinaison d'options possibles. Les logiciels libres RTKLIB et gLAB ont également fait l'objet de tests. Il en ressort que la méthode PPP et en particulier le logiciel SCRS-PPP est tout à fait adapté à une utilisation scientifique dans le cadre d'un suivi de glissements de terrain. Dans un second temps, un traitement automatique et quotidien des données a été développé. Il permet à partir de données RINEX de calculer une position et une variation de ligne de base chaque jour. Afin de garantir une solution fiable, un deuxième traitement a lieu tous les cinquante jours et un dernier calcul annuel est lancé au début de chaque année.

En parallèle au test de la méthode PPP, des récepteurs mono-fréquence à bas coût GEOMON ont été mis en place et testés sur le glissement de Super-Sauze. S'agissant de récepteurs mono-fréquence, il a fallu déterminer une stratégie de calcul précise permettant d'obtenir un positionnement stable d'un jour à l'autre. L'utilisation d'une station de référence située à moins de cinq cent mètres en distance et avec une dénivelée inférieure à cent mètres par rapport aux stations GEOMON sur glissement a été retenue. Le logiciel RTKLIB a été validé pour réaliser le traitement en différentiel des données.

Enfin l'étude d'un récepteur NOVATEL a été réalisée sur le glissement de Pont-Bourquin. Du fait de problèmes techniques persistants, ce matériel n'a pas encore été validé pour le suivi de glissements de terrain.

V. Traitements photogrammétriques

L'objectif de cette partie est de tester un outil open source, permettant à partir de couples de photographies de générer des nuages de points. L'opération nécessite plusieurs étapes dont la calibration, la génération d'images épipolaires, le calcul d'une carte de profondeur pour chaque pixel puis la transformation pour passer aux coordonnées X, Y et Z. Pour résoudre ce problème, la bibliothèque OpenCV propose un certain nombre de fonctions, qui mises bout à bout permettent de passer des photographies issues de deux appareils photos à un nuage de points.

Les paragraphes suivants détaillent les étapes successives du processus qui a été mis en place pour passer des images brutes au nuage de points. Les outils Opencv s'appuient sur un algorithme présenté par Hirschmüller (2008) mais diffèrent légèrement de ce dernier, de manière à alléger le calcul. Ainsi, par défaut, les outils OpenCV associent des blocs et non des pixels.

Dans un premier temps, un effort particulier a été apporté à la calibration.

1. Présentation de l'équipement et des données

Le glissement de Super-Sauze est équipé de deux appareils de photographie permanents (CANON digital REBEL XS). La figure 35 présente l'installation de façon schématique. Les échelles indiquées sont données à titre indicatif. Elles sont dépendantes de l'éloignement.

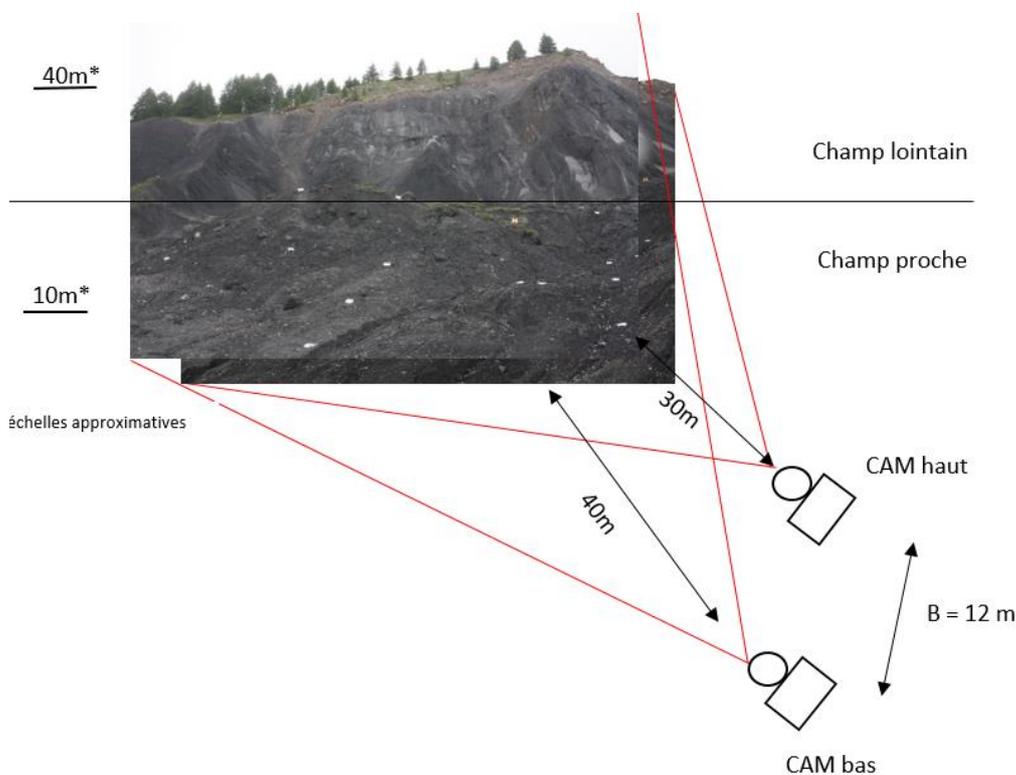


Figure 35 : Présentation de l'installation des appareils photographiques de Super-Sauze.

La figure 36 présente les photographies telles qu'elles sont prises.

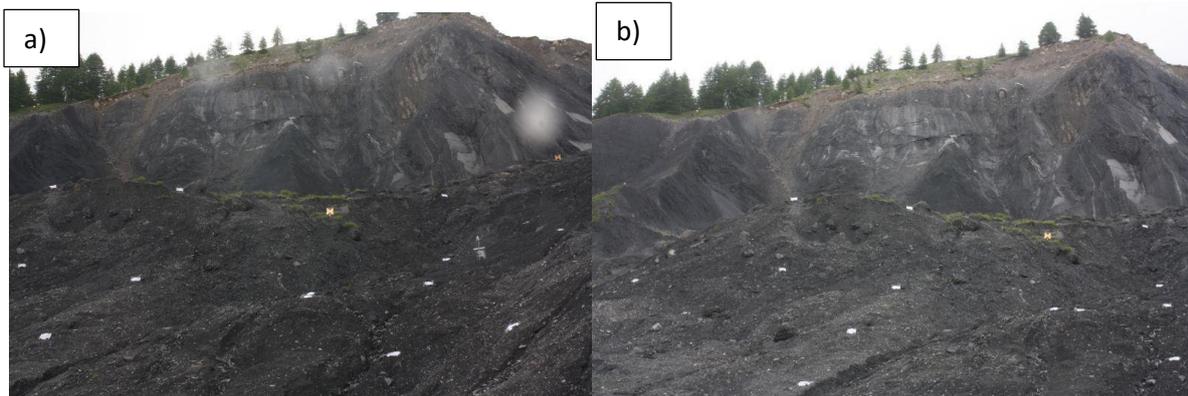


Figure 36 : photographies brutes a) CAM haut et b) CAM bas, prises à Super-Sauze le 17 juin 2015. Les points blancs sont des bâches en plastique utilisées comme cibles

2. Calibration de l'appareil photographique

Pour utiliser des couples de photos, dans l'optique d'en extraire des MNT il est nécessaire de déterminer un certain nombre de paramètres par le biais de la calibration.

Les premiers sont les paramètres d'orientation interne, c'est-à-dire les coordonnées du centre de projection de la caméra c_x et c_y ainsi que la focale f de l'objectif. Les seconds sont les paramètres d'orientation externe à savoir trois paramètres de translation et trois paramètres de rotation de la caméra. Enfin il peut être nécessaire de déterminer un facteur d'échelle s et les distorsions géométriques, en particulier la distorsion radiale. Horn (2000) présente l'ensemble de ces paramètres.

Il existe plusieurs méthodes de calibration permettant d'obtenir les onze paramètres cités précédemment.

2.1. Utilisation de la méthode Tsai

La première méthode qui peut être citée est la méthode Tsai. Horn (2000) détaille le raisonnement à suivre. De façon simplifiée, cette méthode estime un maximum de paramètres en résolvant des systèmes linéaires, puis les résultats finaux, plus fins, sont calculés en résolvant des systèmes non linéaires.

Pour les besoins de ce projet, une toolbox Matlab développée en interne par André Stumpf sera utilisée pour calibrer deux appareils photo Canon EOS DIGITAL REBEL XS, qui sont installés de façon permanente sur le glissement de Super-Sauze.

Les données en entrée du programme sont les suivantes :

- les dimensions (en pixels) des photos prises par l'appareil, ainsi que la taille d'un pixel en X et en Y en mètres dans une matrice (fichier.mat).
- Un fichier .csv contenant des points connus en X, Y et Z sur le terrain et en x et y sur la photo.
- Une photo (au format jpeg) contenant les cibles (pour contrôle visuel).

Pour réaliser cette calibration, un réseau de cible a été placé et levé à Super-Sauze au cours de la mission de juin 2015. Les cibles étaient pour partie des cibles fixes en acier (colorées rouge et jaune) qui étaient déjà en place et pour partie des bâches blanches en plastique posées sur le sol. Le centre de chaque cible a été levé au GPS RTK dans le système Lambert 3 sud.

2.2. Utilisation des outils de calibration de la bibliothèque OpenCV

La bibliothèque OpenCV dispose de deux fonctions permettant de calibrer des appareils de photographie. Les deux fonctions ont été testées et les résultats ont été comparés avec ceux obtenus avec la toolbox Matlab.

La première fonction, « cameraCalibrate » permet de calibrer une caméra en connaissant un certain nombre de points en coordonnées images (2D) et terrain (3D). Il est nécessaire de connaître les valeurs approchées des paramètres de l'orientation interne de la caméra (focale et coordonnées du centre de perspective).

La deuxième fonction, « stereoCalibrate » permet de calibrer deux appareils de photographie simultanément. Il est nécessaire de connaître un certain nombre de points en coordonnées image et terrain. Ces points doivent être les mêmes pour les deux appareils. Il est également nécessaire de connaître les valeurs approchées de paramètres de l'orientation interne des appareils photos, dès lors que l'on ne réalise pas une calibration sur cible plane (damier).

Dans le processus qui a été mis en place, il a été choisi d'utiliser dans un premier temps la fonction « cameraCalibrate » sur chacun des deux appareils photos, puis d'utiliser les résultats obtenus avec cette première fonction comme valeurs approchées de la fonction « stereoCalibrate ».

2.3. Résultats

Le tableau 11 présente les résultats de l'orientation interne obtenue avec la toolbox Matlab fonctionnant selon la méthode Tsai et la fonction « stereoCalibrate » d'Opencv. Les résultats sont les mêmes pour les deux caméras mais divergent considérablement d'une méthode à l'autre, avec des écarts de l'ordre de plusieurs dizaines de pixels sur chaque paramètre. Pour la suite des traitements, c'est la calibration obtenue avec la fonction d'OpenCV qui sera utilisée.

	Toolbox Matlab	stereoCalibrate
distance focale (pixel)	6129,6	6168,3
cx (pixel)	1944,0	2011,0
cy (pixel)	1296,0	1550,0

Tableau 11 : résultats de la calibration des appareils CANON EOS digital REBEL XS avec deux outils différents.

3. Génération d'images épipolaires

De façon simplifiée, deux images épipolaires peuvent être définies de la façon suivante : pour tout point visible sur les deux images, l'ordonnée en pixels de ce point est la même sur chaque image. Ainsi, si l'on place ces deux images côte à côte, c'est-à-dire si l'on place l'origine des repères de chaque image sur le même axe, alors si l'on trace la ligne parallèle à cet axe passant par un point A sur l'image 1, cette ligne passera également par le point A sur l'image 2. Pour des explications plus détaillées sur la géométrie épipolaire, il est possible de consulter Hartley et al. (2003) et Roy et al. (2007).

La génération d'images épipolaires sous OpenCV nécessite l'application successive de trois fonctions (les explications suivantes sont issues de la documentation en ligne relative à la bibliothèque OpenCV) :

- « stereoRectify » : cette fonction permet de générer deux matrices (« camera matrix ») qui une fois appliquées font coïncider les plans image des deux appareils photo. Cela implique que toutes les lignes épipolaires sont parallèles.
- « initUndistortRectifyMap » : cette fonction corrige les distorsions. Les résultats sont sous forme de « maps ».
- « remap » : cette fonction transforme les résultats « maps » en images.

La figure 37 présente les images épipolaires générées à partir des photographies de Super-Sauze. On constate clairement avec l'exemple de la cible métallique rouge et jaune que cette dernière a la même ordonnée sur les images de gauche et de droite. En effet les deux cibles sont situées sur la même ligne (voir trait rouge). Ces images épipolaires semblent donc être de qualité.

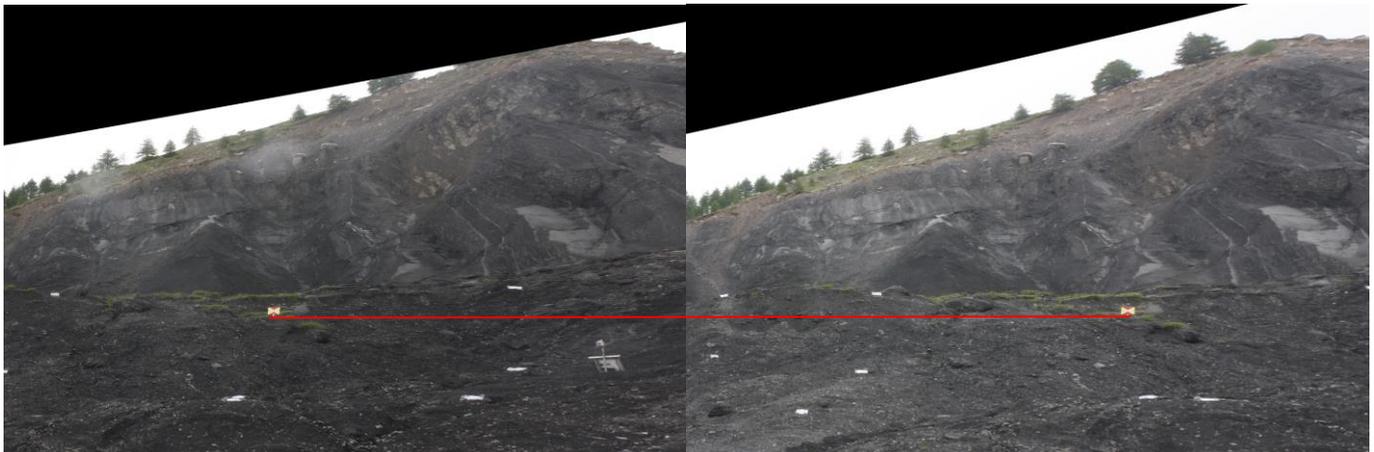
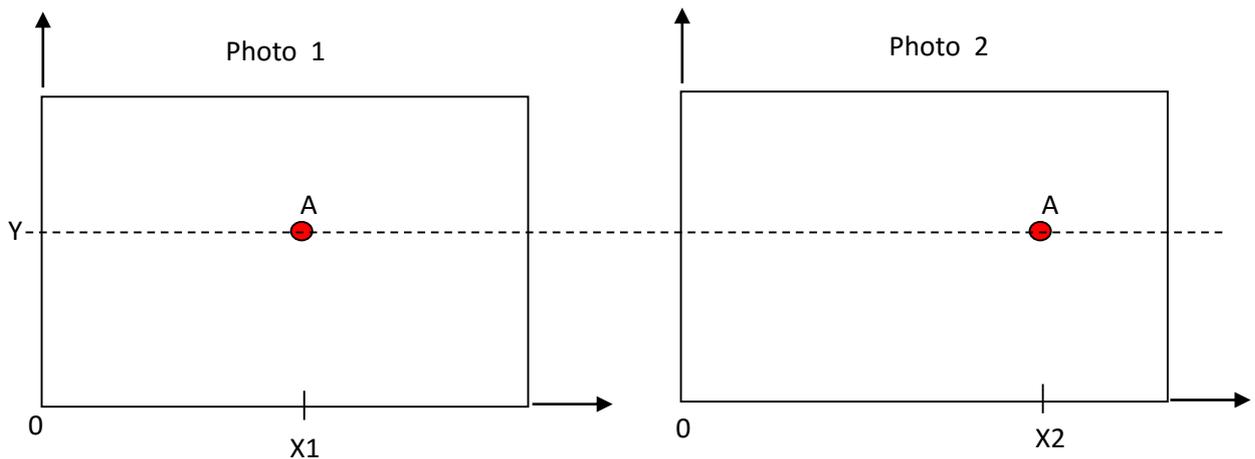


Figure 37 : images épipolaires générées par les fonctions de la bibliothèque OpenCV.
Le trait rouge relie deux points homologues.

4. Génération de cartes de profondeur

Dans une carte de profondeur, la valeur en niveau de gris de chaque pixel correspond à la profondeur, c'est-à-dire à la distance entre le centre de l'appareil photo et le point sur l'image. La profondeur est directement liée à la différence de la coordonnée X entre chaque photo. La figure 38 apporte des explications plus claires sur le principe.



$$\text{Soit } p \text{ la profondeur } \quad p = a \times (X2 - X1) \quad (7)$$

Figure 38 : relation entre images épipolaires et profondeur.

Pour générer une carte de profondeur avec la bibliothèque OpenCV, deux fonctions entrent en action. Il s'agit de la fonction « stereoSGBM_create » pour commencer, qui permet de définir les paramètres à utiliser dans la seconde fonction, « compute » qui elle génère la carte de profondeur.

Dans le cadre de ce projet, les options « blockSize » ou taille de bloc et « numDisparities » ont été testées. La première correspond à la taille du bloc à considérer. On rappelle que par défaut, OpenCV travaille sur des blocs et non sur les pixels. L'option « numDisparities » correspond à la taille de l'intervalle sur lequel la fonction « compute » va chercher une correspondance d'une photo à l'autre.

Dans un premier temps, l'option « blockSize » a été étudiée. Plusieurs valeurs ont été testées. La figure 40 présente les résultats pour les valeurs cinq, sept et douze pixels. Visuellement, il apparaît que la valeur qui apporte le meilleur résultat est la valeur sept. La figure 39 représente les deux options de façon schématique.

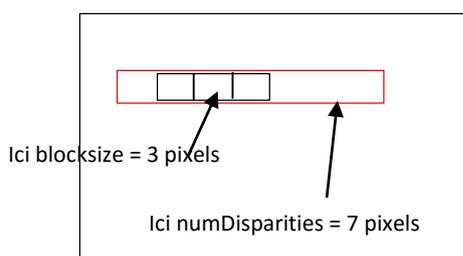


Figure 39 : les options « Blocksize » et « numDisparities » présentées de façon schématique

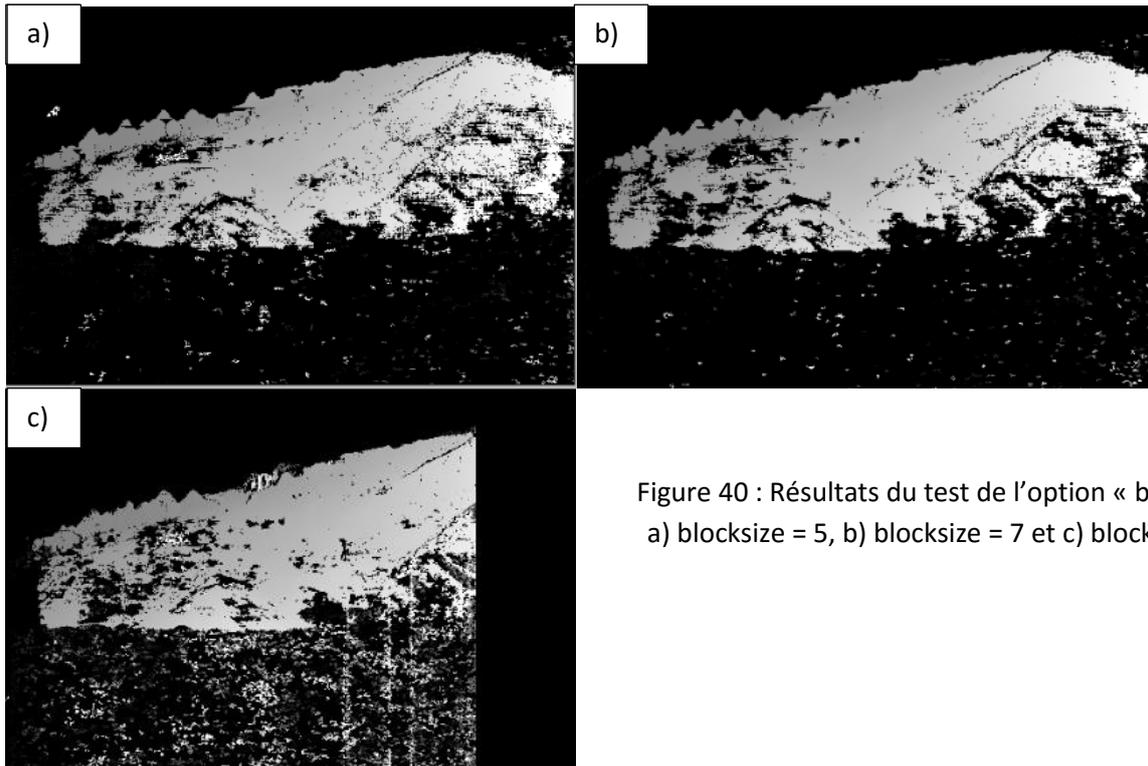


Figure 40 : Résultats du test de l'option « blockSize ». a) blockSize = 5, b) blockSize = 7 et c) blockSize = 12.

Une fois la meilleure valeur pour « blockSize » déterminée, c'est l'option « numDisparities » qui a été étudiée. Les résultats sont présentés sur la figure 41. La valeur optimale semble être trois-cent-soixante-huit. Il semble cependant que le traitement ne fonctionne pas dans le champ proche.

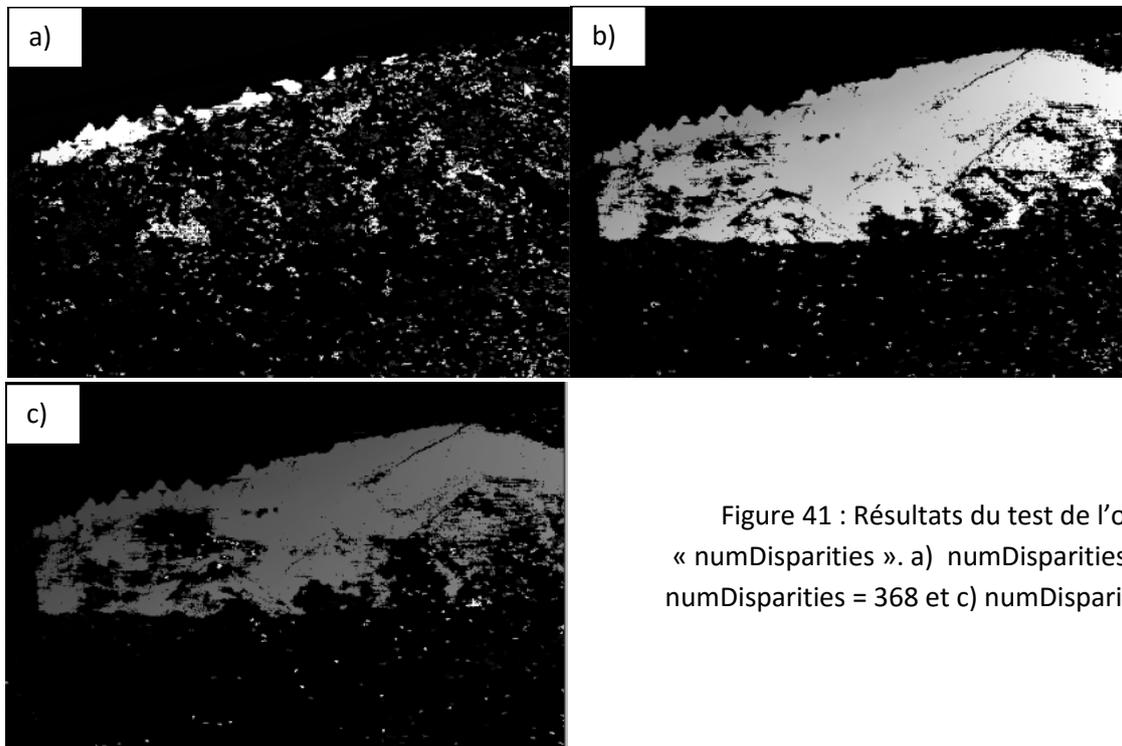


Figure 41 : Résultats du test de l'option « numDisparities ». a) numDisparities = 192, b) numDisparities = 368 et c) numDisparities = 736.

5. Génération de nuages de points

A partir de la carte de profondeur « optimale » générée, il est possible d'obtenir un nuage de points grâce à la fonction « reprojetimagereto3D ». Les résultats sont présentés sur la figure 42. Un grand nombre de points bruités a dû être supprimé manuellement à l'aide de l'outil CloudCompare. Il semble cependant que le nuage de points ne soit pas à l'échelle, puisque l'unité est a priori le pixel. De plus, aucun point n'a été calculé dans le champ proche et il y a beaucoup de trous à l'intérieur du nuage.

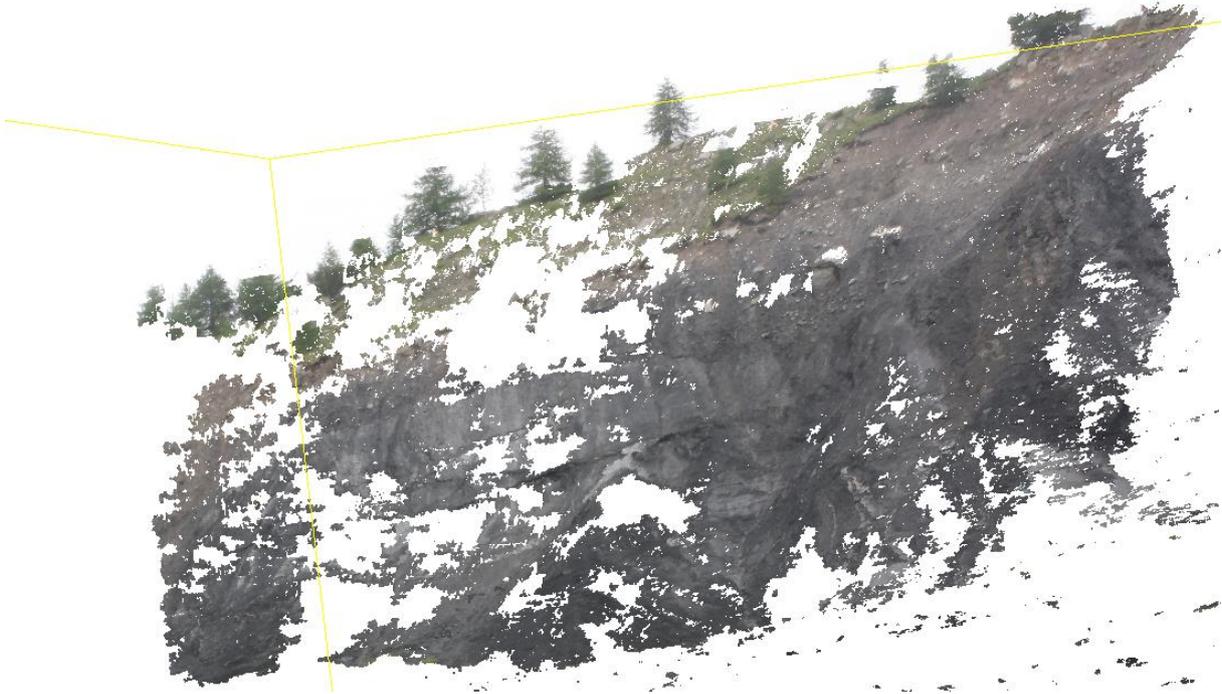


Figure 42 : nuage de points obtenu suite à l'application d'un traitement Open cv et d'une segmentation sous CloudCompare.

6. Conclusion

En conclusion à cette brève étude sur la photogrammétrie appliquée à l'étude des glissements de terrain, il peut être précisé qu'aucune analyse de la précision n'a été réalisée, faute de temps. De plus, il reste encore certaines zones d'ombres, notamment sur les unités et le système de coordonnées en sortie de traitement. La documentation en ligne d'OpenCV est en effet relativement peu détaillée. Cependant, on reconnaît clairement le glissement de terrain sur le nuage de points généré. Ces résultats sont tout à fait encourageants et permettent d'envisager à terme un traitement automatisé des données photographiques.

De plus, il a été constaté que le traitement n'a pas fonctionné dans le champ proche, certainement parce que la ligne de base entre les deux appareils photographiques est trop longue. En effet elle a été dimensionnée pour l'étude de l'escarpement haut du glissement de Super-Sauze situé dans un champ plus éloigné. La solution à ce problème serait d'installer une troisième caméra placée entre les deux existantes.

VI. Conclusion générale et perspectives

En France, le suivi de mouvements de terrain est assuré en partie par le Service National d'Observation OMIV. Ces phénomènes sont complexes et de nombreuses sciences interviennent pour leur compréhension. Pour étudier les déplacements en surface, plusieurs méthodes sont utilisées dont les observations GNSS et la photogrammétrie.

Un premier chapitre de ce projet a consisté à vérifier si la méthode PPP est adaptée au suivi de glissements de terrain et si elle offre une bonne alternative aux méthodes de calcul en différentiel. Une première comparaison a été réalisée entre des résultats GAMIT-GLOBK, GINS et SCRS-PPP. Au vu de ce test, la méthode PPP semble adaptée au suivi de glissements de terrain. Par la suite, les options de SCRS-PPP ont été testées afin de sélectionner la meilleure combinaison d'options possibles. Le potentiel des logiciels gLAB et RTKLIB a également fait l'objet de tests, cependant les résultats obtenus sont moins stables que ceux obtenus avec leur homologue canadien SCRS-PPP.

Suite à ces premières analyses et à la validation du logiciel SCRS-PPP, une chaîne de traitement automatique a été développée et le calcul en PPP y a été intégré, dans le but de proposer une solution quotidienne de positions et de variations de lignes de base pour les stations de l'OMIV. Ce traitement baptisé « solution OMIV » se décompose en une solution rapide, calculée quatre jours après les mesures avec les produits rapides de l'IGS, et en une solution finale temporaire, calculée tous les cinquante jours avec les produits finaux de l'IGS. Enfin, un calcul annuel permet d'obtenir la solution finale.

Le processus fonctionne pour l'instant localement. Il n'a pas encore été mis en place sur le serveur de l'EOST. De plus, le traitement automatique des données d'observation en amont du calcul PPP, c'est-à-dire la conversion des fichiers bruts en fichiers RINEX reste à faire, de même que l'affichage des résultats sur le site internet d'OMIV.

Il serait également intéressant par la suite d'optimiser le traitement, d'une part en réduisant au maximum le temps du processus (minimiser autant que possible le nombre de téléchargements, etc.) et l'espace mémoire nécessaire au stockage des données (ne garder que le strict minimum) et d'autre part en garantissant sa fiabilité (intégration de tests internes au traitement). Enfin il est envisageable de mettre en place un système d'alerte qui viendrait envoyer un message si un déplacement d'une vitesse supérieure à un seuil fixé serait détecté sur quelques jours.

En parallèle, une étude a été menée sur des récepteurs mono-fréquence à bas coût GEOMON. Ces derniers constitueraient en effet une alternative intéressante aux récepteurs bi-fréquence haut de gamme utilisés actuellement et qui sont très coûteux. Un réseau de six récepteurs mono-fréquence GEOMON a été installé sur le glissement de Super-Sauze et plusieurs tests ont été menés. Le choix du logiciel RTKLIB différentiel pour le traitement des données mono-fréquence a été validé. De plus une stratégie a été mise en place pour le traitement à terme des données GEOMON. Il a été décidé d'utiliser une station de référence pour le calcul en différentiel qui est située à moins de cinq cent mètres en distance et avec une dénivelée inférieure à cent mètres par rapport au glissement. Les résultats obtenus sont relativement stables. Cependant, il faut bien entendu garder à l'esprit que la précision annoncée par le constructeur est de trois centimètres. Les récepteurs GEOMON sont donc adaptés

pour le suivi de glissements rapides (plusieurs mètres par an). Il est néanmoins illusoire de vouloir les utiliser sur des glissements lents.

Il serait opportun par la suite d'intégrer le calcul en différentiel des récepteurs mono-fréquence à bas coûts et celui en PPP des récepteurs bi-fréquence dans le même traitement automatique, de manière à proposer une solution encore plus complète aux utilisateurs des données OMIV. De plus, les GEOMON ont été mis en place de façon temporaire sur des mâts à un mètre cinquante du sol. Il faudrait les installer avant l'hiver et la venue de la neige sur des mâts plus hauts.

Un deuxième chapitre a porté sur le traitement de données photographiques issues de deux appareils CANON digital REBEL XS de photographie installés de façon permanente sur le glissement de Super-Sauze. L'objectif à terme est d'intégrer le traitement dans un processus automatique, de façon à générer régulièrement des MNT de certaines zones de glissements de terrain à partir de couples de photographies stéréo. Il serait alors possible de proposer des cartes de déplacements. La bibliothèque de programme OpenCV a été testée et des résultats encourageants ont été obtenus. Un nuage de points qui visuellement semble proche de la réalité a été généré. Il serait nécessaire de réaliser une étude sur la précision de ce nuage de points. De plus, il est certainement possible d'améliorer les résultats, notamment dans le champ proche, en installant un troisième appareil photo sur le glissement de Super-Sauze. Disposer de trois caméras ouvrirait de nouvelles perspectives. Il serait possible de proposer une double solution gérant à la fois le champ proche et le champ lointain et se basant sur la méthode testée au cours de ce PFE, mais également d'utiliser d'autres algorithmes nécessitant l'emploi d'un minimum de trois caméras.

VII. Table des illustrations

Figure 1 : vue du glissement de Super-Sauze (source site OMIV).....	1
Figure 2 : présentation schématique des objectifs	2
Figure 3 : exemple d'une incohérence au niveau du calcul des stations sur un glissement rapide due à l'utilisation de la méthode différentielle. (Source site OMIV)	6
Figure 4 : a) pivot Leica (AR10) et b) antenne permanente Trimble à Super-Sauze	7
Figure 5 : Organisation de OMIV (Source site OMIV http://eost.u-strasbg.fr/omiv/)	10
Figure 6 : plan d'équipement du glissement de Villerville (Source site OMIV).....	11
Figure 7 : plan d'équipement du glissement de La Clapiere (Source site OMIV).....	11
Figure 8 : présentation du fonctionnement de SCRS-PPP d'après Lagnoux (2013)	19
Figure 9 : Comparaison des solutions SCRS-PPP, GINS et GAMIT sur VLRB 2011. Résultats en latitude, longitude et hauteur ellipsoïdale.	22
Figure 10 : Comparaison des solutions SCRS-PPP, GINS et GAMIT sur CLP2 2011. Résultats en latitude, longitude et hauteur ellipsoïdale.	22
Figure 11 : séries temporelles de position obtenues avec les options « static » et « kinematic » sur la station VLRV 2012.	24
Figure 12 : séries temporelles de position obtenues avec les options « static » et « kinematic » sur la station CLP1 2013.....	25
Figure 13 : erreurs moyennes quadratiques sur les positions en fonction de l'option choisie (« kinematic » ou « static ») pour VLRV 2012.	26
Figure 14 : Influence du type de produits IGS utilisés (orbites rapides ou finales) sur le positionnement : station CLAP 2013	28
Figure 15 : Influence du type de produits IGS utilisés (orbites rapides ou finales) sur le positionnement : station CLAP 2013	28
Figure 16 : Variation de la position en fonction de la durée des observations sur la station CLAP le 3 janvier 2013.....	30
Figure 17 : évolution de l'erreur moyenne quadratique sur la précision en fonction de la durée des observations sur la station CLAP le 3 janvier 2013.	31
Figure 18 : Présentation d'une solution de calcul « forward-backward » sous SCRS-PPP. La durée d'observation est ici de 23h.	32
Figure 19 : Comparaison entre un calcul en « L1 only » et en L1 +L2 avec SCRS-PPP sur la station CLP1 2013.....	33
Figure 20 : variation de la position de la station VLRV 2012 obtenue suite à un calcul en PPP avec le logiciel RTKLIB.....	34
Figure 21 : variation de la position de la station BACT 2012 obtenue suite à un calcul en PPP avec le logiciel gLAB.....	35
Figure 22 : écarts de positions entre les résultats gLAB et SCRS-PPP sur la station BACT 2012	36
Figure 23 : chronologie du traitement automatique des données bi-fréquence	38
Figure 24 : Principe du traitement automatique	41

Figure 25 : principe de fonctionnement du système GEOMON développé par la société InfraSurvey. (Source : site d'InfraSurvey)	43
Figure 26 : comparaison de la stabilité des positions d'un jour à l'autre de la station CLP2 2013 entre les calculs SCRS-PPP, RTKLIB différentiel « L1 only » et L1 +L2.	45
Figure 27: vue du système de fixation provisoire de deux récepteurs mono-fréquence GEOMON sur le toit de l'EOST.	46
Figure 28 : Un GEOMON sur le glissement de terrain de Super-Sauze, connecté à une batterie et à un panneau solaire.	47
Figure 29 : Répartition des six récepteurs GNSS GEOMON sur le glissement de Super-Sauze	48
Figure 30 : Comparaison des positions du GEOMON 4 en fonction de la station de référence (BACT ou SAZ4).....	50
Figure 31 : erreurs moyennes quadratiques sur les positions du GEOMON 4 en fonction de la station de référence (BACT ou SAZ4). Les résultats sont donnés en coordonnées cartésiennes géocentriques.	50
Figure 32 : lien entre la durée des observations du récepteur et la stabilité des positions pour le GEOMON 5.	51
Figure 33 : deux récepteurs NOVATEL connectés à des antennes LEICA AR 10 et installés sur le toit de l'EOST.....	53
Figure 34 : série temporelle de position du récepteur bi-fréquence NOVBas installé sur le glissement de Pont-Bourquin, Suisse (solution SCRS-PPP, 13 au 27 mai 2015).....	54
Figure 35 : Présentation de l'installation des appareils photographiques de Super-Sauze.....	56
Figure 36 : photographies brutes a) CAM haut et b) CAM bas, prises à Super-Sauze le 17 juin 2015. Les points blancs sont des bâches en plastique utilisées comme cibles.....	57
Figure 37 : images épipolaires générées par les fonctions de la bibliothèque OpenCV. Le trait rouge relie deux points homologues.	59
Figure 38 : relation entre images épipolaires et profondeur.	60
Figure 39 : les options « <i>Blocksize</i> » et « <i>numDisparities</i> » présentées de façon schématique	60
Figure 40 : Résultats du test de l'option « <i>blockSize</i> ». a) <i>blocksize</i> = 5, b) <i>blocksize</i> = 7 et c) <i>blocksize</i> = 12.	61
Figure 41 : Résultats du test de l'option « <i>numDisparities</i> ». a) <i>numDisparities</i> = 192, b) <i>numDisparities</i> = 368 et c) <i>numDisparities</i> = 736.	61
Figure 42 : nuage de points obtenu suite à l'application d'un traitement Open cv et d'une segmentation sous CloudCompare.	62

VIII. Table des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques des principales méthodes de suivi de déplacements. (D'après Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (1985), Laboratoire central des Ponts et Chaussées (1994), Gili et al. (2000), modifié par Malet et al. (2002), Depréz (2010), Maisse (2014))	4
Tableau 2 : cahier des charges à respecter pour valider la méthode PPP	7
Tableau 3 : Tableau comparatif de différentes solutions de calcul GNSS, d'après Ferhat et al. (2015)	18
Tableau 4: Statistiques des écarts entre les solutions SCRS-PPP et GAMIT pour les stations CLP2 et VLRB 2011.....	23
Tableau 5 : statistiques des écarts entre les options « static » et « kinematic » pour CLP1 2013 et VLRV 2012	25
Tableau 6 : différents types de produits (orbites et horloges satellites) disponibles sur le site de l'IGS (source site de l'IGS).....	27
Tableau 7 : différents de paramètres ERP disponibles sur le site de l'IGS (source site de l'IGS) PM : <i>Polar Motion, PM rate : Polar Motion-Rate, LOD : Length of Day, 100 ys = 3.1 mm de la rotation équatoriale, 10 ys = 4.6 mm de la rotation équatoriale</i>	27
Tableau 8 : statistiques sur les écarts entre les positions calculées avec les orbites rapides et les orbites finales sur CLAP 2013 et VLRH 2013.	29
Tableau 9 : statistiques des écarts entre les solutions de positionnement gLAB et SCRS-PPP sur BACT 2012.....	36
Tableau 10 : statistiques des écarts entre les solutions de positionnement SCRS PPT et RTKLIB différentiel L1 only, et entre RTKLIB différentiel L1 only et L1 +L2.....	45
Tableau 11 : résultats de la calibration des appareils CANON EOS digital REBEL XS avec deux outils différents.....	58

IX. Bibliographie

Altamimi, Z., (2012), Global Terrestrial Reference Systems and Frames, Technical Seminar on Reference Frame in Practice, Rome – Italy, 4th-5th May 2012, 81pages.

Benoit, L., Briole, P., Martin, O., Thom, C., (2014), Real-time deformation monitoring by a wireless network of low-cost GPS, Journal of Applied Geodesy, 10 pages

Bevy, C., (2014), Projet de recherche : GPS Positionnement Ponctuel Précis, Projet de recherche, Université de Strasbourg, EOST, 33 pages

Cartier, G., (1981), Recherches et études sur les glissements de terrains, Bull liaison Labo, P. et Ch. - 115, sept-oct 1981, 10 pages

Cattin, P.-H., Brahier, J., (2011), Géomonitorage par GPS avec des équipements à faible coût, Géomatique Suisse 6/2011, pp 306-308

Déprez, A., (2010), Caractérisation de la cinématique de glissements de terrain par mesure GPS en continu et modélisation mécanique. Application aux sites de La Valette et de Villerville, Mémoire de master 2, Master Sciences de la Terre de l'Université de l'Environnement, Spécialité Sciences de la Terre, 69 pages

École Polytechnique Fédérale de Lausanne (1985). Les travaux de mensuration en terrain instable. Projet d'école « Détection et Utilisation des terrains instables », DUTI, p27.

Evéquo, L., Mabillard, R., (2012), Surveillance de glaciers par GPS « Low Cost », Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1 page

Ferhat, G., Malet, J.-P., Boetzel, P., Ulrich, P., (2015), Evaluation of different processing strategies of Continuous GPS (CGPS) observations for landslide monitoring, European Geosciences Union General Assembly 2015, Vienna, Austria, 12-17 April 2015.

Gakstatter, E., (2013), A comparison of free GPS Online Post-Processing Services

Gili, J.A., Corominas, J., Rius, J., (2000). Using Global Positioning System techniques in landslide monitoring. Engineering geology, n°55, pp 167-192.

Girault, F., Terrier, M. (1994), Analyse par photogrammétrie des mouvements de terrain : application aux sites de la Clapière, du Friolin, de Boulc et de l'Harmalière, BRGM, 103 pages

Hartley, R., Zisserman, A. (2003), Multiple View Geometry in Computer Vision, Second Edition, Cambridge University press, 673 pages.

Bibliographie

Henrion, E., (2013), Retrouver le déplacement rapide des stations géodésiques : expériences et calculs, Mémoire de diplôme d'ingénieur géomètre, ESGT, 58 pages.

Henry, J.-B., Grussenmeyer, P., Malet, J.-P., Maquaire, O., (2001) Génération de MNT par photogrammétrie aérienne de petit format : application au versant instable de Super Sauze, Revue XYZ n°87, pp 42-50

Hernandez-Pajares, M., Juan, J.M., Ramos-Bosch, P., Rovira-Garcia, A., Salazar, D., Ventura-Traveset, J., Lopez-Echazarreta, C., Hein, G., (2010), The ESA/UPC GNSS-Lab Tool (gLab), An advanced multipurpose package for GNSS data processing, 5th ESA Workshop on Satellite Navigation User Equipment Technologies (NAVITEC), Noordwijk, The Netherlands, 8 pages

Hirschmueller, H., (2008), Stereo Processing by Semiglobal Matching and Mutual Information, IEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, vol 30., No2., February 2008, pp 328-341.

Horn, B.K.P., (2000), Tsai's camera calibration method revisited, 13 pages

Lagnoux, B., (2013), Estimation du contenu intégré en vapeur d'eau troposphérique par GPS embarqué, Mémoire de diplôme d'ingénieur géomètre topographe, ESGT, 69 pages

Maisse, P., (2014), Evaluation d'une solution PPP via le logiciel « GINS », mémoire d'ingénieur topographe, ESGT, 49 pages

Malet, J-P., Hartig, S., Calais, E., Maquaire, O., (2000), Apport du GPS au suivi en continue des mouvements de terrain. Application au glissement-coulée de Super-Sauze (Alpes-de Haute-Provence), C. R Acad. Sci Paris, Sciences de la Terre et des planètes/ Earth Planetary Sciences 331, pp 175-182

Malet, J-P., Maquaire, O., Calais, E., (2002), The use of Global Positioning System techniques for the continuous monitoring of landslides: application to the Super-Sauze earthflow (Alpes-de-Haute-Provence, France), Geomorphology 43, pp.33-54.

Malet, J-P., Ulrich, P., Déprez, A., Masson, F., Lissak, C., Maquaire, O., (2011), Continuous monitoring and near-real time processing of GPS observations for landslide analysis : a methodological framework, Proceeding of the Seconde World Landslide Forum, 3-7 October 2011, Rome, 6pages

Malet, J-P., Ulrich, P., Masson, F., Déprez, A., Stumpf, A., Mathieu, A., Lebourg, T., Vidal, M., Brièvre, G., Darras, L., Janex, G., Vial, B., Grasso, J-R., (2013), La surveillance multi-technique des déformations de surface pour l'Observatoire OMIV, JAG2013, 31 pages.

Marty, J.C, Loyer, S., Perosanz, F., Mercier, F., Bracher, G., Legresy, B., Portier, L., Capdeville, H., Fund, F., Lemoine, J.M, Biancale, R., (2011), GINS: the CNES/GRGS GNSS Scientific software, Colloquium Scientific dans Fundamental Aspects of the Galileo Programme, 4 pages.

Milcent, C., (2014), Comparaison des logiciels de traitement de données GPS GAMIT/GLOBK et PPP et validation du logiciel PPP, Mémoire de diplôme d'ingénieur, CNAM, 107 pages.

Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de l'aménagement du territoire, Centre d'Etudes Techniques Maritimes et Fluviales, Département Ports Maritimes et Voies Navigables, (2008), Le GPS différentiel (DGPS) et temps réel (GPS RTK), 6 pages

Bibliographie

Morel, L., Fund, F., Legros, R., Durand, S., Flacelière, B., (2014), PPP: la maturité ? , Revue XYZ n°138, 1er trimestre 2014, pp.39-47

Petit, G., Kanj, A., Loyer, S., Delporte, J., Merci, F., Perosanz, F., (2015), 1×10^{-16} frequency transfer by GPS PPP with integer ambiguity resolution, IOP Publishing, Bureau International des Poids et Mesures, Metrologia 52 (2015), pp. 301-309

Roy, S., Tardif, J-P., (2007), Vision par ordinateur : Calibration de Caméra et géométrie épipolaire, Département d'Informatique et de recherche opérationnelle, Université de Montréal, 69 pages

Soycan, M., Ata, E. (2010), Precise point positioning versus traditional solution for GNSS network, Scientific Research and Essays Vol. 6(4), 18 February 2011, pp. 799-808

Travelletti, J., Delacourt, C. Allemand, P., Malet, J-P., Schmittbuhl, J., Toussaint, R., Bastard, M., Correlation of multi-temporal ground-based optical images for landslide monitoring : Application, potential and limitations, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 70 (2012), pp.39-55

X. Table des annexes

Annexe 1 : fichier de configuration « optimale » pour un calcul en PPP sous gLAB.....	72
Annexe 2 : fichier de configuration « optimale » pour le calcul sous RTKLIB en PPP	75
Annexe 3 : fichier de configuration optimale pour le calcul RTKLIB en différentiel mono-fréquence des données GEOMON (fichier partiel)	77
Annexe 4 : figures en sortie du traitement automatique des stations GNSS permanentes OMIV. Il s'agit là de figures provisoires.....	79
Annexe 5 : exemples de fichiers en sortie qui seront accessibles sur le site d'OMIV. Les fichiers de traitement intermédiaire ne seront pas accessibles.....	81

XI. Annexes

Annexe 1 : fichier de configuration « optimale » pour un calcul en PPP sous gLAB.

```
#####
#
#  gLAB - Version: 2.2.3
#  This is a self-generated configuration file.
#  Created at: 10:05 on 04/05/2015
#
#####

#####
#  INPUT section
#####

-input:obs RINEX
-input:ant filesgLAB/igs08_1840.atx
-input:orb orbite
-input:clk clock
-input:klb navi
-input:dcb navi

#####
#  PREPROCESS section
#####

-pre:setrecpos RINEX
-pre:dec 300
-pre:elevation 5
-pre:eclipse
--pre:cs:li
--pre:cs:bw
-pre:cs:l1c1
-pre:cs:l1c1:max 15
-pre:cs:l1c1>window 100
-pre:cs:l1c1:slope 5
-pre:availf G1
-pre:smooth 0
```

```
#####  
#  MODELLING section  
#####
```

```
--model:dcb:p1p2  
-model:dcb:p1c1 flexible  
--model:satellitehealth  
-model:satclocks  
-model:satmovinflight  
-model:earthrotinflight  
-model:satphasecenter  
-model:relclock  
--model:iono  
-model:trop  
-model:trop:nominal Simple  
-model:trop:mapping Niell  
-model:windup  
-model:solidtides  
-model:relpath  
-model:orbit:deg 10  
-model:clock:deg 0  
-model:rephasecenter ANTEX  
-model:arp RINEX
```

```
#####  
#  FILTER section  
#####
```

```
--filter:Sigmalono  
-filter:trop  
-filter:phi:trop 1  
-filter:q:trop 1e-4  
-filter:p0:trop 0.25  
-filter:nav static  
--filter:backward  
-filter:phi:dr 1  
-filter:q:dr 0  
-filter:p0:dr 1e8  
-filter:phi:clk 0  
-filter:q:clk 9e10  
-filter:p0:clk 9e10  
-filter:fixedweight 1 100  
-filter:meas carrierphase  
-filter:select 2 C1C G1C  
-filter:phi:amb 1
```

-filter:q:amb 0
-filter:p0:amb 400
-filter:fixedweight 2 0.5

#####

OUTPUT section

#####

-output:file pierrot.out
-print:info
--print:cycleslips
--print:input
--print:model
--print:satellites
--print:prefit
--print:postfit
--print:filter
-print:output
--print:satdiff
--print:satstat
--print:satstattot
--print:meas

#####

End of self-generated parameters



Annexe 2 : fichier de configuration « optimale » pour le calcul sous RTKLIB en PPP

```
# rtkpost options (2010/08/07 09:24:29, v.2.4.0)
```

```
#pos1-posmode =kinematic # (0:single,1:DGPS,2:kinematic,3:static,4:movingbase,5:fixed,6:ppp-
kine,7:ppp-static)
pos1-posmode =ppp-static # (0:single,1:DGPS,2:kinematic,3:static,4:movingbase,5:fixed,6:ppp-
kine,7:ppp-static)
pos1-frequency =l1 # (1:l1,2:l1+l2,3:l1+l2+l5)
pos1-soltype =forward # (0:forward,1:backward,2:combined)
pos1-elmask =10 # (deg)
#pos1-snrmask =0 # (dBHz)
pos1-dynamics =off # (0:off,1:on)
pos1-tidecorr =off # (0:off,1:on)
pos1-ionoopt =brdc # (0:off,1:brdc,2:sbas,3:dual-freq,4:est-stec)
pos1-tropopt =saas # (0:off,1:saas,2:sbas,3:est-ztd,4:est-ztdgrad)
pos1-sateph =precise # (0:brdc,1:precise,2:brdc+sbas,3:brdc+ssrapc,4:brdc+ssrcom)
pos1-exclsats = # (prn ...)
pos1-navsys =1 # (1:gps+2:sbas+4:glo+8:gal+16:qzs+32:comp)
pos2-armode =fix-and-hold # (0:off,1:continuous,2:instantaneous,3:fix-and-hold)
pos2-gloarmode =on # (0:off,1:on,2:autocal)
pos2-arthres =5
pos2-arlockcnt =0
pos2-arelmask =0 # (deg)
pos2-aroutcnt =5
pos2-arminfix =10
pos2-slipthres =0.05 # (m)
pos2-maxage =30 # (s)
pos2-rejionno =30 # (m)
pos2-niter =1
pos2-baselen =0 # (m)
pos2-basesig =0 # (m)
out-solformat =xyz # (0:llh,1:xyz,2:enu,3:nmea)
out-outhead =on # (0:off,1:on)
out-outopt =on # (0:off,1:on)
out-timesys =gpst # (0:gpst,1:utc,2:jst)
out-timeform =hms # (0:tow,1:hms)
out-timendec =3
out-degform =deg # (0:deg,1:dms)
out-fieldsep =
out-height =ellipsoidal # (0:ellipsoidal,1:geodetic)
out-geoid =internal # (0:internal,1:egm96,2:egm08_2.5,3:egm08_1,4:gsi2000)
```

```

#out-solstatic =all # (0:all,1:single)
out-solstatic =all # (0:all,1:single)
out-nmeaintv1 =0 # (s)
out-nmeaintv2 =0 # (s)
out-outstat =off # (0:off,1:state,2:residual)
stats-errratio =100
stats-errphase =0.003 # (m)
stats-errphaseel =0.003 # (m)
stats-errphasebl =0 # (m/10km)
stats-errdoppler =10 # (Hz)
stats-stdbias =30 # (m)
stats-stdiono =0.03 # (m)
stats-stdtrop =0.3 # (m)
stats-prnaccelh =1 # (m/s^2)
stats-prnaccelv =0.1 # (m/s^2)
stats-prnbias =0.0001 # (m)
stats-prniono =0.001 # (m)
stats-prntrop =0.0001 # (m)
stats-clkstabil =5e-12 # (s/s)
ant1-postype =llh # (0:llh,1:xyz,2:single,3:posfile,4:RINEXhead,5:rtcm)
ant1-pos1 =0 # (deg|m)
ant1-pos2 =0 # (deg|m)
ant1-pos3 =0 # (m|m)
ant1-anttype =*
ant1-antdele =0 # (m)
ant1-antdeln =0 # (m)
ant1-antdelu =0 # (m)
ant2-postype =single # (0:llh,1:xyz,2:single,3:posfile,4:RINEXhead,5:rtcm)
ant2-pos1 =0 # (deg|m)
ant2-pos2 =0 # (deg|m)
ant2-pos3 =0 # (m|m)
ant2-anttype =*
ant2-antdele =0 # (m)
ant2-antdeln =0 # (m)
ant2-antdelu =0 # (m)
misc-timeinterp =on # (0:off,1:on)
misc-sbasatsel =0 # (0:all)
#file-satantfile =.././../data/igs05.atx
#file-rcvantfile =.././../data/igs05.atx
#file-staposfile =.././../data/stations.pos
#file-geoidfile =
#file-dcbfile =.././../data/P1C1_ALL.DCB
file-tempdir =
file-geexefile =
file-solstatfile =

```

file-tracefile =

Annexe 3 : fichier de configuration optimale pour le calcul RTKLIB en différentiel mono-fréquence des données GEOMON (fichier partiel)

rtkpost options (2013/11/27, v.2.4.2)

```

pos1-posmode    =static    # (0:single,1:DGPS,2:kinematic,3:static,4:movingbase,5:fixed,6:ppp-
kine,7:ppp-static)
pos1-frequency  =11        # (1:l1,2:l1+l2,3:l1+l2+l5,4:l1+l2+l5+l6,5:l1+l2+l5+l6+l7)
pos1-soltype    =combined  # (0:forward,1:backward,2:combined)
pos1-elmask     =20        # (deg)
pos1-snrmask_r  =on        # (0:off,1:on)
pos1-snrmask_b  =on        # (0:off,1:on)
pos1-snrmask_L1 =40,40,40,40,40,40,40,40,40
pos1-snrmask_L2 =0,0,0,0,0,0,0,0,0
pos1-snrmask_L5 =0,0,0,0,0,0,0,0,0
pos1-dynamics   =off       # (0:off,1:on)
pos1-tidecorr   =off       # (0:off,1:on)
pos1-ionoopt    =off       # (0:off,1:brdc,2:sbas,3:dual-freq,4:est-stec,5:ionex-tec,6:qzs-brdc,7:qzs-
lex,8:vtec_sf,9:vtec_ef,10:gtec)
pos1-tropopt    =off       # (0:off,1:saas,2:sbas,3:est-ztd,4:est-ztdgrad)
pos1-sateph     =brdc      # (0:brdc,1:precise,2:brdc+sbas,3:brdc+ssrapc,4:brdc+ssrcom)
pos1-posopt1    =off       # (0:off,1:on)
pos1-posopt2    =off       # (0:off,1:on)
pos1-posopt3    =off       # (0:off,1:on)
pos1-posopt4    =off       # (0:off,1:on)
pos1-posopt5    =off       # (0:off,1:on)
pos1-exclsats   =          # (prn ...)
pos1-navsys     =5         # (1:gps+2:sbas+4:glo+8:gal+16:qzs+32:comp)
pos2-armode     =continuous # (0:off,1:continuous,2:instantaneous,3:fix-and-hold)
pos2-gloarmode  =on        # (0:off,1:on,2:autocal)
pos2-arthres    =3
pos2-arlockcnt  =0
pos2-arelmask   =0        # (deg)
pos2-arminfix   =10
pos2-elmaskhold =0        # (deg)
pos2-aroutcnt   =5
pos2-maxage     =2        # (s)
pos2-syncsol    =off       # (0:off,1:on)
pos2-slipthres  =0.05     # (m)
pos2-rejionno   =30       # (m)
pos2-rejgdop    =30
pos2-niter      =1
pos2-baselen    =0        # (m)

```

```

pos2-basesig    =0      # (m)
out-solformat   =xyz     # (0:llh,1:xyz,2:enu,3:nmea)
out-outthead    =on      # (0:off,1:on)
out-outopt      =on      # (0:off,1:on)
out-timesys     =gpst    # (0:gpst,1:utc,2:jst)
out-timeform    =hms     # (0:tow,1:hms)
out-timendec    =3
out-degform     =deg     # (0:deg,1:dms)
out-fieldsep    =
out-height      =ellipsoidal# (0:ellipsoidal,1:geodetic)
out-geoid       =internal # (0:internal,1:egm96,2:egm08_2.5,3:egm08_1,4:gsi2000)
out-solstatic   =all     # (0:all,1:single)
out-nmeaintv1   =0       # (s)
out-nmeaintv2   =0       # (s)
out-outstat     =residual # (0:off,1:state,2:residual)
stats-eratio1   =100
stats-eratio2   =100
stats-errphase  =0.003   # (m)
stats-errphaseel =0.003   # (m)
stats-errphasebl =0      # (m/10km)
stats-errdoppler =10     # (Hz)
stats-stdbias   =30      # (m)
stats-stdiono   =0.03    # (m)
stats-stdtrop   =0.3     # (m)
stats-prnaccelh =10      # (m/s^2)
stats-prnaccelv =10      # (m/s^2)
stats-prnbias   =0.0001  # (m)
stats-prniono   =0.001   # (m)
stats-prntrop   =0.0001  # (m)
stats-clkstab   =5e-12   # (s/s)
ant1-postype    =RINEXhead # (0:llh,1:xyz,2:single,3:posfile,4:RINEXhead,5:rtcm)
ant1-pos1       =        # (deg|m)
ant1-pos2       =        # (deg|m)
ant1-pos3       =        # (m|m)
ant1-anttype    =*
ant1-antdele    =0       # (m)
ant1-antdeln    =0       # (m)
ant1-antdelu    =0       # (m)
ant2-postype    =xyz     # (0:llh,1:xyz,2:single,3:posfile,4:RINEXhead,5:rtcm)
ant2-pos1       =        # (deg|m)
ant2-pos2       =        # (deg|m)
ant2-pos3       =        # (m|m)
ant2-anttype    =*
ant2-antdele    =        # (m)
ant2-antdeln    =        # (m)

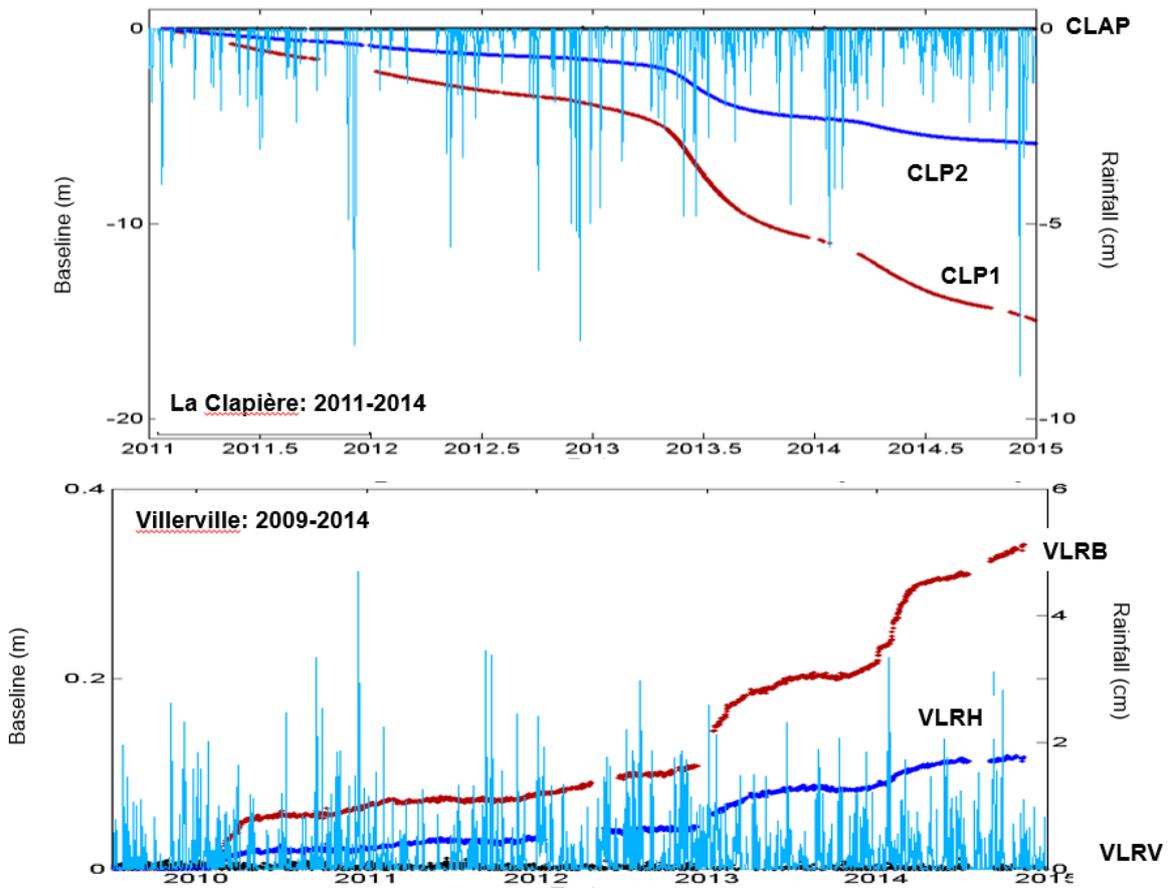
```

ant2-antdelu = # (m)

Annexe 4 : figures en sortie du traitement automatique des stations GNSS permanentes OMIV. Il s'agit là de figures provisoires.

Exemple d'une série temporelle de variation de lignes de base pour le glissement de La Clapière de 2011 à 2014. Les données pluviométriques sont superposées aux variations de lignes de base.

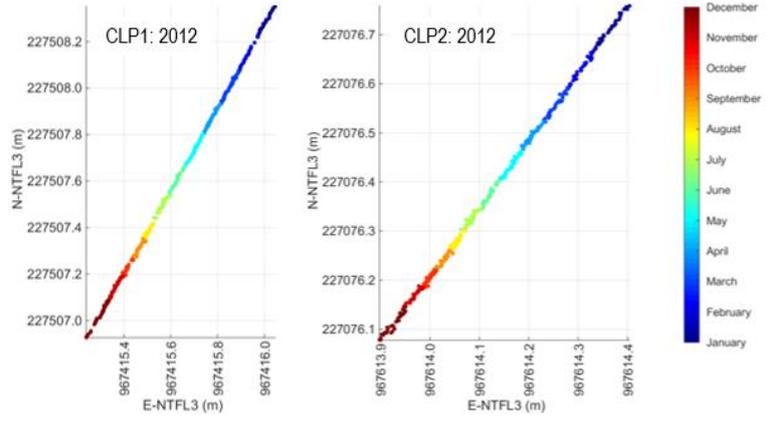
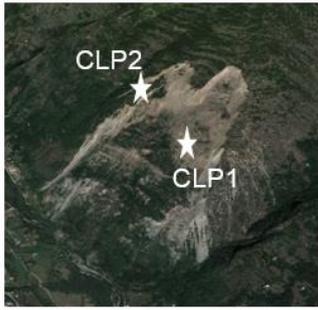
Results: Position time series of position - 2009-2014



Cartes de mouvements pour les stations CLP1 2012 et CLP2 2012.

Annexes

La Clapière



Annexes

Annexe 5 : exemples de fichiers en sortie qui seront accessibles sur le site d'OMIV. Les fichiers de traitement intermédiaire ne seront pas accessibles.

Pour chaque station fichier synthétique contenant les coordonnées et erreurs moyennes quadratiques sur les coordonnées dans l'ITRF2008, les coordonnées Lambert 3 et la durée des observations.

#	Date	DoY	Year	X-ITRF2008 (m)	Y-ITRF2008 (m)	Z-ITRF2008 (m)	StdX (m)	StdY (m)	StdZ (m)	E-NTF (m)	N-NTF (m)	Alti (m)	Obstime (hours)
2014/01/01	001	2014.00136990	4543553.2661	553232.3610	4429156.3438	0.0031	0.0023	0.0028	967611.984	227073.347	1429.222	14.99	
2014/01/02	002	2014.00410960	4543553.2591	553232.3575	4429156.3331	0.0031	0.0023	0.0028	967611.981	227073.344	1429.210	14.99	
2014/01/04	004	2014.00958900	4543553.2582	553232.3586	4429156.3320	0.0033	0.0028	0.0030	967611.982	227073.344	1429.208	14.99	

Pour chaque station, un fichier de variation de position dans le système East, North Up.

#	Date	DoY	Year	North (m)	East (m)	Up (m)	stN (m)	stE (m)	stU (m)
2014/01/01	001	2014.0013699	0.0514	-0.2165	3.0735	0.0008	0.0021	0.0039	
2014/01/02	002	2014.0041096	0.0540	-0.2397	3.1177	0.0007	0.0019	0.0036	
2014/01/03	003	2014.0068493	0.0557	-0.2244	3.0822	0.0008	0.0020	0.0037	

Pour chaque station sur le glissement, un fichier contenant les variations de ligne de base.

#	Date	DoY	Year	Geo-distance (m)	StdD (m)	deltaD (m)	East (m)	StdE (m)	North (m)	StdN (m)	Up (m)	StdU (m)
2014/01/01	001	2014.00136990	1257.1792	0.0041	0.0000	-1216.1289	0.0031	-298.0149	0.0041	-112.7706	0.0041	
2014/01/02	002	2014.00410960	1257.1929	0.0039	0.0137	-1216.1495	0.0030	-298.0099	0.0039	-112.7137	0.0039	
2014/01/04	004	2014.00958900	1257.1917	0.0042	0.0125	-1216.1447	0.0035	-298.0084	0.0041	-112.7561	0.0042	