



HAL
open science

Utilisation des réseaux de capteurs Géocubes pour la mesure de déformation des volcans en temps réel par GNSS

Mohamed Amjad Lasri

► **To cite this version:**

Mohamed Amjad Lasri. Utilisation des réseaux de capteurs Géocubes pour la mesure de déformation des volcans en temps réel par GNSS. Sciences de la Terre. Université Paris sciences et lettres, 2018. Français. NNT : 2018PSLEE040 . tel-02426022

HAL Id: tel-02426022

<https://theses.hal.science/tel-02426022v1>

Submitted on 1 Jan 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE DE DOCTORAT

de l'Université de recherche Paris Sciences et Lettres
PSL Research University

Préparée à l'Ecole Normale Supérieure de Paris

Utilisation des réseaux de capteurs Géocubes pour la mesure de
déformation des volcans en temps réel par GNSS

Ecole doctorale n°560

ECOLE DOCTORALE DES SCIENCES DE LA TERRE ET DE
L'ENVIRONNEMENT ET PHYSIQUE DE L'UNIVERS, PARIS

Spécialité TERRE ET ENVIRONNEMENT

COMPOSITION DU JURY :

M. KASSER Michel
Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du
Canton de Vaud, Rapporteur, Président du jury

M. VERDUN Jérôme
Ecole Supérieure des Géomètres et
Topographes, Rapporteur

Mme. FRUNEAU Bénédicte
Université Paris-Est-Marne-la-Vallée,
Examinatrice

M. BOUDIN Frédéric
Ecole Normale Supérieure de Paris,
Examinateur

M. TROUVÉ Emmanuel
Université Savoie Mont Blanc, Examinateur

M. BRIOLE Pierre
Ecole Normale Supérieure de Paris, Directeur
de thèse

M. THOM Christian
Institut National de l'Information Géographique
et Forestière, Co-directeur de thèse

M. VERLUISE Frédéric
Kylia, Invité

**Soutenue par Mohamed Amjad Lasri
le 18 Décembre 2018**

Dirigée par **Pierre Briole et
Christian Thom**



RÉSUMÉ

Le système Géocube est un réseau de capteurs GPS conçu et développé par le Laboratoire d'Opto-Électronique de Métrologie et d'Instrumentation (LOEMI) de l'Institut National de l'Information Géographique et Forestière (IGN) et maintenu par le même laboratoire et l'entreprise Ophelia-Sensors qui s'occupe de son industrialisation. Il a comme objectif de mesurer les déformations du sol avec une précision millimétrique. Ce réseau de capteurs a la particularité d'être à la fois très peu énergivore, d'un faible coût de revient, simple d'installation et d'utilisation. Il est donc bien adapté à l'usage dans un environnement difficile, comme les volcans. Ce système a déjà été testé avec succès lors d'une précédente thèse sur le glacier d'Argentière et sur un glissement de terrain proche de Super-Sauze en France.

La première partie de cette thèse porte sur l'optimisation du système de calcul du Géocube pour l'adapter à des réseaux de tailles plus importantes horizontalement et verticalement en vue de son utilisation dans un contexte volcanique. Cela passe, d'abord, par l'intégration d'une stratégie pour l'estimation du biais troposphérique dans le filtre de Kalman qui constitue le coeur du logiciel de calcul du Géocube. Cette amélioration est ensuite validée en utilisant les données de quelques réseaux GNSS permanents nationaux et internationaux. La deuxième partie consiste à étudier l'apport d'un réseau dense de Géocubes à l'étude du volcanisme à travers une expérience conduite sur le flanc sud-est de l'Etna, où cinq Géocubes ont été déployés entre le 12 Juillet 2016 et le 10 Juillet 2017. Les résultats obtenus et les enseignements tirés de cette expérimentation sont discutés et analysés. Enfin, nous validons les résultats obtenus avec les Géocubes en appliquant une technique PSI (Persistent Scatterer InSAR) sur des interférogrammes RADAR calculés à partir des données des satellites Sentinel-1A/B et qui couvrent la période de déploiement des Géocubes sur l'Etna. Ces deux méthodes (GPS et RADAR) se sont avérées complémentaires puisque le RADAR apporte la densité spatiale des mesures et le système Géocube la précision et la continuité temporelle.

ABSTRACT

The Geocube system is a network of wireless GPS sensors designed and developed by the Laboratory of Opto-Electronics, Metrology and Instrumentation (LOEMI) of the National Institute of Geographical and Forest Information (IGN) and maintained by the same laboratory and Ophelia-Sensors, the company responsible for its industrialization. Its purpose is to measure ground deformations with millimetre accuracy. This sensor network has the particularity of being very low in energy consumption, low cost, easy to install and easy to use. It is suited for use in harsh environments, such as volcanoes. This system has already been successfully tested in a previous works on the Argentière glacier and a Super-Sauze landslide in France.

The first part of this thesis deals with the optimization of the Geocube system for larger networks, horizontally and vertically, in order to use it in a volcanic context. First, a new strategy to estimate the tropospheric bias has been implemented into the Kalman filter (the heart of the Geocube processing software) in real time and in post-processing. This improvement is then validated using data from some national and international permanent GNSS networks. The second part consists in studying the contribution of a dense Geocubes network to the study of volcanism through an experiment conducted on the southeastern flank of Etna, where five Geocubes were deployed between July, 12th 2016 and July, 10th 2017. The results obtained from this experiment are discussed and analysed. Finally, the results obtained with Geocubes are validated by applying a PSI (Persistent Scatterer InSAR) technique on RADAR interferograms calculated from Sentinel-1A/B satellite data covering the period of deployment of the Geocubes on Etna. These two methods (GPS and RADAR) turned out to be complementary since RADAR provides the spatial density of measurements and the Geocube system provides accuracy and temporal continuity.

REMERCIEMENTS

Ce travail de thèse a été réalisé entre l'équipe LOEMI du Laboratoire en Sciences et technologies de l'information géographique (LaSTIG) de l'Institut National de l'Information Géographique et forestière (IGN), le laboratoire de Géologie de l'ENS (École Normale Supérieure de Paris) et la société Kylaia. Je tiens à les remercier pour leur accueil, et en particulier Kylaia pour l'aide financière qu'elle m'a apportée pour mes recherches.

Je remercie très sincèrement Pierre Briole, Christian Thom et Frédéric Verluise d'abord d'avoir accepté d'encadrer cette thèse, puis pour leurs conseils, leurs commentaires perspicaces, leurs encouragements durant ces trois années et les discussions intéressantes que nous avons eues. Ce travail n'aurait pas été possible sans leurs conseils et leur soutien.

Je suis très reconnaissant envers les membres de mon jury de thèse, Michel Kasser, Jérôme Verdun, Bénédicte Fruneau, Emmanuel Trouvé et Frédérick Boudin. Leur soutien académique est grandement apprécié. Je remercie vivement tous les membres de l'Institut National de la Géophysique et de la Volcanologie, Observatoire de l'Etna (INGV-OE) pour avoir contribué au développement de mes recherches, pour leur gentillesse et leur hospitalité et pour avoir participé à ma découverte de l'Etna et de la volcanologie.

J'ai également le plaisir d'exprimer ma reconnaissance à mes amis, Olivier Martin et Jean-Philippe Souchon, pour leur soutien inconditionnel, pour être des sources d'inspiration et pour créer un environnement de travail sain et une ambiance chaleureuse.

Enfin, je profite de l'occasion pour remercier profondément mes parents et mon épouse, qui m'ont toujours encouragé et soutenu dans mes choix de carrière.

SOMMAIRE

	Page
Liste des tableaux	xi
Table des figures	xiii
1 Introduction	1
1.1 Contexte et problématique	1
1.2 Plan de la thèse	2
2 Mesure de déformations de surface des volcans	5
2.1 Introduction	5
2.2 État de l'art	5
2.2.1 LIDAR	5
2.2.2 Photogrammétrie	7
2.2.3 GNSS	9
2.2.4 InSAR	10
2.2.5 Bilan	12
2.3 Le système Géocube	13
2.3.1 Historique et contexte	13
2.3.2 Architecture logicielle et matérielle	15
2.3.3 Utilisation des Géocubes pour la mesure de déformations des volcans	18
2.3.4 Limitations du système Géocube :	22
2.4 Bilan : Un système de mesure de déformations millimétriques adapté aux volcans	23
3 Technique de mesure de déformations sub-centimétriques en temps réel adaptée à la surveillance des volcans basée sur un réseau de Géocubes	25

3.1	Introduction	25
3.2	Problématique du positionnement différentiel dans un milieu volcanique .	26
3.3	Une méthode de positionnement différentiel adaptée aux volcans	28
3.3.1	Formulation des équations d'observations	28
3.3.2	Étude des sources d'imprécision	30
3.3.3	Estimation des positions relatives des Géocubes par filtrage de Kalman	37
3.3.4	Bilan	41
3.4	Validation des améliorations	41
3.4.1	En utilisant les données du Mont Saint Helens	41
3.4.2	En utilisant les données des stations du RGP de l'IGN	45
3.5	Conclusion	47
4	Surveillance des déformations du flanc sud-est de l'Etna en utilisant un réseau de Géocubes et l'InSAR	49
4.1	Introduction	49
4.2	Contexte et objectifs de la mission	50
4.3	Méthodes et techniques	51
4.3.1	Matériel et installation	51
4.3.2	Algorithmes et méthodes de traitement GPS	53
4.3.3	Algorithmes et méthodes de traitement INSAR	54
4.4	Résultats et discussion	59
4.4.1	Qualité et disponibilité des données des Géocubes	59
4.4.2	Analyse de la stabilité du point fixe	61
4.4.3	Les séries temporelles des Géocubes de l'Etna	63
4.4.4	Les séries temporelles issues de la méthode StaMPS	67
4.5	Bilan	80
4.6	Contribution de la thèse	83
4.6.1	Contributions scientifiques	83
4.6.2	Contributions techniques	84
4.7	Perspectives	84
4.7.1	Intégration d'autres capteurs dans le Géocube	84
4.7.2	Modernisation des signaux GPS	85
4.7.3	Utilisation de l'InSAR avec le Géocube	85
4.7.4	Extension de la taille des réseaux de Géocubes	85

A Les interférogrammes de l'Etna	87
B Les améliorations techniques apportées au système Géocube	93
B.1 Architecture réseau	93
B.2 Programme de calcul	94
B.2.1 Éphémérides	94
B.2.2 Interopérabilité avec les autres récepteurs du commerce	95
B.2.3 Enrichissement de l'offre logicielle	95
B.2.4 Débogage des programmes	95
Bibliographie	97

LISTE DES TABLEAUX

TABLE	Page
3.1 La différence entre les résultats de G3GPS et les coordonnées publiées par l'UNAVCO dans un repère topocentrique	27
3.2 La fidélité des résultats obtenus avec G3GPS en estimant le biais troposphérique (ΔE^* , ΔN^* , ΔU^*) et sans estimer le biais troposphérique (ΔE , ΔN , ΔU). NE : le filtre de Kalman n'a pu estimer ce paramètre.	42
3.3 Les stations utilisées dans les tests de validation de l'amélioration du filtre de Kalman	45
4.1 Les positions des Géocubes	51
4.2 Les images SAR en orbite ascendante utilisées pour construire les interférogrammes. L'image maîtresse est celle du 27 octobre 2016.	57
4.3 Les images SAR en orbite descendante utilisées pour construire les interférogrammes. L'image maîtresse est celle du 9 octobre 2016.	58
4.4 Les paramètres de traitement utilisés dans StaMPS	67

TABLE DES FIGURES

FIGURE	Page
2.1 Illustration du recouvrement photogrammétrique longitudinal et transversal	7
2.2 Exemples d'interférogrammes d'une partie de l'Etna calculés à partir des images de Sentinel-1A/B en orbite descendante (a) et ascendante (b).	12
2.3 Première version du Géocube	14
2.4 Version industrielle du Géocube	14
2.5 Les couches matérielles d'un Géocube	15
2.6 Architecture réseau du système Géocube	16
2.7 Architecture matérielle du Géocube	17
2.8 Architecture logicielle du coordinateur	19
2.9 Déploiement d'un Géocube sur le glissement de terrain Super-Sauze	20
2.10 Installation d'un Géocube sur le glacier d'Argentière	21
3.1 Le réseau de stations permanentes déployées sur le Mont Saint Helens, utilisé pour le test de la fidélité et de la justesse des résultats obtenus par G3GPS .	28
3.2 Histogrammes des erreurs sur 1 mois de données (août 2011). Calcul effectué avec G3GPS	29
3.3 Illustration des doubles différences	31
3.4 Histogrammes des erreurs sur 1 mois de données (août 2011) du point P697 en utilisant G3GPS avec estimation d'un biais troposphérique. Avant l'optimisation du filtre de Kalman ce point n'a pas pu être déterminé	42
3.5 Histogrammes des erreurs sur 1 mois de données (août 2011) des points P690 et P693 en utilisant G3GPS avec et sans estimation d'un biais troposphérique..	43
3.6 Histogrammes des erreurs sur 1 mois de données (août 2011) des points P695 et P696 en utilisant G3GPS avec et sans estimation d'un biais troposphérique.	44
3.7 La composante E de la station PUYA avec et sans l'estimation du biais troposphérique dans le filtre de Kalman. La station JANU est utilisée comme point pivot.	46

3.8	La composante N de la station PUYA avec et sans l'estimation du biais troposphérique dans le filtre de Kalman. La station JANU est utilisée comme point pivot.	46
3.9	La composante U de la station PUYA avec et sans l'estimation du biais troposphérique dans le filtre de Kalman. La station JANU est utilisée comme point pivot.	46
4.1	Installation du Géocube sur l'Etna	51
4.2	Carte du réseau de Géocubes déployés sur le flanc sud-est de l'Etna	52
4.3	Le Géocube KYLIA-60 installé sur l'Etna	53
4.4	La chaîne de traitement utilisée pour construire des séries temporelles de déplacements avec l'InSAR	56
4.5	Disponibilité des données par Géocube et la courbe de température de la station météorologique la plus proche (aéroport de Catane).	59
4.6	Une coulée de lave qui entoure le Géocube KYLIA-64	60
4.7	Histogramme du SNR (rapport signal sur bruit) du KYLIA-64	61
4.8	L'accélération remarquée sur la composante N de l'EINT utilisant GIPSY (PPP), est également remarquée sur un traitement différentiel entre le Géocube KYLIA-64 (fixe) et KYLIA-61 (mobile) en utilisant G3GPS.	62
4.9	Série temporelle 2016-2017 d'EINT après la suppression de la vitesse centrale de la Sicile et la suppression d'une dérive de 11,5 mm/an dans l'azimut N142°E qui minimise respectivement les séries chronologiques Est et Nord.	63
4.10	La composante E des Géocubes	64
4.11	La composante N des Géocubes	65
4.12	La composante U des Géocubes	66
4.13	Régime alternatif remarqué sur le point KYLIA-60.	66
4.14	L'empreinte au sol des parties des images SAR SLC (<i>Single Look Complex</i>) utilisées dans le traitement. Avec rouge : orbite descendante et bleu : orbite ascendante	68
4.15	Les phases déroulées de l'orbite ascendante, partie 1	69
4.16	Les phases déroulées de l'orbite ascendante, partie 2	70
4.17	Les phases déroulées de l'orbite descendante, partie 1	71
4.18	Les phases déroulées de l'orbite descendante, partie 2	72
4.19	Coordonnées GPS de KYLIA-60 reprojctées sur la LOS (<i>Line Of Sight</i>) du satellite radar.	75

4.20	Coordonnées GPS de KYLIA-61 reprojctées sur la LOS (<i>Line Of Sight</i>) du satellite radar.	76
4.21	Coordonnées GPS de KYLIA-62 reprojctées sur la LOS (<i>Line Of Sight</i>) du satellite radar.	76
4.22	Coordonnées GPS de KYLIA-64 reprojctées sur la LOS (<i>Line Of Sight</i>) du satellite radar.	77
4.23	Carte des déplacements globaux (de juillet 2016 à fin novembre 2016) calculée à partir des phases déroulées de l'orbite ascendante, avec l'emplacement des Géocubes et du NSEC. EINT utilisé comme pixel de référence (point fixe par rapport auquel les déformations sont exprimées).	78
4.24	Carte des déplacements globaux (de juillet 2016 à fin novembre 2016) calculée à partir des phases déroulées de l'orbite descendante, avec l'emplacement des Géocubes et du NSEC. EINT utilisé comme pixel de référence (point fixe par rapport auquel les déformations sont exprimées).	79
A.1	Les interférogrammes de l'orbite ascendante, partie 1	88
A.2	Les interférogrammes de l'orbite ascendante, partie 2	89
A.3	Les interférogrammes de l'orbite descendante, partie 1	90
A.4	Les interférogrammes de l'orbite descendante, partie 2	91
B.1	L'architecture réseau conçue pour la mission de l'Etna pour garantir la livraison des données en temps réel et l'accès à distance aux capteurs.	94

INTRODUCTION

1.1 Contexte et problématique

La surveillance des déformations des volcans est indispensable à la compréhension des phénomènes géophysiques qui régissent ces structures naturelles et à la prévision des éruptions. Pour mettre en place un système de mesure de déformations efficient et efficace, plusieurs contraintes doivent être prises en compte :

- les données doivent être disponibles en temps réel (en temps de crise l'accès au site peut être très compliqué, voire impossible).
- le temps d'installation, de mise en route et la probabilité de panne doivent être réduits au maximum pour éviter toute intervention humaine sur le site.
- l'autonomie du système doit lui permettre d'opérer même en cas de conditions météorologiques très difficiles.
- la justesse et la fidélité des résultats doivent permettre de détecter les plus faibles mouvements possibles de manière fiable pour éviter les sous ou sur-détections.

Dans la plupart des cas, les structures volcaniques – comme toute autre structure naturelle présentant un risque – sont largement surveillées par plusieurs types d'instruments (récepteurs GNSS, inclinomètres, etc.). Étant généralement chers et gourmands en énergie, ces instruments ne sont pas utilisés en champ proche ni dans des réseaux denses. Dans cette thèse une solution est proposée à cette problématique en se basant sur deux opportunités :

- La miniaturisation des capteurs ainsi que la baisse des coûts de fabrication et

de la consommation électrique des puces GNSS sont des facteurs qui peuvent laisser envisager d'abandonner sur le terrain un réseau de capteurs opérant en permanence. Certains de ces capteurs GNSS permettent d'effectuer des mesures de phase de l'onde porteuse du code GNSS donnant la possibilité de remonter à une justesse sub-centimétrique, d'où l'idée d'un réseau de Géocubes. Le système Géocube est un réseau de capteurs GPS conçu et développé par le Laboratoire d'Opto-Électronique de Métrologie et d'Instrumentation (LOEMI) de l'Institut National de l'Information Géographique et Forestière (IGN) et maintenu par le même laboratoire et l'entreprise Ophelia-Sensors qui s'occupe de son industrialisation. Il a comme objectif de mesurer les déformations du sol avec une précision millimétrique. Ce réseau de capteurs a la particularité d'être très peu gourmand en énergie. On peut envisager de l'abandonner dans un milieu difficilement accessible au moment de crises environnementales sans qu'on ait à se soucier de son alimentation continue en électricité. Un tel réseau peut opérer dans des milieux dangereux et difficilement accessibles, comme les volcans.

- Le lancement des satellites RADAR Sentinel-1A et Sentinel-1B par l'Agence Spatiale Européenne (ESA) et la mise à disposition de leurs données gratuitement pour la communauté scientifique constituent une opportunité intéressante pour pouvoir utiliser l'interférométrie RADAR (InSAR) dans le suivi de déformations à grande échelle des volcans. Cette technique de surveillance a la particularité de donner une vue globale des déformations du volcan avec une précision sub-centimétrique, mais présente quelques limitations que nous allons détailler par la suite.

Durant cette thèse le système Géocube et son algorithme de calcul seront améliorés pour répondre aux exigences d'un milieu difficile comme les volcans. Ses résultats seront validés et complétés par l'InSAR. Nous allons alors prouver que ces deux techniques sont complémentaires, et qu'utilisées ensemble, elles pourront répondre à la problématique que nous avons énoncée précédemment.

1.2 Plan de la thèse

Ce document est composé de quatre chapitres et de deux annexes au fil desquels une solution est proposée à la problématique que nous avons évoquée précédemment.

Le deuxième chapitre est une introduction générale et un état de l'art des méthodes de surveillance utilisées actuellement pour suivre les déformations des volcans. Nous

donnons une importance particulière au mont Etna puisqu'il constitue notre terrain d'expérimentation durant cette thèse.

Dans le troisième chapitre, les contributions scientifiques apportées à l'algorithme de calcul du système Géocube sont présentées et validées sur des jeux de données présentant des caractéristiques semblables à un milieu volcanique.

Dans le quatrième et dernier chapitre, nous présentons une expérimentation conduite dans le cadre de cette thèse entre le 12 juillet 2016 et le 10 juillet 2017 sur le flanc sud-est du mont Etna, dans laquelle une équipe composée de chercheurs de l'IGN, ENS, INGV-OE et Kylia a déployé, en trois jours, un réseau GPS dense, en complément du réseau permanent de l'INGV, permettant un calcul en temps réel des déformations. Toutes les méthodes utilisées sont présentées : de la procédure d'installation à la diffusion et l'analyse des résultats en passant par la récupération des données et le traitement en temps réel. Cette technique est basée sur un réseau de Géocubes avec un algorithme de calcul optimisé pour le contexte volcanique. Les résultats de cette mission sont ensuite comparés aux résultats obtenus en utilisant l'InSAR avec les données des satellites Sentinel-1A/B. Ces deux techniques se sont avérées complémentaires, puis que l'InSAR apporte la densité spatiale des mesures et le système Géocube la précision et la continuité temporelle.

Dans les annexes, les améliorations techniques apportées au Géocube pour l'adapter à un contexte volcanique sont présentées et discutées.

MESURE DE DÉFORMATIONS DE SURFACE DES VOLCANS

2.1 Introduction

La surveillance des déformations des volcans est indispensable à la compréhension des mécanismes géophysiques qui régissent ces édifices géologiques et à la prédiction des éruptions volcaniques. Ce chapitre présente les principales techniques modernes de surveillance des déformations des volcans avec des exemples d'utilisation sur notre terrain d'expérimentation (le mont Etna en Italie). Pour chaque technique nous présentons ses caractéristiques et ses contraintes dans le but d'aider à construire une proposition d'un système de surveillance de mouvement en temps réel, autonome, rapidement déployable, de précision millimétrique, adapté au contexte volcanique. Ce système sera construit tout au long de cette thèse et testé en conditions réelles sur le mont Etna.

2.2 État de l'art

2.2.1 LIDAR

2.2.1.1 Définition et principe

Le LIDAR (Light Detection And Ranging) est une méthode de télédétection active, où des pulses lasers sont envoyés depuis une source vers une cible. Un capteur mesure alors le temps nécessaire à l'onde pour faire un aller-retour pour en déduire ensuite

la distance entre le capteur et la cible. En réitérant ce procédé, le LIDAR permet de construire des modèles 3D de très haute résolution pour des structures géophysiques comme les volcans.

Quand un capteur LIDAR est monté sur une plate-forme (terrestre, aéroportée ou spatiale), il est nécessaire de déterminer la position et l'orientation du capteur et de la source laser. Sans ces paramètres, la détermination de la position des points cibles à partir des mesures de distances serait impossible. On utilise alors des antennes GPS montées aussi sur la plate-forme d'acquisition pour déterminer la position du capteur et de la source laser et éventuellement une centrale inertielle pour déterminer leurs orientations.

Aujourd'hui le LIDAR est considéré comme la technique la plus précise pour la production des MNT et des MNS. En effet un des avantages majeurs par rapport à la photogrammétrie est sa capacité à distinguer les réflexions des ondes lasers provenant du sur-sol de celles provenant du terrain.

2.2.1.2 Application à la mesure de déformations des volcans

Les MNT produits avec les nuages de points issus d'un LIDAR servent principalement à quantifier et à suivre les changements morphologiques et structurels des volcans. Le premier MNT partiel de l'Etna généré à partir de données d'un LIDAR aéroporté date de 2005, où Mazzarini et al. ont estimé dans [24] des indicateurs morphologiques des coulées de lave de 2004 sur une partie du flanc est de l'Etna (Valle del Bove) en utilisant un LIDAR (Optech ALTM 3033) monté sur un avion avec une altitude de vol de 2000m. Un deuxième MNT et un MNS qui couvrent entièrement le mont Etna ont été publiés en 2016 comme supplément numérique à [15]. Ils ont été générés en utilisant les données récoltées par [24]; ils couvrent $620km^2$ avec une résolution de $2m$. La précision de ce MNT ($RMS = \pm 0.24m$) a été validée en utilisant les récepteurs GPS appartenant au réseau de surveillance géodésique de l'Etna [18].

2.2.1.3 Caractéristiques et contraintes

Le LIDAR présente des caractéristiques intéressantes pour la mesure de déformations des volcans :

- contrairement à la photogrammétrie, le LIDAR peut opérer de jour comme de nuit
- la résolution spatiale du LIDAR est nettement supérieure au RADAR
- par rapport aux techniques de surveillance in-situ, la LIDAR ne nécessite pas un accès au terrain ce qui peut être très avantageux en temps de crise.

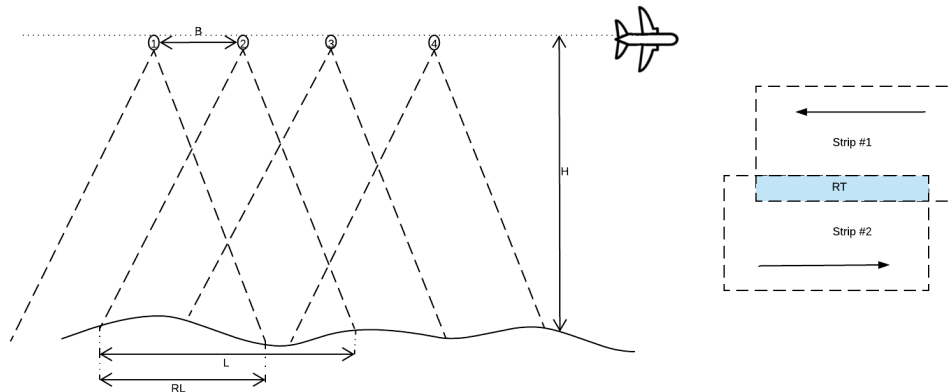


FIGURE 2.1 – Illustration du recouvrement photogrammétrique longitudinal et transversal

Le LIDAR présente aussi quelques contraintes :

- par rapport aux autres méthodes de restitution 3D (Photogrammétrie, Radar), le LIDAR est très coûteux et ne peut opérer depuis l'espace
- par rapport aux méthodes ponctuelles *in-situ*, le LIDAR ne permet pas d'effectuer des suivis de déformations en temps réel.

2.2.2 Photogrammétrie

2.2.2.1 Définition et principe

La photogrammétrie est l'ensemble des techniques permettant de restituer le relief à partir d'un couple d'images stéréoscopiques. Pour cela, tous les points de la scène à restituer doivent être visibles sur au moins deux images prises de deux points différents (figure 2.1). Dans le cas de la surveillance des volcans le procédé photogrammétrique est principalement appliqué à des acquisitions d'images réalisées à partir de vecteurs aériens ou spatiaux. Une étude pré-projet est nécessaire pour pouvoir déterminer la configuration de prise de vue (altitude, recouvrement longitudinal, recouvrement transversal, etc.) à partir de la topographie du terrain et des caractéristiques techniques du capteur et de la plate-forme de prise de vue.

2.2.2.2 Application à la mesure de déformations des volcans

Les applications de la photogrammétrie à la surveillance des volcans sont diverses mais utilisent toutes le même mode opératoire : la détermination de deux MNT à deux

époques différentes permet de quantifier et de suivre les changements structurels d'un volcan et de mesurer ses déformations et ceci en soustrayant le premier au deuxième. Il faudra s'assurer que l'on arrive à mettre en correspondance chaque point du premier MNT avec son homologue dans le deuxième MNT à travers un procédé de mise en référence. La grille résultante de cette opération de soustraction contient des valeurs positives, pour des dépositions ou gonflements, ainsi que des valeurs négatives, pour des érosions ou subsidences.

Sur l'Etna, deux campagnes d'acquisition d'images ont été organisées en 2012 et en 2014 [10]. Durant les deux campagnes des flux vidéos ont été enregistrés en utilisant un système de caméra sphérique (Point Grey Ladybug, www.pointgray.com) composé d'une grille de six cameras de 2 MP, installé sur un hélicoptère as350 écureuil. Les images acquises couvrent les parties sommitales de l'Etna ainsi que la Valle del Bove. La configuration d'acquisition est la même entre les deux dates. Les images acquises en 2012 et en 2014 ont été traitées séparément en utilisant la chaîne de traitement photogrammétrique Photoscan Agisoft, deux MNT correspondant à chacune des deux dates ont été générés. Pour géoréférencer les deux MNT, des points de contrôle terrain ont été créés en utilisant des récepteurs GPS en mode différentiel. Une analyse d'erreur entre les deux MNT a ensuite été effectuée en calculant leur différence sur les zones les moins touchées par l'activité volcanique entre 2012 et 2014. Cette étude a montré qu'avec un tel procédé on peut avoir une justesse décimétrique et une fidélité métrique.

2.2.2.3 Caractéristiques et contraintes

La photogrammétrie présente plusieurs caractéristiques intéressantes pour la mesure de déformation des volcans que nous pourrions résumer par les points suivants :

- par rapport aux autres techniques de restitution 3D (LIDAR, RADAR, ...), la photogrammétrie (*in-situ*, aérienne ou spatiale) est la moins coûteuse. En effet, il est possible de construire des modèles numériques de terrain avec des dispositifs de prise de vue du commerce (à partir de quelques centaines d'euros)
- contrairement au RADAR et au LIDAR, la photogrammétrie a la particularité d'acquérir en plus la radiométrie de la scène imagée, ce qui peut être avantageux pour améliorer la connaissance du terrain
- par rapport aux techniques de surveillance *in-situ*, la photogrammétrie (aéro-nautique ou spatiale) ne nécessite pas un accès au terrain ce qui peut être très avantageux en temps de crise

La photogrammétrie présente aussi quelques contraintes :

- par rapport aux autres méthodes de restitution 3D (Lidar, Radar), la photogrammétrie ne peut opérer que de jour et lorsque les conditions météorologiques le permettent (nuage, absence de nébulosité, ...)
- par rapport aux méthodes ponctuelles *in-situ*, la photogrammétrie ne permet pas d'effectuer des suivis de déformations en temps-réel.

2.2.3 GNSS

2.2.3.1 Définition et principe

Les GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) sont des constellations de satellites qui diffusent des signaux radios (sur plusieurs fréquences) vers la Terre dans le but de permettre aux utilisateurs munis d'un récepteur adéquat de se positionner en temps-réel avec une précision métrique. Les deux principales familles de méthodes GNSS utilisées dans le positionnement précis :

- **positionnement différentiel** : ce type de positionnement suppose que l'on dispose d'au moins deux récepteurs suffisamment proches l'un de l'autre pour pouvoir éliminer la plus grande part des biais et des incertitudes qui entachent les observations, ce qui permet d'atteindre une justesse sub-centimétrique. Cette technique de positionnement sera largement revue dans le chapitre III
- **positionnement ponctuel précis (PPP)** : cette technique de positionnement est possible pour les récepteurs pouvant acquérir les signaux de deux fréquences différentes (L_1 et L_2 par exemple). L'approche PPP consiste à utiliser des horloges et des orbites précises des satellites GNSS estimées à partir d'un réseau mondial pour calculer une position précise avec un récepteur unique.

2.2.3.2 Application à la mesure de déformations des volcans

Les GNSS sont désormais des outils incontournables pour la surveillance des volcans, que cela soit comme outil autonome indépendant des méthodes existantes ou complémentaire des techniques de télédétection. Puglisi et al. présentent dans [38] l'expérience de l'INGV-OE dans la surveillance du mont Etna en utilisant les récepteurs GNSS. L'utilisation de ce système a commencé en 1988 avec la création d'un réseau de neuf points GNSS et continue jusqu'à aujourd'hui avec un réseau de plus de 80 points. Les coordonnées de ces points sont calculées au moins une fois par an [18] par méthode de positionnement statique. L'Etna compte aussi 25 stations permanentes qui acquièrent les observations GNSS en continu et à très haute fréquence (jusqu'à $10Hz$). L'utilisation

du GNSS dans la surveillance de l'Etna a amélioré la connaissance de l'INGV-OE en matière de dynamique du volcan [38]. L'analyse des données GNSS récoltées permet, entre autres, de localiser les réservoirs de magma, d'identifier les zones de pression sous les flancs, d'étudier les intrusions peu profondes liées aux éruptions, de quantifier la dynamique des flancs et de modéliser les surfaces de détachement sous les flancs.

Le GNSS est utilisé aussi comme outil complémentaire pour de nombreuses techniques de télédétection. En effet, pour le LIDAR par exemple, il est nécessaire de déterminer la position du sommet de prise de vue et de créer des points de contrôle au sol. Pour la photogrammétrie aussi le GNSS est omniprésent pour géoréférencer les nuages de points ou dans le processus d'aérotriangulation.

2.2.3.3 Caractéristiques et contraintes

Le GNSS se distingue des autres techniques par :

- la haute résolution temporelle : la plupart des récepteurs GNSS du commerce peuvent acquérir des observations avec une fréquence pouvant atteindre $10Hz$
- en utilisant des récepteurs GNSS il est possible de construire un système de mesure de déformations en temps réel, si on leur adjoint un système de télécommunication.

Le GNSS présente aussi quelques contraintes :

- le coût des récepteurs classiques qui donnent accès à la phase peut être estimé à quelques milliers d'euros. Installés *in-situ*, ces récepteurs risquent d'être endommagés par l'activité volcanique
- contrairement aux méthodes de télédétection, les récepteurs GNSS ne donnent pas une vue dense des déformations d'un volcan
- la dépendance aux conditions atmosphériques, notamment au contenu en vapeur d'eau.

2.2.4 InSAR

2.2.4.1 Définition et principe

L'Interférométrie Radar à Synthèse d'Ouverture (InSAR) est une technique de mesure de déformations qui se base sur l'acquisition de deux images radar à deux instants différents et le calcul du déphasage pour chaque pixel entre la première image (qu'on appelle l'image maîtresse) et la deuxième image (l'image esclave). L'image qui contient le déphasage pour chaque pixel s'appelle un interférogramme (figure 2.2). En calculant

plusieurs interférogrammes en utilisant la même image maîtresse on peut construire des séries temporelles de déformations par rapport à l'instant d'acquisition de l'image maîtresse. Contrairement à la photogrammétrie, le RADAR est une technique de télédétection dite active où un capteur illumine une cible avec un signal qui sera ensuite réfléchi par la cible et une partie de ce signal réfléchi atteindra donc l'antenne. C'est en calculant le temps *source-cible-antenne* de l'ensemble des points qui constituent la scène imagée que nous allons construire une image qui contient pour chaque pixel l'amplitude du signal réfléchi vers l'antenne et la mesure de phase associée.

2.2.4.2 Application à la mesure de déformations des volcans

Par leur nature rocheuse et en l'absence de couverture végétale, les volcans sont des milieux très intéressants pour l'utilisation de l'InSAR pour la mesure de déformations du sol. La littérature est riche d'expériences de mesure de déformations de l'Etna en utilisant les images de satellites radar. Par exemple, dans [35] D. Massonnet et al. montrent que l'InSAR peut être utilisée pour suivre les déformations centimétriques à grande échelle d'un volcan : à travers l'utilisation des images du satellite ERS-1 qui couvrent le Mont Etna acquises en le 17 Mai 1992 et le 24 Octobre 1993. D. Massonnet et al. ont formé 32 interférogrammes issus d'images acquises en orbite ascendante et 60 interférogrammes d'images acquises en orbite descendante. L'analyse de ces interférogrammes a montré une déflation globale du mont Etna. Cette déflation a ensuite été quantifiée en utilisant un modèle basé sur le changement de pression sur une sphère dans un semi-espace élastique ; cette modélisation a montré que la déformation observée augmente avec le temps jusqu'à la fin de l'éruption.

2.2.4.3 Caractéristiques et contraintes

Dans un milieu volcanique le RADAR présente des caractéristiques importantes qui le distingue des autres techniques de télédétection :

- le RADAR peut opérer depuis l'espace contrairement au LIDAR qui doit être proche de la cible
- contrairement à la photogrammétrie, le RADAR peut opérer de jour comme de nuit et il est insensible à la couverture nuageuse
- la précision des résultats obtenus avec l'InSAR est comparable aux techniques de mesure in-situ

Le RADAR présente aussi quelques limitations :

- la résolution temporelle : la période de revisite varie de une à deux semaines

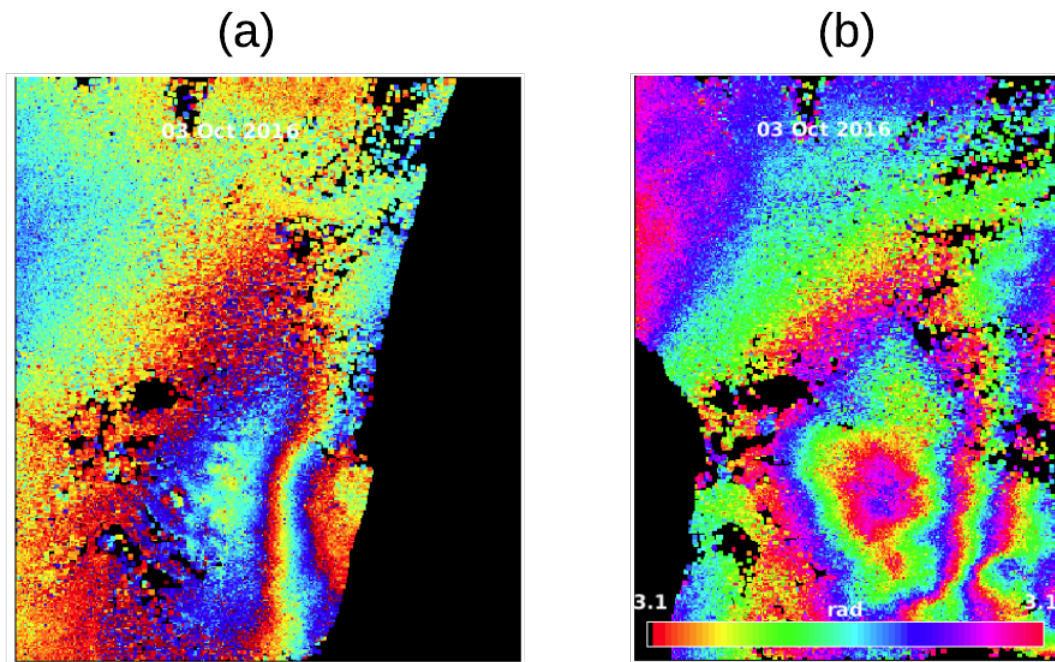


FIGURE 2.2 – Exemples d’interférogrammes d’une partie de l’Etna calculés à partir des images de Sentinel-1A/B en orbite descendante (a) et ascendante (b).

- la résolution spatiale : contrairement à la photogrammétrie et au LIDAR la résolution spatiale des images RADAR est de l’ordre de quelques dizaines de mètres
- la sensibilité aux variations de la couverture du sol (végétation, enneigement, humidité, ...)
- la dépendance aux conditions atmosphériques, notamment au contenu en vapeur d’eau

2.2.5 Bilan

Les volcans sont des structures géologiques qui présentent la particularité d’être très dynamiques à cause de tous les processus géophysiques et géochimiques qui les régissent. De plus, ces structures présentent un danger pour l’activité humaine (les agglomérations limitrophes, l’activité aérienne, tourisme, etc.) et leur activité est souvent imprévisible. Pour comprendre les processus géophysiques sous-jacents des volcans, il est nécessaire de disposer (en plus des données sismiques et géochimiques) de données sur la déformation

de sa surface.

Les méthodes de surveillance de déformations que nous avons présentées sont utilisées soit pour avoir une vue globale sur les déformations des volcans (méthodes de télédétection) soit pour avoir un suivi (qui peut être en temps réel) d'un point présentant un intérêt géophysique. Idéalement, un système d'information pour la mesure de déformations des volcans doit présenter les avantages que présentent ces deux familles de techniques de surveillance. Le système que nous cherchons doit :

1. pouvoir suivre en temps réel les déformations
2. avoir une vue globale sur tout le volcan
3. bénéficier d'une bonne robustesse matérielle et logicielle
4. être peu onéreux
5. être simple d'installation pour que le temps passé sur le terrain soit minimisé
6. être autonome : aucune intervention sur le terrain ne doit être nécessaire ni pour configurer le système ni pour récupérer les données.

L'InSAR est une technique qui répond parfaitement aux points 2, 4, 5, 6. Les récepteurs GPS du commerce pourront répondre au point 1. Les points 5 et 6 sont cruciaux dans un contexte volcanique et peuvent être garantis en utilisant le système Géocube.

2.3 Le système Géocube

Le Géocube est un récepteur GPS qui donne accès à la mesure de phase de l'onde porteuse L1. Il a été conçu par l'équipe LOEMI du LaSTIG/IGN. Sa particularité réside dans son faible coût de fabrication, sa très faible consommation électrique ainsi que dans sa simplicité d'utilisation et de déploiement. Dans ce qui suit nous présentons son architecture logicielle et matérielle ainsi que les travaux qui ont été menés avant cette thèse pour tester le système dans des conditions de déploiement réelles.

2.3.1 Historique et contexte

La miniaturisation des capteurs ainsi que la baisse des coûts de fabrication et de la consommation électrique des puces GNSS sont des facteurs qui peuvent laisser envisager d'abandonner sur le terrain un réseau de capteurs opérant en permanence. Certains de ces capteurs GNSS permettent d'effectuer des mesures sur la phase donnant la possibilité de remonter à des précisions millimétriques, d'où l'idée d'un réseau de



FIGURE 2.3 – Première version du Géocube



FIGURE 2.4 – Version industrielle du Géocube

Géocubes. Le système Géocube est un réseau de capteurs GPS conçu et développé par le Laboratoire d'Opto-Électronique, Métrologie et Instrumentation de l'Institut National de l'Information Géographique et Forestière. Il a comme objectif de mesurer les déformations avec une précision millimétrique. Ce réseau de capteurs a la particularité d'être très peu gourmand en énergie. On peut envisager de l'abandonner dans un milieu difficilement accessible sans qu'on ait à se soucier de son alimentation continue en électricité.

Dans la version industrielle du Géocube maintenue par la société Ophelia-Sensors (figure 2.4), une attention particulière est prêtée à l'étanchéité du boîtier qui le contient et à la robustesse du produit final. Ce choix se justifie principalement par le fait qu'un réseau de Géocubes peut être destiné à la surveillance environnementale en temps de crise et doit, par conséquent, être résistant aux conditions extrêmes que peut présenter



FIGURE 2.5 – Les couches matérielles d'un Géocube

un tel contexte. Les ouvertures de la connectique sont par exemple scellées et on privilégie d'avantage les antennes internes pour la communication radio.

2.3.2 Architecture logicielle et matérielle

Un réseau de Géocubes communique à travers le protocole radio DigiMesh et l'utilise aussi pour centraliser les mesures acquises par les Géocubes vers un ordinateur déployé aussi sur le terrain, appelé coordinateur. Le coordinateur est le composant central du réseau, il encapsule toute la logique liée au traitement et au stockage des données. Il permet aussi à l'utilisateur de lancer des séries de calculs, récupérer les résultats ou communiquer avec un Géocube en lançant des commandes qui seront transmises par radio. La figure 2.6 résume ce schéma de fonctionnement.

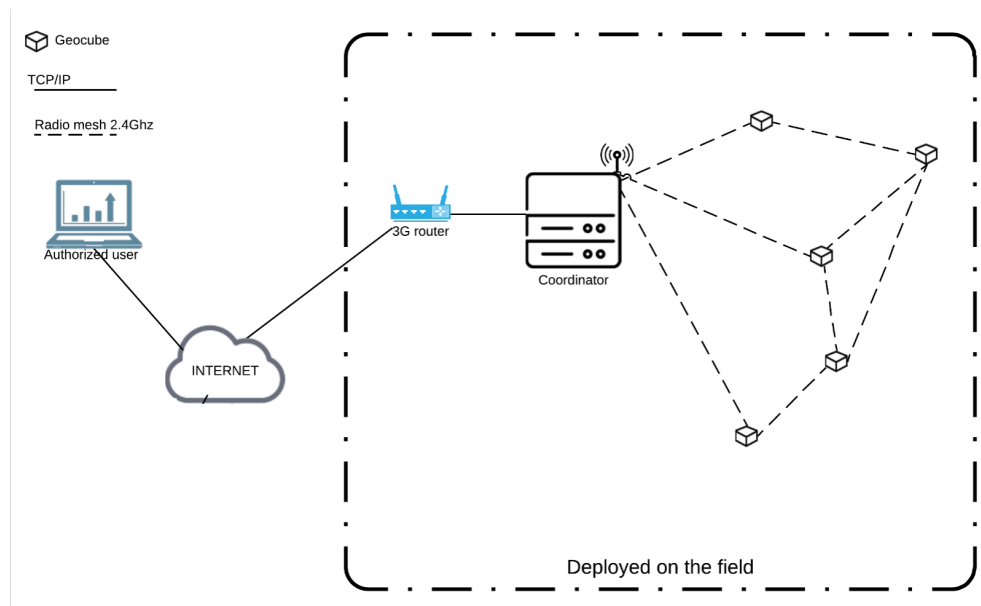


FIGURE 2.6 – Architecture réseau du système Géocube

2.3.2.1 Architecture matérielle

L'architecture matérielle du système Géocube est résumée dans les figures 2.7 et 2.5. Elle est composée de trois couches principales :

- **la couche GPS** : constituée d'une puce GPS *LEA-6T* d'Ublox donnant accès à la phase porteuse *L1C* au code *C/A*, au Doppler de la fréquence *L1* et au rapport signal sur bruit *SNR*. Cette puce GPS est liée à une antenne GPS patch standard (25 mm). Cette couche permet l'acquisition des observations GPS qui seront télé-transmises par la suite au coordinateur
- **la couche télétransmission** : cette couche est constituée d'une puce radio *DigiMesh* pour la transmission des données acquises vers le coordinateur et la réception des commandes radio depuis le coordinateur. Cette puce, qui opère à *2.4 GHz*, est liée à une antenne qui permet la réception des signaux radio. Le type d'antenne peut être adapté suivant la configuration du chantier (omnidirectionnelle, Yagi, ...). Le protocole radio utilisé permet de construire des réseaux maillés et donc l'inter-visibilité directe entre un Géocube et le coordinateur n'est pas requise
- **le module de gestion** : la gestion de la couche GPS et la couche radio s'effectue à travers un microcontrôleur *16bits MSP430* de *Texas Instrument*. Ce microcontrôleur gère les données entrantes et sortantes du Géocube, gère la sauvegarde des

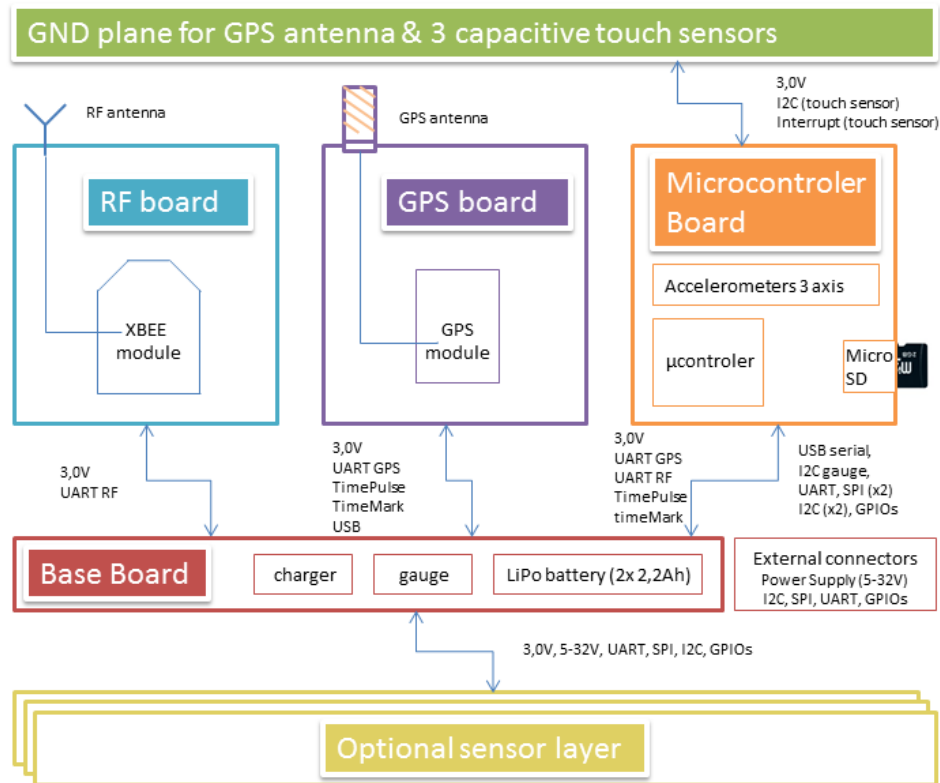


FIGURE 2.7 – Architecture matérielle du Géocube

données sur une mémoire interne, communique avec les capteurs pour déterminer leur état fonctionnel (marche, arrêt, ...) et gère la consommation énergétique du Géocube (Gestion des périodes d'endormissement).

Tous les composants du Géocube ont la particularité d'être très peu gourmands en énergie ce qui rend le Géocube adapté aux chantiers où la seule source d'énergie disponible est l'énergie solaire.

2.3.2.2 Architecture logicielle :

Le système Géocube est constitué de deux composants principaux : le Géocube (récepteur GPS) et le coordinateur (ordinateur qui effectue les calculs en temps réel et offre une interface de gestion de tout le réseau).

— **L'architecture logicielle du Géocube :** le Géocube (figure 2.3) fonctionne en

utilisant un système d'exploitation temps réel (RTOS), appelé G3OS. Ce système d'exploitation a été conçu par l'équipe LOEMI, il encapsule toute la logique de gestion des tâches (radio, GPS, ...) et du cycle de vie de l'information GPS (depuis son acquisition jusqu'à son envoi au coordinateur). En effet, G3OS réalise aussi une opération de compression des données d'observation GPS, ceci permet d'alléger la bande passante radio du réseau.

- **L'architecture logicielle du coordinateur** : illustrée sur la figure 2.8. Le point d'entrée du coordinateur est G3pont qui fait office de pont radio et d'un serveur que tous les consommateurs du flux radio vont interroger pour récupérer les informations envoyées par les Géocubes. G3GPS est le programme de calcul du système Géocube. Il implémente l'algorithme de positionnement différentiel en temps réel pour estimer les positions des Géocubes à partir des données d'observation des Géocubes ($L1$, $C1$, $D1$, $S1$) récupérées depuis G3pont et des éphémérides des satellites GPS téléchargées depuis le serveur du RGP (Réseau GNSS Permanent) de l'IGN. Un autre consommateur du flux radio est le G3datalogger qui s'occupera de l'écriture des données des autres capteurs dans une base de données. G3supervisor est le composant du coordinateur qui va ordonnancer l'envoi des commandes radio au Géocube. La base de données du coordinateur fait office d'interface entre les services que nous avons présentés et un serveur web qui va permettre à l'utilisateur de lire et d'écrire dans la base de données et donc de récupérer les résultats et de contrôler le réseau.

2.3.3 Utilisation des Géocubes pour la mesure de déformations des volcans

Deux expérimentations du système sur des objets ont été menées lors de la thèse de Lionel Benoît [11]. Nous présentons brièvement les résultats obtenus et les performances atteintes.

2.3.3.1 Glissement de terrain Super-Sauze

Le glissement de terrain Super-Sauze est situé sur le bassin de Barcelonette dans le sud des Alpes françaises. Ce terrain est un laboratoire naturel qui a fait l'objet de plusieurs travaux de mesure de déformations, spécialement durant les vingt dernières années où plusieurs techniques de suivi ont été utilisées pour suivre son mouvement et expliquer les processus géophysiques et météorologiques qui régissent son activité [12].

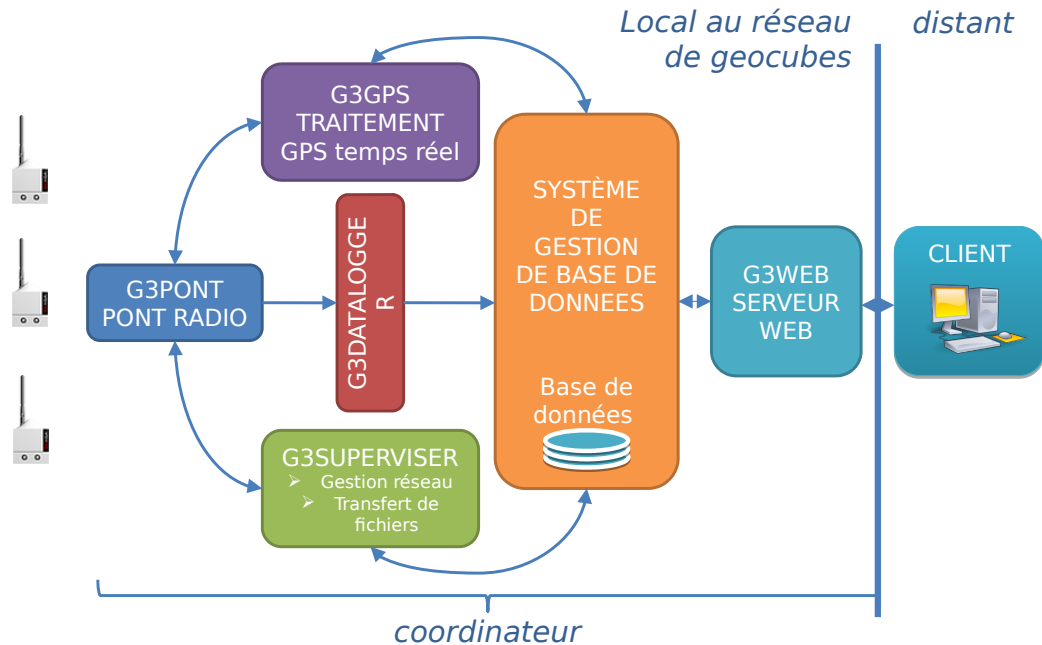


FIGURE 2.8 – Architecture logicielle du coordinateur

Dix-neuf Géocubes ont été déployés sur ce glissement de terrain (figure 2.9) pour une durée de 82 jours (entre le 5 juillet et le 27 septembre 2012) pour couvrir l'ensemble de sa surface (900m de large x 150m de long x 300m de dénivelée), avec une fréquence d'acquisition fixée à $0.5Hz$. Durant la période de déploiement, 62% des messages d'observation potentiels ont été acquis. Les principales causes de défaillances sont l'étanchéité des capteurs, les erreurs d'écriture sur la carte mémoire et les problèmes liés à l'alimentation électrique.

Pour ce chantier une connexion internet par satellite a été mise en place pour pouvoir interagir avec le coordinateur et les Géocubes à distance. Cette connexion est nécessaire aussi pour que les données puissent être récupérées à distance depuis le coordinateur.

Le traitement des données brutes a été effectué en post-traitement, après l'acquisition d'une quantité de messages d'observation. Ces données sont rapatriées sur un ordinateur distant où des sessions de calcul utilisant G3GPS sont lancées pour estimer les positions des Géocubes.

Les résultats de cette expérimentation ont montré que le Géocube est adapté à la surveillance des glissements de terrain et capable de détecter des mouvements sub-



FIGURE 2.9 – Déploiement d'un Géocube sur le glissement de terrain Super-Sauze

centimétriques sur des réseaux sub-kilométriques ne présentant pas une grande dénivellée [12].

2.3.3.2 Glacier d'Argentière

Situé dans le massif du Mont Blanc, le glacier d'Argentière, qui s'étend de 1750m à 3100m d'altitude suscite l'intérêt de plusieurs glaciologues notamment après une rupture, apparue au cours des années 2000, au niveau d'un lieu dit "le Lognan" à 2250m d'altitude. La vitesse de ce glacier varie entre 50m/an en amont et 100m/an en aval [14] [1].

Depuis le début des années 2000, ce glacier est un vrai laboratoire grandeur nature pour adapter les différentes méthodes de surveillance de déformations à un contexte glaciologique (InSAR [42], GNSS [14], etc.)

Treize Géocubes ont été déployés sur ce glacier entre le 14 septembre et le 7 novembre 2013 couvrant une zone de 600m x 400m située en amont de Lognan. Les Géocubes étaient fixés sur des tiges métalliques et reliés à des petits panneaux solaires tel qu'illustré dans la figure 2.10. Les Géocubes centralisaient les messages d'observation vers le coordinateur, qui était aussi déployé sur place. Le coordinateur était alimenté avec un panneau solaire adapté à son besoin en énergie électrique, et relié à internet à travers une liaison satellitaire.

Durant la période de déploiement 52% des messages d'observation potentiels ont



FIGURE 2.10 – Installation d'un Géocube sur le glacier d'Argentière

été acquis. Une fois le système démantelé et rapatrié, le traitement des données brutes a été effectué en utilisant G3GPS en post-traitement. Les résultats des traitements ont montré que le glacier a une vitesse quasi-constante de 15cm/jour avec quelques accélérations ponctuelles corrélées avec les paramètres météorologiques mesurés sur le site (pluviométrie et température).

Avec ce déploiement l'intérêt d'utiliser un système comme le Géocube pour le suivi de déformations des glaciers a été démontré. En effet, le Géocube présente plusieurs avantages, dont la grande résolution temporelle des séries de positions, ce qui permet une meilleure datation des accélérations du glacier, la rapidité de déploiement et de mise en route, la précision des résultats obtenus.

2.3.4 Limitations du système Géocube :

Les travaux du LOEMI de l'IGN et la thèse de Lionel Benoît [11] ont permis de construire un système de mesure de déformations avec un très faible coût de fabrication en comparaison avec les solutions existantes du commerce. Les tests de ce système menés sur le glissement de terrain de Super-Sauze et le glacier d'Argentière ont montré que ce système est capable de remonter à une précision sub-centimétrique sur des petits chantiers de taille sub-kilométrique et ne présentant pas une grande dénivelée.

2.3.4.1 Limitation de l'algorithme de calcul

- Les tests documentés dans la thèse de Lionel Benoit [11] ont montré qu'une perte de précision considérable est notée pour les réseaux déployés sur des zones avec une grande dénivelée. Le premier défi scientifique de cette thèse est alors de lever ce verrou pour adapter le programme de calcul des Géocubes à un contexte volcanique présentant une grande dénivelée
- les premiers tests effectués durant cette thèse ont montré que l'algorithme des triples différences proposé dans [11] et implémenté dans G3GPS est efficace uniquement lorsque la position des Géocubes est connue à au moins 5m près. Or, les puces GPS utilisées dans les Géocubes implémentent des stratégies de gestion d'énergie qui font que la justesse des positions calculées par la puce GPS est de l'ordre de 100m. Une solution sera proposée durant cette thèse pour pallier ce problème.

2.3.4.2 Limitations techniques

- Le programme de calcul en temps réel est dépendant du serveur de données GNSS de l'IGN (<ftp://rgpdata.ign.fr>) pour télécharger les éphémérides des satellites GPS nécessaires à l'estimation des positions des Géocubes. Or, ceci rend le système dépendant d'internet et de la disponibilité des serveurs de l'IGN. Ces serveurs tombent souvent en panne et leur indisponibilité dure parfois jusqu'à 48h
- le programme de calcul en post-traitement présentent plusieurs bogues qui le rendent inexploitable sur des arcs de données de plusieurs semaines
- la consommation électrique du coordinateur est une limitation majeure qui complique le déploiement vu la taille des panneaux solaires nécessaires à son alimentation en énergie électrique.

2.4 Bilan : Un système de mesure de déformations millimétriques adapté aux volcans

La première section de ce chapitre est une étude de l'état de l'art des méthodes utilisées par la mesure des déformations des volcans. Nous présentons ensuite le Géocube qui est un système de mesure de déformations en temps réel qui a été utilisé jusque-là pour la mesure de déformations d'objets géophysiques de taille sub-kilométrique (600m² pour Super-Sauze et 500m² pour le glacier d'Argentière). L'objectif de cette thèse est de proposer une méthode de mesure de déformations adaptée aux volcans qui respecte les contraintes énoncées précédemment. En effet, le Géocube présente la particularité d'être autonome, simple d'utilisation, de faible coût ce qui en fait un candidat idéal pour opérer en champs proche des points présentant un risque sur les volcans.

TECHNIQUE DE MESURE DE DÉFORMATIONS SUB-CENTIMÉTRIQUES EN TEMPS RÉEL ADAPTÉE À LA SURVEILLANCE DES VOLCANS BASÉE SUR UN RÉSEAU DE GÉOCUBES

3.1 Introduction

Nous avons démontré dans le chapitre II de ce rapport que le système Géocube est un candidat intéressant pour construire un système de surveillance de déformations en temps réel adapté aux volcans. Ce système a fait ses preuves dans des contextes difficiles (glissement de terrain Super-Sauze [12] et glacier d'Argentière [13]) mais avec des configurations limitées dans l'espace et dans le temps. Pour adapter le système Géocube à un contexte volcanique, des améliorations qui touchent à la fois les aspects algorithmiques et techniques doivent être apportées au système existant pour tenir compte de leurs particularités.

Dans ce chapitre, nous commençons par montrer les limitations de l'algorithme de calcul actuel du système Géocube dans un contexte volcanique à travers l'utilisation des données de quelques stations du réseau CORS (*Continuously Operating Reference Station*) déployées sur le volcan Saint Helens. Ensuite, nous repensons le filtre de Kalman implémenté dans le logiciel de calcul du système Géocube de manière à estimer (en plus des positions relatives des Géocubes) le biais troposphérique qui constitue la principale

limitation de l'algorithme actuel. Enfin, les performances et les limitations de cette amélioration sont discutées à la fin de ce chapitre.

Les améliorations techniques apportées au système Géocube durant cette thèse sont, quand à elles, présentées séparément dans l'annexe B de ce rapport.

3.2 Problématique du positionnement différentiel dans un milieu volcanique

Contrairement aux chantiers dans lesquels les Géocubes ont opéré antérieurement, les volcans sont des structures géologiques qui présentent une étendue horizontale et verticale considérable. L'erreur de la phase due à la partie indifférenciée du biais troposphérique ne peut donc plus être considérée comme négligeable et doit être estimée. Avant de proposer une optimisation du filtre de Kalman actuel pour l'adapter à un calcul en réseau dans un contexte volcanique, nous présentons la preuve, par le contre-exemple, que l'algorithme de calcul actuel du système Géocube n'est pas capable d'estimer les positions avec une précision sub-centimétrique dans un contexte volcanique même dans un réseau.

Pour cela, nous allons utiliser les données brutes des stations P690, P693, P695, P696, P696, P697 et P698. Ces points sont déployés sur le volcan Saint Helens aux Etats-Unis comme le montre la figure 3.1 et sont maintenus par UNAVCO-PBO (*Plate Boundary Observatory*)[3]. On choisit un réseau sans Géocube pour séparer les problèmes dus à l'algorithme de calcul des problèmes techniques éventuels du Géocube. Les données brutes utilisées couvrent la période du 1er août 2011 au 31 août 2011. Comme ces points sont déployés sur un volcan, avec toutes leurs contraintes (différence de hauteur entre récepteurs, etc.), ils forment un bon réseau pour estimer la précision que peut offrir l'algorithme de calcul précédent du Géocube dans ce contexte, tel qu'il est implémenté dans le logiciel de calcul G3GPS, en temps réel et en post-traitement.

Nous comparons ensuite les résultats obtenus par G3GPS en post-traitement avec les coordonnées publiées par l'UNAVCO-PBO [3]. Leur solution est basée sur une combinaison de deux solutions : l'une est basée sur un algorithme de positionnement ponctuel précis (PPP) en utilisant le logiciel GIPSY/OASIS [44] de la *Central Washington University* et l'autre est une solution de calcul en réseau basée sur une double différenciation de la phase de l'onde porteuse et du code GPS produite avec le logiciel GAMIT du *New Mexico Institute of Mining and Technology* [3]. Comme les coordonnées publiées sont exprimées dans le système de coordonnées NAD83 à l'époque 2010.0, nous avons utilisé

3.2. PROBLÉMATIQUE DU POSITIONNEMENT DIFFÉRENTIEL DANS UN MILIEU VOLCANIQUE

Accuracy of G3GPS solutions				
Station	ΔE (mm)	ΔN (mm)	ΔU (mm)	h(m)
P698	0	0	0	1479
P697	NE	NE	NE	2214
P696	3	1	15	1600
P695	5	8	50	2016
P693	15	2	40	2113
P690	5	3	52	2079

TABLEAU 3.1 – La différence entre les résultats de G3GPS et les coordonnées publiées par l’UNAVCO dans un repère topocentrique

la vitesse de ces stations dans le même référentiel pour calculer les coordonnées en août 2011. Toutes les coordonnées sont ensuite transformées dans un système de référence topocentrique, afin de pouvoir comparer les résultats obtenus à partir de G3GPS (avec P698 comme point fixe) avec les coordonnées publiées par UNAVCO-PBO. La justesse et la fidélité des résultats obtenus avec G3GPS indiquées dans le tableau 3.1 et la figure 3.2 montrent que :

- G3GPS est incapable d’estimer la position du point P697 qui se trouve à plus de 700m de dénivelé du point fixe P698, même si la distance à vol d’oiseau entre ces deux points ne dépasse pas les 5km
- pour les points pour lesquels G3GPS a pu estimer les positions, la fidélité et la justesse des résultats de la composante verticale est de l’ordre de 5cm. Ce qui est loin des résultats sub-centimétriques obtenus dans des chantiers de faible étendue et de faible dénivelée [13] [12]

Nous concluons de ce qui précède que l’algorithme de calcul implémenté actuellement dans G3GPS n’est pas adapté à un contexte volcanique. De plus, nous remarquons que la composante verticale est la plus touchée par cette dégradation de précision qui s’avère aussi proportionnelle à la différence d’altitude entre les stations. Par conséquent, nous pensons que cette dégradation de précision est due principalement à l’effet de la troposphère [40] sur les ondes GPS. Le filtre de Kalman, qui constitue le cœur du programme de calcul, doit être optimisé de manière à permettre un positionnement relatif des Géocubes en tenant compte de l’effet de la troposphère.

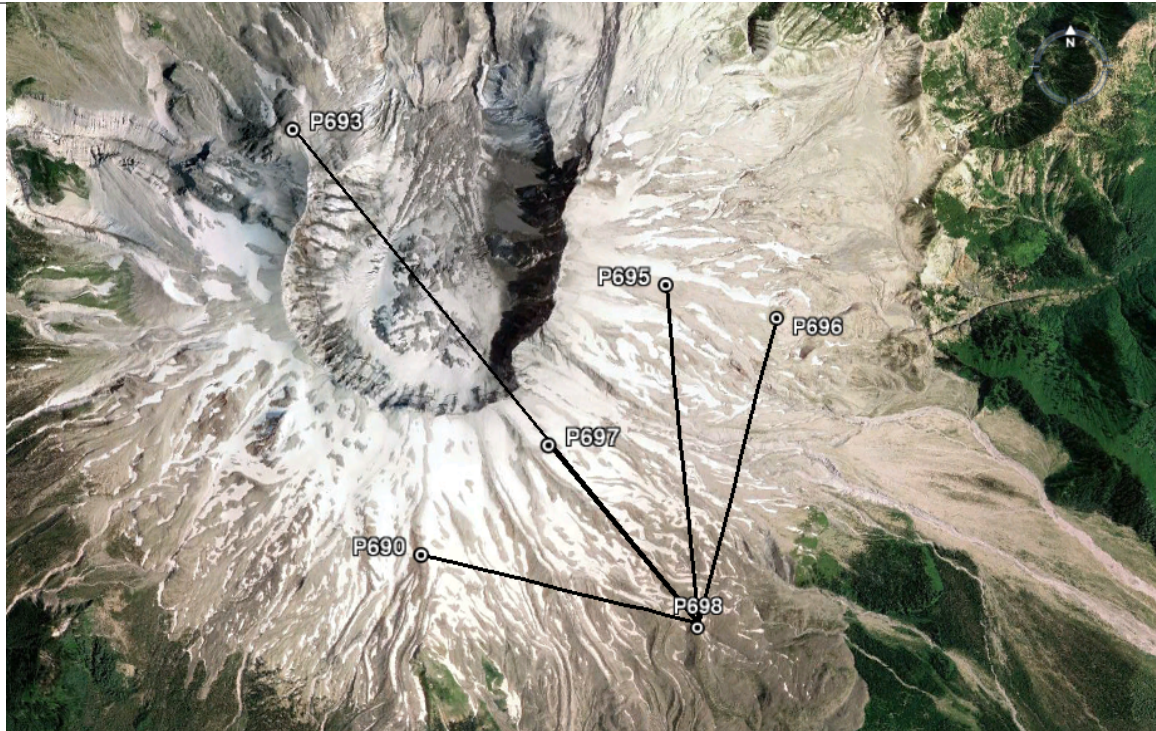


FIGURE 3.1 – Le réseau de stations permanentes déployées sur le Mont Saint Helens, utilisé pour le test de la fidélité et de la justesse des résultats obtenus par G3GPS

3.3 Une méthode de positionnement différentiel adaptée aux volcans

Nous présentons une optimisation du filtre de Kalman présenté par L. Benoît dans [11] pour l'adapter au positionnement précis dans un contexte volcanique présentant la particularité d'une forte dénivelée.

3.3.1 Formulation des équations d'observations

Le Géocube est un récepteur GPS mono-fréquence qui donne accès aux mesures suivantes pour les satellites qu'il capte :

- C/A_1 : la mesure du code GPS civil exprimé en mètres. Il représente la distance entre le satellite et le récepteur
- L_1 : la mesure de phase de l'onde porteuse GPS. Sa longueur d'onde $\lambda_{L_1} = 19cm$. Elle est exprimée en cycles de l'onde porteuse
- D_1 : la mesure du Doppler de la phase de l'onde porteuse L_1 exprimée en hertz (Hz)

3.3. UNE MÉTHODE DE POSITIONNEMENT DIFFÉRENTIEL ADAPTÉE AUX VOLCANS

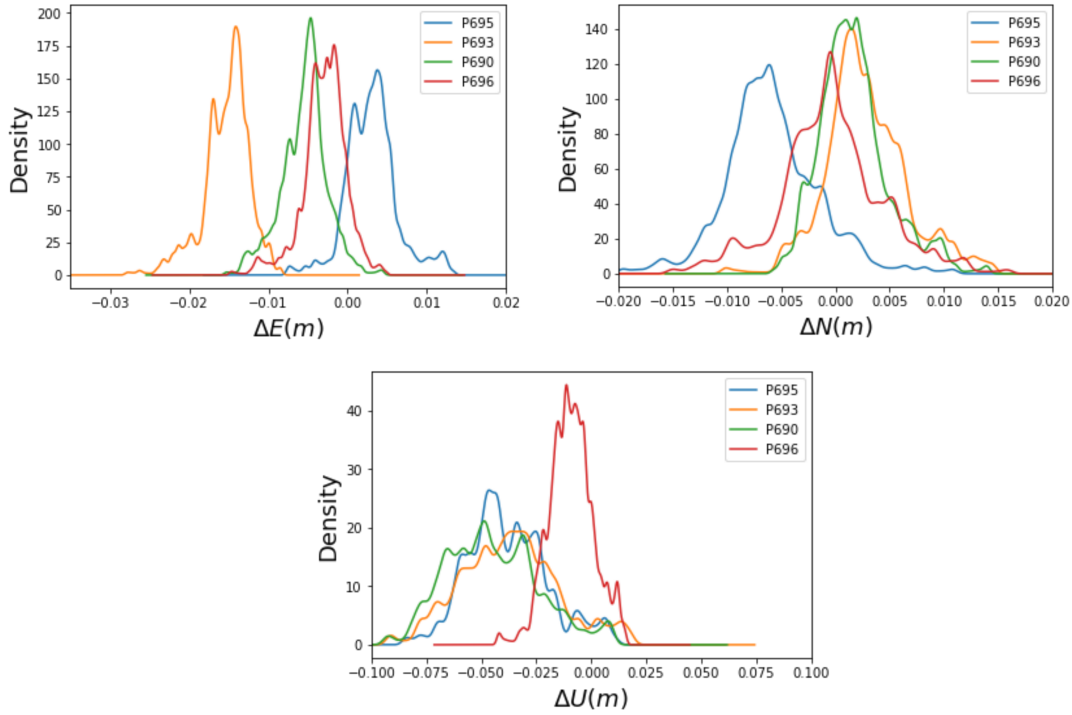


FIGURE 3.2 – Histogrammes des erreurs sur 1 mois de données (août 2011). Calcul effectué avec G3GPS

— S_1 : le rapport signal sur bruit exprimé en decibels

En plus de ces mesures un certain nombre d'indicateurs de qualité sont aussi donnés dans le message d'observations :

— LLI (*Lost of Lock Indicator*) : est un flag qui indique si une perte de phase a eu lieu

— QI (*Quality Indicator*) : est un indicateur de la qualité du message d'observation similaire à celui qu'on trouve dans les fichiers d'observation GPS conventionnels RINEX (*Receiver Independant EXchange Format*) documenté dans [43]

Dans [11] Benoît a étudié les différentes stratégies de positionnement possibles pour le Géocube. Étant donné que le Géocube ne donne accès qu'à la mesure de l'onde porteuse L_1 , l'utilisation de la méthode PPP n'est pas possible. La seule possibilité exploitable pour l'instant est le GNSS différentiel. L'utilisation de la différenciation permet d'enlever les biais liés à l'erreur de l'horloge des satellites et des récepteurs.

$$(3.1) \quad \phi_r^s = \frac{1}{\lambda_{L1}} \cdot \rho_r^s + \frac{c}{\lambda_{L1}} \cdot dt_r + \frac{c}{\lambda_{L1}} \cdot dt^s + \tau_{r,tropo}^s + \tau_{r,iono}^s + \sigma_r^s - N_r^s$$

CHAPITRE 3. TECHNIQUE DE MESURE DE DÉFORMATIONS
SUB-CENTIMÉTRIQUES EN TEMPS RÉEL ADAPTÉE À LA SURVEILLANCE DES
VOLCANS BASÉE SUR UN RÉSEAU DE GÉOCUBES

Où ϕ_r^s est la phase mesurée, λ_{L1} est la longueur d'onde de L1, ρ_r^s est la distance géométrique entre le récepteur et le satellite, dt_r est le biais lié à l'imprécision de l'horloge du récepteur, dt^s est le biais lié à l'imprécision de l'horloge du satellite, $\tau_{r,tropo}^s$ et $\tau_{r,iono}^s$ sont respectivement le retard de la phase dû à la troposphère et à l'ionosphère, N_r^s est l'ambiguïté entière de la phase et σ_r^s représente toutes les erreurs et les biais non modélisés.

$$(3.2) \quad \Delta\phi_r^{s1,s2} = \frac{1}{\lambda_{L1}} \cdot \Delta\rho_r^{s1,s2} + \frac{c}{\lambda_{L1}} \cdot \Delta dt^{s1,s2} + \Delta\tau_{r,tropo}^{s1,s2} + \Delta\tau_{r,iono}^{s1,s2} + \Delta\epsilon - \Delta N_r^{s1,s2}$$

L'équation des simples différences (3.2) est complètement débarrassée de l'erreur due à l'imprécision de l'horloge du récepteur. L'opérateur Δ dénote la première différenciation. Ainsi, $\Delta X_{r1}^{s1,s2} = X_{r1}^{s1} - X_{r1}^{s2}$.

$$(3.3) \quad \nabla\Delta\phi_{r1,r2}^{s1,s2} = \frac{1}{\lambda_{L1}} \cdot \nabla\Delta\rho_{r1,r2}^{s1,s2} + \nabla\Delta\tau_{r1,r2,tropo}^{s1,s2} + \nabla\Delta\tau_{r1,r2,iono}^{s1,s2} + \nabla\Delta\epsilon - \nabla\Delta N_{r1,r2}^{s1,s2}$$

L'équation des doubles différences (3.3) est complètement débarrassée du biais dû à l'imprécision des horloges des satellites s_1 et s_2 . L'opérateur ∇ dénote la deuxième différenciation. Ainsi, $\nabla\Delta X_{r1,r2}^{s1,s2} = X_{r1}^{s1} - X_{r1}^{s2} - X_{r2}^{s1} + X_{r2}^{s2}$. L'équation d'observation (3.3) est entachée de deux types de biais :

- *biais spatialement corrélés* : les biais qui varient en fonction de la ligne de base comme l'erreur de la phase due à la partie non-différenciée de la troposphère ($\nabla\Delta\tau_{r1,r2,tropo}^{s1,s2}$) et de l'ionosphère ($\nabla\Delta\tau_{r1,r2,iono}^{s1,s2}$).
- *biais spatialement décorrélés* : $\nabla\Delta\epsilon_{r1,r2}^{s1,s2}$ qui englobe les biais spatialement décorrélés et non différenciés dans l'équation 3.3

Dans ce qui suit, nous étudions les différents biais qui entachent notre équation d'observation GPS.

3.3.2 Étude des sources d'imprécision

3.3.2.1 Biais ionosphériques

L'ionosphère est une couche de l'atmosphère qui s'étale de 50km à plus de 1000km d'altitude. Cette couche est formée par l'ionisation du gaz et du plasma par les radiations UV (ultra violet) en provenance du soleil. L'effet de l'ionosphère sur les signaux GPS est une fonction principalement du *TEC (Total Electron Content)* qui représente la densité des électrons rencontrée par l'onde GPS durant son trajet satellite-récepteur [30] et son

3.3. UNE MÉTHODE DE POSITIONNEMENT DIFFÉRENTIEL ADAPTÉE AUX VOLCANS

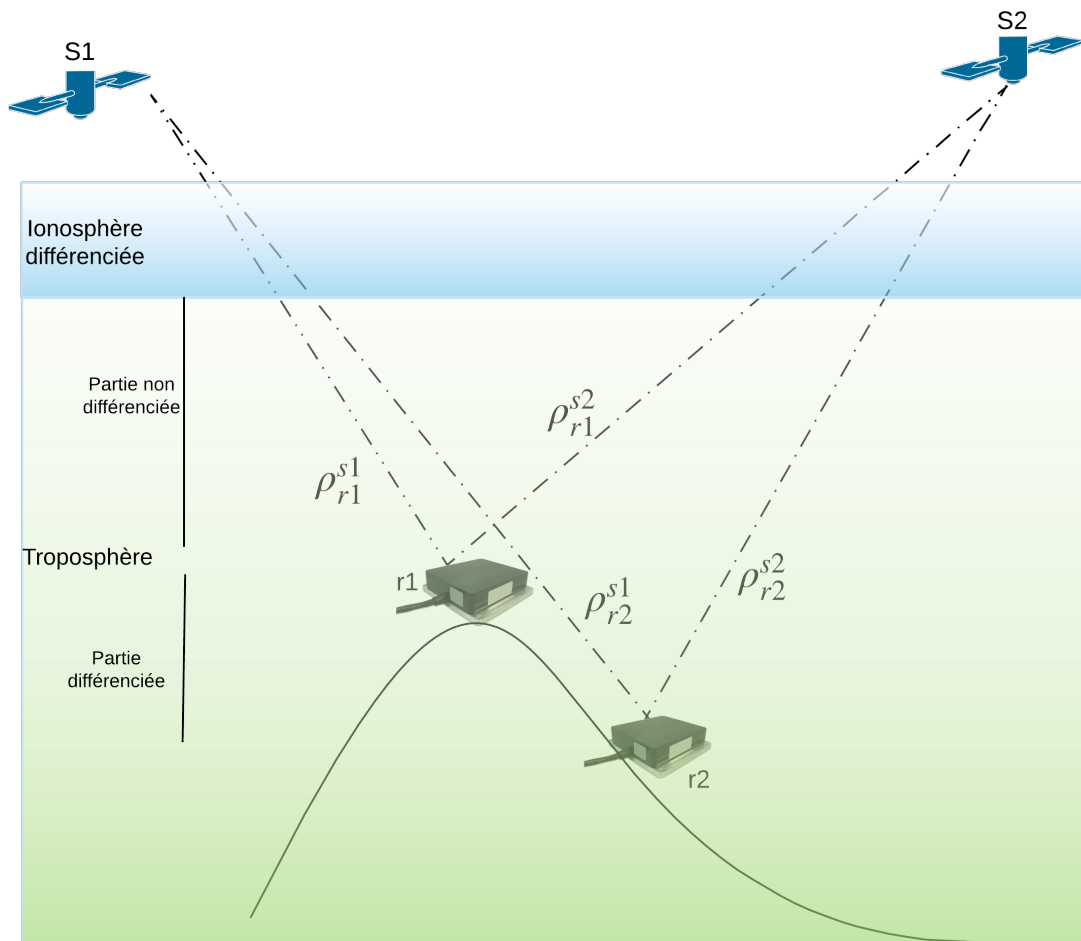


FIGURE 3.3 – Illustration des doubles différences

unité est le $TECU = 10^{16} \text{electrons}/m^2$. À partir du TEC et de la fréquence de l'onde porteuse GPS f , le retard de l'onde GPS dû à l'effet de l'ionosphère peut être calculé en utilisant la formule (3.4) [30].

$$(3.4) \quad \tau_{iono} = \frac{40.3}{f^2} \cdot TEC$$

On voit qu'il dépend de f , et qu'il peut donc être estimé si l'on dispose d'un récepteur bi-fréquence [44]. Ce n'est pas le cas pour le Géocube, mais dans un contexte volcanique, où la taille et la nature des chantiers implique des lignes de base entre le récepteur pivot et les récepteurs mobiles qui vont de quelques centaines de mètres à quelques kilomètres,

CHAPITRE 3. TECHNIQUE DE MESURE DE DÉFORMATIONS SUB-CENTIMÉTRIQUES EN TEMPS RÉEL ADAPTÉE À LA SURVEILLANCE DES VOLCANS BASÉE SUR UN RÉSEAU DE GÉOCUBES

la partie indifférenciée $\nabla\Delta\tau_{iono,r1,r2}^{s1,s2}$ est négligeable [32]. Ce biais sera donc considéré comme complètement différencié dans la conception de notre filtre de Kalman.

3.3.2.2 Erreur de la phase due à la partie indifférenciée des erreurs des orbites

Les éphémérides des satellites GPS sont indispensables pour pouvoir estimer la position d'un récepteur GPS. Elles entrent dans la formulation de l'équation des doubles différences (3.3) à travers le terme $\nabla\Delta\rho_{r1,r2}^{s1,s2}$. Leur justesse conditionne donc la justesse des paramètres estimés avec notre filtre de Kalman.

Il existe deux types d'éphémérides disponibles gratuitement sur internet ou extractible depuis les messages de navigation des satellites :

- **les éphémérides radiodiffusées** : les éléments képlériens de l'orbite des satellites GPS sont disponibles en temps réel. Ils permettent de calculer la position d'un satellite GPS à l'instant de la réception de l'onde GPS par le récepteur. Ce type d'éphémérides est disponible soit en téléchargement depuis les sites des centres de calculs comme le RGP de l'IGN ou à travers le message de navigation des satellites GPS (chaque satellite diffuse ses propres éphémérides). leur précision est de l'ordre de quelques mètres
- **les éphémérides précises** : sont disponibles en temps différé sous forme d'un fichier qui répertorie les positions géocentriques des satellites GPS avec un pas d'échantillonnage de 15min. En utilisant une méthode d'interpolation polynomiale, la position d'un satellite à n'importe quel instant est estimée avec une précision de quelques centimètres [25].

Pour des lignes de base de 10km l'erreur de la phase due à la partie indifférenciée de l'erreur sur la position du satellite est sub-millimétrique [11]. Nous utiliserons donc les éphémérides radiodiffusées disponibles en temps réel pour calculer les positions des satellites GPS au moment de la formation des doubles différences. Dans le cadre de cette thèse, une amélioration a été apportée au système de récupération des éphémérides en temps réel pour rendre le système Géocube complètement indépendant d'internet et des serveurs des centres de calcul. Cette amélioration est documentée dans l'annexe B.

3.3.2.3 Biais troposphérique

La troposphère est une couche de l'atmosphère qui s'étend la surface de la Terre jusqu'à 12 km d'altitude. Contrairement à l'ionosphère, la troposphère est un milieu non-dispersif pour les fréquences inférieures à 30 GHz. Ainsi, les signaux GPS L1, L2

et L5 sont affectés de la même manière. Le biais qu'elle provoque concerne donc et les récepteurs mono-fréquence et les multi-fréquences puisqu'il est impossible de l'éliminer de manière similaire au biais ionosphérique [44]. Il a deux composantes qui contribuent avec des proportions différentes à son effet sur les signaux GPS :

- **retard de l'onde porteuse dû à la composante sèche (T_{zhd})** : principalement dû aux molécules de N_2 , O_2 , Ar et CO_2 présentes dans l'atmosphère proche de la surface de la Terre. Il contribue à plus de 80% à l'effet de la troposphère sur les ondes GPS. Il est étroitement corrélé avec la pression atmosphérique et peut donc être facilement estimé avec un baromètre. Sa valeur typique est de 2.30m au niveau de la mer [7]
- **retard de l'onde porteuse dû à la composante humide (T_{zwd})** : il est principalement dû à la vapeur d'eau présente dans l'atmosphère proche de la surface de la terre. Les mesures de température et d'humidité ne sont pas de bons indicateurs de ce retard puisqu'ils ne prennent pas en compte les conditions du trajet entre le récepteur et le satellite. Sa valeur typique peut varier de quelques centimètres à 30cm [37], et il est surtout concentré dans les basses couches de la troposphère.

Plusieurs familles de méthodes existent pour pouvoir estimer ces biais :

- les méthodes basées sur les modèles de prévisions météorologiques en utilisant des modèles numériques régionaux ou globaux. Ces méthodes se basent principalement sur les séries temporelles mises à disposition par l'ECMWF (Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme) ou le GPTM (Global Pressure and Temperature Models) de la température, de la pression et du contenu en vapeur d'eau [4]. Ce qui permet de calculer le ZWD et le ZHD ainsi que de paramétrer la fonction de mapping pour calculer le retard troposphérique sur les lignes récepteur-satellite. Néanmoins, cette famille de méthodes présente des inconvénients qu'on peut résumer à la dépendance aux centres de calcul (et donc à internet) qui proposent les séries temporelles ainsi que la résolution des modèles (à l'ordre de 10 Km)
- les méthodes basées sur l'estimation statistique. On suppose donc que ce T_{zhd} et T_{zwd} sont entachés d'un biais qu'on cherche à estimer par moindres carrés ou par filtrage de Kalman (d'ailleurs c'est la méthode d'estimation utilisée dans GIPSY/OASIS [44] pour estimer le T_{zhd} et le T_{zwd} pour un récepteur)
- les méthodes basées sur les mesures conjointes des composantes humide et sèche de la troposphère par radiosondes. Cette méthode présente un surcoût et son utilisation dans un environnement difficilement accessible et présentant un risque

CHAPITRE 3. TECHNIQUE DE MESURE DE DÉFORMATIONS SUB-CENTIMÉTRIQUES EN TEMPS RÉEL ADAPTÉE À LA SURVEILLANCE DES VOLCANS BASÉE SUR UN RÉSEAU DE GÉOCUBES

est impossible

- les méthodes basées sur l'utilisation d'une technique de télédétection passive, comme la radiométrie micro-ondes [29] ou active telle que le LIDAR Raman [37] pour construire des profils de teneur en vapeur d'eau de l'atmosphère tout au long des lignes de visées récepteur-satellite. Cette méthode permet de s'affranchir de la partie humide de la troposphère mais elle est très coûteuse et n'est pas adaptée à la philosophie même du Géocube (basse consommation électrique, déploiement rapide, etc.).

Dans chacune des trois premières méthodes l'utilisation d'une fonction de mapping est indispensable pour passer du retard au zénith au calcul du retard sur chaque ligne de mesure récepteur-satellite. On suppose que l'atmosphère est stratifiée horizontalement. Une fonction de mapping va nous permettre de passer du retard troposphérique au zénith au retard sur la ligne de vue du satellite GPS. Les fonctions de mapping les plus connues (GMF : *Global Mapping Function* [17], NMF : *Niell Mapping Function* [36], etc.) présentent des résultats avec des précisions comparables [34]. La précision des résultats dépend donc principalement de la bonne estimation du T_{zhd} et du T_{zwd} . Et inversement, lorsqu'on essaie d'estimer le retard troposphérique à partir des observations, la qualité de la fonction de mapping est primordiale.

Actuellement dans le logiciel de calcul du Géocube (G3GPS), le biais dû à la partie indifférenciée du retard troposphérique n'est pas estimé. Dans [13], Benoit et al utilisent un modèle simplifié de Saastomoinen [40] pour calculer le ZTD (Zenith Total Delay) avec $T_{ztd} = T_{zhd} + T_{zwd}$ sans estimation du biais résiduel qui entache la mesure de la phase. Cette méthode, comme nous l'avons prouvé au début de ce chapitre, n'a pas donné satisfaction dans un contexte volcanique. En effet, pour les lignes de base de taille sub-kilométrique qui ne présentent pas une grande dénivelée, une simple correction *a priori* de la phase de l'onde porteuse basée sur un modèle empirique suffit. Pour des réseaux de plus grande étendue verticale et horizontale, ce biais résiduel doit être estimé et pris en compte dans la formulation de l'équation des doubles différences.

De la liste des familles de méthodes que nous avons présentées précédemment, le deuxième type de méthodes basé sur l'estimation statistique d'un biais résiduel dû à la partie indifférenciée de la troposphère est le plus adapté à un réseau de Géocubes dans un contexte volcanique (les méthodes qui se basent sur les modèles météorologiques ont une résolution spatiale très faible et les méthodes basées sur les radiosondes et la télédétection active sont très coûteuses et compliquées à mettre en place dans un contexte difficile comme les volcans). Plusieurs modèles existent pour calculer une

3.3. UNE MÉTHODE DE POSITIONNEMENT DIFFÉRENTIEL ADAPTÉE AUX VOLCANS

approximation du T_{zwd} et du T_{zhd} en fonction de l'altitude du récepteur uniquement [7] et sans avoir besoin de données en provenance de systèmes ou capteurs externes. Si $\tau_{r_i}^{s_j}$ est le retard troposphérique entre le satellite j et le récepteur i , nous nous placerons dans le formalisme utilisé par le logiciel de calcul GPS GIPSY/OASIS [44], et nous exprimons donc ce retard avec l'équation suivante :

$$(3.5) \quad \tau_{r_i}^{s_j} = m_{N,wet}^{r_i,s_j}(E).T_{zwd} + m_{N,dry}^{r_i,s_j}(E,H).T_{zhd} + m_{BE}^{r_i,s_j}(E).\Delta T_{ztd}$$

Avec

$$T_{zhd} = ae^{-bH}$$

et

$$T_{zwd} = 0.1$$

Où T_{zwd} est le retard zénithal dû à la composante humide de l'atmosphère, T_{zhd} est le retard zénithal dû à la composante hydrostatique de l'atmosphère, $a = 2.30m$ et $b = 0.116.10^{-3}$. Ces deux composantes du retard troposphérique représentent la partie calculée *a priori* qu'on corrige directement dans la mesure de la phase. L'équation 3.6 représente la partie du retard troposphérique qui contient un paramètre ϵ qu'on cherche à estimer [44] dans le filtre de Kalman présenté dans la section 3.3.3.

$$(3.6) \quad \Delta T_{ztd} = \epsilon e^{-bH}$$

Les différentes fonctions de mapping de Niell [36] du délai hydrostatique (3.8), humide (3.7) et la fonction de mapping de Black et Eisner [16] pour le ΔT_{ztd} , qui entrent dans la formulation de l'équation du retard troposphérique (3.5) se présentent comme suit :

$$(3.7) \quad m_{wet}^{r_i,s_j}(E) = m(E, a_w, b_w, c_w)$$

$$(3.8) \quad m_{dry}^{r_i,s_j}(E, H) = m(E, a_d, b_d, c_d) + \Delta m(E, H)$$

Avec :

$$(3.9) \quad \Delta m(E, H) = \left[\frac{1}{\sin(E)} - m(E, a_{ht}, b_{ht}, c_{ht}) \right] \cdot H$$

$$m(E, a, b, c) = \frac{1 + \frac{a}{1 + \frac{b}{1+c}}}{\sin(E) + \frac{a}{\sin(E) + \frac{b}{\sin(E)+c}}}$$

Et :

$$(3.10) \quad m_{BE}^{r_i, s_j}(E) = \frac{1}{\sqrt{1 - (\cos(E)/1.001)^2}}$$

Avec E l'élévation du satellite, H la hauteur de la station et les coefficients $a_w, b_w, c_w, a_{ht}, b_{ht}$ et c_{ht} qui dépendent du jour de l'année et de la latitude [36] et vont s'exprimer en fonction de :

$$\xi(\phi, t) = \xi_{avg}(\phi) - \xi_{amp}(\phi) \cos\left(2\pi \frac{t - T_0}{365.25}\right)$$

Les valeurs de ξ_{avg} et ξ_{amp} peuvent être obtenues depuis les tableaux présentés dans [36].

L'expression des doubles différences débarrassées du biais ionosphérique qu'on suppose complètement différencié, mais entachées de la partie indifférenciée du biais troposphérique, est présentée dans (3.11).

$$(3.11) \quad \nabla \Delta \Phi_{r_1, r_2}^{s_1, s_2} = \nabla \Delta \rho_{r_1, r_2}^{s_1, s_2} - N - \nabla \Delta \tau_{r_1, r_2}^{s_1, s_2}$$

L'erreur des doubles différences de la phase due à la partie non différenciée du retard troposphérique (3.12) est exprimée comme combinaison linéaire des retards troposphériques dans les directions de visée des satellites GPS qui entrent dans la formulation de l'équation des doubles différences.

$$(3.12) \quad \nabla \Delta \tau_{r_1, r_2}^{s_1, s_2} = \tau_{r_1}^{s_1} - \tau_{r_1}^{s_2} - \tau_{r_2}^{s_1} + \tau_{r_2}^{s_2}$$

Dans ce qui suit nous allons présenter les modifications apportées au filtre de Kalman proposé initialement dans [11] pour estimer en plus des coordonnées des Géocubes, le paramètre ϵ de l'équation (3.6).

3.3.3 Estimation des positions relatives des Géocubes par filtrage de Kalman

Nous proposons une optimisation du filtre de Kalman proposé par L. Benoît dans [11] pour estimer pour chaque Géocube un biais troposphérique en plus de ses coordonnées géocentriques.

Le vecteur d'observations (3.13) ne change pas de la version initiale du filtre de Kalman [11]. Il est composé des coordonnées géocentriques des Géocubes fixes ($X_{r_{fi}}, Y_{r_{fi}}, Z_{r_{fi}}$) et des doubles différences de la phase de l'onde porteuse L_1 (3.11) qu'on suppose entachées d'une erreur due à la partie indifférenciée de l'effet troposphérique (3.3).

$$(3.13) \quad y = \frac{1}{\lambda_{L1}} \cdot \begin{bmatrix} X_{r_{f1}} \\ Y_{r_{f1}} \\ Z_{r_{f1}} \\ X_{r_{f2}} \\ Y_{r_{f2}} \\ Z_{r_{f2}} \\ \dots \\ \nabla\Delta\Phi_{r_{f1},r_{f2}}^{s1,s2} \\ \dots \\ \nabla\Delta\Phi_{r_{f1},r_{f2}}^{s1,s_{ns}} \\ \dots \\ \nabla\Delta\Phi_{r_{f1},r_{nr}}^{s1,s_{ns}} \end{bmatrix}$$

On associe à ce vecteur d'observations la matrice de variance-covariance $Q_{y,y}$ telle que définie dans [11] par les équations (3.14) et (3.15).

$$(3.14) \quad \text{Var}(\nabla\Delta\phi_{r_1,r_2}^{s1,s2}) = \text{Var}(\phi_{r_1}^{s1}) + \text{Var}(\phi_{r_2}^{s1}) + \text{Var}(\phi_{r_1}^{s2}) + \text{Var}(\phi_{r_2}^{s2})$$

$$(3.15) \quad \text{Covar}(\nabla\Delta\phi_{r_1,r_2}^{s1,s2}, \nabla\Delta\phi_{r_1,r_2}^{s1,s3}) = \text{Var}(\phi_{r_1}^{s1}) + \text{Var}(\phi_{r_1}^{s2})$$

L'expression de la variance de la phase $\text{Var}(\phi_{r_i}^{s_i})$ est donnée par l'équation (3.16). Cette expression tient compte des biais locaux et des biais atmosphériques résiduels [19]. Les paramètres a et b ont été estimés empiriquement pour les Géocubes dans [12] à

CHAPITRE 3. TECHNIQUE DE MESURE DE DÉFORMATIONS
SUB-CENTIMÉTRIQUES EN TEMPS RÉEL ADAPTÉE À LA SURVEILLANCE DES
VOLCANS BASÉE SUR UN RÉSEAU DE GÉOCUBES

$a = 2 \times 10^{-4}$ et $b = 5$. Avec $E_{r_i}^{s_i}$ l'élévation du satellite s_i par rapport au récepteur r_i et SNR est le rapport signal sur bruit du signal reçu.

$$(3.16) \quad Var(\phi_{r_i}^{s_i}) = \frac{a}{\sin(E_{r_i}^{s_i})} + \frac{b}{10^{\frac{SNR}{10}}}$$

Le vecteur des paramètres à estimer (3.17) dans le filtre de Kalman subit une modification, il contiendra donc, en plus des coordonnées géocentriques $(X_{r_i}, Y_{r_i}, Z_{r_i})$, un biais troposphérique ϵ_{r_i} pour chaque Géocube du réseau. Donc :

$$(3.17) \quad x = \frac{1}{\lambda_{L1}} \cdot \begin{bmatrix} X_{r_1} \\ Y_{r_1} \\ Z_{r_1} \\ \dots \\ X_{r_n} \\ Y_{r_n} \\ Z_{r_n} \\ \epsilon_1 \\ \dots \\ \epsilon_{nr} \end{bmatrix}$$

L'application $y = h(x)$ permettant de passer du vecteur des paramètres au vecteur des observations se décompose en deux parties :

1. équation des contraintes : on suppose que les Géocubes fixes n'ont effectué aucun mouvement
2. équation des doubles différences $\nabla \Delta \Phi_{r_1, r_2}^{s_1, s_2} = \nabla \Delta \rho_{r_1, r_2}^{s_1, s_2} - N_{r_1, r_2}^{s_1, s_2} - \nabla \Delta \tau_{r_1, r_2}^{s_1, s_2}$ avec $\rho_{r_i}^{s_j} = \sqrt{(X_{r_i} - X_{s_j})^2 + (Y_{r_i} - Y_{s_j})^2 + (Z_{r_i} - Z_{s_j})^2}$ et $N_{r_1, r_2}^{s_1, s_2}$ le terme qui représente la double différence des ambiguïtés de phase. Il est fixé en utilisant la méthode discutée dans [11] et que nous n'allons pas reprendre dans ce rapport.

L'équation 2 n'est pas linéaire, un filtre de Kalman étendu est utilisé pour estimer le vecteur des paramètres (3.17). Pour linéariser le problème on utilise la matrice Jacobienne H des équations des observations définie par : $H = \frac{\delta h}{\delta x} |_{\bar{x}}$. Les termes de la matrice H sont alors les dérivées des termes du vecteur d'observations par les termes du vecteur des paramètres à estimer. Pour cela nous donnons l'exemple pour les paramètres ϵ_{r_1} et X_{r_1} et nous présentons ensuite notre matrice jacobienne H :

3.3. UNE MÉTHODE DE POSITIONNEMENT DIFFÉRENTIEL ADAPTÉE AUX VOLCANS

$$(3.18) \quad \frac{\delta \nabla \Delta \phi_{r_1, r_2}^{s_1, s_2}}{\delta \epsilon_{r_1}} = m_{BE}^{r_1, s_1}(E).e^{-bH_{r_1}} - m_{BE}^{r_1, s_2}(E).e^{-bH_{r_1}} - m_{BE}^{r_2, s_1}(E).e^{-bH_{r_2}} + m_{BE}^{r_2, s_2}(E).e^{-bH_{r_2}}$$

$$(3.19) \quad \frac{\delta \nabla \Delta \phi_{r_1, r_2}^{s_1, s_2}}{\delta X_{r_1}} = \frac{X_{r_1} - X_{s_1}}{\rho_{r_1}^{s_1}} - \frac{X_{r_1} - X_{s_2}}{\rho_{r_1}^{s_2}}$$

En réalité $\frac{\delta \nabla \Delta \phi_{r_1, r_2}^{s_1, s_2}}{\delta X_{r_i}}$ dépend aussi de $\frac{\nabla \Delta \tau_{r_1, r_2}^{s_1, s_2}}{\delta X_{r_i}}$ puisque $\nabla \Delta \tau_{r_1, r_2}^{s_1, s_2}$ est exprimée, entre autres, en fonction de l'altitude de la station et cette altitude dépend de la position. Mais dans notre implémentation nous supposons que ce terme est généralement négligeable dans la formulation des doubles différences.

Notre matrice Jacobienne se présente finalement comme suit (3.20) :

$$(3.20) \quad H = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \cdot & \cdot & 0 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \frac{\delta \nabla \Delta \phi_{r_1, r_2}^{s_1, s_2}}{\delta X_{r_1}} & \frac{\delta \nabla \Delta \phi_{r_1, r_2}^{s_1, s_2}}{\delta Y_{r_1}} & \frac{\delta \nabla \Delta \phi_{r_1, r_2}^{s_1, s_2}}{\delta Z_{r_1}} & \frac{\delta \nabla \Delta \phi_{r_1, r_2}^{s_1, s_2}}{\delta X_{r_2}} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \frac{\delta \nabla \Delta \phi_{r_1, r_{nr}}^{s_1, s_{ns}}}{\delta \epsilon_{r_1}} \\ \cdot & \cdot & \cdot & 0 & 0 & 0 & \frac{\delta \nabla \Delta \phi_{r_1, r_3}^{s_1, s_2}}{\delta X_{r_3}} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & \cdot & 0 & \cdot \\ \frac{\delta \nabla \Delta \phi_{r_1, r_{nr}}^{s_1, s_{ns}}}{\delta X_{r_1}} & \frac{\delta \nabla \Delta \phi_{r_1, r_{nr}}^{s_1, s_{ns}}}{\delta Y_{r_1}} & \frac{\delta \nabla \Delta \phi_{r_1, r_{nr}}^{s_1, s_{ns}}}{\delta Z_{r_1}} & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & \frac{\delta \nabla \Delta \phi_{r_1, r_{nr}}^{s_1, s_{ns}}}{\delta Z_{r_{nr}}} & \frac{\delta \nabla \Delta \phi_{r_1, r_{nr}}^{s_1, s_{ns}}}{\delta \epsilon_{r_{nr}}} & \cdot \end{pmatrix}$$

La solution prédite \tilde{x}_k peut être calculée à partir du vecteur des paramètres estimés à l'itération précédente \hat{x}_{k-1} et ceci en utilisant la relation qui les lient : $\tilde{x}_k = f(\hat{x}_{k-1}) + w$, avec f la fonction de propagation et w le bruit du processus associé à la matrice de variance-covariance $Q_{w,w}$. Il est donc nécessaire de connaître le bruit de processus associé aux paramètres (ϵ_{r_i}) que nous avons rajoutés.

Ce bruit correspond à la fluctuation du paramètre entre deux époques. On l'assimile en général à une variable de marche aléatoire [27] et donc sa variance est linéaire en fonction de l'époque. On devra donc choisir la valeur qui correspond à $0.1m/\sqrt{\text{heure}}$, ce

CHAPITRE 3. TECHNIQUE DE MESURE DE DÉFORMATIONS
SUB-CENTIMÉTRIQUES EN TEMPS RÉEL ADAPTÉE À LA SURVEILLANCE DES
VOLCANS BASÉE SUR UN RÉSEAU DE GÉOCUBES

qui correspond à environ 0.001 pour des époques distantes d'une minute. L'estimation de ce paramètre doit être réaliste, car sinon on court le risque de voir se reporter sur le biais troposphérique des mouvements, notamment verticaux, surtout si l'on contraint fortement le bruit de processus des positions.

La formulation des équations du filtre de Kalman étendu sont celles présentées dans [12]. On les liste ci-dessous par souci d'exhaustivité :

3.3.3.1 Phase de prédiction

$$(3.21) \quad \tilde{x}_{k+1} = F_k \cdot \hat{x}_k$$

$$(3.22) \quad Q_{\tilde{x}_{k+1}, \tilde{x}_{k+1}} = F_k \cdot Q_{\hat{x}_k, \hat{x}_k} \cdot F_k^T + Q_{w,w}$$

F_k est la matrice associée à l'application linéaire f (dans notre cas cette matrice est égale à la matrice identité) et $Q_{\hat{x}_k, \hat{x}_k}$ la matrice de variance-covariance des paramètres à l'itération k .

3.3.3.2 Phase d'estimation

Calcul de l'innovation :

$$(3.23) \quad In_k = y_k - h(\tilde{x}_k)$$

Calcul de la matrice de variance-covariance de l'innovation :

$$(3.24) \quad Q_{In_k, In_k} = H_k \cdot Q_{\tilde{x}_k, \tilde{x}_k} \cdot H_k^T + Q_{y_k, y_k}$$

Calcul du gain de Kalman :

$$(3.25) \quad G_k = Q_{\hat{x}_k, \hat{x}_k} \cdot H_k^T \cdot (Q_{In_k, In_k})^{-1}$$

Mise à jour du vecteur des paramètres :

$$(3.26) \quad \hat{x}_k = \tilde{x}_k + G_k \cdot In_k$$

Mise à jour de la matrice de variance-covariance des paramètres :

$$(3.27) \quad Q_{\hat{x}_k, \hat{x}_k} = (Id - G_k \cdot H_k) \cdot Q_{\tilde{x}_k, \tilde{x}_k}$$

3.3.4 Bilan

Une optimisation du filtre de Kalman proposé dans [11] a été présentée dans cette section pour tenir compte du biais des doubles différences lié à la partie indifférenciée de la troposphère. Cette optimisation a été proposée pour adapter les réseaux des Géocubes au contexte volcanique. Elle a ensuite été implémentée dans G3GPS en post-traitement et en temps réel. Dans la section suivante, l'apport de cette optimisation est mesuré en utilisant les données de deux réseaux de récepteurs GNSS nationaux et internationaux présentant les particularités géométriques d'un contexte volcanique.

3.4 Validation des améliorations

Dans cette section nous allons valider l'optimisation du filtre de Kalman que nous avons proposée en utilisant :

- les données des récepteurs GNSS du volcan Saint Helens que nous avons présentées au début de ce chapitre (figure 3.1) et pour lesquelles le programme G3GPS original a montré des limites particulièrement pour estimer la composante verticale des récepteurs installés avec une grande différence de dénivelé par rapport au récepteur fixe.
- les données des stations PUYA (Puy Aillaud, France) et JANU (Janus, France) gérées par ISTerre (Institut des Sciences de la Terre) et rattachées au RGP de l'IGN. Ils présentent une configuration idéale pour tester notre amélioration sur les réseaux avec une étendue horizontale de plus de 20km, et verticale de plus de 1km.

3.4.1 En utilisant les données du Mont Saint Helens

Un calcul G3GPS nouvelle version en post-traitement a été réalisé sur le même jeu de données du Mont Saint Helens présenté au début de ce chapitre. Les résultats obtenus et illustrés dans les figures 3.4, 3.5, 3.6 montrent que cette amélioration a permis d'atteindre une fidélité et une justesse sub-centimétrique pour tous les points du réseau. Alors que sans cette optimisation, la fidélité et la justesse des résultats, spécialement de la composante verticale, étaient de l'ordre de 5cm.

CHAPITRE 3. TECHNIQUE DE MESURE DE DÉFORMATIONS
 SUB-CENTIMÉTRIQUES EN TEMPS RÉEL ADAPTÉE À LA SURVEILLANCE DES
 VOLCANS BASÉE SUR UN RÉSEAU DE GÉOCUBES

Station	ΔE^* (mm)	ΔE (mm)	ΔN^* (mm)	ΔN (mm)	ΔU^* (mm)	ΔU (mm)	h(m)
P698	0	0	0	0	0	0	1479
P697	3	NE	3	NE	1	NE	2214
P696	3	3	3	1	4	15	1600
P695	1	5	6	8	7	50	2016
P693	5	15	2	2	3	40	2113
P690	5	5	3	3	7	52	2079

TABLEAU 3.2 – La fidélité des résultats obtenus avec G3GPS en estimant le biais troposphérique (ΔE^* , ΔN^* , ΔU^*) et sans estimer le biais troposphérique (ΔE , ΔN , ΔU). NE : le filtre de Kalman n'a pu estimer ce paramètre.

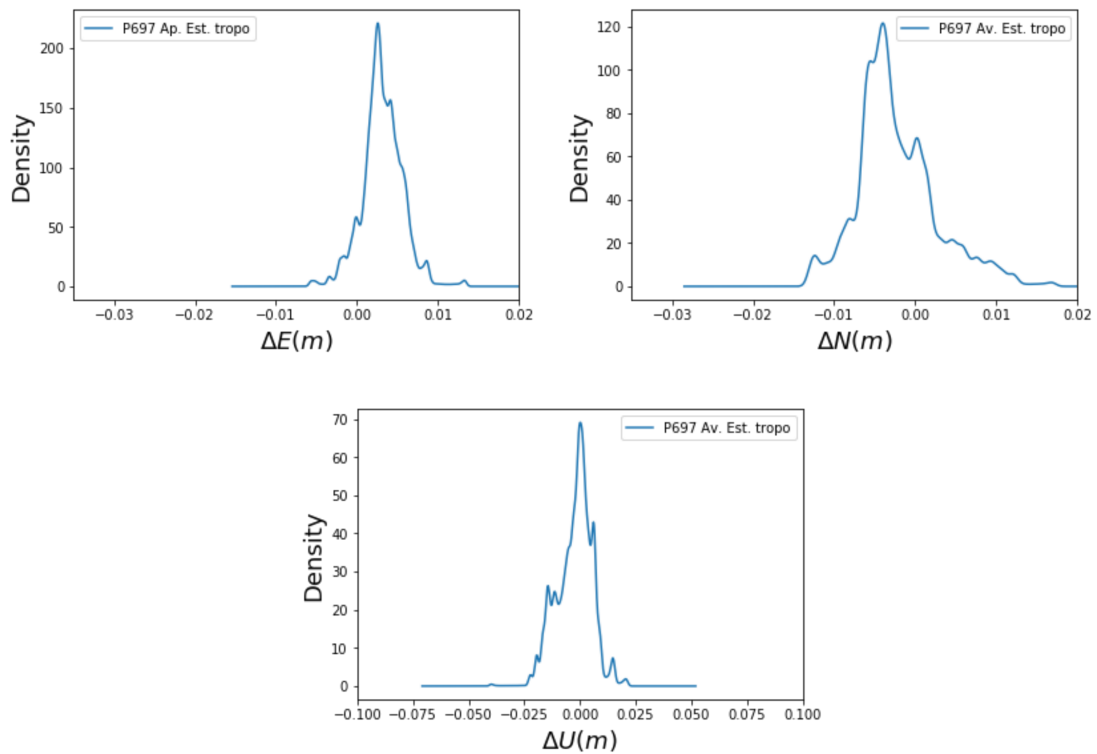


FIGURE 3.4 – Histogrammes des erreurs sur 1 mois de données (août 2011) du point P697 en utilisant G3GPS avec estimation d'un biais troposphérique. Avant l'optimisation du filtre de Kalman ce point n'a pas pu être déterminé

3.4. VALIDATION DES AMÉLIORATIONS

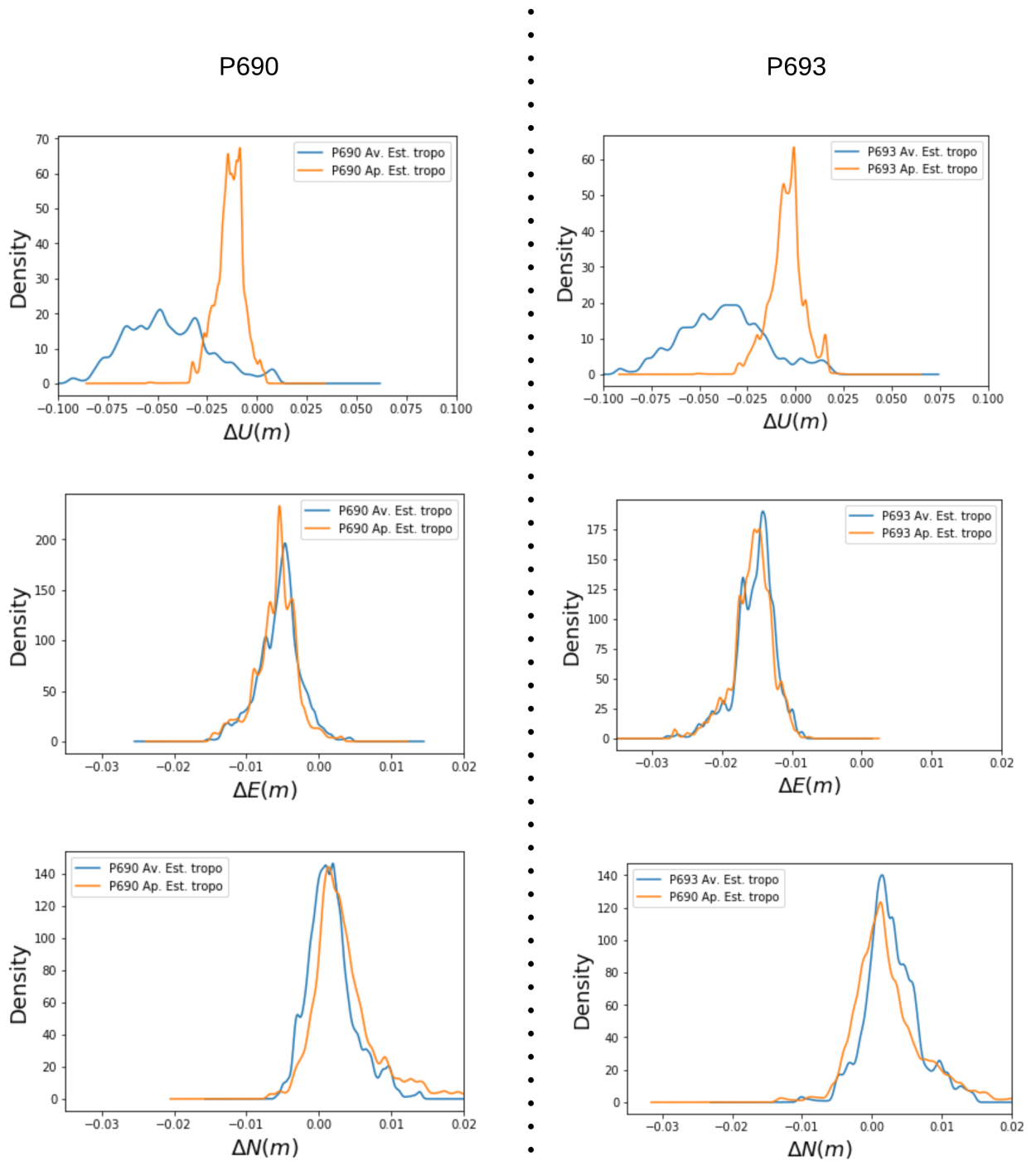


FIGURE 3.5 – Histogrammes des erreurs sur 1 mois de données (août 2011) des points P690 et P693 en utilisant G3GPS avec et sans estimation d’un biais troposphérique..

CHAPITRE 3. TECHNIQUE DE MESURE DE DÉFORMATIONS
 SUB-CENTIMÉTRIQUES EN TEMPS RÉEL ADAPTÉE À LA SURVEILLANCE DES
 VOLCANS BASÉE SUR UN RÉSEAU DE GÉOCUBES

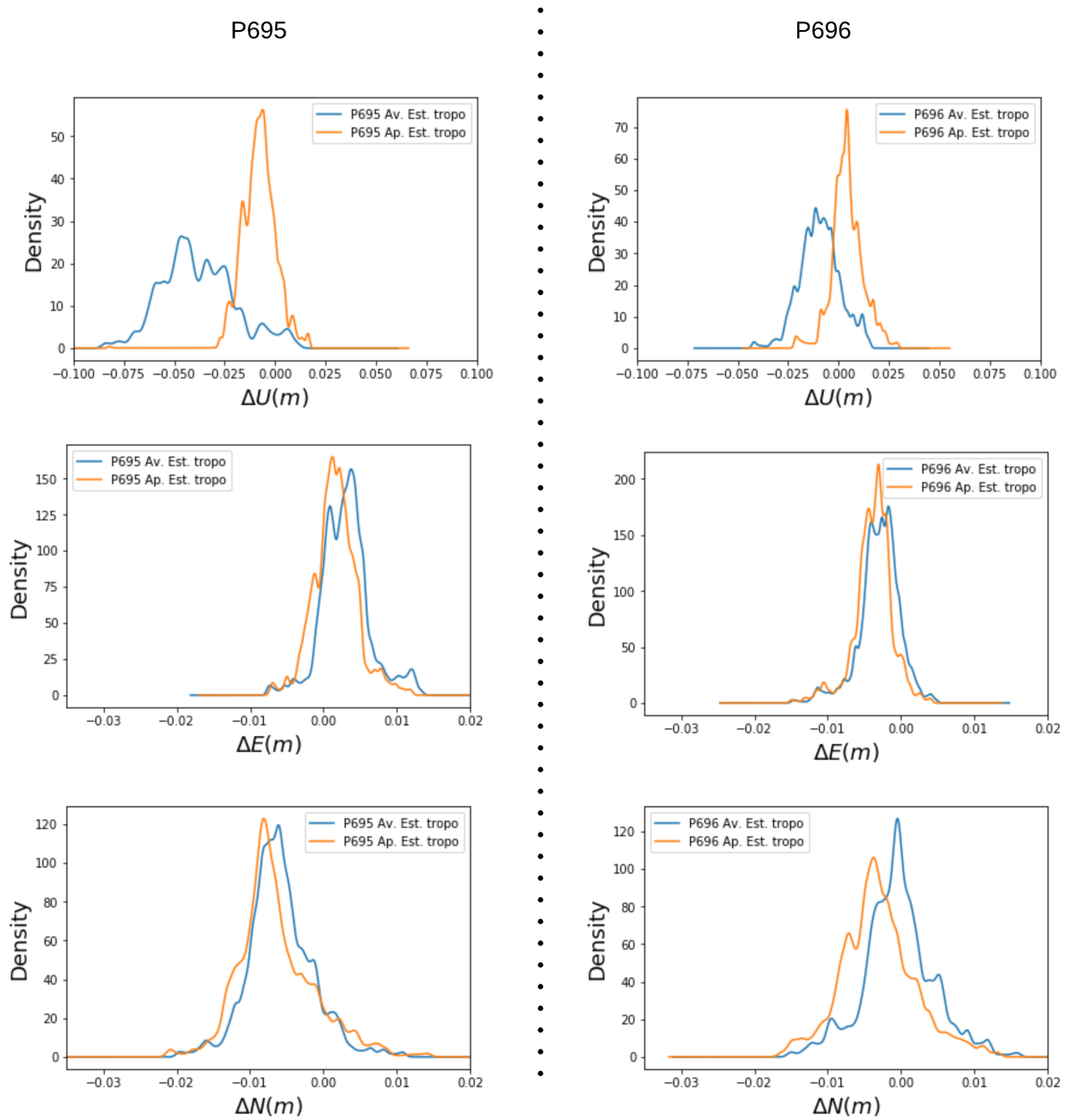


FIGURE 3.6 – Histogrammes des erreurs sur 1 mois de données (août 2011) des points P695 et P696 en utilisant G3GPS avec et sans estimation d'un biais troposphérique.

Station	X(m)	Y(m)	Z(m)	N.B
JANU	4495454.049	528892.396	4482123.077	récepteur mobile à 2583m d'altitude et à 20km à vol d'oiseau de PUYA
PUYA	4501028.727	511152.356	4477342.052	récepteur pivot à 1690m d'altitude

TABLEAU 3.3 – Les stations utilisées dans les tests de validation de l'amélioration du filtre de Kalman

3.4.2 En utilisant les données des stations du RGP de l'IGN

Nous utilisons deux stations du RGP de l'IGN qui présentent des particularités intéressantes pour valider notre amélioration du filtre de Kalman sur un réseau plus étendu que le précédent. Les coordonnées et les informations des deux stations que nous allons utiliser sont présentées dans le tableau 3.4.2. Deux calculs ont été effectués en utilisant les deux versions G3GPS (avec et sans estimation du biais troposphérique), les résultats ont montré que :

- avec ou sans estimation du biais troposphérique, G3GPS arrive à estimer la composante N avec une fidélité sub-centimétrique (figure 3.8)
- la version de G3GPS avec estimation du biais troposphérique améliore la justesse des résultats sur la composante E de 2mm (figure 3.7)
- sur la composante verticale, la version de G3GPS avec estimation du biais troposphérique donne un résultat avec une précision sub-centimétrique tandis que sans estimation du biais troposphérique, nous obtenons une fidélité et une justesse de 70mm.

CHAPITRE 3. TECHNIQUE DE MESURE DE DÉFORMATIONS SUB-CENTIMÉTRIQUES EN TEMPS RÉEL ADAPTÉE À LA SURVEILLANCE DES VOLCANS BASÉE SUR UN RÉSEAU DE GÉOCUBES

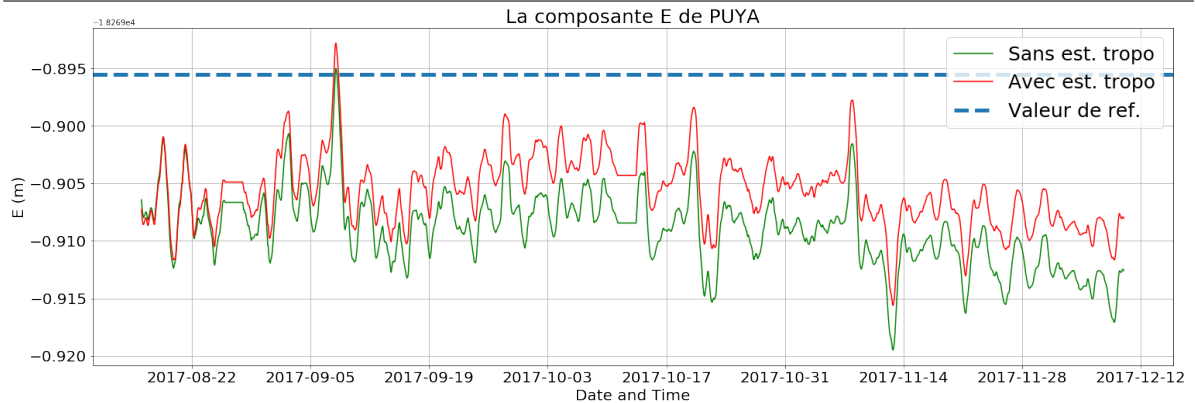


FIGURE 3.7 – La composante E de la station PUYA avec et sans l’estimation du biais troposphérique dans le filtre de Kalman. La station JANU est utilisée comme point pivot.

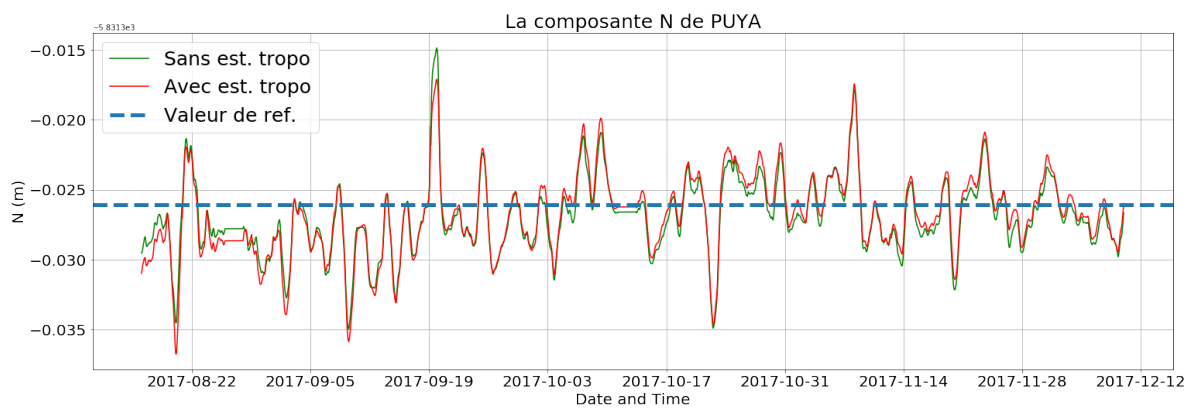


FIGURE 3.8 – La composante N de la station PUYA avec et sans l’estimation du biais troposphérique dans le filtre de Kalman. La station JANU est utilisée comme point pivot.

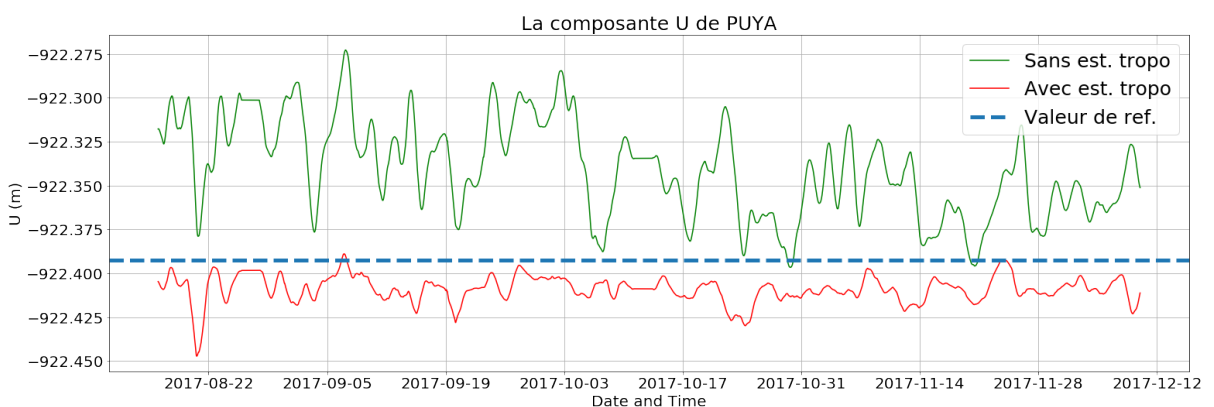


FIGURE 3.9 – La composante U de la station PUYA avec et sans l’estimation du biais troposphérique dans le filtre de Kalman. La station JANU est utilisée comme point pivot.

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons commencé par montrer les limites de l'algorithme de calcul du Géocube dans un contexte volcanique qui implique de fortes dénivelées entre le récepteur fixe et les récepteurs mobiles, et ceci à travers l'utilisation des données de quelques stations GNSS installées sur le Mont Saint Helens et rattachées au réseau américain CORS. Nous avons ensuite proposé une optimisation du filtre de Kalman qui constitue le cœur de cet algorithme de calcul de façon à estimer, en plus des positions des Géocubes, l'erreur des doubles différences due à la partie indifférenciée de la troposphère. Enfin nous avons validé l'optimisation du filtre de Kalman sur deux chantiers différents. Dans cette dernière partie nous avons démontré que notre amélioration permet au logiciel de calcul de retrouver la fidélité et la justesse sub-centimétrique sur des chantiers qui présentent les mêmes caractéristiques géométriques qu'un volcan.

SURVEILLANCE DES DÉFORMATIONS DU FLANC SUD-EST DE L'ETNA EN UTILISANT UN RÉSEAU DE GÉOCUBES ET L'INSAR

4.1 Introduction

Après avoir proposé une optimisation du filtre de Kalman pour adapter le logiciel de calcul du Géocube à un contexte volcanique, nous allons dans ce chapitre, valider les améliorations scientifiques (chapitre III) et techniques (annexe B) apportées au système Géocube durant cette thèse à travers une expérimentation menée sur le flanc Sud-Est de l'Etna, où cinq Géocubes ont été déployés entre le 12 juillet 2016 et le 10 juillet 2017. Le système déployé a pu opérer comme réseau indépendant, mais aussi comme réseau complémentaire au réseau permanent de l'INGV-OE.

Les résultats de cette mission sont analysés, discutés et comparés aux résultats obtenus en utilisant une méthode de la famille PSI (*Persistent Scatterer InSAR*) avec les images RADAR des satellites Sentinel-1A/B. Ces deux méthodes (GPS et InSAR) se sont avérées complémentaires puisque le RADAR apporte la densité spatiale des mesures et le système Géocube la précision et le continuité temporelle.

4.2 Contexte et objectifs de la mission

Situé sur la côte Est de la Sicile, l'Etna est l'un des volcans les plus actifs du monde. Il est étudié et surveillé depuis les années soixante-dix. Les déformations du sol ont été d'abord surveillées en utilisant les EDMs (*Electronic Distance Meters*) et la topométrie [18]. Depuis 1988, ces techniques ont été progressivement abandonnées pour laisser place aux GNSS. L'utilisation du GPS pour les mesures de déformations permet une plus grande flexibilité dans la conception des réseaux (l'inter-visibilité entre les points de mesure n'est pas nécessaire), et le large choix d'algorithmes de positionnement (statique, cinématique,...) rend possible de nombreux cas d'utilisations (profilage, positionnement statique pour la densification des points d'appui, mesure de déformation au sol, etc.). Depuis 1988, des levés GPS ont été effectués régulièrement pendant des campagnes annuelles à l'Etna et quotidiennement pendant les périodes de forte activité volcanique. Les récepteurs GPS utilisés pour la surveillance sont principalement des récepteurs bi-fréquence du commerce [18].

En juillet 2016 et dans le cadre de cette thèse, une équipe de chercheurs de l'IGN, l'ENS, l'INGV-OE et la société KYLIA a mené une expérimentation sur le flanc Sud-Est de l'Etna pour mettre en place un système expérimental de surveillance de déformations en temps réel qui comprend cinq géocubes et un coordinateur (figure 4.1).

Cette mission a pour but de :

- prouver à travers une expérience réelle, qu'il est possible de construire un système de surveillance de déformations basé sur un réseau de capteurs GPS, à faible coût de revient, rapidement déployable, opérant en temps réel, clé en main, autonome, avec une précision sub-centimétrique et adapté aux environnements difficiles et présentant un risque
- étudier la contribution d'un réseau GPS dense et peu coûteux à l'étude du volcanisme
- déployer un réseau de surveillance GPS sans fil à faible coût de revient, complémentaire et interopérable avec le réseau GNSS permanent existant sur l'Etna, et étudier sa contribution à la surveillance des déformations. Le réseau de points GNSS sur l'Etna sera densifié à l'occasion de cette mission, les coordonnées des nouveaux points étant publiées dans cette thèse. Ces nouveaux points pourront être utilisés lors de déploiements futurs
- combiner les résultats du système Géocube avec les résultats obtenus avec la méthode StaMPS en utilisant les images RADAR Sentinel-1A/B. Nous montrons

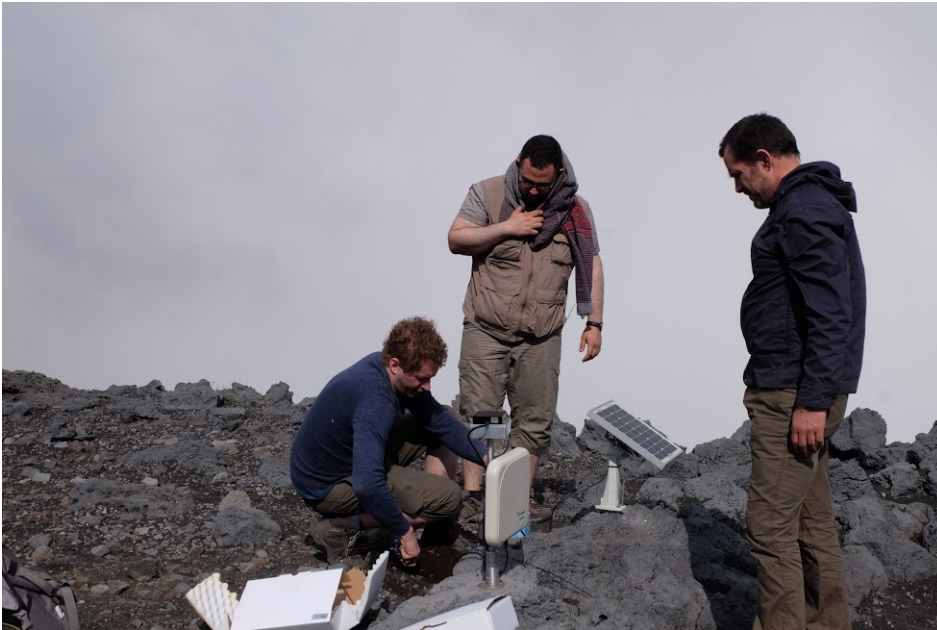


FIGURE 4.1 – Installation du Géocube sur l'Etna

Name	Longitude	Latitude	height
KYLIA-60	15.00070	37.00070	2962
KYLIA-61	15.00026	37.7296	2803
KYLIA-62	15.00415	37.71864	2643
KYLIA-64	15.01042	37.72910	2705
EINT	14.99795	37.71950	2548

TABLEAU 4.1 – Les positions des Géocubes

les avantages de combiner ces techniques pour la surveillance de la déformation des volcans.

4.3 Méthodes et techniques

4.3.1 Matériel et installation

En temps de crise (périodes éruptives, etc.) ou dans des environnements difficiles, le temps de mise en place d'un système de surveillance doit être le plus court possible. De plus, les capteurs doivent être autonomes, de sorte qu'aucune intervention humaine ne soit nécessaire pour remplacer les batteries, télécharger les données ou configurer les capteurs. L'alimentation électrique des capteurs de surveillance est le point de

CHAPITRE 4. SURVEILLANCE DES DÉFORMATIONS DU FLANC SUD-EST DE L'ETNA EN UTILISANT UN RÉSEAU DE GÉOCUBES ET L'INSAR

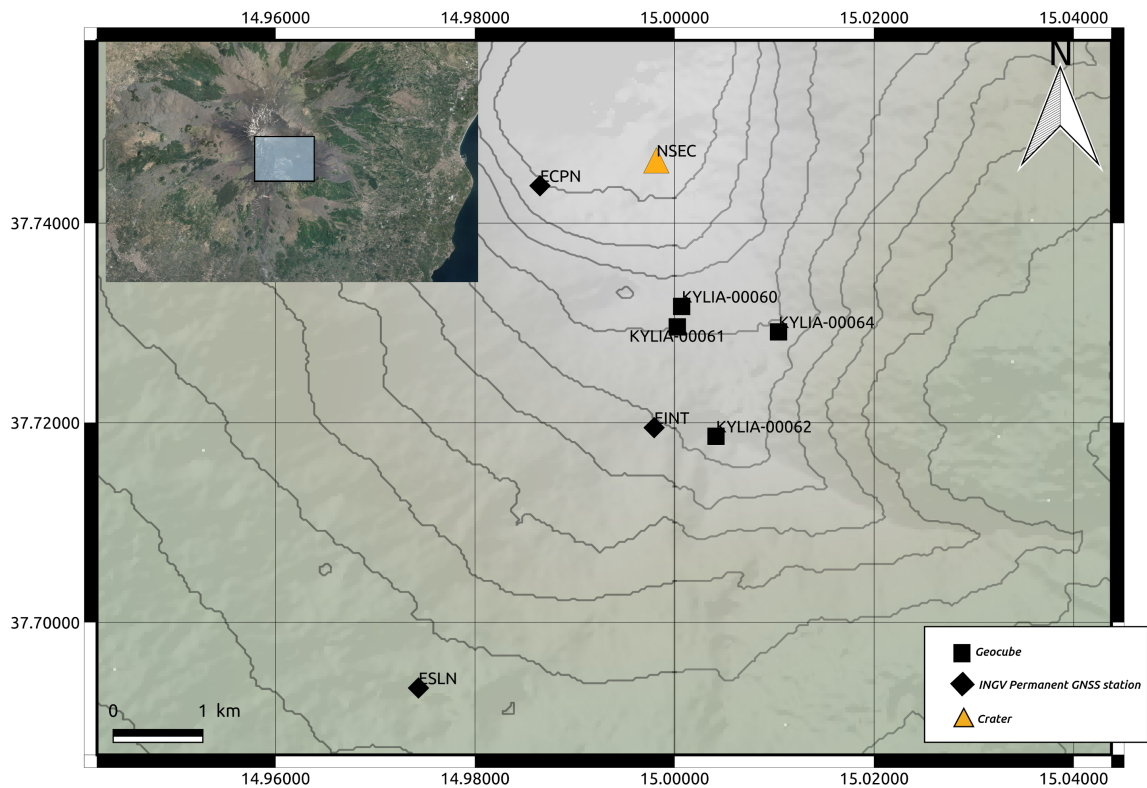


FIGURE 4.2 – Carte du réseau de Géocubes déployés sur le flanc sud-est de l'Etna

défaillance le plus important qui doit être étudié en profondeur avant le déploiement. En général, dans de tels environnements, il n'y a pas de source d'énergie électrique continue et la seule alternative est l'énergie solaire. La consommation électrique du Géocube est d'environ 500mW. Un petit panneau solaire de 10W et une batterie de secours de 7800mAh/7.4V ont été utilisés pour alimenter chaque Géocube pendant la mission. Une installation typique d'un Géocube est illustrée dans la figure 4.3. Avec cette configuration, le Géocube est censé fonctionner en continu, 24 heures sur 24, 7 jours sur 7, pendant la période de l'étude précédant l'hiver (du 12 juillet 2016 au 15 novembre 2016).

Dans sa version industrielle, le Géocube est un capteur intégré : le récepteur GPS, l'antenne GPS, la puce radio et la mémoire de sauvegarde sont intégrés dans une unité de 106 x 98 x 31 mm. Cette configuration simplifie le travail sur le terrain par rapport à des récepteurs traditionnels qui sont plus compliqués à mettre en place, car il faut installer le récepteur et l'antenne indépendamment et cela peut augmenter le temps nécessaire pour installer un capteur fonctionnel.

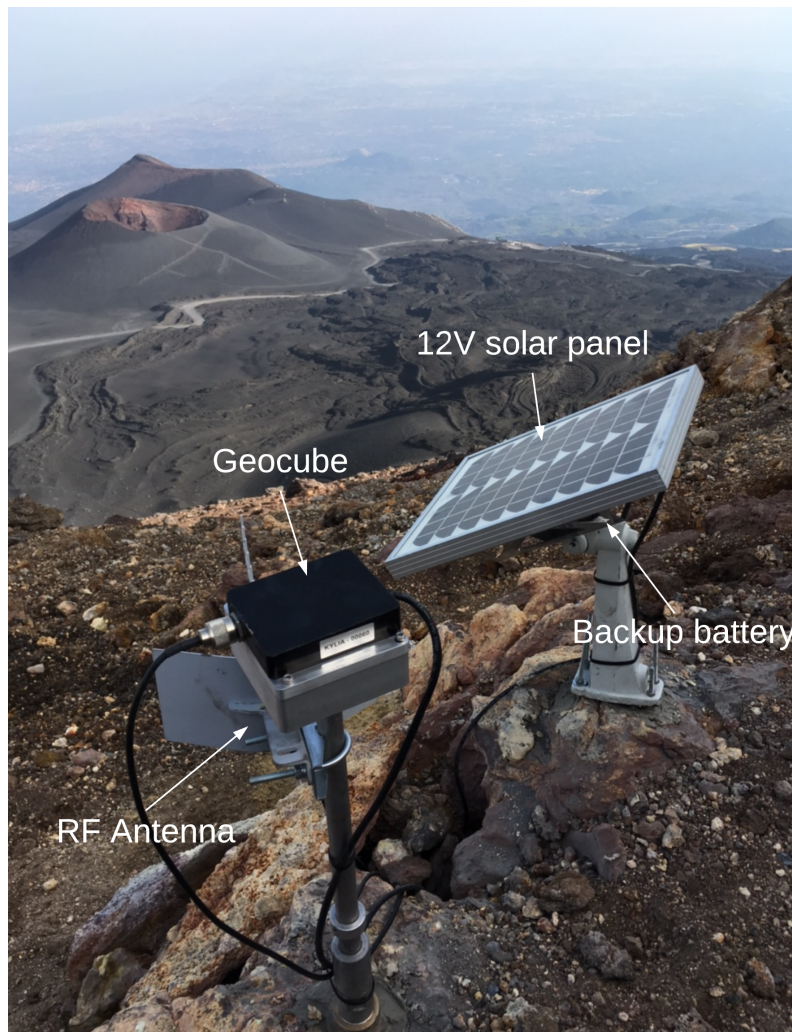


FIGURE 4.3 – Le Géocube KYLIA-60 installé sur l'Etna

L'architecture réseau utilisée sur ce chantier pour rapatrier les données et pouvoir agir à distance sur les Géocubes est présentée dans l'annexe B.

4.3.2 Algorithmes et méthodes de traitement GPS

Le traitement des données brutes est effectué en utilisant G3GPS, le logiciel de calcul du système Géocube qui implémente l'optimisation du filtre de Kalman que nous avons présentée dans le chapitre III. Néanmoins, et pour rattacher notre réseau de Géocubes au réseau permanent de l'INGV, un traitement en PPP avec le logiciel GIPSY/OASIS [44] est utilisé pour étudier la stabilité du point de rattachement. On note ici que le réseau de Géocubes a opéré comme un réseau indépendant de mesure de déformations

en temps réel. L'intégration des stations permanentes au calcul, ne peut se faire que par post-traitement est possible, vu que les données brutes de ces stations permanentes ne sont pas disponibles en temps réel.

4.3.3 Algorithmes et méthodes de traitement INSAR

Le principe de fonctionnement d'un radar à synthèse d'ouverture (SAR), l'interférométrie SAR (InSAR) classique sont présentés dans [20]. La technologie PSI (*Persistent Scatterer InSAR*) appartient à la famille de l'interférométrie différentielle avec SAR (DInSAR). Le principe de DInSAR est présenté dans [23].

Quand une image radar est formée, la valeur de chaque pixel est la combinaison de ce que retourne chaque diffuseur dans l'empreinte du pixel. Si ces diffuseurs bougent les uns par rapport aux autres, comme dans le cas de la présence d'une couverture végétale, la réponse du pixel peut varier aléatoirement, ce qui mène à une décorrelation. Par contre, si l'empreinte du pixel est dominée par un objet stable (grand rocher, tronc d'arbre, etc.) alors la réponse du pixel est dominée par la réponse de ce seul diffuseur stable. A. Ferretti nomme ce type de pixels : diffuseurs persistants (*PS : Persistent Scatterer*) et propose dans [23] une technique pour les identifier et estimer leurs déplacements. On note ici que plusieurs méthodes PSI ont vu le jour depuis [23] et ont prouvé leur efficacité sur différents types de terrain. Une bibliographie non exhaustive de ces méthodes est présentée dans [20]. Parmi ces méthodes on trouve StaMPS (*Stanford Method for Persistent Scatterers*), cette méthode proposée par A. Hooper dans [5] sera utilisée dans ce chapitre pour construire des séries temporelles de déformations du flanc Est de l'Etna et découvrir comment cette méthode pourrait être complémentaire aux Géocubes. Le choix de cette méthode est justifié d'abord par son efficacité pour la mesure des déformations des volcans [5] [2] et parce qu'une chaîne logicielle gratuite et libre existe, du nom de StaMPS (comme la méthode) avec une communauté très active autour.

Comme le montre la figure 4.4, le logiciel SNAP publié par l'ESA (Agence spatiale européenne) est utilisé pour pré-traiter les données Sentinel-1A/B, calculer les interférogrammes, formater la sortie pour répondre aux exigences StaMPS. Ensuite, StaMPS est utilisé pour estimer la stabilité de phase, sélectionner les diffuseurs persistants et estimer les déplacements.

Pour former les interférogrammes nous nous intéresserons aux images SLC (*Single Look Complex*), de polarisation VV (vertical-vertical) prises depuis la même orbite (descendante ou ascendante). Il est conseillé d'utiliser au minimum une dizaine d'images pour une bonne estimation de la stabilité de la phase [2].

Il existe deux interfaces pour pouvoir télécharger les images des satellites SAR Sentinel-1A et Sentinel-1B :

- Interface web : accessible sur <https://scihub.copernicus.eu/>. Cette interface graphique permet de télécharger les images d'une manière interactive depuis le navigateur web.
- API REST : pour automatiser les téléchargements. La plateforme Copernicus a mis en place une API (Application Programming Interface) interrogeable à travers des requêtes HTTP. C'est cette deuxième interface que nous avons utilisée pour télécharger les images Sentinel-1A/B.

Les deux sources de données sont protégées par nom d'utilisateur et mot de passe et nécessitent donc un enregistrement préalable sur la plateforme Copernicus.

Sur l'Etna, les premiers névés apparaissent généralement début décembre. La couverture de neige peut entraîner une incohérence complète dans les interférogrammes [26]. Comme les méthodes PSI sont basées sur l'étude de la stabilité de phase dans le temps, nous devons suivre la couverture de neige sur l'Etna pour choisir les images les plus appropriées afin de maximiser la cohérence entre l'image maîtresse et les images esclaves. La première approche a été l'utilisation des images Sentinel-2 pour cartographier la couverture de neige sur les parties supérieures de l'Etna. À cause de la couverture nuageuse présente sur les images Sentinel-2, nous avons cherché à compléter ses données avec les images des caméras de vidéosurveillance, en visible et infrarouge, installées sur l'Etna et gérées par l'INGV-OE. Malheureusement, les historiques de ces données ne sont pas archivées sur le site de l'INGV-OE. Les images Sentinel-2 ont finalement été complétés avec les photos publiés par les touristes et les photographes qui ont visité l'Etna en décembre 2016 et publiées dans les médias sociaux (principalement Flickr®). Ces deux sources de données (Sentinel-2 et photos de touristes) ont été très utiles pour estimer et suivre l'enneigement de décembre 2016 à avril 2017 dans notre région d'intérêt. Sur la base d'une analyse visuelle de ces données nous choisissons les images listées dans les tableaux 4.2 et 4.3.

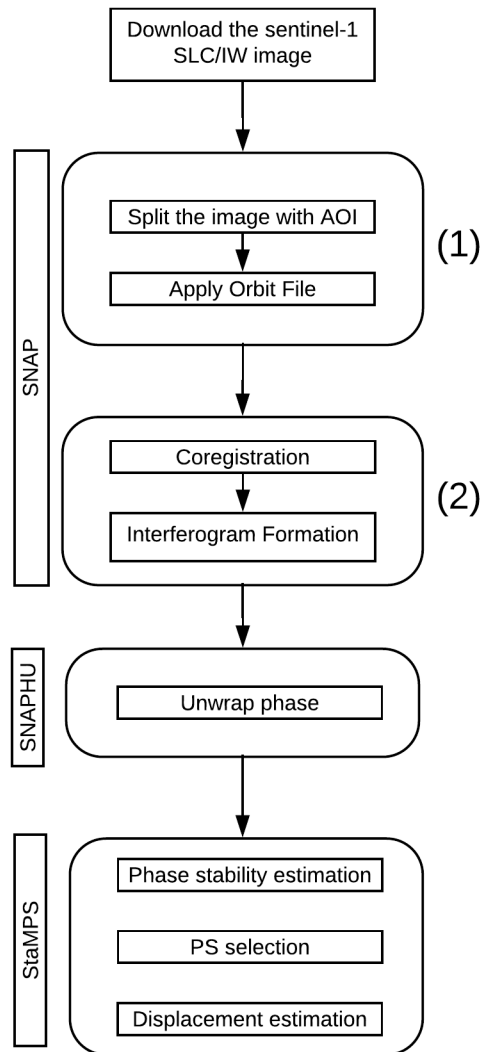


FIGURE 4.4 – La chaîne de traitement utilisée pour construire des séries temporelles de déplacements avec l'InSAR

Orbit	Date	Sensor	$B_{\perp}[m]$
12191	2016-07-17	Sentinel-1A	20
12366	2016-07-29	Sentinel-1A	-32
12541	2016-08-10	Sentinel-1A	-29
12761	2016-08-22	Sentinel-1A	-56
12891	2016-09-03	Sentinel-1A	86
13066	2016-09-15	Sentinel-1A	37
13241	2016-09-27	Sentinel-1A	-24
2345	2016-10-03	Sentinel-1B	21
13416	2016-10-09	Sentinel-1A	-95
2520	2016-10-15	Sentinel-1B	30
13591	2016-10-21	Sentinel-1A	-88
2695	2016-10-27	Sentinel-1B	-28
13766	2016-11-02	Sentinel-1A	-17
2870	2016-11-08	Sentinel-1B	-112
13941	2016-11-14	Sentinel-1A	6
3045	2016-11-20	Sentinel-1B	-83
14116	2016-11-26	Sentinel-1A	-27
3220	2016-12-02	Sentinel-1B	-46

TABLEAU 4.2 – Les images SAR en orbite ascendante utilisées pour construire les interférogrammes. L'image maîtresse est celle du 27 octobre 2016.

CHAPITRE 4. SURVEILLANCE DES DÉFORMATIONS DU FLANC SUD-EST DE L'ETNA EN UTILISANT UN RÉSEAU DE GÉOCUBES ET L'INSAR

Orbit	Date	Sensor	$B_{\perp}[m]$
12096	2016-07-11	Sentinel-1A	-67.81
12271	2016-07-23	Sentinel-1A	-25.66
12446	2016-08-04	Sentinel-1A	94.52
12621	2016-08-16	Sentinel-1A	14.86
12971	2016-09-09	Sentinel-1A	-69.13
13146	2016-09-21	Sentinel-1A	-44.8
2250	2016-09-27	Sentinel-1B	20.66
13321	2016-10-03	Sentinel-1A	55.62
2425	2016-10-09	Sentinel-1B	0
13496	2016-10-15	Sentinel-1A	30
2600	2016-10-21	Sentinel-1B	-88.07
13671	2016-10-27	Sentinel-1A	19.63
2775	2016-11-02	Sentinel-1B	56.77
13846	2016-11-08	Sentinel-1A	-5.15
2775	2016-11-14	Sentinel-1B	20.63
14021	2016-11-20	Sentinel-1A	7.99
3125	2016-11-26	Sentinel-1B	-12.49

TABLEAU 4.3 – Les images SAR en orbite descendante utilisées pour construire les interférogrammes. L'image maîtresse est celle du 9 octobre 2016.

4.4 Résultats et discussion

4.4.1 Qualité et disponibilité des données des Géocubes

L'installation des capteurs a débuté le 12 juillet 2016 et s'est terminée le 15 juillet 2016. Pendant ces trois jours, cinq Géocubes et l'infrastructure réseau (annexe B) ont été déployés. Le déploiement devait durer trois mois (jusqu'au 15 novembre 2017). Mais avec le taux de succès que nous avons obtenu pendant cette période (figure 4.5), nous avons décidé de prolonger le déploiement jusqu'au 10 juillet 2017. Enfin, les capteurs sont restés toute l'année sur le terrain avec une unité de puissance conçue pour trois mois seulement. Une fois le réseau déployé, aucune intervention humaine n'a été effectuée sur le terrain, ni pour configurer les capteurs, ni pour changer les batteries de secours.

Un exemple réel est une photo prise par l'INGV-OE le 17 avril 2017 après l'éruption de février 2017 de l'Etna, nous pouvons observer un Géocube complètement entouré par une coulée de lave et des bombes volcaniques (fig. 4.6). L'infrastructure réseau que nous avons présentée précédemment nous a permis d'effectuer des traitements en temps réel et d'accéder à distance aux données. Les données brutes recueillies au cours de la mission sont de qualité suffisante pour effectuer un traitement différentiel de phase porteuse (figure 4.7).

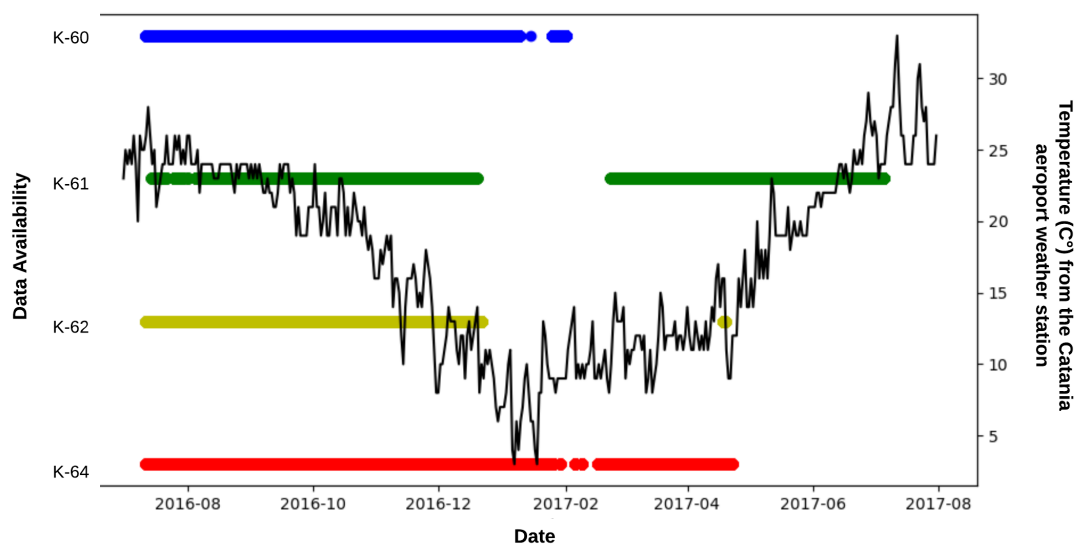


FIGURE 4.5 – Disponibilité des données par Géocube et la courbe de température de la station météorologique la plus proche (aéroport de Catane).

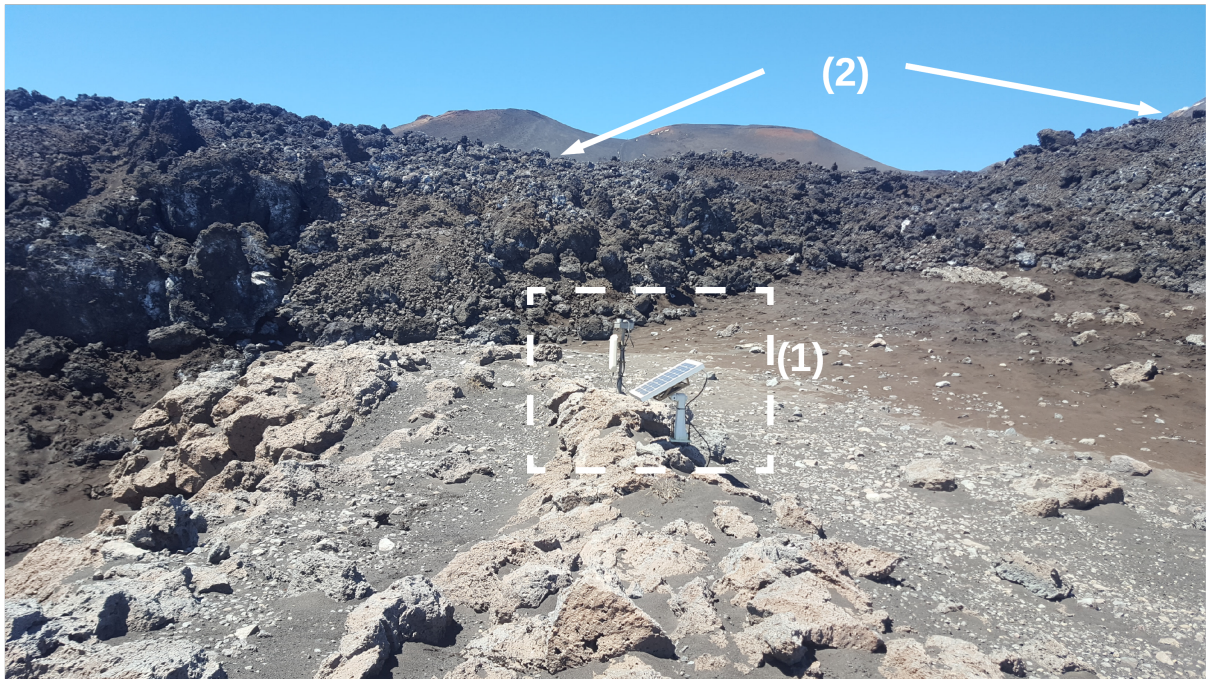


FIGURE 4.6 – Une coulée de lave qui entoure le Géocube KYLIA-64

L'antenne GPS standard en céramique de 25 mm utilisée sur le Géocube est particulièrement sensible aux multi-trajets. Cet effet résulte de la réflexion de l'onde GPS sur les surfaces environnantes [11]. Sur la série temporelle, le trajet multiple apparaît comme un motif répétitif et peut changer si un nouvel élément apparaît sur l'environnement du récepteur (par exemple, l'écoulement de lave près du Géocube) ou par des phénomènes météorologiques comme la pluie ou la neige qui modifie la réflectance des surfaces [12]. Dans tous les cas, les changements de trajets multiples dus à des variations lentes de la morphologie ou de la réflectance de l'environnement pourraient être atténués en utilisant une moyenne mobile de 23h56min (la période de la constellation GPS).

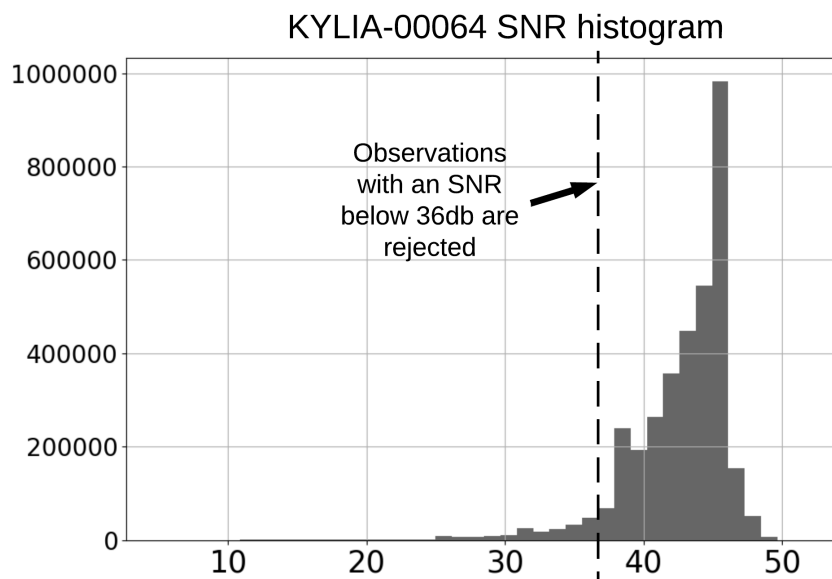


FIGURE 4.7 – Histogramme du SNR (rapport signal sur bruit) du KYLIA-64

4.4.2 Analyse de la stabilité du point fixe

Puisque les quatre Géocubes sont sur des zones à surveiller, nous utiliserons une station permanente (EINT, Figure 4.2) comme point fixe pour notre réseau. Comme G3GPS effectue un traitement différentiel, nous allons d'abord étudier la stabilité d'EINT en utilisant le logiciel GIPSY/OASIS en PPP.

Toutes les séries temporelles sont corrigées pour tenir compte de la vitesse locale d'EINT pour la période 2010-2016, c'est-à-dire $v_E = 28$ mm/an et $v_N = 10$ mm/an dans l'ITRF2008. Le RMS (Root Mean Square) est respectivement de 3,9 et 5,6 mm à l'est et au Nord. Le RMS de la composante Nord Est plus grand, probablement parce que c'est la direction radiale du volcan. Quand on enlève à cette vitesse locale la vitesse ITRF2008 de la Sicile centrale, $v_E = 21$ mm/an et $v_N = 19$ mm/an [39]. La vitesse résiduelle est $v_{relE} = 7$ mm/an, $v_{relN} = -9$ mm/an. En d'autres termes, la série chronologique suggère un mouvement à long terme de l'EINT (à l'échelle de dix ans) à une vitesse moyenne de 11,5 mm/an dans l'azimut N142°E (c'est-à-dire vers le Sud-Est), plus deux petites fluctuations épisodiques en mai 2016 et avril 2017 (Figure 4.9). La dérive locale est cohérente avec le fait que l'EINT se situerait dans la zone Sud-Est du rift, donc affectée par une dérive vers le Sud-Est.

La figure 4.9 montre qu'EINT est presque stable verticalement de juillet 2016 à juillet 2017, pendant la période de fonctionnement des Géocubes. La composante Est

CHAPITRE 4. SURVEILLANCE DES DÉFORMATIONS DU FLANC SUD-EST DE L'ETNA EN UTILISANT UN RÉSEAU DE GÉOCUBES ET L'INSAR

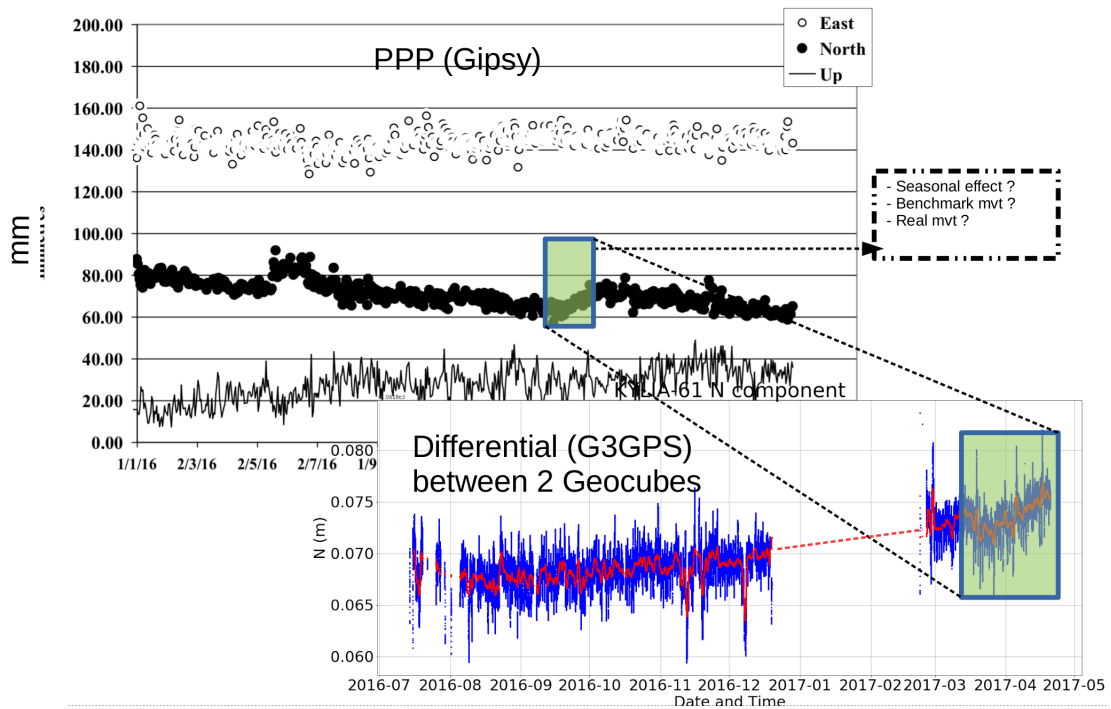


FIGURE 4.8 – L'accélération remarquée sur la composante N de l'EINT utilisant GIPSY (PPP), est également remarquée sur un traitement différentiel entre le Géocube KYLIA-64 (fixe) et KYLIA-61 (mobile) en utilisant G3GPS.

de la coordonnée est plate. La composante Nord présente deux événements : le premier commence brutalement le 17 mai 2016 et culmine le 2 juin 2016, avant l'installation des Géocubes. Le deuxième commence vers le 8 mars 2017 et se termine vers le 22 avril 2017. Durant cette période de 45 jours, le point se déplace de 13mm vers le Nord, alors que le reste du temps, il se déplace à 20 mm/an vers le Sud, avant et après cette période de 45 jours. Ces vitesses sont importantes par rapport aux vitesses de dérive à long terme et on ne s'attend pas à ce qu'elles soient stables sur de longues périodes. Elles pourraient bien être liés à l'activité peu profonde du volcan. Aucun changement vertical et aucun changement dans la composante Est ne sont observés entre le 8 mars et le 22 avril 2017.

À ce stade de l'analyse, nous ne pouvons pas exclure l'existence d'une composante saisonnière annuelle de déformation à EINT, comme on l'observe dans de nombreuses stations GPS, qui pourrait entraîner l'instabilité locale du repère et des effets saisonniers dans le traitement même des données.

La période 2016-2017 a été presque optimale pour les Géocubes car la déformation globale du volcan était très faible mais non nulle comme le montrent les séries chronologiques des stations GPS permanentes INGV-OE environnantes. Le léger changement

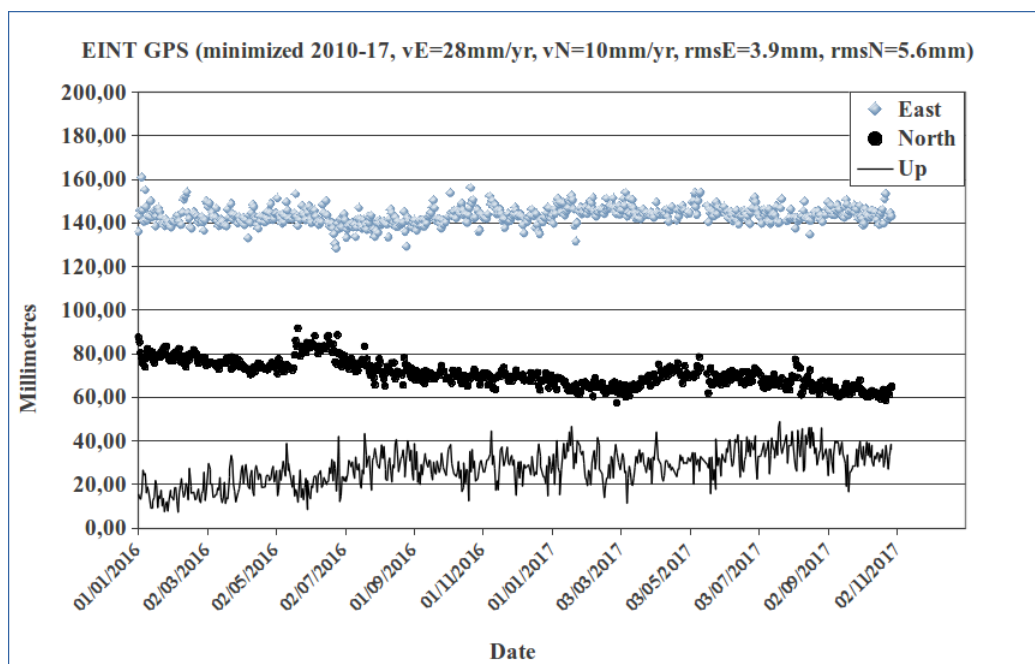


FIGURE 4.9 – Série temporelle 2016-2017 d'EINT après la suppression de la vitesse centrale de la Sicile et la suppression d'une dérive de 11,5 mm/an dans l'azimut N142°E qui minimise respectivement les séries chronologiques Est et Nord.

enregistré à EINT de la mi-mars à la mi-avril 2017 pourrait être un artefact affectant ces stations ou pourrait être un véritable signal géophysique. Nous allons voir plus loin dans ce chapitre comment les Géocubes ont aidé à déterminer une hypothèse sur la nature de ce mouvement.

EINT est la station la plus proche des Géocubes mais sa série temporelle n'est pas linéaire. Si EINT est utilisée comme point de référence pour le traitement du réseau de Géocubes et l'analyse ultérieure, ce comportement temporel d'EINT devra être corrigé afin de représenter l'évolution temporelle des Géocubes dans le référentiel d'EINT (EINT comme point fixe) tel qu'il a été défini ci-dessus.

4.4.3 Les séries temporelles des Géocubes de l'Etna

Le traitement différentiel effectué entre l'EINT et les autres Géocubes montre des signaux intéressants que nous examinerons dans les paragraphes suivants avant d'aller plus loin dans l'analyse. Nous utilisons G3GPS en mode post-traitement car les données brutes EINT ne sont pas disponibles en temps réel.

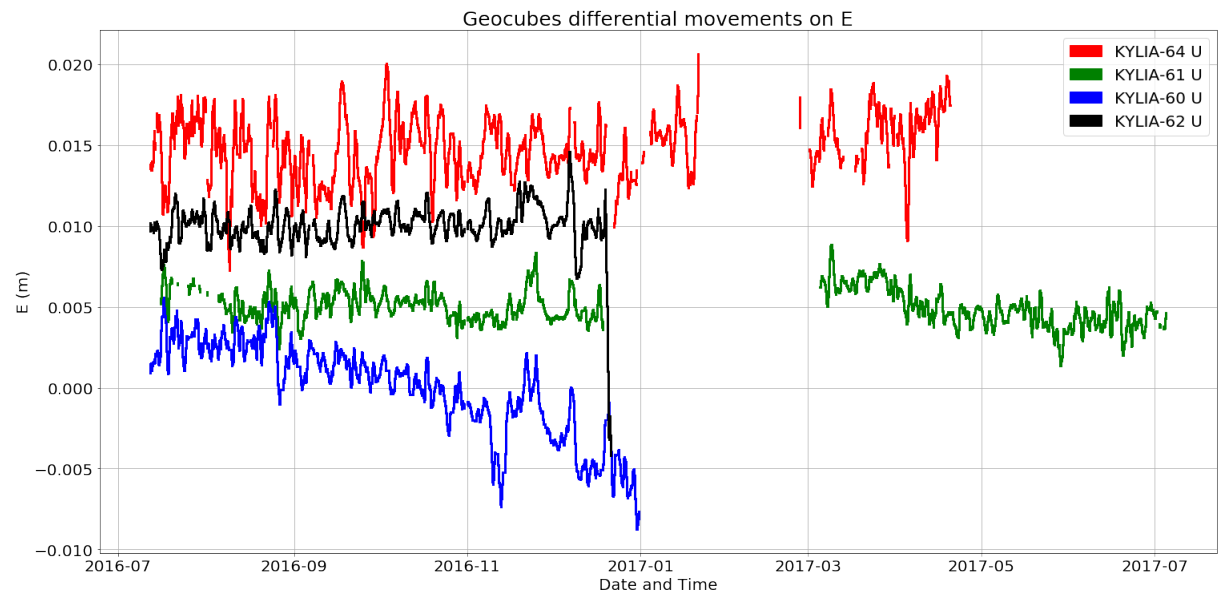


FIGURE 4.10 – La composante E des Géocubes

4.4.3.1 Sur la composante E (Est)

La figure 4.10 montre qu'aucun mouvement n'est remarqué sur le réseau Géocube entre le 12 juillet 2016 et le 20 août 2016. De multiples coupures sur les séries temporelles de la KYLIA-64 sont remarquées. Ceci est dû à une mauvaise configuration de ce Géocube, mais il a été reconfiguré grâce à l'architecture réseau qui garantit l'accès à distance aux capteurs. Cet épisode stable se termine le 20 août 2016 avec un signal haute fréquence d'amplitude 5mm . Par la suite, le KYLIA-60 (à Torre del Filosofo) a commencé un mouvement uniforme avec une vitesse de 12mm/an jusqu'à la fin. Le 15 mars 2017 une accélération s'observe sur KYLIA-61 et KYLIA-64, et finit le 22 avril 2017. Ce mouvement s'est produit en même temps que celui observé sur les séries chronologiques de l'EINT en PPP.

4.4.3.2 Sur la composante N (Nord)

Les récepteurs KYLIA-61, KYLIA-62 et KYLIA-64 sont stables sur 2016 avec respectivement sur la composante Nord : 1mm/an , 2mm/an et 1mm/an . Le KYLIA-60 se déplace de 20mm/an à l'Ouest. En 2017, un nouveau mouvement de 2mm sur KYLIA-64 et 6mm sur KYLIA-61 se produit. L'événement que nous avons évoqué précédemment, sur la composante Nord d'EINT, qui commence le 8 mars 2017 et se termine le 22 avril 2017, n'est pas un mouvement du support de la station car nous observons le même

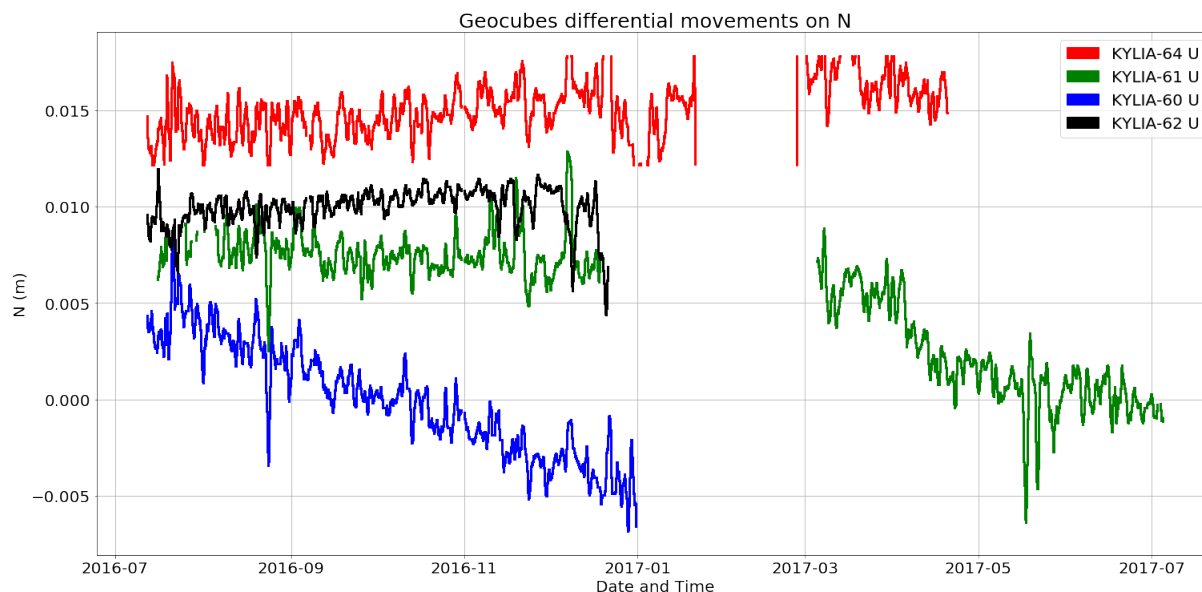


FIGURE 4.11 – La composante N des Géocubes

événement en effectuant un traitement différentiel entre les Géocubes KYLIA-64 (fixe) et KYLIA-61 (mobile) en utilisant G3GPS comme montré sur la figure 4.8. Nous soulignons ici que les géocubes ont été utilisés pour lever le doute sur un événement observé sur un récepteur GNSS permanent.

4.4.3.3 Sur la composante verticale (U)

KYLIA-62 est presque stable en 2016. KYLIA-60/61/64 montrent un signal haute fréquence entre le 22 août 2016 et le 1er septembre 2016. Durant cette semaine KYLIA-60 et KYLIA-61 se déplacent de 5mm , et KYLIA-64 reste stable après l'événement. Tous les Géocubes restent stables du 1er septembre au 10 octobre 2016. Lorsqu'un nouveau signal haute fréquence est détecté sur KYLIA-60/61/62. Après cet événement, KYLIA-60 et KYLIA-61 commencent un mouvement de subsidence de 120mm/an jusqu'à la fin. KYLIA-60 montre un régime alternatif remarquable sur la composante verticale comme le montre la Figure 4.13.

CHAPITRE 4. SURVEILLANCE DES DÉFORMATIONS DU FLANC SUD-EST DE L'ETNA EN UTILISANT UN RÉSEAU DE GÉOCUBES ET L'INSAR

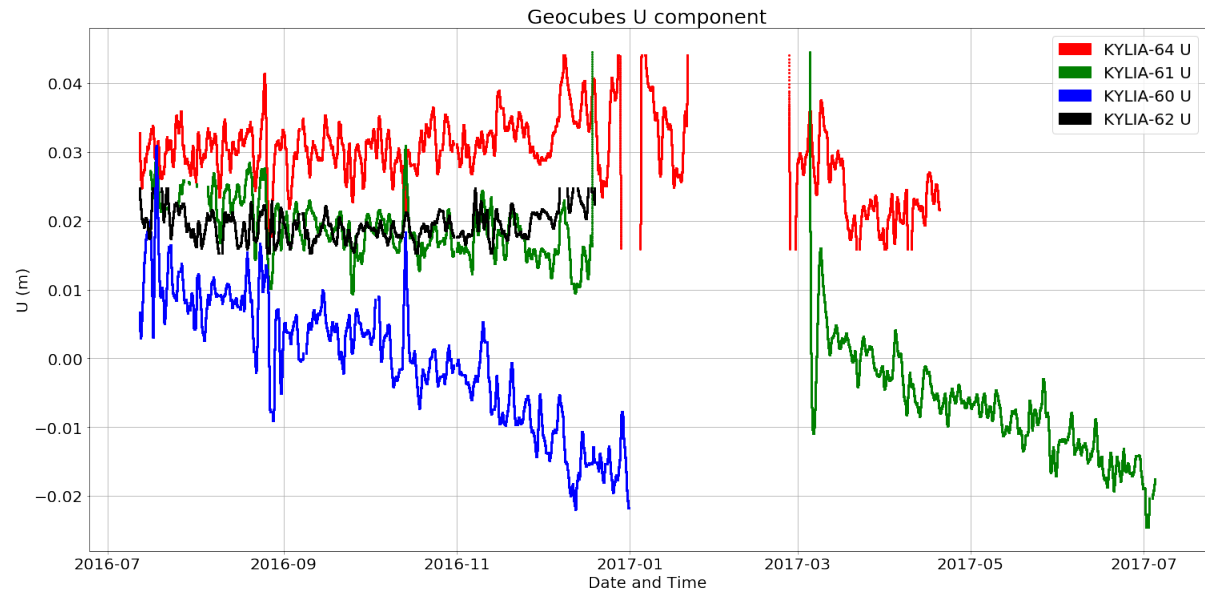


FIGURE 4.12 – La composante U des Géocubes

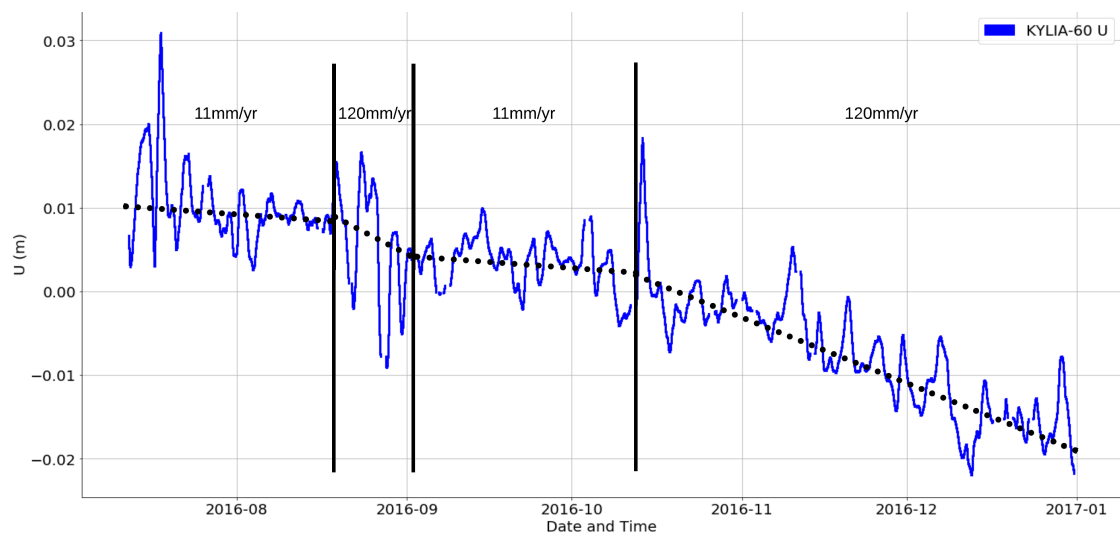


FIGURE 4.13 – Régime alternatif remarqué sur le point KYLIA-60.

4.4.4 Les séries temporelles issues de la méthode StaMPS

À l'heure où ces lignes sont rédigées la dernière version de StaMPS est la 3.3b1, qui date du 12 Septembre 2013, avant le lancement des satellites Sentinel-1A et Sentinel-1B. D'ailleurs, dans son manuel, le développeur décrit l'utilisation de son logiciel en utilisant les satellites ERS1, ERS2 et Envisat. Pour adapter les interférogrammes Sentinel-1 au programme StaMPS, un pré-traitement des images radar est nécessaire avec SNAP : la boîte à outils de la constellation Sentinel. StaMPS va alors être utilisé pour l'estimation de la stabilité de la phase, la sélection des PS et l'estimation des déplacements.

4.4.4.1 résultats issus de StaMPS

Nous avons montré précédemment que KYLIA-60/60/60/63 montrent quelques événements et tendances intéressants entre juillet 2016 et juillet 2017. En utilisant le StaMPS, nous essaierons de déterminer si ces mouvements et tendances sont réels et ne sont pas seulement des mouvements locaux du repère ou de la roche sur laquelle est installé le repère. En d'autres termes, cela nous permettra de valider les résultats obtenus à l'aide des Géocubes avec une technique InSAR (et vice versa : valider les résultats obtenus à l'aide des images Sentinel-1A/B avec les séries chronologiques Géocubes). Comme avec InSAR nous obtenons une vue globale des déplacements du volcan, nous allons essayer de savoir si les événements que nous avons observés sur les séries chronologiques des Géocubes sont présents ailleurs sur le flanc Est de l'Etna.

Valeur	Paramètre
MNT	SRTM 3-arc second
Erreur maximum du MNT	10 m
Band-pass phase filter grid cell size	40 m
Band-pass phase filter grid size	64 x 64
Band-pass phase filter low-pass cutoff	800 m
Band-pass phase filter α	1
Band-pass phase filter β	0.3
Acceptable fraction of false positive PS pixels	1%
Partial PS pixels rejected?	no
Spatially correlated filtering time window	180
Unwrapping algorithm	stepwise 3-D
Unwrapping grid cell size	100m
Unwrapping Gaussian width	8 σ

TABLEAU 4.4 – Les paramètres de traitement utilisés dans StaMPS

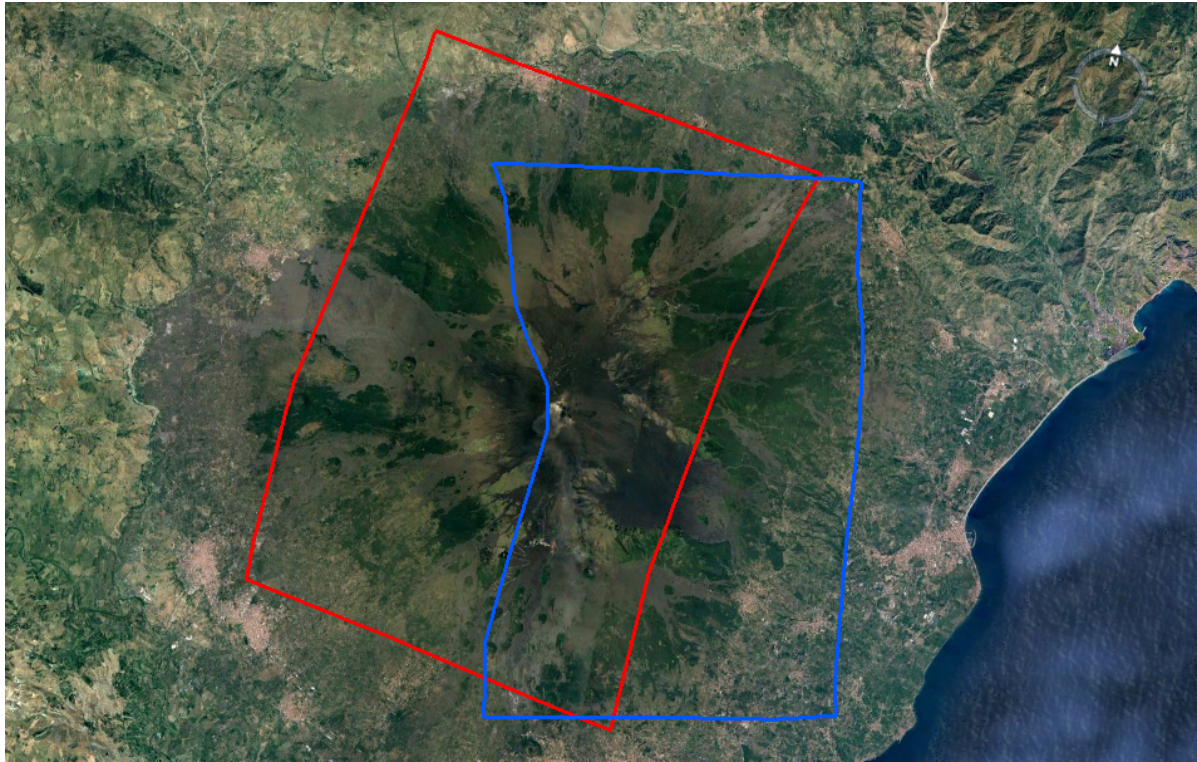


FIGURE 4.14 – L’empreinte au sol des parties des images SAR SLC (*Single Look Complex*) utilisées dans le traitement. Avec rouge : orbite descendante et bleu : orbite ascendante

Nous avons appliqué StaMPS aux images acquises par les satellites Sentinel-1A et Sentinel-1B sur le flanc Est de l’Etna entre juillet 2016 et décembre 2016. Nous avons traité 19 images de l’orbite ascendante donnant 18 interférogrammes (tableau 4.2). et 18 images d’orbite descendante donnant 17 interférogrammes (tableau 4.3). Nous avons utilisé un MNT déterminé par la mission de topographie radar SRTM, avec une résolution de 3 secondes d’arc. Les paramètres spécifiques que nous avons utilisés dans le traitement sont détaillés dans le tableau 4.4.

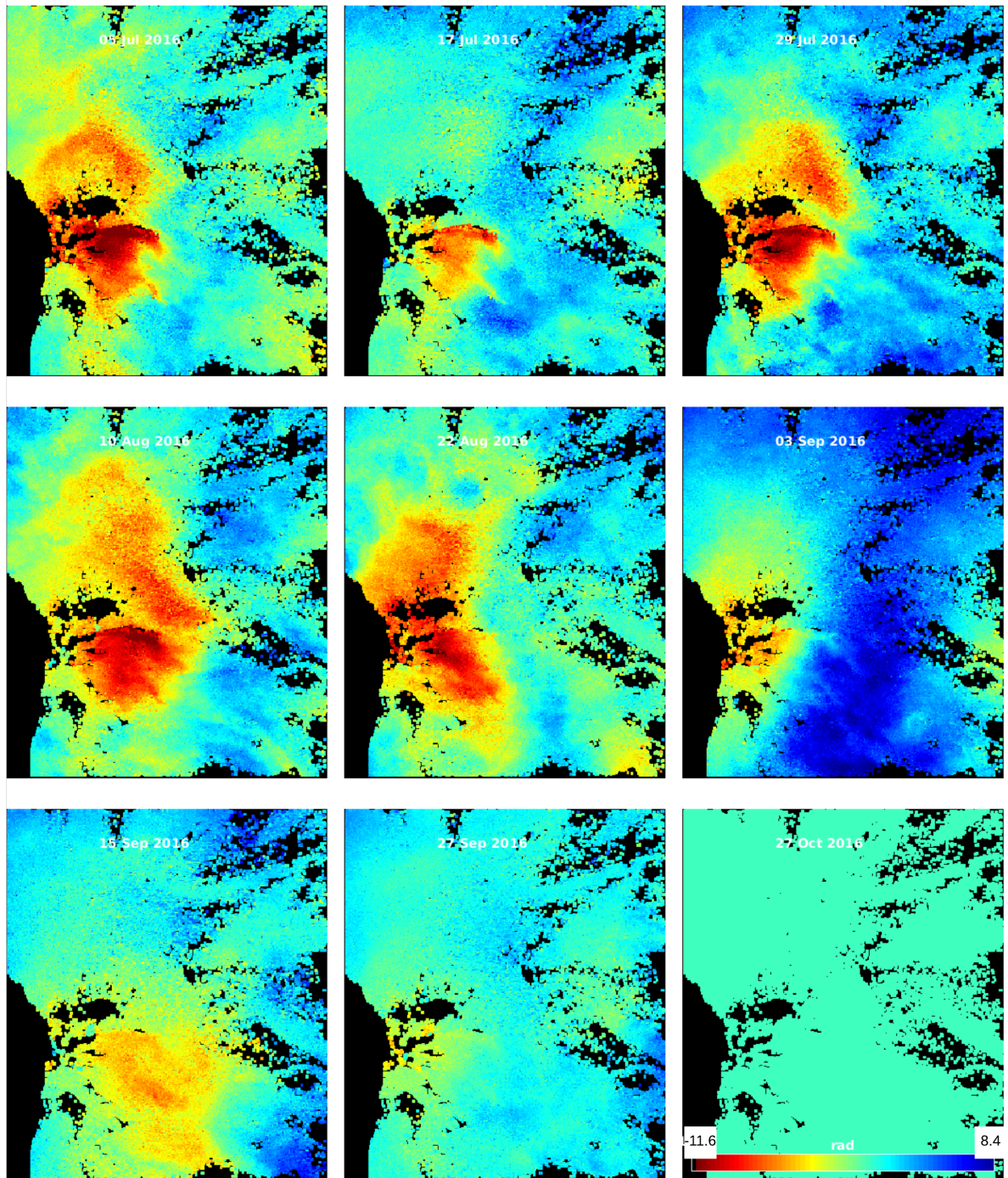


FIGURE 4.15 – Les phases déroulées de l'orbite ascendante, partie 1

CHAPITRE 4. SURVEILLANCE DES DÉFORMATIONS DU FLANC SUD-EST DE L'ETNA EN UTILISANT UN RÉSEAU DE GÉOCUBES ET L'INSAR

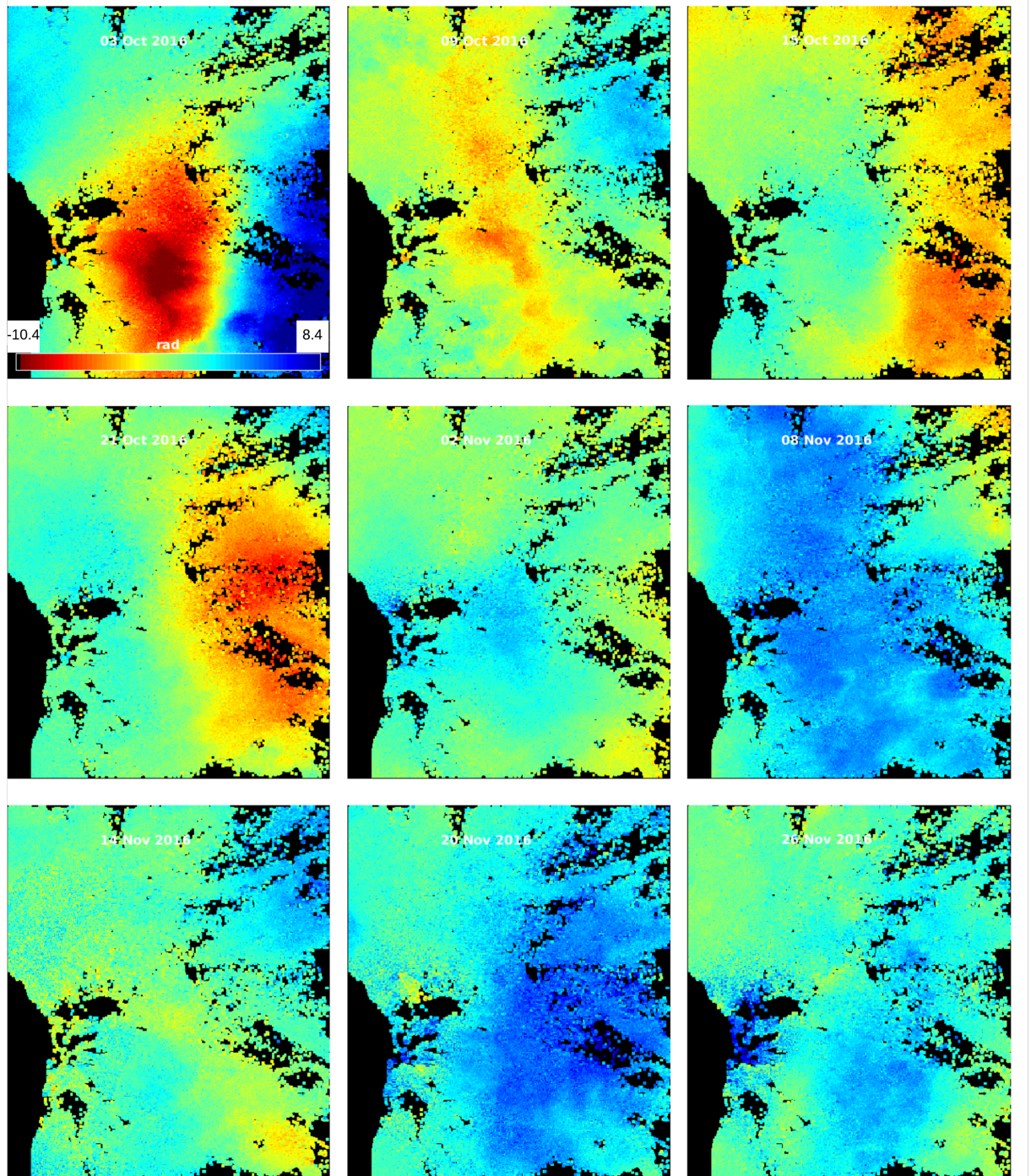


FIGURE 4.16 – Les phases déroulées de l'orbite ascendante, partie 2

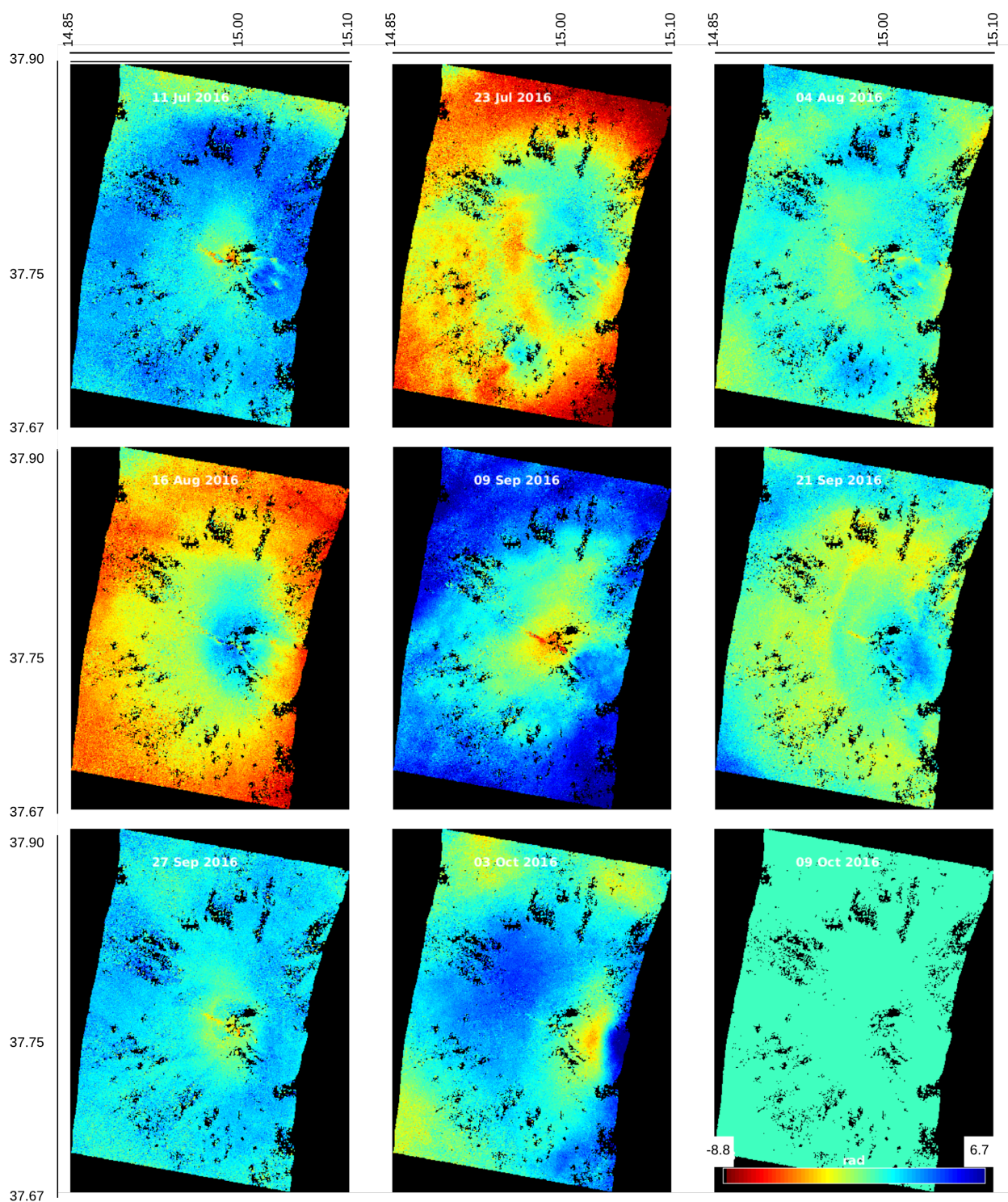


FIGURE 4.17 – Les phases déroulées de l'orbite descendante, partie 1

CHAPITRE 4. SURVEILLANCE DES DÉFORMATIONS DU FLANC SUD-EST DE L'ETNA EN UTILISANT UN RÉSEAU DE GÉOCUBES ET L'INSAR

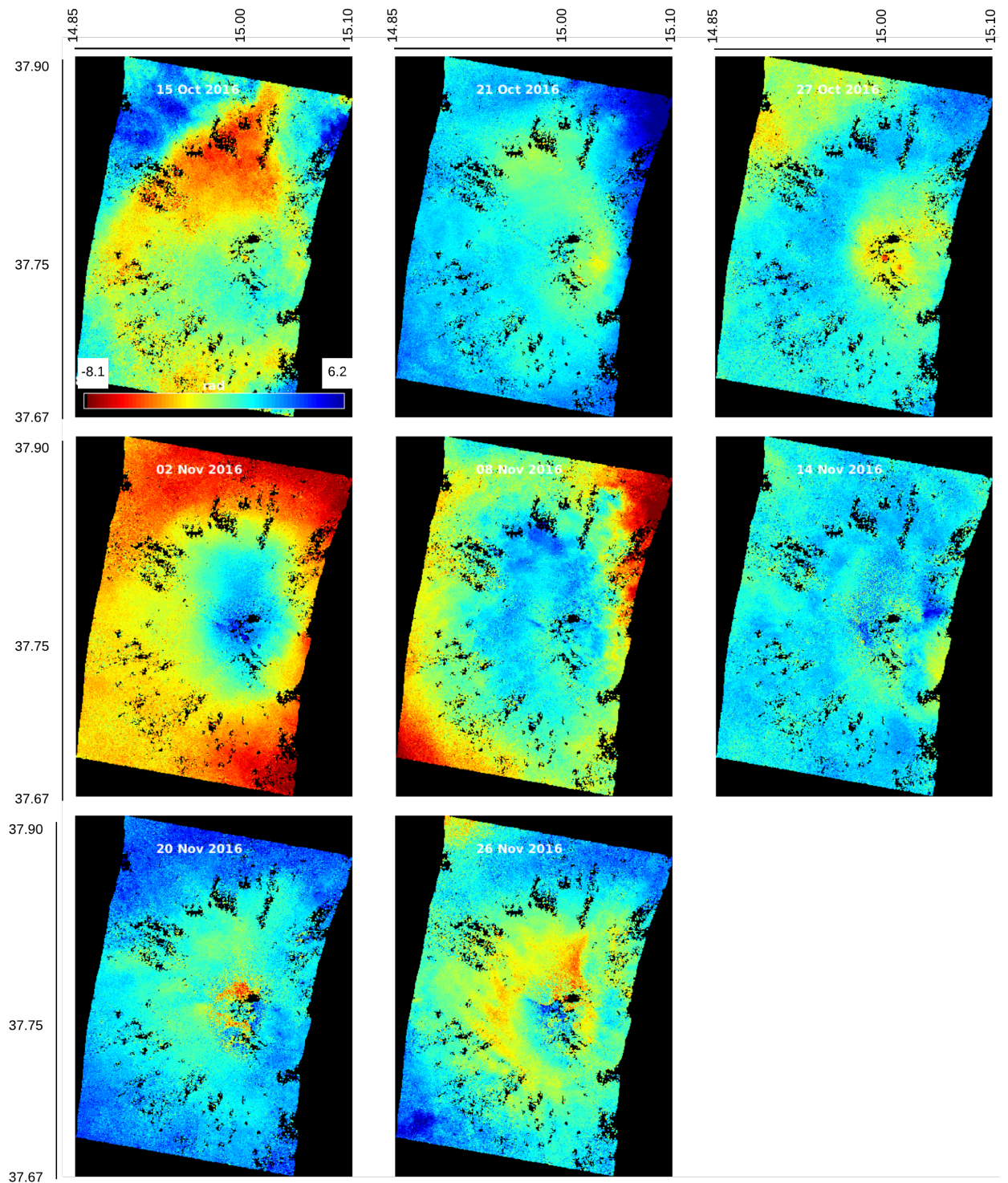


FIGURE 4.18 – Les phases déroulées de l'orbite descendante, partie 2

4.4.4.2 Analyse et discussion

Les interférogrammes calculés et utilisés sont présentés dans l'annexe A, les images des phases déroulées sont présentées dans les figures [4.15, 4.16, 4.17 et 4.18]. Ces images montrent que :

- comme le montre les cartes de déplacements globaux (figures 4.23 et 4.24) un signal de subsidence générale est remarqué sur le flanc est des parties sommitales de l'Etna. Néanmoins, la vitesse de cette subsidence n'est pas uniforme et elle est dominée par des événements qu'on remarque clairement sur les images des phases déroulées et particulièrement sur les images issues de l'orbite ascendante (figures 4.15 et 4.16)
- la période qui s'étale du début de la mission à fin août est relativement stable. Nous avons d'ailleurs remarqué cette stabilité sur les séries temporelles des Géocubes aussi, sauf que pour les Géocubes nous remarquons aussi quelques signaux de haute fréquence qui peuvent avoir une origine géophysique mais le manque de données d'autres capteurs *in-situ* comme les inclinomètres pour confirmer ces signaux nous ne permet pas de confirmer leurs origines
- le premier incident clairement visible sur les phases déroulées de l'orbite ascendante (figure 4.15) a eu lieu entre le 22 août 2016 et le 3 septembre 2016. Cet incident est un mouvement de subsidence clairement marqué sur les phases déroulées de l'orbite ascendante et qui a touché particulièrement le flanc est des parties sommitales. Cet incident est aussi visible sur la composante verticale des séries temporelles des Géocubes KYLIA-60/61/64 (figures 4.12). Ce signal de subsidence peut être dû à l'activité volcanique intense rapportée par l'INGV-OE dans leur rapport hebdomadaire. En effet, ce document rapporte que dans la semaine du 29 août 2016 au 04 septembre 2016, les cratères du sommet ont été marqués par une intense activité de dégazage répartie sur l'ensemble des zones sommitales. L'activité des cratères du sommet de l'Etna a été observée en utilisant les caméras du système des Vidéosurveillance de l'INGV-OE. De plus, deux inspections ont été effectuées dans la zone du sommet, le 29 Août 2016 par Daniele Andronico (volcanologue de l'INGV), et le 31 Août 2016 par l'équipe du sauvetage alpin de la *Guardia di Finanza de Nicolosi*
- le deuxième incident visible sur les phases déroulées des orbites ascendante et descendante (figures 4.16 et 4.17) a eu lieu entre le 3 Octobre 2016 et le 9 Octobre 2016 et il est particulièrement visible sur les images du 3 Octobre 2016. Cet incident a été précédé par une période relativement stable dans laquelle aucun

signal particulier n'a été remarqué. Ce mouvement de subsidence brusque est probablement dû à l'activité géophysique et géochimique particulièrement intense remarquée sur les parties sommitales de l'Etna et documentée dans le rapport hebdomadaire de l'INGV-OE. Ce rapport qui décrit les événements du 3 Octobre 2016 au 10 Octobre 2016 stipule que le débit hebdomadaire moyen de SO₂ émis par le volcan, mesuré par le réseau Scanner-UV a indiqué des valeurs en forte hausse par rapport au chiffre enregistré des dernières semaines. En conclusion, les observations géochimiques du panache de l'Etna, ont indiqué un régime de dégazage croissant, qui atteint un niveau maximal dans la semaine du 3 Octobre 2016 au 10 Octobre 2016. De plus, et d'après le même rapport, cinq événements sismiques ont eu lieu dans cette même semaine sur les parties sommitale de l'Etna. Malheureusement les observations classiques par vidéosurveillance n'ont pas été possible à cause des conditions météorologiques défavorables qui ont eu pour effet de limiter la visibilité sur les zones sommitales. Cet incident est aussi marqué sur les courbes des Géocubes et particulièrement sur la composante verticale

- après ce dernier incident les phases déroulées montre que le flanc est de L'ETNA entre dans une phase de subsidence uniforme et continue. Cette phase est d'ailleurs marquée aussi sur la composante verticale des Géocubes et particulièrement sur le KYLIA-60 comme le montre la figure figure 4.13.

Nous avons vu que les signaux marquants observés sur les phases déroulées issues des interférogrammes InSAR sont probablement corrélés avec des événements géochimiques et géophysique observés sur les parties sommitales de l'Etna. L'InSAR nous apporte ici une vue globale et une bonne résolution spatiale de l'étendue et de l'amplitude de ces signaux, tandis que les séries temporelles des Géocubes nous offre une très bonne résolution temporelle pour la datation de ces événements.

Après cette analyse qualitative des signaux observés avec l'InSAR et le GPS. Nous allons, dans ce qui suit, valider les mouvements millimétriques observés par les Géocubes en utilisant les résultats obtenus en utilisant la méthode StaMPS. Les figures (4.19, 4.20, 4.20, 4.21 et 4.22) et qui montrent que les déplacements en millimètres observés par les Géocubes (GPS) sont également observés en appliquant la méthode StaMPS (InSAR) aux images Sentinel-1A/B. En examinant les séries chronologiques, la subsidence de 5mm survenue la première semaine de septembre 2016 est également visible sur les séries chronologiques InSAR. En utilisant la série chronologique StaMPS, nous observons le même mouvement de subsidence sur le flanc est du NSEC (*New South East Crater*) mais avec une amplitude de 30mm. Le mouvement de 5mm observé sur les Géocubes pourrait

être un effet du mouvement de subsidence de 30mm observé près du NSEC. La carte des déplacements totaux présentée à la figure 4.23 donne une vue plus globale des taux de déplacement et montre que la zone située à l'est des cratères les plus élevés subit le taux de déplacement le plus élevé (124mm/an). Le régime alternatif observé sur le Géocube KYLIA-60 (fig. 4.13) est également observé dans les séries temporelles StaMPS comme montré dans la Figure 4.19.

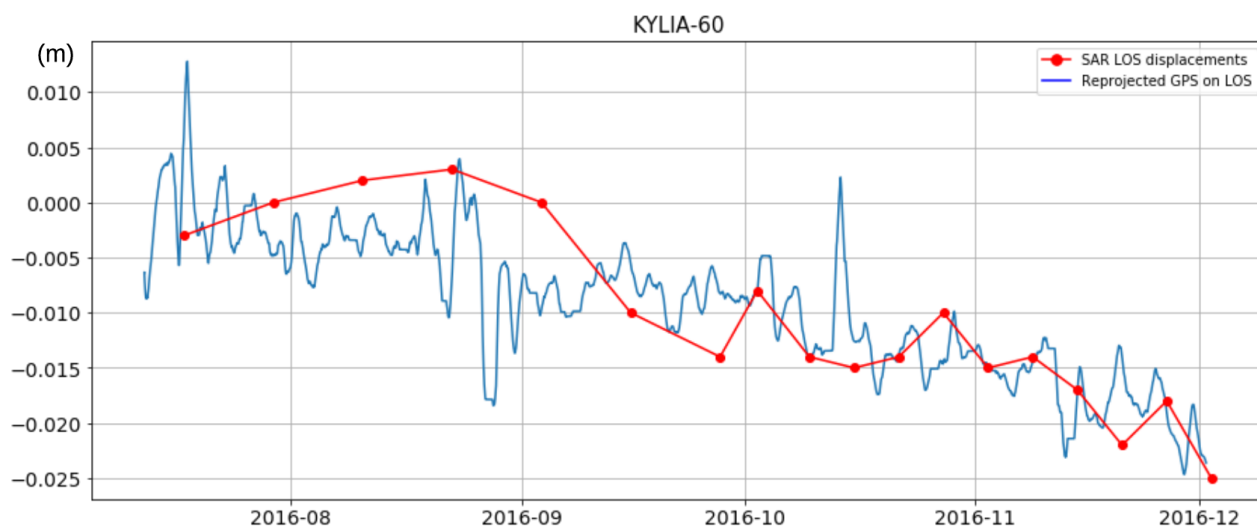


FIGURE 4.19 – Coordonnées GPS de KYLIA-60 reprojétées sur la LOS (*Line Of Sight*) du satellite radar.

CHAPITRE 4. SURVEILLANCE DES DÉFORMATIONS DU FLANC SUD-EST DE L'ETNA EN UTILISANT UN RÉSEAU DE GÉOCUBES ET L'INSAR

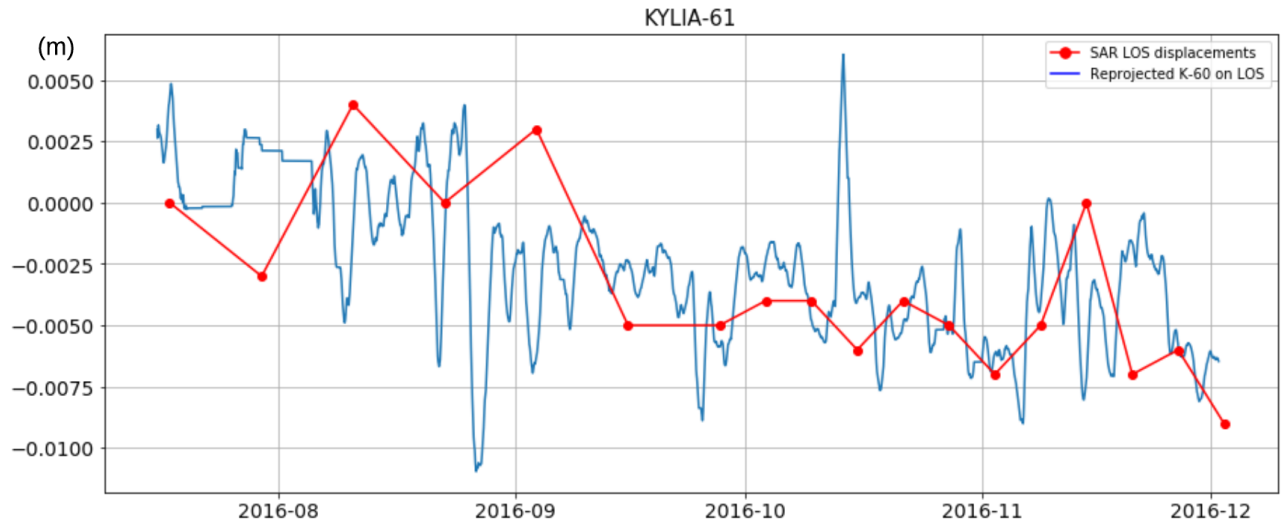


FIGURE 4.20 – Coordonnées GPS de KYLIA-61 reprojctées sur la LOS (*Line Of Sight*) du satellite radar.

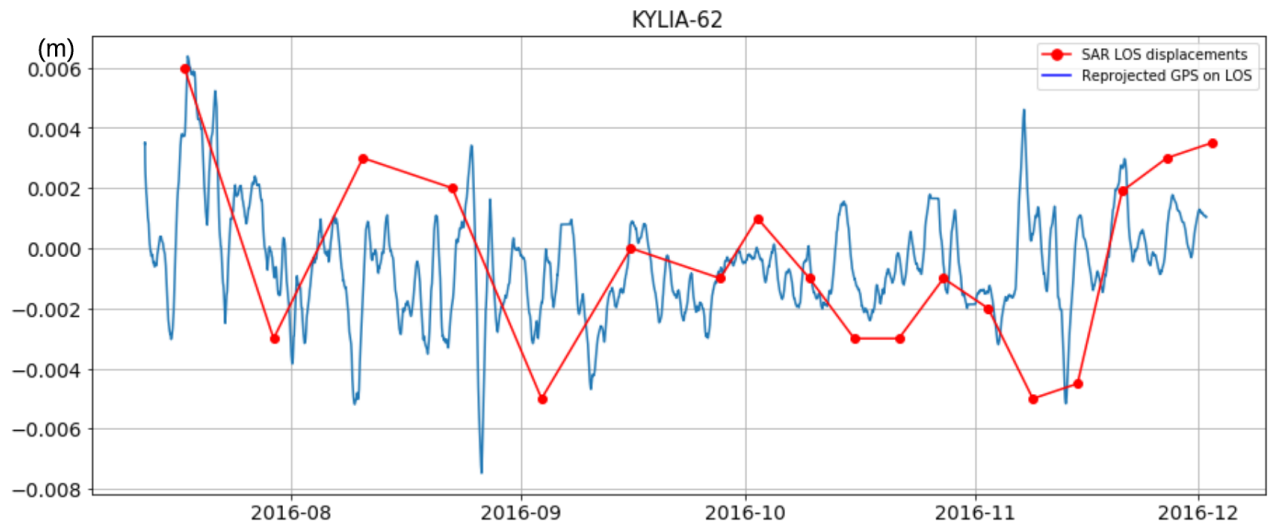


FIGURE 4.21 – Coordonnées GPS de KYLIA-62 reprojctées sur la LOS (*Line Of Sight*) du satellite radar.

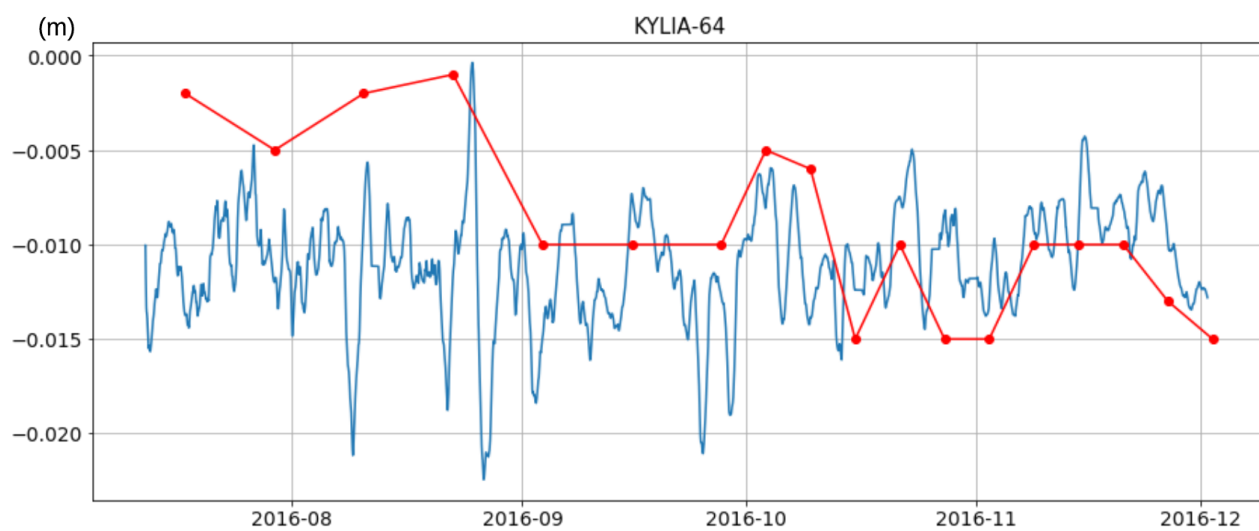


FIGURE 4.22 – Coordonnées GPS de KYLIA-64 reprojétées sur la LOS (*Line Of Sight*) du satellite radar.

CHAPITRE 4. SURVEILLANCE DES DÉFORMATIONS DU FLANC SUD-EST DE L'ETNA EN UTILISANT UN RÉSEAU DE GÉOCUBES ET L'INSAR

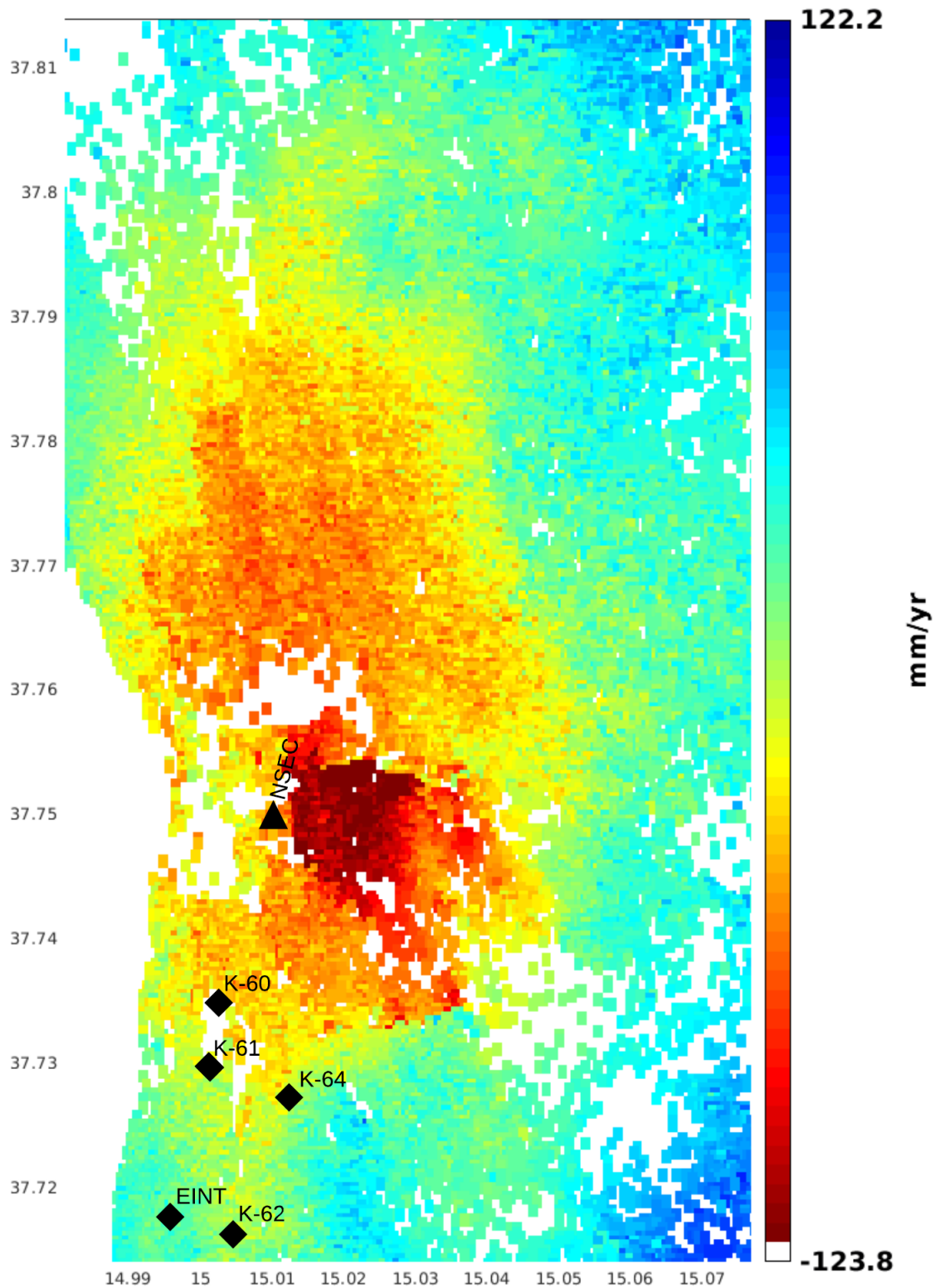


FIGURE 4.23 – Carte des déplacements globaux (de juillet 2016 à fin novembre 2016) calculée à partir des phases déroulées de l'orbite ascendante, avec l'emplacement des Géocubes et du NSEC. EINT utilisé comme pixel de référence (point fixe par rapport auquel les déformations sont exprimées). 78

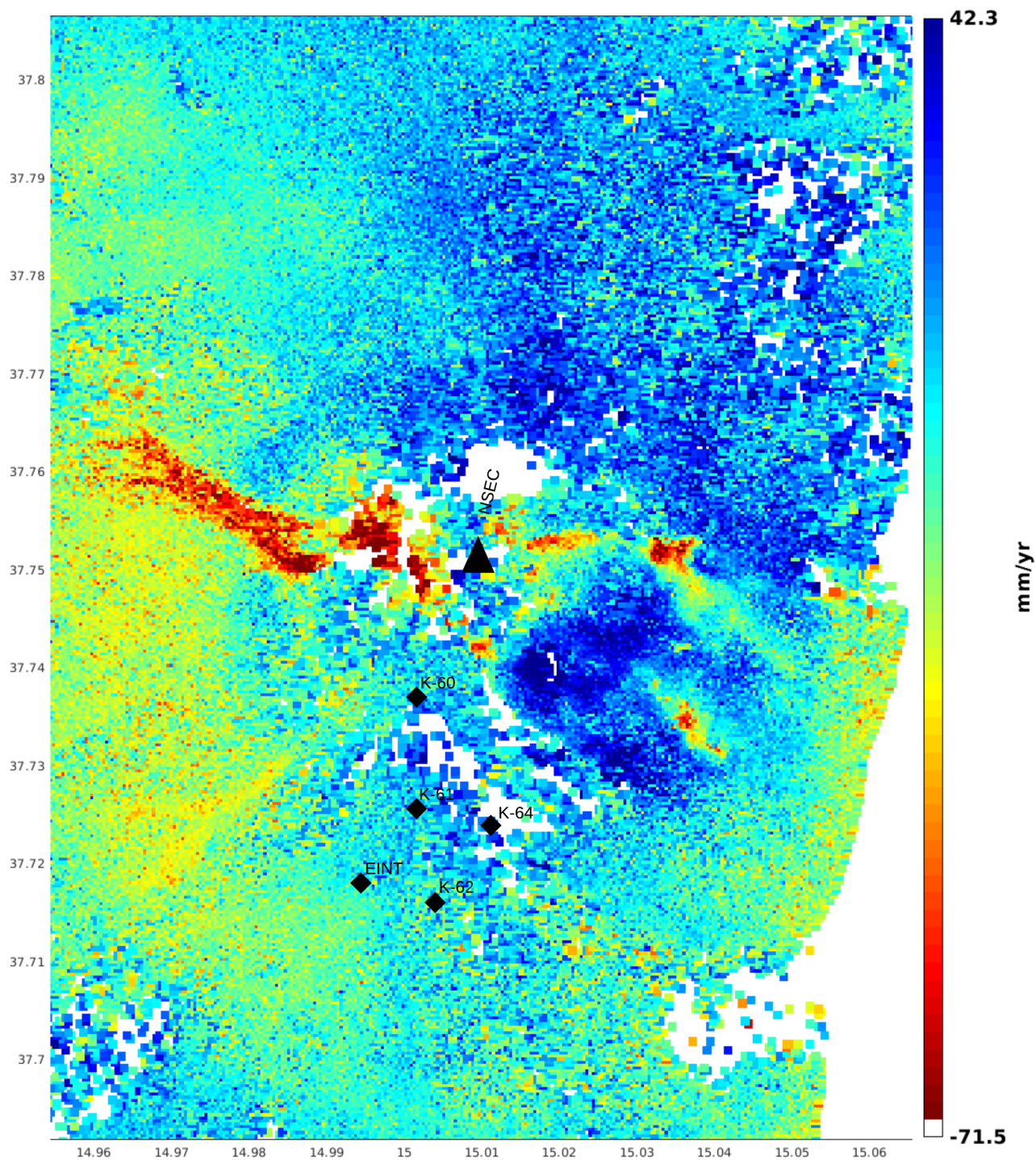


FIGURE 4.24 – Carte des déplacements globaux (de juillet 2016 à fin novembre 2016) calculée à partir des phases déroulées de l'orbite descendante, avec l'emplacement des Géocubes et du NSEC. EINT utilisé comme pixel de référence (point fixe par rapport auquel les déformations sont exprimées).

4.5 Bilan

À l'aide d'un réseau sans fil de récepteurs GPS mono-fréquence (Géocubes), nous avons construit un système de surveillance en temps réel d'une précision millimétrique adapté aux environnements difficiles et risqués, et pouvant être déployé rapidement en temps de crise. Nous avons effectué un levé sur le flanc Sud-Est de l'Etna pour étudier les déformations qui se sont produites entre le 12 juillet 2016 et le 10 juillet 2017 dans notre zone d'intérêt. Les séries chronologiques Géocube montrent qu'un premier événement est détecté la dernière semaine d'août 2016. Par la suite, un mouvement d'affaissement de 5mm est remarqué sur tous les Géocubes. KYLIA-60 (Torre del Filosofo) présente le taux de déplacement le plus élevé (60mm/an sur la composante verticale, 20mm/an à l'est et 20mm/an au Nord). Le deuxième événement particulier a été observé sur KYLIA-64 et KYLIA-61 et montre une accélération sur toute la composante du 8 mars 2017 au 22 avril 2017. Cette accélération a également été remarquée en utilisant uniquement des Géocubes sans la station permanente de l'EINT.

Ces événements ont été confirmés par l'application de la méthode StaMPS sur les satellites Sentinel-1A/B SAR. Les séries chronologiques obtenues à l'aide des satellites SAR ont été comparées à celles obtenues à l'aide du GPS. Les déplacements de bout en bout sont les mêmes. À ce stade de l'analyse, nous avons démontré, à l'aide d'un cas d'utilisation réel, comment le GPS et l'InSAR pouvaient être utilisés ensemble pour obtenir une vue beaucoup plus complète et précise des déplacements sur les volcans. Les données recueillies et traitées au cours de cette enquête contribuent à comprendre comment le flanc est de l'Etna se déplace entre juillet 2016 et juillet 2017.

D'autres instruments de mesures tel que les inclinomètres aurait pu être utiliser pour valider les signaux observés avec l'InSAR, malheureusement leurs données n'ont pas pu être rendues disponibles par nos partenaires de l'INGV.

En plus de cette complémentarité dans la mesure des déformations, l'InSAR peut être utilisé comme outil d'étude préalable à un déploiement GPS, en d'autres mots, un outil puissant pour choisir au préalable les zones les plus appropriés au déploiement d'un réseau GNSS de surveillance de déformations en temps réel. Dans notre cas, et comme le montre les cartes des déplacements globaux issues de l'InSAR (figures 4.23 et 4.24), le choix des zones de déploiement des Géocubes n'a malheureusement pas été optimal à cause des contraintes opérationnelles que présente un réseau de Géocubes (portée de la radio, etc.).

Les images de Sentinel-2 ont été complétées avec les photos prises par les touristes et

les photographes qui ont visité les parties supérieures de l'Etna entre Décembre 2016 et avril 2017. Ces données ont été très utiles pour estimer la couverture de neige de notre zone d'intérêt et pour choisir les images Sentinel-1A/B appropriées à inclure dans notre pile StaMPS.

Dans ce chapitre, nous avons démontré que les Géocubes pouvaient être utilisés comme un système de surveillance autonome et aussi comme un système de surveillance complémentaire à celui qui existe déjà. Les Géocubes peuvent fonctionner près des cratères : comme les capteurs sont dix fois moins chers que les récepteurs commerciaux à double fréquence, nous pouvons tolérer la perte de certains capteurs pendant les événements volcaniques.

Nous avons construit un réseau dense de points de repère normalisés qui pourrait être utilisé dans le cadre d'un travail futur, soit pour réinstaller un système de surveillance permanente en temps réel, soit pour effectuer des levés de routine.

4.6 Contribution de la thèse

Plusieurs contributions scientifiques et techniques ont été réalisés pour répondre à la problématique de la thèse. Nous en citons quelques-unes dans ce qui suit.

4.6.1 Contributions scientifiques

- Proposition, implémentation et validation d'une méthode pour s'affranchir de l'effet de la troposphère sur les réseaux de Géocubes présentant une grande dénivelée. La méthode proposée a été implémentée dans le moteur de calcul en temps réel et en post-traitement. Les tests effectués sur différentes configurations réseaux ont montré que cette amélioration permet non seulement de corriger une grande partie du biais troposphérique sur des réseaux présentant une grande dénivelée ($> 100\text{m}$), mais aussi sur des réseaux étendus (lignes de base de plusieurs kilomètres).
- Évaluation de l'apport d'un réseau de Géocubes à l'étude du volcanisme en champ proche à travers le déploiement d'un réseau constitué de quatre Géocubes sur le flanc Sud-Est du mont Etna. Ce déploiement a permis de suivre les déformations du volcan en temps réel et de valider les développements et les améliorations effectués durant cette thèse.
- La mission des Géocubes sur le volcan Etna a permis d'observer un certain nombre de signaux intéressants qui ont pu être partiellement confirmés avec les récepteurs GPS permanents disponibles sur place. Pour valider ces mouvements sub-centimétriques l'interférométrie radar à synthèse d'ouverture (InSAR) avec les satellites Sentinel-1A/B a été d'une importance cruciale. Une approche basée sur l'étude diffuseurs permanents (*Permanent Scatterer InSAR*) a permis de valider les tendances millimétriques et les signaux à hautes fréquences que nous observons avec les Géocubes en combinant les résultats PSI obtenus à partir des

orbites ascendantes et descendantes des satellites radar Sentinel-1A/B.

4.6.2 Contributions techniques

- Développement de la couche logicielle pour l'intégration des éphémérides radio-diffusées depuis les satellites dans les calculs en temps réel. Ces développements ont été validés en production aussi. Ils ont l'intérêt de rendre le système complètement indépendant d'internet et donc plus robuste et stable. Ce développement a permis aussi d'améliorer la précision des résultats obtenus en temps réel dans les époques de changement d'éphémérides par les satellites (moins d'outliers sur les courbes au moments de changements de données de navigation des satellites GPS).
- Le coordinateur des Géocubes s'est révélé être le maillon faible du système que nous avons déployé sur l'Etna. Les programmes existants ont été modifiés pour se passer de cet élément de manière à les rendre exploitables sur des serveurs déportés (cloud). Ces développements ont été validés et déployés en production. Le coordinateur des Géocubes peut maintenant être remplacé par un dispositif plus adapté aux endroits à risque (comme les volcans).
- Développement de plusieurs couches logicielles pour rendre le système interoperable avec les systèmes existants (pour pouvoir intégrer des stations permanentes).
- Parfaire les solutions logicielles existantes à travers la correction de plusieurs bogues qui entravaient le fonctionnement normal du système Géocube.
- Adaptation de la suite logicielle StaMPS [2] aux interférogrammes issus des images RADAR des satellites Sentinel-1A/B pour pouvoir appliquer la technique PSI pour le suivi de déformations du mont Etna avec les images des satellites Sentinel-1A/B. En effet, au moment où les lignes sont rédigées, la dernière version de la suite StaMPS qui date de 2013 ne supporte pas les données des satellites Sentinel-1A/B.

4.7 Perspectives

4.7.1 Intégration d'autres capteurs dans le Géocube

L'importance des données issues d'autres types de capteurs s'est fait ressentir spécialement pour valider les mouvements de hautes fréquences que nous avons remarqués

sur les séries temporelles des Géocubes durant leur période de déploiement sur l'Etna. Malheureusement ces données n'ont pas pu être rendues disponibles par nos partenaires de l'INGV-OE. Nous pouvons alors réfléchir à intégrer, dans les futures versions du Géocube, d'autres types de capteurs que le GPS adaptés à un contexte volcanique. Les données de ces nouveaux capteurs pourront alors compléter les données GPS, et vice versa. Par son architecture modulaire, le Géocube est déjà construit de telle sorte à supporter des couches de capteurs et son architecture réseau a été conçue de manière à supporter les flux des données de différents types. L'intégration d'autres types de capteurs (géophone, etc.) ne peut qu'être bénéfique et apporter une vision plus complète des processus volcaniques.

4.7.2 Modernisation des signaux GPS

La modernisation des signaux GPS (ajout d'un code civil sur l'onde L2 et l'introduction des nouveaux signaux civils L3 et L5 [28]) va rendre possible l'intégration dans le Géocube d'une puce GPS multi-fréquences. Cela ouvrira de nouvelles possibilités pour améliorer la précision des résultats spécialement pour s'affranchir du biais ionosphérique et diminuer l'effet des multitrajets [41]. D'ailleurs le constructeur des puces GPS UBlox (constructeur de la puce utilisée actuellement dans le Géocube) a déjà annoncé que les premières puces tri-fréquences GPS, de faible coût de revient et multi-constellations entreront en phase de commercialisation courant 2018.

4.7.3 Utilisation de l'InSAR avec le Géocube

Nous avons montré dans ce rapport que l'InSAR et le GPS peuvent être complémentaires dans la mesure de déformations du sol puisque le premier apporte une bonne résolution spatiale de l'étendue des déformations et le deuxième une bonne résolution temporelle pour la datation des mouvements. Nous avons ensuite souligné que l'InSAR peut être utilisé comme outil d'étude préalable à un déploiement GPS pour choisir les zones à surveiller. Cette possibilité mérite d'être vérifiée et validée au cours de futurs déploiements, que cela soit dans un contexte volcanique ou dans d'autres types de chantiers.

4.7.4 Extension de la taille des réseaux de Géocubes

La principale limitation de l'architecture temps réel actuelle est le protocole radio qui limite considérablement les possibilités de déploiement à cause de sa courte portée

(de quelques centaines de mètre à 1 km). Le déploiement des Géocubes de l'Etna aurait pu être plus rapide et on aurait pu couvrir de plus larges surfaces si la portée de la radio l'avait permis. Une version du Géocube qui utilise le réseau 3G pour centraliser les informations vers un coordinateur déporté est en cours de validation. Néanmoins, et si l'on veut profiter pleinement de cette amélioration technique pour étendre la taille des réseaux de Géocubes à plusieurs dizaines (voire centaines) de kilomètres il est nécessaire d'accompagner ces développements par l'amélioration de l'algorithme de calcul pour intégrer l'utilisation des éphémérides précises au lieu des radio-diffusées utilisées actuellement, et d'une stratégie pour estimer la partie non différenciée de l'ionosphère.

**A
N
N
E
X
E**



LES INTERFÉROGRAMMES DE L'ÉTNA

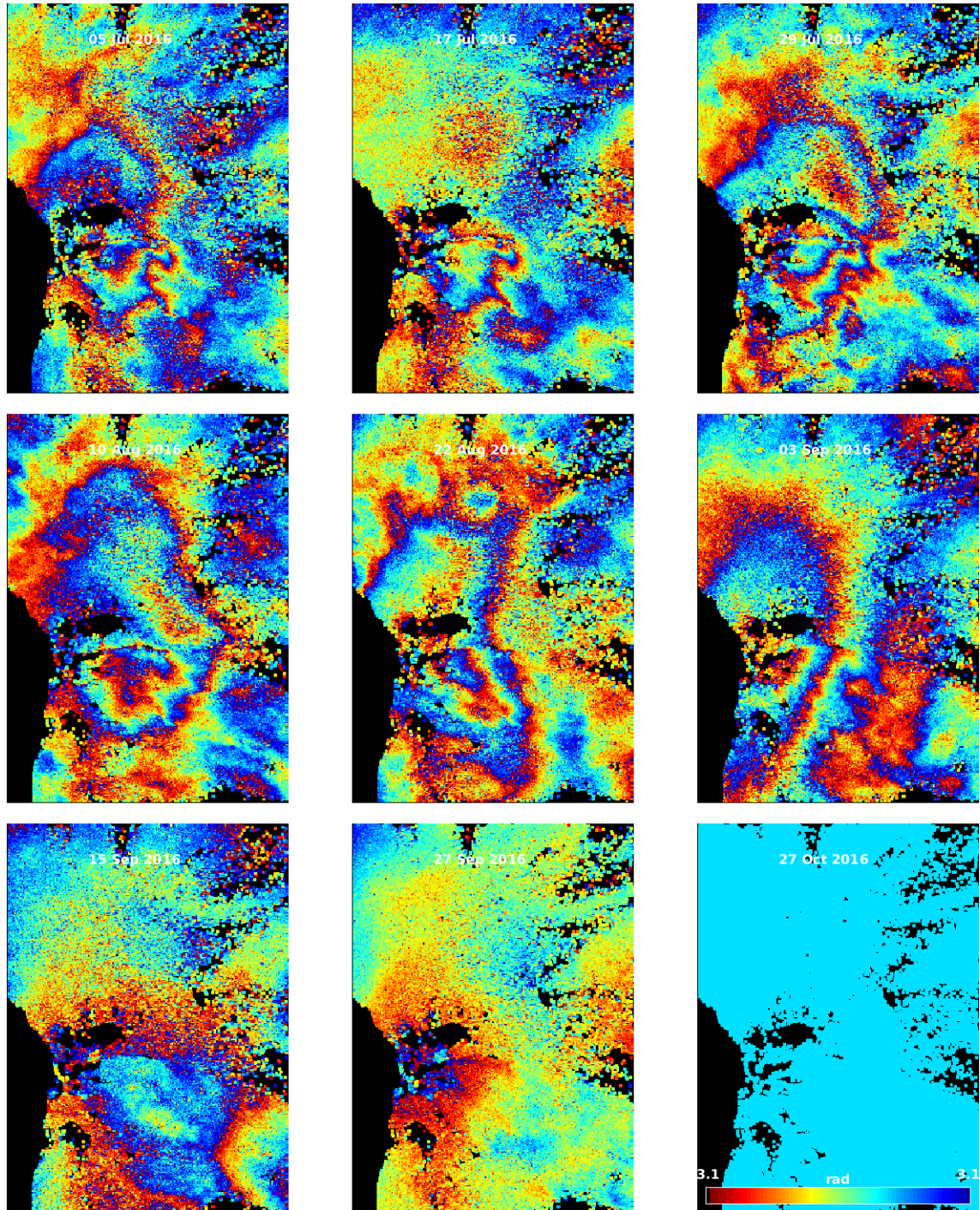


FIGURE A.1 – Les interférogrammes de l'orbite ascendante, partie 1

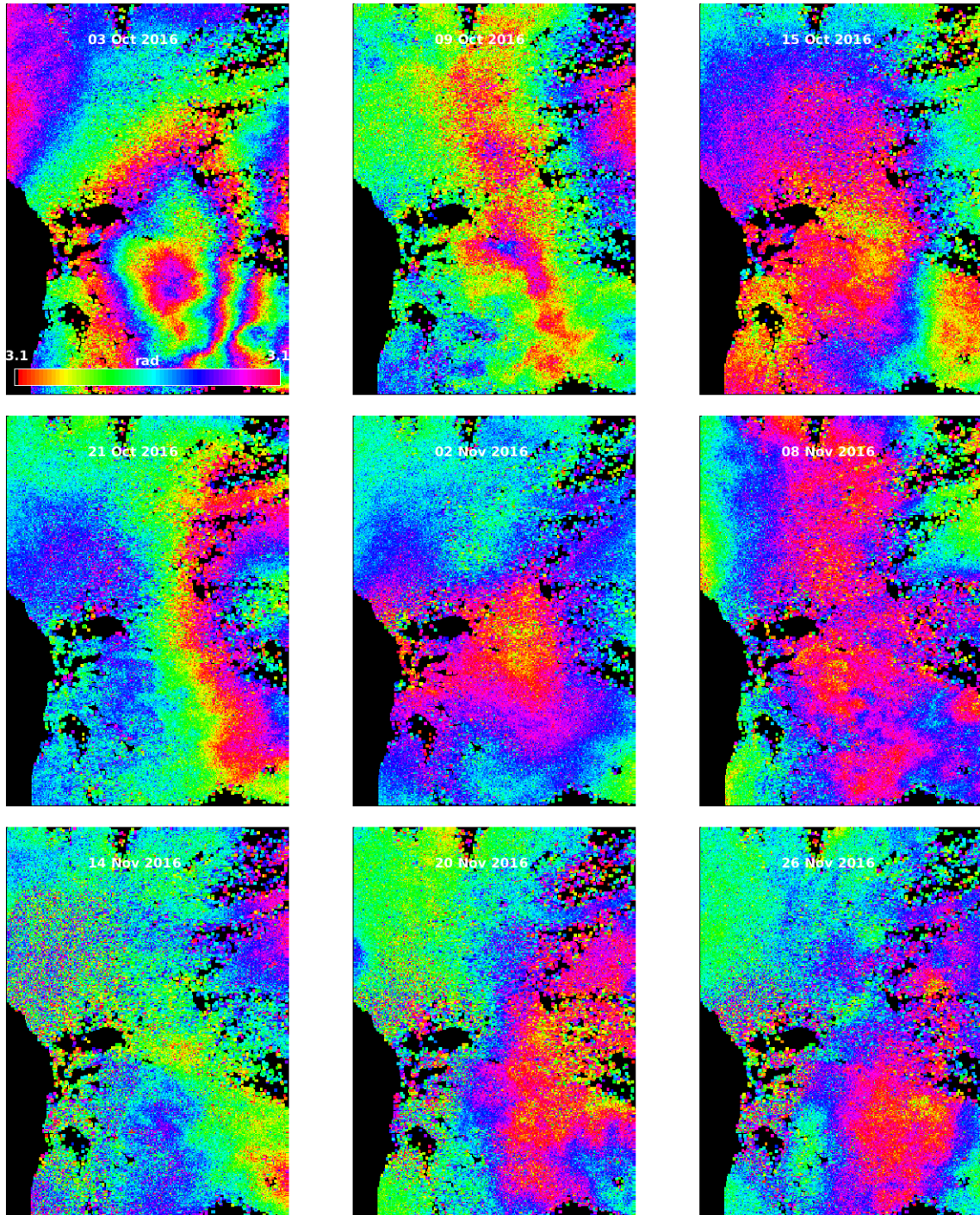


FIGURE A.2 – Les interférogammes de l'orbite ascendante, partie 2

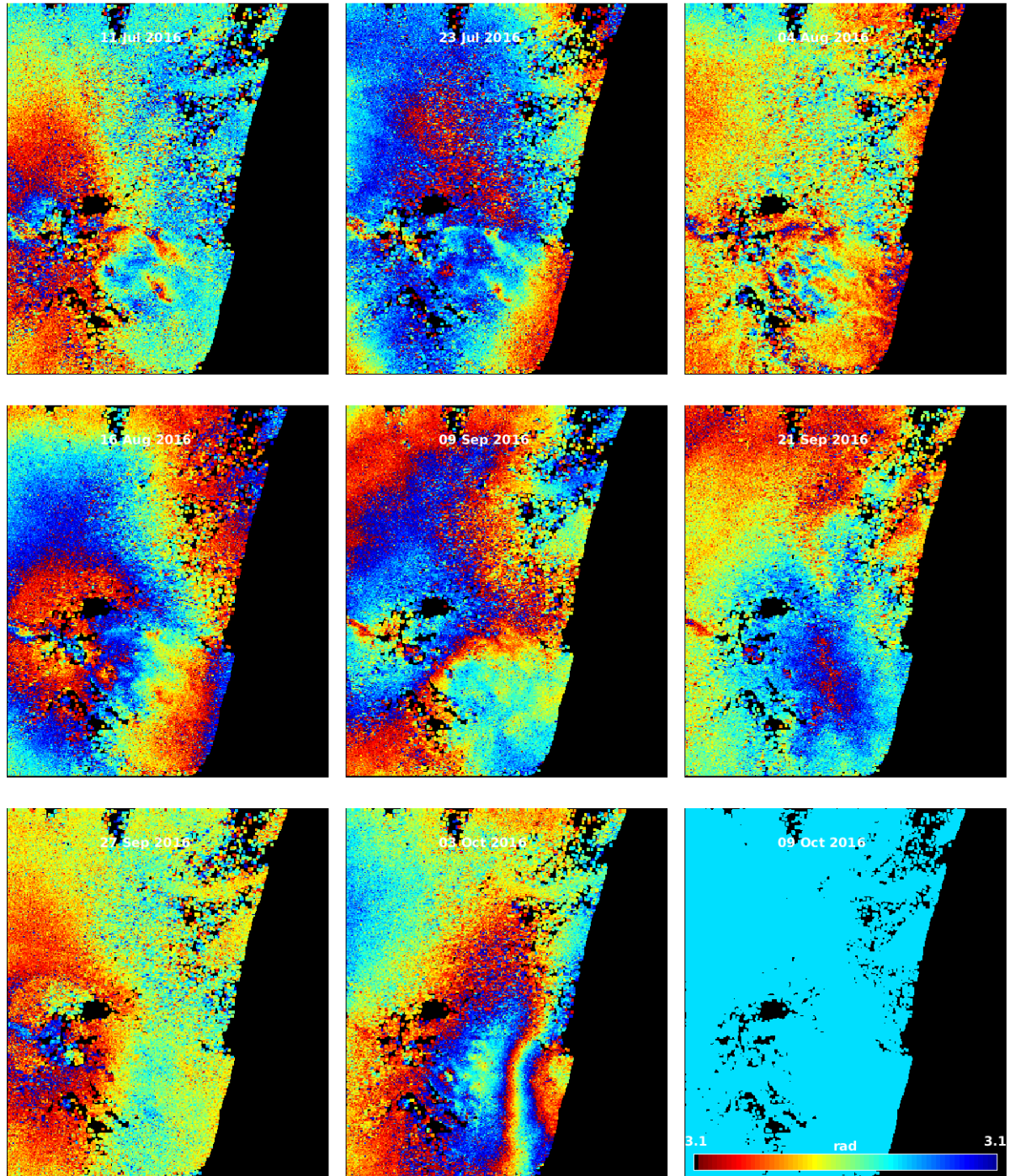


FIGURE A.3 – Les interférogrammes de l'orbite descendante, partie 1

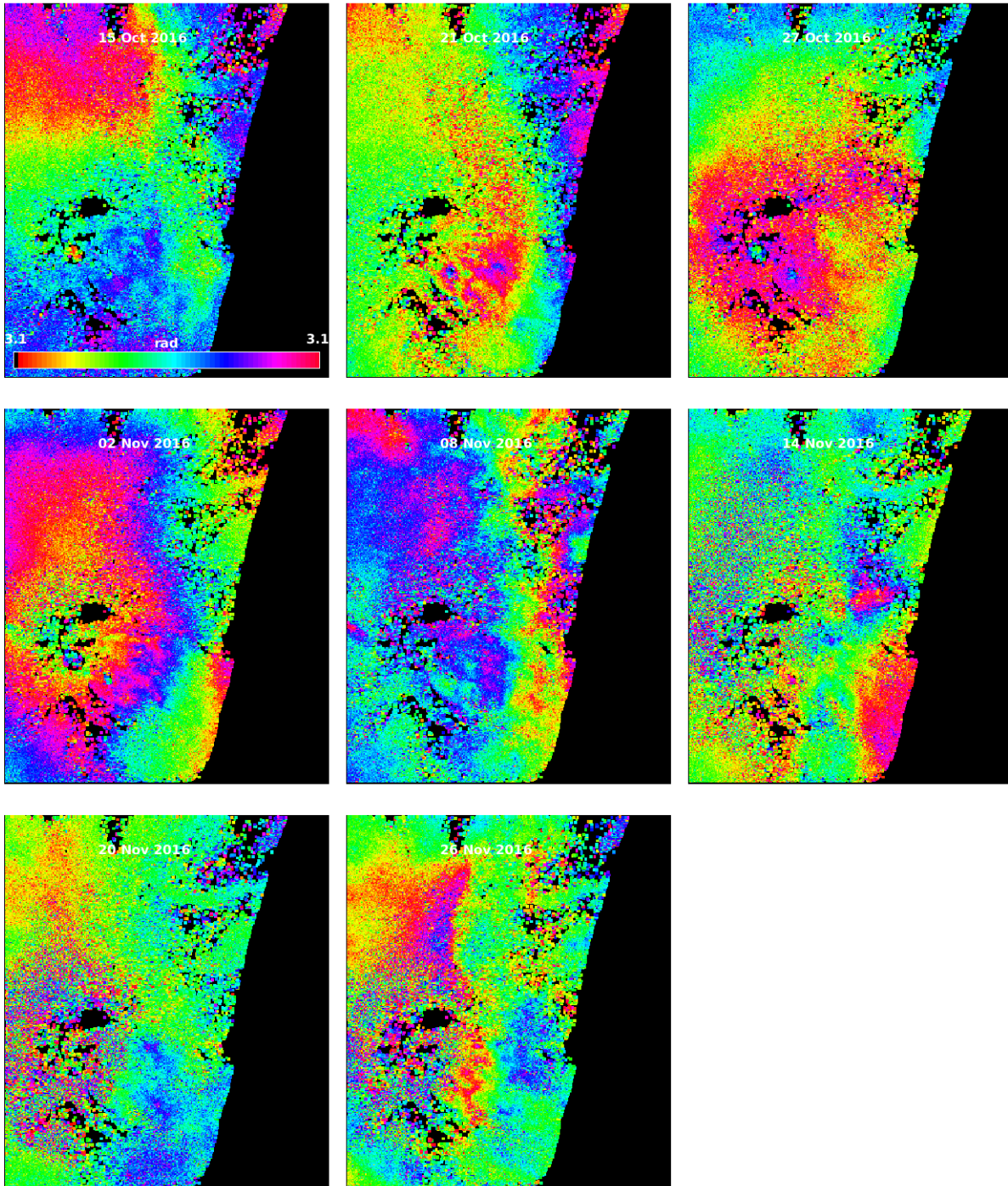


FIGURE A.4 – Les interférogrammes de l'orbite descendante, partie 2



LES AMÉLIORATIONS TECHNIQUES APPORTÉES AU SYSTÈME GÉOCUBE

B.1 Architecture réseau

En temps de crise, un système de surveillance efficace doit permettre un contrôle à distance sécurisé des capteurs pour pouvoir les configurer (modification de la fréquence d'acquisition, ajustement des phases de sommeil pour optimiser la consommation énergétique, etc.), mais aussi pour avoir accès en temps réel aux données brutes et aux résultats de traitement. Pour répondre à cette problématique fonctionnelle, nous avons conçu une architecture où le coordinateur traite les données brutes reçues depuis les Géocubes à l'aide des éphémérides diffusées en temps réel, stocke les résultats dans une base de données locale et stocke les données brutes sur un serveur FTP local pour post-traitement. Comme le montre la figure B.1, le coordinateur est connecté à un VPN (*Virtual Private Network*) via Internet. Il a été déployé spécialement pour cette mission. Seuls les utilisateurs autorisés peuvent se connecter aux autres nœuds du VPN. Grâce à cette architecture, les utilisateurs autorisés peuvent agir à distance et en toute sécurité sur le coordinateur et les Géocubes. Le coordinateur effectue également une sauvegarde quotidienne des données brutes et des résultats sur des serveurs distants fournis par l'ENS et Kyla.

Cette couche vient s'ajouter au protocole de maillage radio à 2.4Ghz qui permet aux Géocubes de centraliser les données brutes vers le coordinateur. Si un Géocube

ANNEXE B. LES AMÉLIORATIONS TECHNIQUES APPORTÉES AU SYSTÈME GÉOCUBE

est éloigné du coordinateur et qu'aucune connexion radio directe n'est possible, il peut utiliser le Géocube le plus proche comme relais pour communiquer avec le coordinateur.

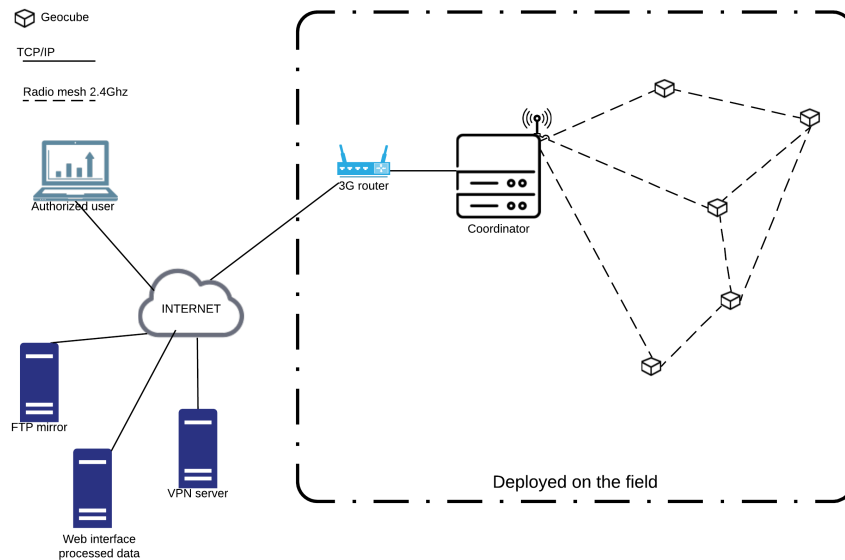


FIGURE B.1 – L'architecture réseau conçue pour la mission de l'Etna pour garantir la livraison des données en temps réel et l'accès à distance aux capteurs.

B.2 Programme de calcul

B.2.1 Éphémérides

Un des points les plus critiques qui font que le système Géocube est dépendant d'internet est la nécessité de récupérer les éphémérides naviguées depuis le serveur de l'IGN. Durant cette thèse, nous avons amélioré ce point : cela consiste à récupérer les éphémérides directement depuis les messages de navigation brutes des satellites. Ces messages sont transmis par la puce GPS au microcontrôleur du Géocube qui les transmet par la radio au coordinateur qui se charge ensuite de calculer les positions des satellites à partir des éléments képlériens. Cette opération est effectuée uniquement par le Géocube pivot, puisque le message de navigation d'un satellite est le même pour tous les Géocubes. Cette opération n'est nécessaire pour un satellite qu'une fois pour une période de 2 heures, ce qui correspond à la fréquence de mise à jour de ce message. Cette amélioration va permettre au système Géocube d'opérer dans des environnements où l'accès au réseau internet n'est pas garanti ou n'est pas stable. Elle permet aussi de

devenir complètement indépendant des serveurs tiers des centres de calcul pour lesquels nous ne maîtrisons pas la disponibilité. Elle permet enfin d'améliorer la précision des calculs. En effet, les fichiers d'éphémérides radiodiffusées ne sont disponibles sur les serveurs tiers qu'à l'heure $H+1$. Or la validité des éléments képlériens dans un message de navigation n'est garantie que dans un intervalle de $[H - 1, H + 1]$. Par exemple, les messages képlériens de 15h sont donc radiodiffusés par les satellites de 14h à 16h. Donc, à 14h30 avec l'ancienne version du logiciel les éphémérides datant de 13h étaient utilisées, alors que maintenant ce sont celles de 15h, *a priori* plus justes.

B.2.2 Interopérabilité avec les autres récepteurs du commerce

L'interopérabilité avec les récepteurs du commerce a été rendue possible à travers le développement d'un traducteur de fichiers RINEX en format natif du Géocube (UBX). Il a été développé durant cette thèse et a servi à intégrer les stations permanentes de l'INGV dans un calcul avec G3GPS en post-traitement. Les fichiers en format natif issus des Géocubes peuvent, quand à eux, être traduits en format RINEX pour post-traitement avec d'autres programmes de calcul, avec un logiciel tel que *TEQC* [22].

B.2.3 Enrichissement de l'offre logicielle

L'enrichissement de l'offre logicielle autour du Géocube pour répondre aux problématiques de récupération de données, stockage, réplication, etc. Ces améliorations et développements techniques sont aujourd'hui utilisés en production et accompagnent la suite logicielle du système Géocube dans d'autres déploiements à travers le monde (ponts, glissements de terrain, etc.).

B.2.4 Débogage des programmes

Une partie du travail technique effectué lors de cette thèse a été axé sur le débogage du programme de calcul existant pour le rendre opérationnel aussi bien en temps-réel qu'en post-traitement.

BIBLIOGRAPHIE

- [1]
- [2] H. A., S. P., AND Z. H., *Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to volcán alcedo, galápagos*, Journal of Geophysical Research : Solid Earth, 112.
- [3] H. T. A., M. T. I., M. M. H., F. M. A., S. W. M., K. R. W., P. D. A., P. C. M., S. MARCELO, AND W. LEI, *Plate boundary observatory and related networks : Gps data analysis methods and geodetic products*, Reviews of Geophysics, 54, pp. 759–808.
- [4] E. ANDERSSON, P. BAUER, A. BELJAARS, F. CHEVALLIER, E. HÓLM, M. JANISKOVÁ, P. KÅLLBERG, G. KELLY, P. LOPEZ, A. MCNALLY, E. MOREAU, A. J. SIMMONS, J.-N. THÉPAUT, AND A. M. TOMPKINS, *Assimilation and modeling of the atmospheric hydrological cycle in the ecmwf forecasting system*, Bulletin of the American Meteorological Society, 86 (2005), pp. 387–402.
- [5] H. ANDREW, Z. HOWARD, S. PAUL, AND K. BERT, *A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using insar persistent scatterers*, Geophysical Research Letters, 31.
- [6] R. AZZARO, A. BONFORTE, S. BRANCA, AND F. GUGLIELMINO, *Geometry and kinematics of the fault systems controlling the unstable flank of etna volcano (sicily)*, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 251 (2013), pp. 5 – 15. Flank instability at Mt. Etna.
- [7] Y. E. BAR-SEVER, P. M. KROGER, AND J. A. BORJESSON, *Estimating horizontal gradients of tropospheric path delay with a single gps receiver*, Journal of Geophysical Research : Solid Earth, 103, pp. 5019–5035.
- [8] D. BEKAERT, A. HOOPER, AND T. WRIGHT, *A spatially-variable power-law tropospheric correction technique for InSAR data*, 120 (2015).

- [9] D. BEKAERT, R. WALTERS, T. WRIGHT, A. HOOPER, AND D. PARKER, *Statistical comparison of insar tropospheric correction techniques*, *Remote Sensing of Environment*, 170 (2015), pp. 40 – 47.
- [10] E. D. BENI, B. BEHNCKE, S. BRANCA, I. NICOLOSI, R. CARLUCCIO, F. D. CARRACCILO, AND M. CHIAPPINI, *The continuing story of etna’s new southeast crater (2012–2014) : Evolution and volume calculations based on field surveys and aerophotogrammetry*, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 303 (2015), pp. 175 – 186.
- [11] L. BENOÎT, *Precise and real-time GPS positioning in the context of wireless sensor networks : application to small extend geophysical structures monitoring*, theses, Ecole normale supérieure - ENS PARIS, Oct. 2014.
- [12] L. BENOIT, P. BRIOLE, O. MARTIN, C. THOM, J.-P. MALET, AND P. ULRICH, *Monitoring landslide displacements with the geocube wireless network of low-cost gps*, *Engineering Geology*, 195 (2015), pp. 111 – 121.
- [13] L. BENOIT, A. DEHECQ, H.-T. PHAM, F. VERNIER, E. TROUVÉ, L. MOREAU, O. MARTIN, C. THOM, M. PIERROT-DESEILLIGNY, P. BRIOLE, AND ET AL., *Multi-method monitoring of glacier d’argentière dynamics*, *Annals of Glaciology*, 56 (2015), p. 118–128.
- [14] BERTHIER, ETIENNE, *Dynamique et bilan de masse des glaciers de montagne (alpes, islande, himalaya). contribution de l’imagerie satellitaire*, *La Houille Blanche*, (2007), pp. 116–121.
- [15] M. BISSON, C. SPINETTI, M. NERI, AND A. BONFORTE, *Mt. etna volcano high-resolution topography : airborne lidar modelling validated by gps data*, *International Journal of Digital Earth*, 9 (2016), pp. 710–732.
- [16] H. D. BLACK AND A. EISNER, *Correcting satellite doppler data for tropospheric effects*, *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 89, pp. 2616–2626.
- [17] J. BOEHM, A. NIELL, P. TREGONING, AND H. SCHUH, *Global mapping function (gmf) : A new empirical mapping function based on numerical weather model data*, *Geophysical Research Letters*, 33.
- [18] A. BONFORTE, S. FAGONE, C. GIARDINA, S. GENOVESE, G. AIESI, F. CALVAGNA, M. CANTARERO, O. CONSOLI, S. CONSOLI, F. GUGLIELMINO, B. PUGLISI,

G. PUGLISI, AND B. SARACENO, *Global positioning system survey data for active seismic and volcanic areas of eastern sicily, 1994 to 2013*, Scientific Data, 3 (2016), pp. 160062 EP –.

Data Descriptor.

[19] L. R. COLLINS J.P, *Precise point positioning for the efficient and robust analysis of gps data from large networks*, Technical report, U.S. Army Corps of Engineers Topographic Engineering Center, (1999), pp. 1–40.

[20] M. CROSETTO, O. MONSERRAT, M. CUEVAS-GONZÁLEZ, N. DEVANTHÉRY, AND B. CRIPPA, *Persistent scatterer interferometry : A review*, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 115 (2016), pp. 78 – 89.

Theme issue 'State-of-the-art in photogrammetry, remote sensing and spatial information science'.

[21] M. DAAKIR, M. PIERROT-DESEILLIGNY, P. BOSSER, F. PICHARD, C. THOM, Y. RABOT, AND O. MARTIN, *Lightweight uav with on-board photogrammetry and single-frequency gps positioning for metrology applications*, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 127 (2017), pp. 115 – 126.

Geospatial Week 2015.

[22] L. H. ESTEY AND C. M. MEERTENS, *Teqc : The multi-purpose toolkit for gps / glonass data*, GPS Solutions, 3 (1999), pp. 42–49.

[23] A. FERRETTI, C. PRATI, AND F. ROCCA, *Permanent scatterers in sar interferometry*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39 (2001), pp. 8–20.

[24] M. FRANCESCO, P. M. TERESA, F. MASSIMILIANO, I. ILARIA, T. SIMONE, AND B. ENZO, *Morphology of basaltic lava channels during the mt. etna september 2004 eruption from airborne laser altimeter data*, Geophysical Research Letters, 32.

[25] J. GRIFFITHS AND J. R. RAY, *On the precision and accuracy of igs orbits*, Journal of Geodesy, 83 (2009), pp. 277–287.

[26] T. GUNERIUSSEN, K. A. HOGDA, H. JOHNSEN, AND I. LAUKNES, *Insar for estimation of changes in snow water equivalent of dry snow*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39 (2001), pp. 2101–2108.

- [27] T. HADAS, F. N. TEFERLE, K. KAZMIERSKI, P. HORDYNIEC, AND J. BOSY, *Optimum stochastic modeling for gnss tropospheric delay estimation in real-time*, GPS Solutions, 21 (2017), pp. 1069–1081.
- [28] W. HAROLD, *Gps modernization and interoperability*, National Coordination Office United States of America.
- [29] D. C. HOGG, F. O. GUIRAUD, J. B. SNIDER, M. T. DECKER, AND E. R. WESTWATER, *A steerable dual-channel microwave radiometer for measurement of water vapor and liquid in the troposphere*, Journal of Climate and Applied Meteorology, 22 (1983), pp. 789–806.
- [30] J. A. KLOBUCHAR, *Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency gps users*, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, AES-23 (1987), pp. 325–331.
- [31] M. A. LASRI. AND C. THOM, *Time series of the unavco-pbo gnss network on saint-helens volcano. from august 1st 2011 to august, 31th 2011. using the g3gps software*, (2018).
- [32] S.-W. LEE, S.-H. YUN, D. H. KIM, D. LEE, Y. J. LEE, AND B. E. SCHUTZ, *Real-time volcano monitoring using gnss single-frequency receivers*, Journal of Geophysical Research : Solid Earth, 120, pp. 8551–8569.
- [33] B. LIONEL, B. PIERRE, M. OLIVIER, AND T. CHRISTIAN, *jag*, vol. 8, 2018 2014, ch. Real-time deformation monitoring by a wireless network of low-cost GPS, p. 119.
- 2.
- [34] MAKABAYI AND HUNEGNAW, *Analysis of the accuracy of gmf, nmf, and vmf1 mapping functions with gpt 50 a priori zenith constraint in tropospheric delay modeling*, (2015).
- [35] D. MASSONNET, P. BRIOLE, AND A. ARNAUD, *Deflation of mount etna monitored by spaceborne radar interferometry*, Nature, 375 (1995), pp. 567 EP –.
- [36] A. E. NIELL, *Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths*, Journal of Geophysical Research : Solid Earth, 101, pp. 3227–3246.

- [37] B. P, *Développement et validation d'une méthode de calcul gps intégrant des mesures de profils de vapeur d'eau en visée multi-angulaire pour l'altimétrie de haute précision*, Thèse de doctorat, (2008).
- [38] G. PUGLISI, M. ALOISI, A. BONACCORSO, A. BONFORTE, P. BRIOLE, V. BRUNO, F. CALVAGNA, O. CAMPISI, F. CANNAVÒ, M. CANTARERO, O. CONSOLI, S. CONSOLI, S. GAMBINO, F. GUGLIELMINO, M. MATTIA, G. NUNNARI, M. PALANO, D. PATANÈ, D. PELLEGRINO, AND R. VELARDITA, *25 years of gps measurements at mt. etna forecasting volcanic activity -reading and translating the messages of nature for society*, (2013).
- [39] M. ROGER, *Gnss velocity field in and around sicily - inshights on the regional tectonic context*, Msc thesis report, (2016).
- [40] J. SAASTAMOINEN, *Atmospheric Correction for the Troposphere and Stratosphere in Radio Ranging Satellites*, American Geophysical Union (AGU), 2013, pp. 247–251.
- [41] P. R. R. STRODE AND P. D. GROVES, *Gnss multipath detection using three-frequency signal-to-noise measurements*, GPS Solutions, 20 (2016), pp. 399–412.
- [42] E. TROUVE, I. PETILLOT, P. BOLON, M. GAY, L. BOMBRUN, J. NICOLAS, F. TUPIN, A. WALPERSDORF, N. COTTE, I. HAJNSEK, AND M. KELLER, *Monitoring alpine glacier activity by a combined use of terrasar-x images and continuous gps measurements - the argentièrre glacier experiment*, in 7th European Conference on Synthetic Aperture Radar, June 2008, pp. 1–4.
- [43] WERNER, GURTNER, *Rinex : The receiver independent exchange format version 2.11*, Astronomical Institute, University of Berne, (2007).
- [44] J. F. ZUMBERGE, M. B. HEFLIN, D. C. JEFFERSON, M. M. WATKINS, AND F. H. WEBB, *Precise point positioning for the efficient and robust analysis of gps data from large networks*, Journal of Geophysical Research : Solid Earth, 102, pp. 5005–5017.

Résumé

Le système Géocube est un réseau de capteurs GPS conçu et développé par le Laboratoire d'Opto-Électronique de Métrologie et d'Instrumentation (LOEMI) de l'Institut National de l'Information Géographique et Forestière (IGN) et maintenu par le même laboratoire et l'entreprise Ophelia-Sensors qui s'occupe de son industrialisation. Il a comme objectif de mesurer les déformations du sol avec une précision millimétrique. Ce réseau de capteurs a la particularité d'être à la fois très peu énergivore, d'un faible coût de revient, simple d'installation et d'utilisation. Il est donc bien adapté à l'usage dans un environnement difficile, comme les volcans. Ce système a déjà été testé avec succès lors d'une précédente thèse sur le glacier d'Argentière et sur un glissement de terrain proche de Super-Sauze en France.

La première partie de cette thèse porte sur l'optimisation du système de calcul du Géocube pour l'adapter à des réseaux de tailles plus importantes horizontalement et verticalement en vue de son utilisation dans un contexte volcanique. Cela passe, d'abord, par l'intégration d'une stratégie pour l'estimation du biais troposphérique dans le filtre de Kalman qui constitue le cœur du logiciel de calcul du Géocube. Cette amélioration est ensuite validée en utilisant les données de quelques réseaux GNSS permanents nationaux et internationaux. La deuxième partie consiste à étudier l'apport d'un réseau dense de Géocubes à l'étude du volcanisme à travers une expérience conduite sur le flanc sud-est de l'Etna, où cinq Géocubes ont été déployés entre le 12 Juillet 2016 et le 10 Juillet 2017. Les résultats obtenus et les enseignements tirés de cette expérimentation sont discutés et analysés. Enfin, nous validons les résultats obtenus avec les Géocubes en appliquant une technique PSI (Persistent Scatterer InSAR) sur des interférogrammes RADAR calculés à partir des données des satellites Sentinel-1A/B et qui couvrent la période de déploiement des Géocubes sur l'Etna. Ces deux méthodes (GPS et RADAR) se sont avérées complémentaires puisque le RADAR apporte la densité spatiale des mesures et le système Géocube la précision et la continuité temporelle.

Mots Clés

GNSS, InSAR, Etna, mesure de déformations

Abstract

The Geocube system is a network of wireless GPS sensors designed and developed by the Laboratory of Opto-Electronics, Metrology and Instrumentation (LOEMI) of the National Institute of Geographical and Forest Information (IGN) and maintained by the same laboratory and Ophelia-Sensors, the company responsible for its industrialization. Its purpose is to measure ground deformations with millimetre accuracy. This sensor network has the particularity of being very low in energy consumption, low cost, easy to install and easy to use. It is suited for use in harsh environments, such as volcanoes. This system has already been successfully tested in a previous works on the Argentière glacier and a Super-Sauze landslide in France.

The first part of this thesis deals with the optimization of the Geocube system for larger networks, horizontally and vertically, in order to use it in a volcanic context. First, a new strategy to estimate the tropospheric bias has been implemented into the Kalman filter (the heart of the Geocube processing software) in real time and in post-processing. This improvement is then validated using data from some national and international permanent GNSS networks. The second part consists in studying the contribution of a dense Geocubes network to the study of volcanism through an experiment conducted on the southeastern flank of Etna, where five Geocubes were deployed between July, 2016 and July, 2017. The results obtained from this experiment are discussed and analysed. Finally, the results obtained with Geocubes are validated by applying a PSI (Persistent Scatterer InSAR) technique on RADAR interferograms calculated from Sentinel-1A/B satellite data covering the period of deployment of the Geocubes on Etna. These two methods (GPS and RADAR) turned out to be complementary since RADAR provides the spatial density of measurements and the Geocube system provides accuracy and temporal continuity.

Keywords

GNSS, InSAR, Etna, Deformation monitoring