Positionnement GPS précis et en temps-réel dans le contexte de réseaux de capteurs sans fil type Geocube : application à des objets géophysiques de taille kilométrique

Lionel Benoît

▶ **To cite this version:**

Lionel Benoît. Positionnement GPS précis et en temps-réel dans le contexte de réseaux de capteurs sans fil type Geocube : application à des objets géophysiques de taille kilométrique. Sciences de la Terre. Ecole normale supérieure - ENS PARIS, 2014. Français. NNT : 2014ENSU0014 . tel-01302853

HAL Id: tel-01302853

https://theses.hal.science/tel-01302853

Submitted on 15 Apr 2016

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.

École doctorale
des sciences de la Terre

Thèse de doctorat

En vue de l'obtention du grade de :
Docteur de l'École Normale Supérieure

École doctorale des Sciences de la Terre - ED109
Spécialité : Sciences de la Terre

Présentée et soutenue le 23 octobre 2014 par :
Lionel Benoît

Positionnement GPS précis et en temps-réel dans le contexte de réseaux de capteurs sans fil type Geocube

Application à des objets géophysiques de taille kilométrique

Composition du jury :

M. Michel Kasser	Rapporteur
M. Giuseppe Puglisi	Rapporteur
M. François Beauducel	Examinateur
M. Emmanuel Trouvé	Examinateur
M. Pierre Briole	Directeur de thèse
M. Christian Thom	Co-directeur de thèse

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Christian Thom pour m'avoir proposé cette thèse, pour son encadrement mêlant une grande disponibilité et de précieux conseils, et pour son soutien tout au long de ces trois années.

Je tiens ensuite à remercier Pierre Briole pour la direction de cette thèse, et pour m'avoir incité et aidé à approfondir la partie traitant de la géophysique.

Merci également aux membres du jury qui ont accepté de se pencher sur mon travail, ainsi qu'aux relecteurs de ce manuscrit qui ont grandement contribué à l'amélioration de son contenu.

Mes remerciements vont ensuite à l'ensemble des membres du LOEMI qui ont largement participé au bon déroulement de cette thèse, que ce soit au travers de leur aide et de leurs conseils, par leurs encouragements, ou en contribuant à la bonne ambiance du laboratoire. Merci à Olivier pour tout le travail fourni pour porter le projet Geocube, pour ses innombrables coups de main et explications au sujet des petites boîtes blanches, ainsi que pour son aide lors de l'organisation des tests sur le terrain. Merci à Christophe pour son aide précieuse dans la résolution de mes différents problèmes informatiques. Merci à Jean-Philippe et à Yann pour leur bonne humeur, leurs encouragements ainsi que leur aide à la réalisation des tests à Super-Sauze et à Argentière. Et encore une fois merci à Christian pour l'encadrement quotidien de ma thèse.
Merci également aux personnes "de passage" au 4ème étage du bâtiment K : Leslie, Olivier, Marc, Mehdi et Emmanuel, pour avoir contribué à l'ambiance du LOEMI. Un clin d'œil particulier à Manu pour m'avoir fait connaître le LOEMI et l'existence de cette thèse.

Je souhaite aussi remercier toutes les personnes hors LOEMI qui ont travaillé (et travaillent encore) au développement du Geocube, en particulier les membres du SGN et du SIDT ainsi que Frédéric.

Un grand merci également à toutes les personnes qui m'ont accompagné et aidé pour la manip' à Argentière : Luc, Emmanuel T, Flavien, Jean-Louis, Blaise, Laurent, François, Amaury, Ha-Thai, Haixing, Emmanuel B, Olivier et Denis. Ce fut l'occasion de déployer un réseau de Geocubes sur un site magnifique mais exigeant, et votre aide a largement contribué au succès de l'expérience.

En plus de la thématique Geocubes, cette thèse fut aussi pour moi l'occasion d'enseigner un peu la géomatique, et en particulier la géodésie, dans le cadre d'un monitorat à l'ENSG. Je tiens donc à remercier le DPTS ainsi que les personnes avec qui j'ai eu l'occasion d'enseigner, en particulier Daphné et les membres du groupe d'instruction de Forcalquier, pour cette excellente première expérience de prof'. Merci également à tous les élèves que j'ai croisé de m'avoir écouté !

En dehors du travail, ces trois années ont été agrémentées par de nombreux week-ends, bars et autres moments conviviaux. Un grand merci à tous les IT07, IT08, IT09 et assimilé(e)s pour toutes ces occasions de me changer les idées... ou de continuer à parler boulot.

Enfin, merci aux membres de ma famille pour leur soutien sans faille et tous leurs encouragements, et merci à Céline de m'avoir supporté dans les deux sens du terme.

Résumé

Les réseaux de capteurs permettent une surveillance multi-paramètres de zones d'étendue limitée grâce à la coopération d'un ensemble de récepteurs déployés in-situ qui gèrent l'acquisition, le traitement et le transfert de données. Le Laboratoire d'Opto-Electronique, Métrologie et Instrumentation de l'Institut National de l'Information Géographique et Forestière (LOEMI-IGN) a mis au point le Geocube afin de coupler le concept de réseaux de capteurs et un positionnement précis des récepteurs au sein du réseau. Chaque Geocube consiste en un petit récepteur à faible coût et économe en énergie, géolocalisé par GPS et destiné à une utilisation en réseau. Il est composé d'une puce GPS pour la localisation, d'une puce radio pour la communication sans fil, d'un processeur pour la gestion de l'acquisition des données, et il permet un ajout optionnel modulaire de couches thématiques de capteurs.

Dans ce contexte, cette thèse consiste en la mise au point de la fonctionnalité de positionnement des Geocubes déployés en réseaux locaux, et en l'application de tels réseaux à l'étude de la dynamique d'objets géophysiques.

La première partie de ce travail a été consacrée au développement d'une stratégie d'acquisition, de transfert et de traitement des données GPS des Geocubes pour permettre un positionnement relatif précis et en temps-réel de l'ensemble des Geocubes d'un réseau. Ces spécifications nécessitent la mise au point d'un traitement adapté aux données disponibles et à la structure d'un réseau de capteurs.
Les données acquises par l'ensemble des Geocubes sont transmises par radio à un nœud principal où elles sont traitées par un petit ordinateur de terrain nommé coordinateur qui est connecté par radio aux Geocubes. Une méthode de compression des données GPS brutes est développée afin d'assurer le transfert en temps-réel de ces données vers le coordinateur, y compris dans le cas de réseaux incluant de nombreux récepteurs. Une fois les données centralisées, un filtre de Kalman est utilisé pour estimer en temps-réel les positions de l'ensemble des Geocubes du réseau. Un calcul différentiel est implémenté et permet l'élimination de la quasi-totalité des erreurs spatialement corrélées grâce à la faible distance séparant les récepteurs. Les positions relatives de l'ensemble des Geocubes sont alors calculées avec une précision centimétrique et une grande résolution temporelle. Les séries temporelles de positions brutes sont, cependant, fortement entachées de l'effet des multitrajets qui polluent les mesures de phase. Ils sont particulièrement importants dans le cas du Geocube car la miniaturisation du récepteur et la limitation de son prix ont conduit à l'utilisation d'une antenne GPS non géodésique qui rejette mal les multitrajets. Une étude détaillée de ce phénomène permet alors de proposer diverses stratégies pour atténuer ses effets dans les séries temporelles de positions. Un positionnement de précision infra-centimétrique à millimétrique, selon les caractéristiques du chantier, est finalement obtenu après atténuation des multitrajets.

Une fois le logiciel de traitement GPS mis au point, la seconde partie de cette thèse a été consacrée à l'application de réseaux de Geocubes pour l'étude d'objets géophysiques. Deux sites d'étude ont été sélectionnés : le glissement de terrain de Super-Sauze dans la vallée de l'Ubaye (Alpes de Haute-Provence) et le glacier d'Argentière dans le massif du Mont-Blanc (Haute-Savoie).
Sur chaque site test un réseau de 13 à 19 Geocubes a été déployé pendant plusieurs mois pour acquérir des données GPS brutes et surveiller des paramètres additionnels grâce à des couches capteurs développées pour l'occasion, par exemple une station météorologique, des sondes piézo-

métriques et des sismomètres. Les déplacements et les déformations des objets étudiés sont alors calculés à l'aide du logiciel de traitement GPS développé. Une étude géophysique est ensuite menée en combinant les mouvements observés et les mesures des couches capteurs. La dynamique des objets d'intérêt peut finalement être étudiée à une échelle infra-journalière grâce à la précision et à la grande résolution temporelle du positionnement des Geocubes. De plus, la densité des réseaux de mesure et leur facilité d'installation permet d'instrumenter la grande majorité des points où un besoin de surveillance est identifié.

Mots clefs : GPS, temps-réel, réseaux de capteurs, mesure de déformations, glacier, glissement de terrain

Abstract

Wireless Sensor Networks (WSN) allow a multi-parameters monitoring of small extend areas thanks to cooperative data acquisition, transfer and processing. In order to combine WSN with a precise positioning of the receivers within the network, the Geocube has been developed by the French National Institute of Geographic and Forest Information (IGN-France). Each Geocube includes a single-frequency GPS module for positioning, a radio module for data exchange, and a CPU unit to manage data acquisition. During the design of the Geocube, a special attention has been paid to its low cost, its low energy consumption and its ergonomics. In addition, the Geocube allows to add on extra sensors to supplement the GPS.

In this context, this PhD thesis aimed at developing the positioning capability of the Geocube and at using Geocube networks to study the dynamics of small extend geophysical structures.

The first part of this work focused on GPS data management and processing to allow the relative positioning of the Geocubes within a local network. To this end, a processing method customized for Geocube data and WSN environment was developed.
Raw GPS carrier phase data acquired by Geocubes are sent by radio to a field computer which centralizes and processes them. Thus, a data compression method was developed to minimize the data flow and ensure the GPS data radio transfer even in real-time. Next, a processing software based on a Kalman filter using the centralized GPS data was developed for Geocubes real-time positioning. A relative positioning based on carrier phase double differences was selected. It dramatically mitigates spatially correlated errors thanks to the short involved baselines. A high time resolution as well as a centimeter level accuracy are reached for position time series. However, due to the basic antenna used into the Geocube to minimize its price and its size, multipath are sparsely rejected during the carrier phase acquisition step and form the major source of errors of the processing. Thus, a detailed study of multipath was carried out and various mitigation strategies are proposed. After multipath mitigation, a sub-centimeter to millimeter level accuracy is reached for relative positioning depending on measurement conditions.

The second part of this work was devoted to the use of Geocube networks for geophysical structures monitoring. Two test sites were selected : the Super-Sauze landslide (Ubaye valley, Alpes de Haute-Provence, France) and the Argentière glacier (Mont-Blanc massif, Haute-Savoie, France).
Networks of 13 to 19 Geocubes were set up on both sites during several months and positioning data as well as extra parameters (for example meteorological or seismological data) were acquired. Surface displacements and deformations were derived from raw GPS data using the previously developed processing software. Geophysical studies based on surface displacements and extra-sensors measurements were then carried out. Finally the dynamics of the studied areas was investigated at a sub-daily time scale thanks to the high accuracy and the high time resolution of positioning time series. In addition, positioning data were acquired quite everywhere a deformation measurement was needed thanks to the low-cost of Geocubes and their easy set up.

Keywords : GPS, real-time, wireless sensor network, deformation monitoring, glacier, landslide

Table des matières

Introduction **7**

1 Mesure de déformations de surface sur des zones de faible étendue **11**
1.1 Introduction . . . 11
1.2 Etat de l'art . . . 12
1.2.1 Topométrie . . . 12
1.2.2 Photogrammétrie . . . 14
1.2.3 LIDAR . . . 19
1.2.4 Interférométrie radar . . . 21
1.2.5 GNSS . . . 23
1.2.6 Bilan : intégration d'une composante de surveillance topographique à un réseau de capteurs . . . 25
1.3 Mesure de déformations à l'aide d'un réseau de Geocubes . . . 26
1.3.1 Présentation du Geocube . . . 26
1.3.2 Le récepteur Geocube : architecture en modules . . . 27
1.3.3 Fonctionnement en réseau et rôle du coordinateur . . . 31
1.3.4 Bilan : utilisation d'un réseau de Geocubes pour la mesure de déformations 33

2 Traitement des données de phase GPS issues des Geocubes pour la mesure en temps-réel de déformations de faible amplitude **35**
2.1 Introduction . . . 36
2.2 Méthode de positionnement relatif . . . 36
2.2.1 Choix de la méthode . . . 36
2.2.2 Formation des doubles différences et pondération associée . . . 38
2.2.3 Calcul en réseau et mise en référence . . . 41
2.2.4 Estimation des positions relatives des Geocubes par filtrage de Kalman . . 42
2.2.5 Paramétrage du filtre de Kalman et modèle stochastique . . . 44
2.2.6 Résolution des ambiguïtés . . . 44
2.2.7 Etude du terme d'innovation pour les doubles et triples différences . . . 50
2.2.8 Bilan : caractéristiques du positionnement des Geocubes au sein du réseau . 52
2.3 Implémentation de la méthode de positionnement . . . 52
2.3.1 Généralités . . . 52
2.3.2 Le module de post-traitement . . . 53
2.3.3 Le module temps-réel . . . 54
2.3.4 Traitement de données décimées . . . 59
2.3.5 Bilan : positions brutes obtenues . . . 60
2.4 Principales sources d'imprécision . . . 62
2.4.1 Biais totalement éliminés par double différentiation : les erreurs d'horloge . 62
2.4.2 Biais fortement réduits par différentiation . . . 62
2.4.3 Biais locaux non différentiés : les multitrajets . . . 68
2.5 Atténuation de l'effet des multi-trajets . . . 72
2.5.1 Paramétrage du filtre de Kalman : filtrage strict . . . 72
2.5.2 Cartographie des multitrajets . . . 73
2.5.3 Calcul en réseau . . . 74

2.5.4 Correction sidérale . . . 75
2.5.5 Stratégie retenue pour l'atténuation des multitrajets . . . 76
2.5.6 Prise en compte des multitrajets dans le cas de données décimées . . . 77
2.6 Performances et limitations de la méthode de positionnement proposée . . . 78
2.6.1 Conditions optimales d'utilisation . . . 78
2.6.2 Vérification de l'exactitude des déplacements mesurés par comparaison à d'autres logiciels de traitement GPS . . . 78
2.6.3 Précision finale atteinte . . . 80

3 Utilisation de réseaux de Geocubes pour la mesure de déformations d'objets géophysiques de taille kilométrique 81
3.1 Introduction . . . 81
3.2 Suivi du glissement de terrain de Super-Sauze . . . 82
3.2.1 Contexte . . . 82
3.2.2 Acquisition et traitement des données . . . 82
3.2.3 Analyse des déplacements observés . . . 87
3.2.4 Bilan : apport des Geocubes à l'étude des glissements de terrain . . . 90
3.3 Suivi du glacier d'Argentière . . . 91
3.3.1 Contexte . . . 91
3.3.2 Acquisition et traitement des données . . . 92
3.3.3 Etude du glacier d'Argentière à partir des déplacements mesurés par un réseau de Geocubes . . . 97
3.3.4 Bilan : apport des Geocubes à l'étude des glaciers . . . 104
3.4 Synthèse de l'apport des réseaux de Geocubes à l'étude d'objets géophysiques . . . 105

Conclusion et perspectives 107

Bibliographie 111

Annexes 116

A Le système GPS 117

B Message de navigation et éphémérides des satellites 121

C Modèle de Klobuchar pour la correction du biais ionosphérique 125

D Modèle de Saastamoinen pour la correction du biais troposphérique 127

E Tenseurs de déformations 129

Introduction

Introduction générale

Un réseau de capteurs consiste en un déploiement d'instruments mesurant différentes grandeurs physiques en plusieurs points d'une aire géographique déterminée. Plus précisément il s'agit d'un ensemble de récepteurs multi-capteurs autonomes, souvent de faible coût et reliés entre eux par un moyen de télécommunication sans fil. Ces récepteurs sont distribués spatialement et coopèrent afin de réaliser une surveillance multi-paramètres de la zone d'étude en acquérant, transmettant et traitant les données des différents capteurs intégrés au réseau. Une application majeure des réseaux de capteurs consiste à réaliser la surveillance de paramètres environnementaux tels que la température et l'humidité de l'air ou du sol, la présence de polluants volatils, ou encore les déformations et les vibrations du sol. Dans le cas de la surveillance environnementale, les réseaux de capteurs peuvent compléter voire remplacer les réseaux de surveillance thématiques utilisés historiquement et basés sur la mesure d'un seul ou d'un nombre très restreint de paramètres (ensemble de stations météorologiques, observatoire sismologique, surveillance topographique...). Une caractéristique fondamentale des réseaux de capteurs ainsi définis consiste au regroupement de plusieurs capteurs au sein de chaque récepteur constituant un nœud du réseau ce qui entraîne deux avantages :
- L'ensemble des fonctions d'alimentation du récepteur, de gestion des données (numérisation, stockage et transfert) et de communication sont mutualisées à l'échelle de chaque nœud. Un unique récepteur compact peut alors être déployé en chaque point de mesure ce qui simplifie considérablement le déploiement et la maintenance du réseau.
- Les données collectées par un même récepteur sont acquises et traitées de façon similaire pour tous les capteurs et sont donc facilement comparables voire fusionnables. Ainsi, les différents paramètres physiques mesurés en un nœud de réseau sont co-localisés et datés de façon cohérente.

Le positionnement occupe une place particulière au sein de l'ensemble des paramètres mesurés par un réseau de capteurs. Un tel système consiste à étudier la variabilité spatiale des paramètres d'intérêt et il est donc indispensable que les différents nœuds soient localisés au sein du réseau. Ils sont même le plus souvent géoréférencés ce qui permet de connaître leurs positions à la surface de la Terre en plus de leurs positions relatives. La localisation des récepteurs constitue alors une méta-donnée indispensable à l'interprétation des autres mesures. De plus, si le positionnement des récepteurs devient assez précis pour pouvoir mesurer des variations de distance compatibles avec les déformations de la zone, cette mesure de la position précise du récepteur devient un paramètre d'intérêt en tant que tel. Elle permet de suivre le déplacement de la zone d'étude par rapport à un référentiel fixe ainsi que ses déformations internes. La composante de positionnement du réseau de capteurs se comporte alors comme une couche capteurs de plus.
Si l'on change de point de vue et que l'on s'interroge sur l'intérêt de mesurer des paramètres complémentaires aux coordonnées habituellement collectées par un système de positionnement il apparaît que :
- L'ajout de capteurs mesurant des paramètres judicieusement choisis permet d'augmenter la fiabilité de la mesure de localisation obtenue, cette dernière étant réalisée moins "à l'aveugle".
- Les capteurs supplémentaires permettent le suivi de paramètres susceptibles d'influencer le mouvement, ce qui rend possible l'interprétation des mouvements observés.
Finalement un réseau de capteurs doté d'une composante de positionnement précis peut se révéler être un outil bien adapté à l'étude et à la surveillance d'objets complexes en déformation ou en déplacement. Cependant, la taille des réseaux est souvent limitée par la portée du lien de commu-

nication sans fil entre les récepteurs et l'on se restreint habituellement à l'étude d'objets de petite taille, avec des distances maximales entre récepteurs de l'ordre du kilomètre. Un positionnement relatif à partir de références préalablement géoréférencées est alors couramment adopté pour la composante de positionnement précis afin d'améliorer la précision et la résolution temporelle de la mesure de déformations. On parlera alors de surveillance topographique pour qualifier le procédé mis en œuvre.
Le suivi d'un glissement de terrain donne un exemple type de l'intérêt d'un réseau de capteurs pour la surveillance environnementale avec composante topographique. Un glissement de terrain présente en effet un écoulement commandé par un ensemble complexe de paramètres qui génère des déplacements hétérogènes au sein de la zone en mouvement. L'accélération du glissement peut être déclenchée par une multitude de facteurs dont les principaux sont un épisode pluvieux, la fonte du manteau neigeux, des variations de température ou une rupture à l'interface du glissement. Pour comprendre le fonctionnement d'un glissement de terrain, il est donc indispensable de mesurer les déplacements en de nombreux points de la zone impactée, et de suivre les paramètres qui commandent son déclenchement. Les réseaux de capteurs répondent donc parfaitement aux besoins de surveillance d'une telle zone. Les données acquises peuvent alors être utilisées avec pour objectifs :
- Comprendre le phénomène en cours pour pouvoir prédire son évolution en réponse à des changements environnementaux. Le réseau de capteurs peut alors être vu comme une instrumentation fournissant les mesures nécessaires à une étude géophysique.
- Mesurer des paramètres (déplacements de surface, pression interstitielle...) dont on sait à l'avance que les variations traduisent une évolution du glissement pouvant conduire à son accélération. L'instrumentation joue ici le rôle d'outil de gestion des risques pouvant le cas échéant être couplé à un déclenchement d'alarme si la masse en mouvement présente un risque direct pour les populations ou les infrastructures voisines.

Les réseaux de capteurs commencent aujourd'hui à permettre une surveillance opérationnelle d'objets tels que les glissements de terrain. Leur adaptation à la surveillance environnementale a été favorisée ces dernières années par le développement de composants électroniques et de capteurs à faible coût et économes en énergie qui a suivi l'essor de l'électronique mobile (smartphones et tablettes en particulier). Ces composants permettent la réalisation de récepteurs performants, autonomes et bon marché qui composent des réseaux de capteurs dédiés à la surveillance environnementale. La maturité de ces systèmes novateurs d'acquisition de données ouvre alors la porte à de nouvelles applications comme la surveillance topographique à l'aide d'un réseau dense de récepteurs, sans fil et autonomes.

Contexte et objectifs

L'Institut National de l'Information Géographique et Forestière (IGN) a entrepris dès 2006 le développement d'un réseau de capteurs conçu autour d'un module GPS mono-fréquence dans le but de créer un système mettant en avant le positionnement précis du récepteur et la gestion de l'information géographique qui sont au cœur des missions et des compétences de l'institut. Ce développement a été réalisé par le Laboratoire d'Optique, Electronique, Métrologie et Informatique (LOEMI) et a abouti peu avant le début de cette thèse à une première version d'un système nommé Geocube. Il s'agit d'un récepteur de petite taille et de faible coût dont la version de base permet la localisation à l'aide d'un GPS, la gestion de capteurs additionnels et de l'alimentation grâce à un micro-processeur ainsi que la communication radio. Il consomme peu d'énergie et peut être alimenté par un petit panneau solaire. Une version multi-capteurs peut être obtenue facilement à partir de cette version socle par l'ajout modulaire de couches capteurs.
Cette thèse a été initiée lorsque le développement du Geocube a été suffisamment avancé pour permettre l'acquisition de données GPS brutes par des récepteurs dont la partie électronique et les logiciels internes étaient fonctionnels. Les logiciels standards de traitement GPS n'étant pas optimaux pour le traitement des données collectées par un réseau de Geocubes, le besoin d'un logiciel de traitement GPS spécialement dédié à ce système est apparu et son développement constitue le cœur de ce travail.
Dans ce contexte le premier objectif de cette thèse consiste à développer la composante de surveil-

lance topographique du système Geocube au travers de la réalisation d'un logiciel de calcul GPS dédié aux données collectées par les Geocubes. Ce logiciel permet un positionnement relatif temps-réel de précision infra-centimétrique de tous les Geocubes au sein du réseau. Ce développement méthodologique a conduit à l'élaboration d'une stratégie de positionnement compatible avec le fonctionnement des Geocubes déployés en réseaux sans fil. Parallèlement, notre travail a nécessité l'évolution des récepteurs ainsi que de leur logiciel interne afin d'optimiser le système de positionnement obtenu.
Le deuxième volet de cette thèse a consisté à déployer des réseaux de Geocubes afin de tester le bon fonctionnement de l'infrastructure en conditions opérationnelles de surveillance, de qualifier la méthode de positionnement mise au point et d'étudier des objets géophysiques d'étendue limitée : le glissement de terrain de Super-Sauze (Hautes Alpes) et le glacier d'Argentière (Haute Savoie). En nous focalisant sur ces objets pour tester notre méthode de positionnement nous avons choisi de nous concentrer sur l'interprétation physique des mouvements mesurés plutôt que sur le développement d'une méthode de détection automatique de mouvements pouvant permettre le déclenchement d'alarmes en cas de mouvements suspects.

Structure du document

Ce manuscrit de thèse vise à donner une vision globale de la mesure précise et en temps-réel des déformations d'objets de taille kilométrique en utilisant un réseau de Geocubes, récepteurs GPS mono-fréquence communiquant entre eux à l'aide d'une liaison radio. Pour cela le système Geocube est tout d'abord présenté et replacé dans le contexte actuel des méthodes de mesure de déformations de zones de faible étendue (Partie I : Mesure de déformations de surface sur des zones de faible étendue). Ensuite, la méthode de positionnement des Geocubes au sein du réseau est détaillée, en particulier les adaptations nécessaires à un fonctionnement optimal dans le cadre d'un réseau de capteurs (Partie II : Traitement des données de phase issues des Geocubes pour la mesure en temps-réel de déformations de faible amplitude). Cette présentation de la méthode de positionnement se termine par la qualification de la précision obtenue et des limites du système au travers de l'étude détaillée des différentes sources d'imprécision entachant le positionnement. Enfin, le système de mesure de déformations mis au point est appliqué à l'étude de deux objets géophysiques : le glissement de terrain de Super-Sauze et le glacier d'Argentière (Partie III : Application à la surveillance d'objets géophysiques). Ces deux études permettent de confronter les Geocubes à des cas réels de surveillance et soulignent l'originalité des données de positionnement collectées pour la réalisation d'études géophysiques.
Ce document s'inspire d'articles destinés à des revues scientifiques ou techniques, mais a été entièrement réécrit afin d'en permettre une lecture cohérente. Les articles suivant ont servi de base à ce manuscrit :

- Description des Geocubes :
  Benoit L., Martin O., Meynard C., Thom C., Les Geocubes : réseau de capteurs autonomes géolocalisés pour la surveillance de structures et de zones à risque, *XYZ*, 2014, 138, 26-32.
- Présentation de la méthode de positionnement adaptée aux réseaux de capteurs développée au cours de cette thèse :
  Benoit L., Briole P., Martin O., Thom C., Real-time deformation monitoring by a wireless network of low-cost GPS, *Journal of applied geodesy*, 2014, 8, 119-128.
- Comparaison des Geocubes à d'autres méthodes de mesure de déformations dans le cadre de l'étude du glacier d'Argentière :
  Benoit L., Dehecq A., Pham H.T., Vernier F., Trouvé E., Moreau L., Martin O., Thom C., Pierrot-Deseilligny M., Briole P., Multi-sources monitoring of the Argentière glacier dynamics, *Annals of glaciology*, en cours de relecture.
- Application d'un réseau de Geocubes à la surveillance du glissement de terrain de Super-Sauze :
  Benoit L., Briole P., Martin O., Thom C., Malet J.P., Ulrich P., Monitoring landslide displacement using Geobubes : a wireless network of low-cost GPS receivers, à soumettre.

Chapitre 1

Mesure de déformations de surface sur des zones de faible étendue

Sommaire

1.1 Introduction 11
1.2 Etat de l'art 12
1.2.1 Topométrie 12
1.2.2 Photogrammétrie 14
1.2.3 LIDAR 19
1.2.4 Interférométrie radar 21
1.2.5 GNSS 23
1.2.6 Bilan : intégration d'une composante de surveillance topographique à un réseau de capteurs 25
1.3 Mesure de déformations à l'aide d'un réseau de Geocubes 26
1.3.1 Présentation du Geocube 26
1.3.2 Le récepteur Geocube : architecture en modules 27
1.3.3 Fonctionnement en réseau et rôle du coordinateur 31
1.3.4 Bilan : utilisation d'un réseau de Geocubes pour la mesure de déformations 33

1.1 Introduction

Ce travail se concentre sur le développement d'un système de surveillance de la géométrie de la surface de zones de faible étendue, avec des distances caractéristiques allant de quelques centaines de mètres à quelques kilomètres. La mesure et la représentation de telles zones étant historiquement le fait des topographes, nous parlerons ici de surveillance topographique pour qualifier l'ensemble des techniques permettant de mesurer la géométrie de la surface d'objets de taille kilométrique, bien que les techniques utilisées aujourd'hui dépassent les levés tachéométriques et le nivellement utilisés traditionnellement en topographie. La notion de surveillance implique de plus que la surface des objets étudiés évolue au cours du temps. Il s'agit alors de mesurer les déplacements de l'objet par rapport à un référentiel fixe, ainsi que ses déformations internes en fonction du temps. Enfin, nous entendons par surveillance topographique le suivi de déplacements et de déformations d'amplitude très faible devant la taille de l'objet, n'excédant qu'exceptionnellement 50cm/jour. On parlera de zones quasi-statiques pour qualifier de tels objets, en opposition à une étude cinématique d'objets mobiles.
De nombreux objets sont susceptibles de nécessiter une surveillance topographique ainsi définie, par exemple des objets naturels tels que des glissements de terrain, des falaises, des talus instables ou des glaciers, mais aussi des réalisations humaines : ponts, digues, barrages, accotements ou zones subissant une subsidence locale liée à des activités anthropiques (passage d'un tunnelier, effondrement minier).

1.2 Etat de l'art

Les techniques utilisées pour la réalisation de travaux de surveillance topographique sont aujourd'hui relativement nombreuses afin de répondre à la diversité d'objets pouvant être suivis. Ces techniques sont basées sur des procédés de positionnement issus soit de méthodes de cartographie généralement mises en œuvre par les agences cartographiques nationales, soit de méthodes de topographie utilisées par les géomètres. Dans les deux cas, les procédés ont été largement modifiés par rapport à leur usage initial de modélisation statique de la topographie afin de prendre en compte la faible étendue des zones surveillées ainsi que le besoin de mesures précises et fréquentes. Les capteurs utilisés, leur plate-forme support et le traitement des données collectées ont donc été impactés par l'adaptation de ces méthodes de positionnement à la surveillance topographique.
Les techniques utilisées actuellement fournissent une large panoplie de réponses instrumentales et méthodologiques aux problèmes de surveillance topographique. Ce domaine regroupe des cas de surveillance très divers dépendant de l'objet suivi, de la finesse du résultat souhaité, et des moyens mobilisables au cours de l'étude. Lors de la mise au point d'un système pour la surveillance d'un site particulier, de nombreuses contraintes, pas toujours compatibles entre elles, sont alors à prendre en compte. Pour y faire face, différentes techniques peuvent être déployées individuellement ou être combinées, afin d'obtenir le système le plus adapté au site suivi et aux besoins de surveillance.
Nous utiliserons les critères suivants pour qualifier et comparer ces diverses techniques ainsi que leur adaptation à différents chantiers :

* Déploiement de l'installation :
- Possibilité de surveillance sans accès au site.
- Nécessité d'inter-visibilité entre instruments.

* Conditions de fonctionnement :
- Sensibilité aux contraintes météorologiques.
- Sensibilité aux changements affectant la surface de la zone surveillée.
- Possibilité de fonctionnement continu.
- Temps de calcul.

* Caractéristiques du résultat obtenu :
- Résolution temporelle du résultat.
- Résolution spatiale du résultat.
- Déformations mesurables (1D, 2D, 3D)
- Précision du résultat.

Les principales méthodes de surveillance topographique actuelles vont être examinées par la suite. Ces méthodes étant toutes dérivées de procédés de positionnement appliqués de manière répétée afin de suivre l'évolution de la géométrie des zones étudiées, le principe de positionnement sous-jacent sera tout d'abord présenté. Ensuite, l'adaptation de ces procédés de positionnement à la mesure de déformations puis à la surveillance topographique sera présentée et des exemples de cas d'utilisation seront donnés. Les principales sources d'erreurs entachant la mesure de déformations ainsi que les contraintes opérationnelles seront alors détaillées. Enfin, la caractérisation de chaque méthode de surveillance sera réalisée en utilisant les critères définis ci-dessus.
Nous nous limiterons ici à la présentation des méthodes de surveillance topographique au sens strict, c'est à dire s'intéressant à l'évolution de la topographie de la zone d'étude. Nous excluons donc de notre état de l'art les méthodes de mesure de déformations des milieux (extensomètres, piézomètres...) ainsi que les méthodes de surveillance géophysique (sismologie, infrasons...).

1.2.1 Topométrie

Définition

La topométrie consiste à positionner par mesure d'angles et de distances des points de coordonnées inconnues à partir de références locales connues. Pour cela on fixe une ou plusieurs références et on calcule les coordonnées relatives des points d'intérêt par propagation des coordonnées des

points de référence. Pour permettre le partage des données et la cohérence de chantiers voisins, il arrive fréquemment que les coordonnées des références ne soient pas exprimées dans un repère local, mais plutôt dans un repère global. Ces coordonnées sont alors calculées au préalable par des méthodes géodésiques.

Mesure de l'espace

Les mesures topométriques sont réalisées à l'aide de tachéomètres. Il s'agit d'instruments permettant de mesurer simultanément un angle horizontal, un angle vertical et une distance. Lors de levés tachéométriques, des points d'intérêt sont visés par le tachéomètre qui enregistre l'angle vertical et l'angle horizontal de la direction de la cible ainsi que la distance tachéomètre - cible. Dans la majorité des cas les cibles visées sont matérialisées par des prismes, ce qui améliore la qualité des mesures et assure que le point visé est bien défini.
Les données acquises (angles et distances) sont ensuite combinées pour mesurer les positions relatives des cibles et des tachéomètres par triangulation. Pour le calcul des coordonnées de points inconnus, deux étapes sont nécessaires :
1) Localisation du tachéomètre dans l'espace.
Cette étape est réalisée en effectuant un relèvement des tachéomètres à l'aide de visées sur des cibles de coordonnées connues appelées références. Les coordonnées des tachéomètres sont alors déterminées à partir de celles des références.
2) Localisation des points inconnus.
Les cibles de coordonnées inconnues sont alors visées et leurs coordonnées sont calculées par rapport à celles des tachéomètres par rayonnement ou intersection de faisceaux.

Au final, ces deux étapes conduisent à la propagation des coordonnées des références pour calculer les coordonnées des points inconnus. La topométrie permet alors de déterminer les coordonnées relatives de certains points de la surface topographique à partir des coordonnées de quelques références. L'utilisation de ce maillage de points de coordonnées connues dans un unique référentiel rend alors possible la modélisation de cette surface.

Mesure de déformations

La topométrie donne accès aux coordonnées relatives de différents points d'intérêt à un instant donné. La réalisation d'un second levé topométrique à une date ultérieure permet de calculer un nouveau jeu de coordonnées et la différence de coordonnées entre les deux dates donne les déformations et les déplacements subis par un échantillon de points de la surface topographique. L'utilisation de prismes et de tachéomètres rigoureusement mis en station permet d'assurer que ce sont les coordonnées des mêmes points qui ont été mesurées aux deux dates. Cependant, pour que les déformations mesurées correspondent aux déformations réelles de la zone, il faut que les références utilisées soient fixes au cours du temps. Ces références sont alors choisies hors de la zone en déformation afin d'assurer leur stabilité et une redondance dans les références est introduite afin de pouvoir déceler un éventuel mouvement parasite de l'une d'elles.

Application à la surveillance topographique

L'étendue des zones pour lesquelles les procédés topométriques s'appliquent est totalement compatible avec la surveillance topographique, et l'adaptation de tels procédés à la surveillance topographique passe donc uniquement par l'augmentation de la fréquence des levés, leur automatisation et le fonctionnement continu du système. Pour cela des tachéomètres motorisés ont été développés par de nombreux fabricants de matériel topographique. Ils permettent la réalisation de mesures topographiques de manière automatique à une cadence prédéfinie et ceci de jour comme de nuit grâce à une visée active utilisant des ondes émises par le tachéomètre pour localiser la cible et évaluer les angles et les distances. Les mesures réalisées sont déchargées automatiquement et traitées par une chaîne informatique de calculs topométriques qui donne accès à des coordonnées des points d'intérêt mises à jour peu de temps après la fin des mesures. Cependant, les mesures tachéométriques sont réalisées par tours d'horizons successifs, chaque tachéomètre mesurant cycliquement un certain nombre de cibles en vue, et les mesures ne sont donc exploitables qu'à la fin de chaque tour

d'horizon. Ces derniers durent plusieurs minutes (souvent 15 - 30min), ce qui conduit à une surveillance en temps légèrement différé et dégrade la résolution temporelle du résultat.
La précision millimétrique des mesures issues de la topométrie en fait la technique de référence pour la surveillance de précision en milieu urbain (surveillance de bâtiments, d'ouvrages d'art...). Elle est également utilisée pour l'étude d'objets naturels tels que les glissements de terrain [Singer et al, 2009] ou les glaciers [Dietrich et al, 2007] [Riesen et al, 2011], mais son utilisation y est moins développée.

Sources d'erreurs et contraintes opérationnelles

La topométrie s'appuie sur des visées optiques pour les mesures d'angles et sur la mesure d'un temps de parcours d'ondes pour la mesure de distances. La réalisation de visées relativement horizontales et proches du sol rend alors la topométrie sensible à la réfraction atmosphérique qui est forte dans les basses couches agitées de l'atmosphère. Une source d'imprécision supplémentaire provient des mesures d'angles qui peuvent être entachées d'erreurs instrumentales dues à des imperfections des limbes servant à la lecture des observations ou à des imperfections mécaniques.
Cependant, les procédés topométriques intègrent une complémentarité (angles et distances) et une redondance de mesures qui permet d'atténuer fortement les erreurs d'observation. Les erreurs physiques (en particulier réfraction) qui leur sont liées sont pour leur part corrigées grâce à des modèles utilisant en entrée des observations météo (température, pression, humidité...). De plus, les erreurs instrumentales sont en grande parties éliminées par des procédés d'observations dédiés (calibration du matériel, double retournement, observation par tours d'horizon).
Une précision millimétrique est alors atteinte, mais au prix d'une certaine lourdeur méthodologique qui nécessite une grande redondance de mesures et l'utilisation de réseaux d'observation possédant une bonne géométrie, ce qui contraint fortement la mise en place des réseaux. De plus, il faut que tous les points mesurés soient accessibles pour permettre l'installation des prismes servant à la mesure. A cela s'ajoute le besoin d'inter-visibilité tachéomètres-cibles qui complique encore la conception des réseaux d'observation. A ces contraintes géométriques s'ajoute la nécessité d'une alimentation électrique continue pour les tachéomètres automatiques afin de répondre à leur consommation élevée.

Caractéristiques de la méthode

La table 1.1 récapitule les caractéristiques de la surveillance topographique par topométrie.

Déploiement de l'installation	
Accès au site	Nécessaire pour l'installation des prismes
Inter-visibilité	Nécessaire entre tachéomètres et prismes
Déploiement	Installation simple des prismes, installation complexe des tachéomètres
Conditions de fonctionnement	
Sensibilité météo	Légère dégradation de la précision par temps de pluie ou forte chaleur
Sensibilité surface	Insensible (mesure sur prismes)
Fonctionnement	24h/24
Temps de calcul	Calcul en temps légèrement différé
Caractéristiques du résultat	
Résolution temporelle	Limitée par la durée d'un tour d'horizon (environ 15 minutes)
Résolution spatiale	Faible
Type de déformation	3D
Précision	millimétrique

TABLE 1.1 – Caractéristiques de la surveillance topographique par topométrie.

1.2.2 Photogrammétrie

Définition

Mesurer l'espace à partir de photographies permet de reconstruire un modèle dense de la topographie. Cependant, comme une photographie est un enregistrement plan et déformé d'un environ-

nement 3D, une seule image ne suffit pas à reconstituer les 3 dimensions de l'espace. Pour permettre cette reconstruction 3D, chaque point du terrain doit être visible sur au moins deux photographies prises depuis deux points de vue différents (Fig. 1.1). L'exploitation de ces deux (ou plus) images par des procédés photogrammétriques permet alors de retrouver la position et la forme de l'objet étudié en se servant de la parallaxe de manière similaire à la vision humaine.

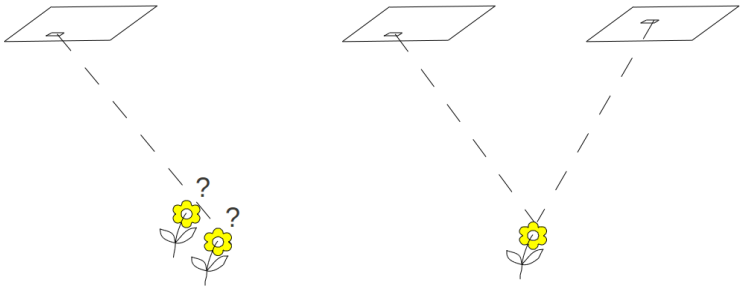

FIGURE 1.1 – Reconstruction 3D à partir de deux photographies.

Mesure de l'espace

Pour mesurer l'espace à l'aide de procédés photogrammétriques, il faut des images avec du recouvrement (tous les points du terrain doivent être visibles dans au moins deux images) pour permettre l'extraction de données en 3 dimensions, mais également des éléments de localisation afin de mettre à l'échelle et de localiser le modèle 3D calculé. La photogrammétrie est donc utilisée pour propager les coordonnées de quelques points connus à l'ensemble des points de la scène.
Une tâche fondamentale de la photogrammétrie consiste alors à définir la relation entre les coordonnées d'un point dans les différentes images et ses coordonnées sur le terrain. Cette relation est appelée formule image (Fig. 1.2).

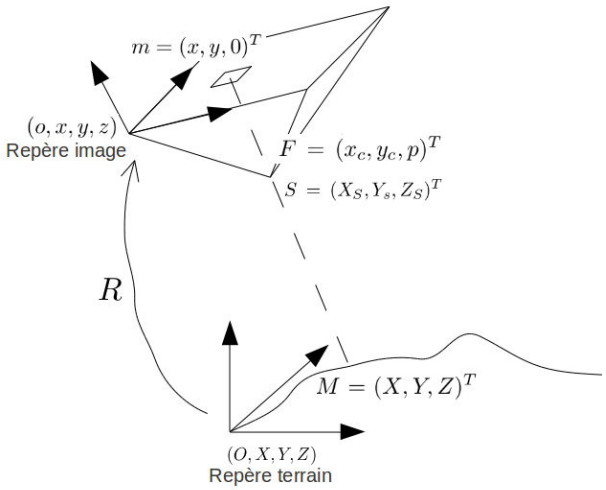

FIGURE 1.2 – Formule image.

Pour établir la formule image on définit :
- (O, X, Y, Z) un repère terrain.
- (o, x, y, z) un repère image tel que (o, x, y) soit confondu avec le plan de l'image.
On note alors :
- $M = (X, Y, Z)^T$ les coordonnées d'un point du terrain dans le repère terrain et $m = (x, y, 0)^T$

son image dans la photographie exprimée dans le repère image.
$S = (X_S, Y_s, Z_S)^T$ les coordonnées du centre de prise de vue dans le repère terrain et
$F = (x_c, y_c, p)^T$ ses coordonnées dans le repère image. Ici p est la distance principale de l'objectif.
En constatant que m appartient à la droite (SM) et au plan de la photographie on peut extraire la formule image :

$$m = F - \frac{k^T \times F \times R \times (M - S)}{k^T \times R \times (M - S)} \tag{1.1}$$

avec k le troisième vecteur unitaire formant la base du repère image et R la matrice rotation de passage du repère terrain au repère image.
Une fois la formule image établie, on se sert de cette formule en deux étapes :

(1) Référencement des images.

Il s'agit de déterminer l'orientation des images, c'est à dire la position (S) et l'orientation (R) des caméras dans le repère terrain à l'instant de prise de vue. Pour référencer les images, il faut disposer de points d'appui qui sont visibles dans les images et dont les coordonnées terrain sont connues, ainsi que de points de liaison, points homologues visibles dans plusieurs images, mais de coordonnées terrain inconnues. Les inconnues d'orientation et de position des caméras sont alors estimées par moindres carrés en utilisant les points d'appui et les points de liaison comme observations et les formules image des différents clichés comme équations d'observation. Un tel ajustement impliquant un bloc d'images avec du recouvrement inter-images est appelé aéro-triangulation.

(2) Exploitation photogrammétrique.

Une fois les images orientées, la formule image peut être utilisée pour la modélisation 3D de la scène. Pour cela un modèle numérique de surface (MNS) est dérivé de la formule image et des orientations des images. Une mise en correspondance permet de trouver pour une sélection de points d'une image maîtresse leurs homologues dans les autres images (images esclaves). L'application de la formule image pour l'image maîtresse et chaque image esclave ainsi que l'intersection des faisceaux obtenus permettent de calculer les coordonnées 3D dans le référentiel terrain de tous les points sélectionnés dans l'image maîtresse.
Cette mise en correspondance peut être réalisée soit par un opérateur utilisant ses capacités de vision stéréoscopique (saisie photogrammétrique), soit de façon automatique par un algorithme de corrélation d'images. La mise en correspondance automatique est réalisée par corrélation dense de vignettes extraites de chaque image. Le coefficient de corrélation entre deux vignettes x et y est donné par :

$$corr(x, y) = \frac{cov(x, y)}{\sigma_x . \sigma_y} = \frac{\sum_{i \in vignette}((x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}))}{\sqrt{\sum_{i \in vignette}(x_i - \bar{x})^2} . \sqrt{\sum_{i \in vignette}(y_i - \bar{y})^2}} \tag{1.2}$$

La mise en correspondance automatique consiste alors à calculer, pour chaque point de l'image maîtresse, le coefficient de corrélation avec les points d'une région homologue approchée de l'image esclave. Le point homologue sera finalement le point de l'image esclave correspondant au maximum local du coefficient de corrélation. Cette mise en correspondance par corrélation présente l'avantage d'être dense et automatique, mais elle nécessite l'utilisation d'images acquises avec des paramètres de prise de vue voisins afin d'obtenir des images semblables, condition indispensable pour que la corrélation donne des résultats satisfaisants.
Finalement l'utilisation de prises de vue stéréoscopiques et d'éléments de localisation dans un procédé photogrammétrique permet une modélisation 3D dense (MNS) de la surface topographique à un instant donné.

Mesure de déformations

La photogrammétrie permettant le calcul de MNS à une date donnée, il est possible d'en dériver des déformations en comparant deux MNS réalisés à deux dates distinctes. Toutefois pour mesurer

un déplacement de la zone d'étude en 3 dimensions il est indispensable de savoir quel point du second MNS correspond à quel point dans le MNS initial. Or la mise en correspondance dans des nuages de points 3D est problématique et la recherche de points homologues entre deux dates nécessite une étape supplémentaire : une mise en correspondance inter-date dans des images 2D. Pour la calculer on peut utiliser soit des ortho-images (images corrigées pour être superposables à une carte), soit des images acquises à deux dates avec des paramètres de prise de vue voisins. Dans tous les cas la mise en correspondance est effectuée par corrélation dense. En couplant la mise en correspondance inter-date 2D et les MNS 3D calculés pour chaque date (Fig. 1.3), un déplacement 3D peut alors être extrait.

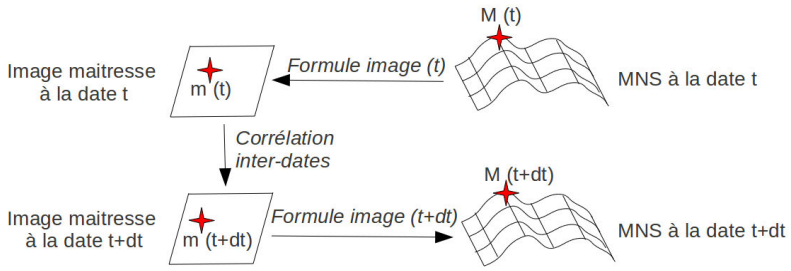

FIGURE 1.3 – Calcul du déplacement 3D à partir d'une corrélation 2D et de deux MNS.

Cette méthode de calcul de déplacements et de déformations en 3D est, cependant, assez lourde à mettre en œuvre et la plupart du temps des procédures allégées sont utilisées bien qu'elles fournissent un résultat moins complet. Le cas le plus fréquent consiste à mesurer des déformations à partir d'images exprimées dans une géométrie constante soit acquises par un unique appareil photographique fixe, soit ortho-rectifiées.
Dans ce cas, les images acquises à différentes dates sont tout d'abord rendues superposables par co-registration en appliquant une homographie à chacune d'elle. Ensuite, une mise en correspondance inter-date est effectuée par corrélation dense. Le champ de déplacement obtenu est en 2D dans le plan de l'image et il est exprimé en pixels. Il peut néanmoins être converti en mètres en utilisant un MNS externe qui permet de calculer la profondeur en chaque point, mais dans tous les cas les mouvements perpendiculaires au plan de l'image seront impossibles à mesurer.

Application à la surveillance topographique

La surveillance topographique par photogrammétrie nécessite la réalisation fréquente et automatique de MNS. Les prises de vue aériennes utilisées habituellement pour la modélisation statique de la surface topographique deviennent alors impossible à mettre en œuvre pour des raisons de coût et d'automatisation. L'utilisation de drones pour les prises de vue sera peut être bientôt une alternative, d'autant plus que leur capacité à voler à basse altitude permet d'améliorer la résolution des images et donc la précision de la mesure de déformations. Cependant, la règlementation actuelle impose la présence au sol d'un opérateur habilité pour superviser l'acquisition d'images par drone. Ceci empêche une acquisition automatique et l'utilisation de drones pour la surveillance topographique n'est donc pas encore envisageable. Une alternative à ces acquisitions aériennes consiste à utiliser des images spatiales [Berthier, 2005] qui permettent des prises de vue répétées et régulières. L'apparition de satellites imageurs à très haute résolution possédant des capacités d'acquisition stéréoscopique a renforcé l'intérêt de ce type de plate forme et des tests ont été réalisés avec succès [Stumpf et al, 2014]. Cependant, les contraintes liées à la planification des acquisitions, le prix des images et la taille des pixels sol (environ 50cm) imposent d'utiliser des prises de vues espacées d'au mois une semaine voire un mois pour un usage de surveillance topographique afin d'observer des déplacements d'amplitude compatible avec la taille des pixels. Pour permettre une acquisition plus flexible et une plus grande résolution temporelle et spatiale, la stratégie la plus fréquemment utilisée consiste finalement à déployer des appareils photographiques fixes et basés au sol en visée directe avec l'objet étudié. Ces appareils sont autonomes grâce à une alimentation externe (panneaux solaires, batterie, secteur...) et sont programmés pour acquérir automatiquement des images à heure fixe. Cette méthode a déjà été appliquée pour différents cas de surveillance topographique,

surtout dans le cadre de l'écoulement gravitaire de petits objets naturels (glissements de terrain [Travelleti et al, 2012], glaciers [Dietrich et al, 2007] [Fallour et al, 2010]), mais reste encore peu utilisée à cause de son automatisation difficile et de sa sensibilité au mauvais temps.

Sources d'erreurs et contraintes opérationnelles

Les procédés photogrammétriques permettant le calcul des MNS utilisés pour la surveillance topographique s'appuient sur l'intersection de faisceaux et sur un processus d'appariement basé sur une corrélation dense. La précision de la détermination de la profondeur des points du terrain, et donc la qualité des MNS, dépendent de la qualité de l'intersection des faisceaux qui doivent être le moins en filé possible pour permettre une intersection nette. Cette condition implique des angles de prise de vue différents. Au contraire, la mise en correspondance par corrélation demande des images semblables pour fonctionner correctement. Un compromis entre ces deux contraintes antagonistes est donc nécessaire. La précision des MNS obtenus par corrélation dense est alors limitée à une fraction de pixel à cause du compromis sur le rapport $\frac{Base}{Profondeur}$ défini lors de l'installation des appareils photographiques réalisant les acquisitions.
Une source d'erreur supplémentaire est induite par l'appariement inter-date. Au cours de cette étape la similitude géométrique entre les images ne pose pas de problème, car les photographies sont prises depuis un point fixe et les déformations de la scène entre deux acquisitions sont faibles. Par contre les variations radiométriques provoquées par des changements d'éclairement ou de conditions météorologiques peuvent gêner l'appariement inter-date. L'amplitude de l'erreur induite est très variable et dépend de la nature de l'objet étudié, de l'heure d'acquisition et des conditions météorologiques.
La combinaison de ces différentes sources d'erreurs conduit finalement à une précision centimétrique à décimétrique pour la surveillance topographique par photogrammétrie terrestre.
La principale contrainte dans l'installation des appareils photographiques pour minimiser ces erreurs et obtenir un levé le plus exhaustif possible consiste à rechercher un site d'installation permettant un rapport $\frac{Base}{Profondeur}$ adapté, une visibilité la plus large possible de l'objet d'intérêt et une variation modérée de l'éclairement. Cette installation est facilitée par les faibles exigences énergétiques des appareils photophotographiques automatiques qui peuvent facilement être alimentés par de petits panneaux solaires.

Caractéristiques de la méthode

La table 1.2 récapitule les caractéristiques de la surveillance topographique par photogrammétrie.

Déploiement de l'installation	
Accès au site	Pas nécessaire, mesure à distance
Inter-visibilité	Nécessaire entre les appareils photographiques et la zone étudiée
Déploiement	Centralisé et assez simple
Conditions de fonctionnement	
Sensibilité météo	Ne fonctionne que par temps clair
Sensibilité surface	Dégradation de la corrélation inter-dates si l'aspect de la surface change brutalement
Fonctionnement	Uniquement de jour
Temps de calcul	Calcul en temps légèrement différé
Caractéristiques du résultat	
Résolution temporelle	Limitée par le temps de traitement. Habituellement une mesure toutes les 1 à 6 heures
Résolution spatiale	Dense
Type de déformation	2D voire 3D
Précision	Centimétrique à décimétrique

TABLE 1.2 – Caractéristiques de la surveillance topographique par photogrammétrie terrestre.

1.2.3 LIDAR

Définition

Le LIDAR (LIght Detection And Ranging) est un système d'auscultation par laser. Il permet de localiser et qualifier l'environnement de l'instrument en utilisant un faisceau d'ondes laser. Ce faisceau est émis par le lidar, rétro-diffusé par l'environnement et collecté en retour par le lidar. Le lidar est donc un système actif qui émet l'onde qui sera analysée en sortie. La combinaison du temps de parcours émetteur-réflecteur-récepteur et de la direction de visée permet alors de positionner le réflecteur. L'étude des propriétés (amplitude, phase, forme) de l'onde réfléchie permet pour sa part d'obtenir des informations sur la nature du réflecteur. Afin d'explorer les trois dimensions de l'espace, les lidars actuels émettent des faisceaux lasers dans différentes directions par un système de balayage parfois combiné au déplacement de la plate-forme d'acquisition. Le lidar permet donc la reconstruction 3D de la surface réflectrice pour la longueur d'onde utilisée. Les lidars sont alors utilisés pour des applications diverses allant de l'étude de l'atmosphère à la modélisation de la surface topographique.

Mesure de l'espace

Des lidars émettant dans les longueurs d'onde du visible sont utilisés pour la mesure de la surface topographique. Les mesures de temps de vol (temps nécessaire à l'onde pour faire l'aller-retour entre le lidar et l'objet mesuré) servent à déterminer la distance entre le lidar et la surface topographique. Cette mesure de distance est ensuite combinée avec la mesure de la direction de visée pour déterminer la position de la zone de réflexion par rapport à l'instrument. La connaissance de la position du lidar au moment de la mesure (obtenue par topométrie, GNSS, ou couplage GNSS/INS selon les cas) permet alors de dériver la position du réflecteur dans l'espace. Le lidar se comporte alors comme un tachéomètre de coordonnées connues réalisant un grand nombre de mesures, mais sans viser des points pré-déterminés et sans utiliser de prisme.
Grâce au balayage de l'espace, le lidar permet alors la mesure des coordonnées 3D d'un grand nombre de points de son environnement. Ce nuage de points géoréférencés permet alors une modélisation 3D dense (MNS) de la surface topographique dont les caractéristiques géométriques approchent celles des MNS dérivés de méthodes photogrammétriques, bien que les procédés d'acquisition soient très différents.

Mesure de déformations

Un levé lidar permet la réalisation d'un MNS à une date donnée. Pour mesurer des déformations il faut donc réaliser des MNS à deux dates et, comme dans le cas de la photogrammétrie, réussir à trouver quel point du second MNS correspond à quel point dans le MNS initial. Cependant, dans le cas du lidar, les données brutes ne se prêtent pas à la corrélation 2D inter-dates. Ici il faut donc utiliser une carte de profondeur, c'est à dire une image représentant la distance entre chaque point mesuré et le lidar, pour réaliser la mise en correspondance [Travelleti et al, 2014]. Cette carte de profondeur est facilement calculée à partir des temps de vol et des angles de visée. Une fois la corrélation inter-date réalisée sur les cartes de profondeur, le calcul de déplacements 3D à partir des MNS est obtenu de la même façon que dans le cas de la photogrammétrie (cf Fig. 1.3).

Application à la surveillance topographique

Pour la surveillance topographique seuls des lidars terrestres et fixes sont utilisés. En effet, la mise en correspondance inter-dates nécessite des cartes de profondeurs semblables pour que le calcul de corrélation aboutisse. De telles cartes de profondeur ne peuvent être obtenues que si les données sont acquises sous le même angle de vue et donc si le lidar est positionné à peu près au même endroit pour les deux acquisitions.
Dans le cas des lidars terrestres le balayage de l'espace par le faisceau laser est obtenu par la rotation d'un miroir selon un axe horizontal (qui permet d'acquérir des lignes verticales) combinée à la rotation de l'instrument autour de l'axe vertical (qui permet de décaler horizontalement les lignes d'acquisition). Les instruments actuels permettent d'acquérir des nuages de points denses (50 à 10000 pts/m^2) pour une zone située dans un rayon d'environ 1km autour de l'instrument

[Jaboyedoff et al, 2012]. Cependant, le pas de temps entre deux acquisitions est limité par la durée d'un scan qui s'étend d'une à plusieurs heures, ce qui limite la résolution temporelle de la surveillance [Schwalbe et al, 2008].
Des acquisitions par lidar terrestre ont déjà été utilisées avec succès pour la surveillance topographique d'objets naturels de petite taille tels que des glaciers [Schwalbe et al, 2008]
[Avian et al, 2009] ou des glissements de terrain [Jaboyedoff et al, 2012] [Travelleti et al, 2014], mais le traitement des données reste lourd et très manuel, ce qui exclut pour l'instant une surveillance continue ou en temps-réel.

Sources d'erreurs et contraintes opérationnelles

Les lidars topographiques terrestres reposent sur un principe de mesure proche de celui des tachéomètres (mesure d'angles et de distances). Cependant, pour permettre une acquisition rapide d'un grand nombre de points menant à un MNS dense, les procédés d'élimination des erreurs systématiques et d'acquisition de mesures redondantes ne sont pas appliqués. Les erreurs liées aux mesures d'angle (rotation du miroir et rotation de l'instrument) contribuent alors au budget d'imprécision de la mesure. S'y ajoute l'imprécision de mesure de distance qui est due aux imperfections du distancemètre ainsi qu'à l'emprise non ponctuelle du faisceau laser sur le terrain. Dans le cas d'un terrain non perpendiculaire à l'axe de visée la distance mesurée sera pour la plupart des lidars la distance au point de la tache le plus proche de l'émetteur, ce qui induit une erreur dans la mesure de distance liée à la rugosité du terrain. La combinaison de ces différentes erreurs conduit à une précision de quelques centimètres pour les nuages de points issus de mesures lidar utilisés pour la surveillance topographique.
Comme dans le cas de la photogrammétrie, la mesure de déplacement à partir de MNS calculés à deux dates différentes introduit une imprécision supplémentaire due à l'appariement inter-dates. Dans le cas du lidar l'utilisation de cartes de profondeur pour le calcul de corrélation rend le processus insensible aux variations d'éclairement et de météo, mais il est par contre sensible à la texture de l'objet. Le suivi d'un objet texturé donnera de bons résultats, alors que l'étude d'un objet lisse dégradera la mesure de déplacements en perturbant l'appariement inter-dates.
Au final, une précision centimétrique à décimétrique est obtenue pour la mesure de déplacements et de déformations par lidar terrestre.
Les contraintes opérationnelles liées à cette méthode résident principalement dans l'installation du lidar. Il doit être positionné sur une zone stable en visée directe avec l'objet à mesurer. De plus, les lidars consomment beaucoup d'énergie, ce qui nécessite un matériel conséquent (batteries, grand panneau solaire) ou une prise secteur pour leur alimentation.

Caractéristiques de la méthode

La table 1.3 récapitule les caractéristiques de la surveillance topographique par LIDAR.

Déploiement de l'installation	
Accès au site	Pas nécessaire, mesure à distance
Inter-visibilité	Nécessaire entre le lidar et la zone étudiée
Déploiement	Centralisé mais complexe
Conditions de fonctionnement	
Sensibilité météo	Ne fonctionne que par temps clair
Sensibilité surface	Peu sensible
Fonctionnement	24h/24
Temps de calcul	Calcul différé
Caractéristiques du résultat	
Résolution temporelle	Limitée par le temps d'acquisition d'un scan (environ 15min à 1h)
Résolution spatiale	Dense
Type de déformation	3D
Précision	Centimétrique à décimétrique

TABLE 1.3 – Caractéristiques de la surveillance topographique par un système LIDAR terrestre.

1.2.4 Interférométrie radar

Définition

Le radar (RAdio Detection And Ranging = détection et mesure de distance par onde radio) est un système consistant à mesurer la rétro-diffusion par l'environnement d'un signal radio préalablement émis. Pour cela une onde radio (bandes L à X pour les usages liés au positionnement, longueur d'onde $\lambda = 3$ *à* $30cm$) est émise, elle se réfléchit sur l'environnement et le signal rétro-diffusé est capté et analysé par un récepteur souvent proche de l'émetteur voire co-localisé avec ce dernier. Le radar est donc un système actif qui émet l'onde qui sera analysée en sortie. Les longueurs d'onde utilisées permettent d'acquérir des données par tous les temps et de jour comme de nuit. Le résultat obtenu est une image dont les pixels correspondent au signal rétro-diffusé par l'environnement dans une direction donnée. Une dimension de l'image correspond à la distance émetteur-réflecteur et l'autre dimension correspond à l'azimut du réflecteur par rapport à l'antenne émettrice. Afin d'améliorer la résolution des images radar en azimut, des radars à synthèse d'ouverture (SAR = synthetic aperture radar) sont fréquemment utilisés.
Le signal enregistré dans les images radar peut s'exprimer sous la forme : $S = A.e^{i\varphi}$ avec :
- A l'amplitude du signal. Une image d'amplitude permet d'imager l'environnement mais se montre bruitée.
- φ la phase du signal. Cette phase contient une information précise de la distance émetteur - réflecteur mais elle est ambiguë. De plus, elle est convoluée avec un déphasage dû à la réflexion sur l'environnement qui donne aux images brutes de phase un aspect aléatoire.

Mesure de l'espace

Pour la mesure de l'espace à partir de données radar, les images d'amplitudes donnent des résultats bruités à cause du phénomène de tavelures propre à la technologie radar [Fallour et al, 2011]. Elle peuvent toutefois être utilisées dans certains cas où les données de phase sont inexploitables (perte de cohérence). Les images d'amplitude sont alors traitées avec des procédés proches de ceux utilisés dans le cas de l'imagerie optique [Fallour et al, 2011]. Contrairement aux données d'amplitude, les données de phase peuvent être mises à profit pour la mesure précise de déformations. Pour cela elles doivent être différentiées : c'est l'interférométrie radar. Dans ce cas, des images de phase obtenues lors de deux acquisitions (2 antennes lors d'un unique passage ou acquisitions à deux dates réalisées par la même antenne) sont soustraites, ce qui élimine par différentiation le déphasage dû à la réflexion sur l'environnement qui est le même pour les deux images. Cette technique nommée InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) permet d'obtenir un interférogramme d'ondes cohérentes. La phase interférométrique représentée dans l'interférogramme, connue avec une ambiguïté de 2π rad, est alors la somme de quatre contributions distinctes de la géométrie du système {émetteur - réflecteur - récepteur} et de la propagation de l'onde électromagnétique dans l'atmosphère :

$$\phi = \phi_{dep} + \phi_{topo} + \phi_{atm} + \phi_{orb} + n[2\pi] \tag{1.3}$$

Avec :
- ϕ_{dep} la contribution due au déplacement du réflecteur entre les deux acquisitions. Seul le déplacement le long de l'axe de visée contribue à ϕ_{dep}.
- ϕ_{topo} la contribution due à la topographie au dessus d'un modèle d'ellipsoïde.
- ϕ_{atm} la contribution due à la traversée de l'atmosphère par l'onde électromagnétique. Cette contribution doit être prise en compte dans le cas d'acquisitions réalisées à deux dates différentes, car l'atmosphère (ionosphère et troposphère) change entre les deux dates et perturbe différemment le trajet des ondes. Ce biais lié à la traversée de l'atmosphère est modélisé en utilisant des mesures sur des points supposés fixes.
- ϕ_{orb} la contribution de la différence de position de l'antenne émettrice entre les deux acquisitions. Cette contribution est modélisée en utilisant une connaissance a priori de la position de la plateforme émettrice.
Dans le cas du positionnement, ϕ_{atm} et ϕ_{orb} sont deux perturbations modélisées a priori, et ϕ_{dep} et ϕ_{topo} sont deux contributions pouvant être utilisées pour mesurer l'espace. La mesure de ϕ_{topo} à ϕ_{dep} constant (acquisitions simultanées ou absence de mouvement) permet de mesurer un MNS de

la zone, alors que la mesure de ϕ_{dep} avec ϕ_{topo} modélisé par un MNS externe permet de mesurer le déplacement de l'objet suivi entre deux acquisitions.

Mesure de déformations

La mesure de déformations par InSAR consiste à mesurer la contribution ϕ_{dep} de la phase interférométrique en modélisant au préalable les autres contributions [Cavalié, 2011]. Les variations résiduelles de la phase interférométrique correspondent alors au déplacement des réflecteurs entre les deux acquisitions utilisées pour calculer l'interférogramme. Le champ de déplacement obtenu est alors dense et sa résolution spatiale correspond à la résolution des images de phase utilisées pour réaliser l'interférogramme. Cependant, seuls les déplacements selon l'axe de visée peuvent être mesurés à partir d'un unique interférogramme, et la reconstruction de déplacements en 3D nécessite donc l'utilisation de deux interférogrammes acquis avec des axes de visée différents et assez éloignés [Wright et al, 2004].
La principale limitation pour la mesure de déformations par InSAR réside dans la nécessité de cohérence entre les phases acquises à deux instants distincts. En effet, un changement de nature des réflecteurs (humidité du sol, croissance de la végétation, chute de neige...) entraîne une modification du déphasage introduit lors de la réflexion et conduit à l'échec de la différentiation [Fallour et al, 2011] [Cavalié, 2011]. La différence entre les deux mesures de phase redevient alors aléatoire à cause de la perte de cohérence. Pour se prémunir de cette perte de cohérence, il faut réaliser des acquisitions proches dans le temps et se focaliser sur la surveillance de zones dont la nature de la surface varie peu.

Application à la surveillance topographique

La surveillance topographique par InSAR est une application directe de la mesure de déformations présentée ci-dessus. Le suivi temporel des déformations est obtenu par la mesure fréquente et répétée d'interférogrammes. Comme dans le cas des systèmes optiques, l'utilisation de radars aéroportés est réservée à la cartographie statique (réalisation de MNS). Au contraire, l'utilisation d'acquisitions par satellite a déjà été appliquée avec succès à certains chantiers de surveillance topographique [Raucoules et al, 2003]. Cependant, la résolution des interférogrammes est peu compatible avec la taille des zones étudiées et le temps de revisite est grand (par exemple 11 jours pour TerraSAR-X). Ainsi, la résolution temporelle est faible et l'espacement des acquisitions peut provoquer une perte de cohérence entre les interférogrammes si la surface étudiée change rapidement d'aspect. Pour pallier ces différentes limitations, une acquisition terrestre est préférée pour la majorité des chantiers de surveillance topographique. L'InSAR sol est alors utilisé dans de nombreux cas, allant de l'étude de structures au suivi d'objets géophysiques de petite taille [Noferini et al, 2007] [Herrera et al, 2009] [Noferini et al, 2009] [Riesen et al, 2011]. Ses atouts sont sa grande précision et la mesure de champs de déformations denses. L'utilisation d'un unique émetteur quasi statique conduisant à la mesure des seules déformations selon l'axe de visée constitue au contraire sa principale limitation.

Sources d'erreurs et contraintes opérationnelles

Au cours des mesures InSAR, les principales erreurs viennent de la mauvaise modélisation de certaines contributions à la phase interférométrique (cf equation 1.3). Dans le cas de la surveillance topographique seuls les déplacements sont estimés, tandis que les trois autres contributions (déplacement de l'émetteur, topographie, traversée de l'atmosphère) doivent être modélisées. Le déplacement de l'émetteur est nul dans le cas du radar sol car l'émetteur est fixe. De plus, la topographie est finement modélisée grâce au recours à un MNS externe. La contribution liée à la traversée de l'atmosphère par les ondes radio est plus difficile à prendre en compte et peut provoquer une erreur décimétrique à métrique si elle est mal corrigée. Dans le cas du radar sol elle est estimée au préalable en utilisant des mesures sur des points réputés fixes. Une fois cette troisième contribution correctement modélisée, une précision millimétrique est atteinte pour les déplacements dans la direction de l'axe de visée qui sont les seuls mesurables.
La principale contrainte opérationnelle pour l'installation d'un radar sol est finalement la nécessité pour installer l'émetteur de disposer d'une plate forme assez étendue (environ $2m \times 2m$), stable et

en vue directe de l'objet d'intérêt et de quelques zones stables. De plus, comme pour le lidar ou les tachéomètres, une important source d'électricité est nécessaire.

Caractéristiques de la méthode

La table 1.4 récapitule les caractéristiques de la surveillance topographique par un système InSAR sol.

Déploiement de l'installation	
Accès au site	Pas nécessaire, mesure à distance
Inter-visibilité	Nécessaire entre le radar et la zone étudiée
Déploiement	Centralisé mais complexe
Conditions de fonctionnement	
Sensibilité météo	Fonctionne par tous les temps
Sensibilité surface	Perte de cohérence de phase si la surface étudiée change
Fonctionnement	24h/24
Temps de calcul	Calcul en temps légèrement différé
Caractéristiques du résultat	
Résolution temporelle	Jusqu'à 1 mesure par heure
Résolution spatiale	Dense
Type de déformation	1D
Précision	millimétrique

Table 1.4 – Caractéristiques de la surveillance topographique par un système InSAR sol.

1.2.5 GNSS

Définition

Les systèmes GNSS (Global Navigation Satellite System) sont des systèmes de radio positionnement par satellite. Leur but initial, qui demeure aujourd'hui leur principale utilisation, consiste à permettre à un utilisateur au sol de connaître sa position à la surface de la Terre avec une précision métrique. Pour cela un système GNSS regroupe un segment spatial composé généralement d'une trentaine de satellites émettant un signal électromagnétique dans la bande L (longueur d'onde λ=15 à 30cm), un segment de contrôle au sol composé d'une dizaine de stations de contrôle et de poursuite qui pilotent et surveillent le segment spatial et d'un segment utilisateur composé d'un récepteur GNSS conçu pour être simple et mobile. Les segments sol et spatial sont gérés par les agences spatiales, tandis que le récepteur mobile est opéré par l'utilisateur.
Les GNSS permettent un nombre illimité d'utilisateurs simultanés qui peuvent se positionner indépendamment les uns des autres. De plus, les longueurs d'onde utilisées et le fait que les GNSS soient des systèmes actifs et mondiaux permettent un positionnement par tous les temps, et à n'importe quel moment.
Le premier système GNSS créé et aujourd'hui encore le plus important est le système GPS (Global Positioning System, Annexe. A), mis en place par les Etats-Unis d'Amérique à partir de 1978 et opérationnel depuis 1995. Il est basé sur deux fréquences porteuses (L1 $\lambda = 19.03cm$ et L2 $\lambda = 24.42cm$) et transmet un message pour le positionnement civil (code C/A) ainsi que des messages cryptés pour le positionnement militaire (codes P et Y). Le système GPS a été rejoint par le système Glonass développé par l'URSS et aujourd'hui opéré par la Fédération de Russie. Il est opérationnel depuis 2011. De plus, l'Union Européenne et la Chine développent actuellement leur propre GNSS, nommés respectivement Galiléo et Beidou, qui devraient être opérationnels à l'horizon 2020.
Actuellement des efforts importants sont fournis par les acteurs du domaine des GNSS afin de permettre l'inter-opérabilité des différents systèmes, et ainsi fournir un meilleur service aux utilisateurs, tant en terme de précision de positionnement que de disponibilité des satellites en chaque point de la Terre.

Mesure de l'espace

Le mode de positionnement naturel d'un récepteur GNSS consiste à l'utiliser comme un outil de navigation qui permet un positionnement métrique et quasi-instantané basé sur des messages de code (code C/A dans le cas du GPS).
Cependant, un positionnement précis basé sur l'utilisation de la phase des ondes porteuses a été développé lors des premières années du système GPS afin de contourner la dégradation de la précision (selective availability-SA) du code C/A imposée aux civils par l'armée américaine (et désactivé depuis mai 2000). Ce mode de positionnement consiste à positionner précisément un point inconnu relativement à une station GPS précisément localisée. Il nécessite donc des données issues de ces deux stations. Cette méthode a abouti rapidement à un positionnement relatif centimétrique [Blewitt, 1989], dit différentiel, et son développement s'est poursuivi après la suppression de la SA pour des applications géodésiques et géophysiques nécessitant la détermination de positions précises. Elle a ensuite été étendue aux autres systèmes GNSS au fur et à mesure de leur apparition. Aujourd'hui le positionnement précis par GNSS atteint une précision millimétrique en post-traitement et centimétrique en temps réel si des mesures différentielles sont réalisées.
Des développements ultérieurs [Zumberge et al, 1997] [Laurichesse et al, 2009] ont permis la mise au point du PPP (Positionnement Ponctuel Précis) qui rend possible un positionnement en point isolé basé sur des mesures de phase. La précision est alors infra-centimétrique en post-traitement et décimétrique en temps-réel.

Mesure de déformations

Pour la mesure de déformations, un réseau de récepteurs GNSS est déployé en un certain nombre de points de la zone d'intérêt et un traitement sur les données de phase (PPP ou différentiel) est privilégié dans la plupart des cas. De nombreux travaux ont permis la mesure de déformations dans différents contextes, en particulier pour suivre des objets géophysiques de grande taille (tectonique des plaques [Iinuma et al, 2011], rebond post-glaciaire [Larson and van Dam, 2000]). Cependant, les récepteurs utilisés pour le positionnement différentiel doivent être de classe géodésique pour permettre une acquisition et un traitement fiable de la phase et ils coûtent donc cher (environ 10000 euros). Ceci limite le déploiement de réseaux denses et seules les agences cartographiques ou les organisations scientifiques internationales sont en mesure de déployer et de maintenir des réseaux incluant de nombreux récepteurs. Pour pallier ce problème, des récepteurs mono-fréquence moins onéreux (quelques milliers d'euros) sont utilisés dans le cas de suivi de déformations de petites zones (volcans [Janssen, 2003], glissements de terrain [Squarzoni et al, 2003] [Heunecke et al, 2011] [Singer et al, 2009], ouvrages d'art [Cosser et al, 2004]). Ils permettent ainsi le déploiement de réseaux conséquents (de l'ordre de la dizaine de récepteurs) pour la mesure de déformations en quelques points stratégiques de la zone étudiée.

Application à la surveillance topographique

La surveillance topographique nécessite le développement de récepteurs spécialisés, idéalement le moins cher possible pour augmenter la densité des réseaux et permettant un fonctionnement autonome ainsi qu'un positionnement en temps-réel. Afin de baisser le prix des récepteurs, des puces GNSS (mais le plus souvent uniquement GPS) mono-fréquence et peu onéreuses (environ 100 euros) sont utilisées pour la confection des récepteurs. Ces puces sont normalement destinées à une utilisation en mode navigation, mais elles fournissent comme "sous-produit" des mesures de phase brutes qui sont mises à profit pour réaliser un positionnement différentiel précis dans le cas de courtes lignes de base entre récepteurs [Schwieger, 2009] [Takasu and Yasuda, 2008] [Takasu and Yasuda, 2009]. Ces puces GNSS à faible coût et économes en énergie sont alors intégrées dans des récepteurs mono-fréquence dédiés à la surveillance topographique. Ils permettent un positionnement précis grâce au GNSS et un traitement des données en temps réel grâce à un partage par radio des données acquises. De tels systèmes sont actuellement en développement et sont utilisés pour différents chantiers de surveillance en conditions difficiles (glissements de terrain [Cattin and Brahier, 2011], arrêtes rocheuses [Mourot, 2008], glaciers [Buchli et al, 2012]).

Sources d'erreurs et contraintes opérationnelles

Les sources d'imprécision impactant le positionnement GNSS différentiel sont présentées en détail section 2.4. Les principales erreurs concernant le positionnement sont liées à la traversée de l'atmosphère par les ondes GNSS, mais elles sont très fortement atténuées par différentiation dans le cas des courtes lignes de base considérées pour la surveillance topographique.
Une précision centimétrique est alors atteinte pour la mesure de déformations en temps-réel par GNSS différentiel. Les erreurs résiduelles sont majoritairement imputables aux multitrajets (cf section 2.5).
Concernant l'installation du système, la principale contrainte réside dans la nécessité d'accéder à tous les points de mesure pour y installer les récepteurs GNSS. De plus, les sites choisis doivent présenter un ciel avec peu de masques (bâtiments, sommets, végétation...) pour permettre aux récepteurs de capter les données provenant d'un maximum de satellites.

Caractéristiques de la méthode

La table 1.5 récapitule les caractéristiques de la surveillance topographique par GNSS.

Déploiement de l'installation	
Accès au site	Nécessaire pour installer les récepteurs
Inter-visibilité	Pas nécessaire
Déploiement	Simple mais décentralisé
Conditions de fonctionnement	
Sensibilité météo	Fonctionne par tous les temps
Sensibilité surface	Résultat indépendant de la surface étudiée
Fonctionnement	24h/24
Temps de calcul	Possibilité de temps-réel
Caractéristiques du résultat	
Résolution temporelle	Jusqu'à 1Hz
Résolution spatiale	Faible
Type de déformation	3D
Précision	centimétrique

TABLE 1.5 – Caractéristiques de la surveillance topographique par GNSS.

1.2.6 Bilan : intégration d'une composante de surveillance topographique à un réseau de capteurs

Deux classes de méthodes de surveillance topographique peuvent être établies à l'issue de cet état de l'art : les méthodes de mesure à distance de type télédétection (photogrammétrie, lidar, InSAR) et les méthodes ponctuelles basées sur des mesures in-situ (topométrie, GNSS).
Les méthodes de type télédétection présentent l'avantage de fournir des champs de déformations denses sans avoir à accéder à la zone d'étude. Les déformations peuvent alors être mesurées pour la quasi-totalité des points de la zone. Par contre ces méthodes sont sensibles à l'évolution de la surface de la zone étudiée et de plus elles ne garantissent pas que les points utilisés pour la détermination des déplacements soient exactement les mêmes à différentes dates, ce qui dégrade la fiabilité des déformations mesurées.
Les méthodes ponctuelles basées sur des mesures in-situ permettent elles le calcul direct de déformations 3D et assurent le suivi de points bien déterminés grâce à leur matérialisation (prismes, récepteurs GNSS). Par contre leur résolution spatiale est faible et leur déploiement nécessite l'accès à la zone étudiée.

Les réseaux de capteurs sont basés sur des mesures in-situ et ponctuelles de différents paramètres physiques. L'utilisation d'une méthode de mesure de déformations présentant des caractéristiques semblables est donc naturelle pour la mise au point de la composante de surveillance topographique intégrée à un tel réseau de capteurs. Parmi les deux techniques ponctuelles de surveillance topographique présentées dans cet état de l'art, le GNSS a de nombreux atouts. Il s'agit d'une méthode

de positionnement facilement décentralisable dans laquelle tous les récepteurs jouent à peu près le même rôle, ont de faibles exigences de fonctionnement (énergie, inter-visibilité) et peuvent être facilement miniaturisés. Cependant, une optimisation des coûts est indispensable pour la rendre pleinement compatible avec un usage dans le cadre d'un réseau de capteurs.

1.3 Mesure de déformations à l'aide d'un réseau de Geocubes

1.3.1 Présentation du Geocube

Afin de développer un réseau de capteurs possédant une composante de surveillance topographique précise, le laboratoire LOEMI de l'IGN mène depuis 2006 le développement du Geocube. L'idée fondatrice a été de réaliser un réseau de capteurs s'appuyant sur une puce GPS qui assure deux fonctionnalités : le positionnement relatif précis des nœuds du réseau et la datation de l'ensemble des mesures effectuées par le réseau dans une unique échelle de temps : le temps GPS. En plus du GPS qui constitue l'unique capteur "de série", le Geocube a été conçu pour permettre l'ajout modulaire de n'importe quel type de capteur afin de mesurer des paramètres physiques additionnels à la variation de la géométrie de la surface de la zone étudiée.
Le système ainsi obtenu permet alors :
- La mesure précise des déplacements et des déformations de la surface de la zone surveillée grâce à la présence d'une composante de surveillance topographique.
- L'interprétation et la recherche des causes des déformations observées grâce aux paramètres supplémentaires mesurés par les couches de capteurs additionnels.
- La mesure de plusieurs paramètres co-localisés et exprimés dans une même échelle de temps en de nombreux points de la zone d'étude. Cette co-localisation et la datation dans une unique échelle de temps de plusieurs paramètres rend possible leur comparaison rigoureuse.
- La géo-localisation précise de chaque nœud sensible du réseau. Cette géo-localisation des mesures couplée à leur datation permet l'étude spatio-temporelle des phénomènes observés.
En pratique le Geocube est un récepteur voué à être abandonné sur un nœud d'un réseau de surveillance afin de mesurer les déformations du sol ainsi que d'autres paramètres physiques éventuels. Il se présente sous la forme d'un récepteur cubique de 7cm de côté (Fig. 1.4) conçu pour être bon marché, facile à installer, économe en énergie et pouvant être déployé en réseau.

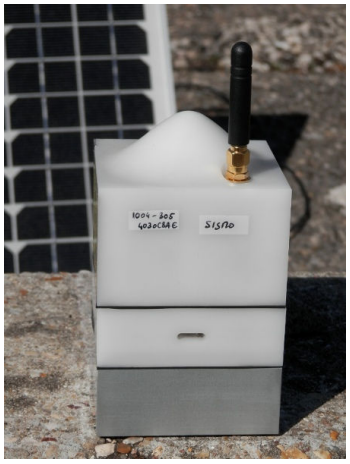

FIGURE 1.4 – Le Geocube et son panneau solaire.

L'autonomie énergétique du Geocube est possible grâce à sa faible consommation et à la gestion de possibles pénuries d'énergie. Son coût modéré est obtenu par l'utilisation de composants électroniques bas coût car issus du marché de masse, y compris la puce GPS. Ce faible prix unitaire du Geocube rend alors envisageable le déploiement de réseaux comportant de nombreux nœuds sensibles. Enfin, pour permettre un déploiement, une maintenance et une exploitation simple des réseaux (Fig. 1.5), la communication entre Geocubes est réalisée sans fil par un lien radio.

FIGURE 1.5 – Déploiement de Geocubes sur le terrain (*photos de gauche et du centre : O.Martin*).

1.3.2 Le récepteur Geocube : architecture en modules

Le fonctionnement d'un Geocube est assuré par trois modules de base implémentant chacun une fonctionnalité précise, auxquels viennent s'ajouter des couches capteurs qui se greffent de façon modulaire au Geocube socle (Fig. 1.6).

FIGURE 1.6 – Architecture en modules du Geocube.
Gauche : schéma de l'architecture, droite : cartes électroniques (illustration et photo : O.Martin).

Le module GPS

Le module GPS est principalement composé d'une puce GPS Ublox LEA-6T mono-fréquence et d'une petite antenne GPS basique. Cette puce LEA-6T [U-Blox LEA-6] se présente sous la forme d'un petit composant électronique rectangulaire (17 x 24 x 2.4mm).
Le module GPS fournit pour la porteuse L1 (λ = 19.05cm) l'ensemble des observations GPS usuelles, à savoir : C/A code, phase, Doppler, rapport signal sur bruit (SNR) et indicateur de saut de cycle, et ceci sous forme de paquets de données au format ubx propriétaire mais documenté [U-Blox ubx Format] envoyés au module de gestion par une liaison série. Ces observations sont disponibles jusqu'à une fréquence de 5Hz pour tous les satellites de la constellation GPS. En plus de la génération de données brutes, la puce GPS permet le calcul à la demande d'une position naviguée à l'aide du code (précise à 2.5m) ainsi que la datation d'évènements (précise à 60ns) qui

est utilisée dans le module de gestion pour synchroniser l'horloge interne du Geocube. Les ondes émises par les satellites sont acquises par 50 canaux de corrélation regroupant plus de deux millions de corrélateurs, ce qui permet le verrouillage des satellites en moins d'une seconde. L'oscillateur utilisé dans la puce GPS est un TCXO (Temperature Controlled X(Crystal) Oscillator, Oscillateur compensé en température). L'horloge qui en est issue présente cependant une dérive résiduelle qui est fonction de la température ambiante (Fig. 1.7) et qui peut être assez élevée (jusqu'à 10^{-6}). La puce GPS recale donc son horloge interne par un saut de 1ms lorsque l'écart entre le temps GPS et le temps récepteur dépasse 0.5ms afin que le temps de la puce GPS ne s'éloigne jamais trop de l'échelle de temps GPS (Fig. 1.7).

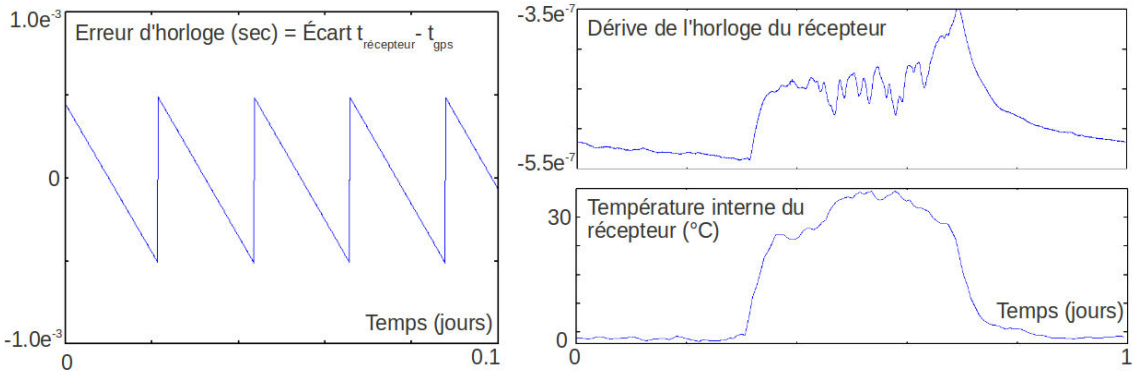

FIGURE 1.7 – Erreur d'horloge de la puce LEA-6T.

L'antenne GPS utilisée dans la version actuelle des Geocubes est de modèle Sarantel SL1206, mais suite à la disparition du fabricant elle sera remplacée à l'avenir par une antenne patch en cours de spécification. Il s'agit dans les deux cas d'antennes GPS basiques qui possèdent des lobes de gain relativement sphériques, ce qui entraîne une acquisition quasi-isotrope des ondes GPS. Afin de rejeter une partie des ondes venant du sol et d'augmenter le rapport signal sur bruit de l'antenne, cette dernière est fixée sur un plan de masse prenant toute la largeur du Geocube (Fig. 1.8).

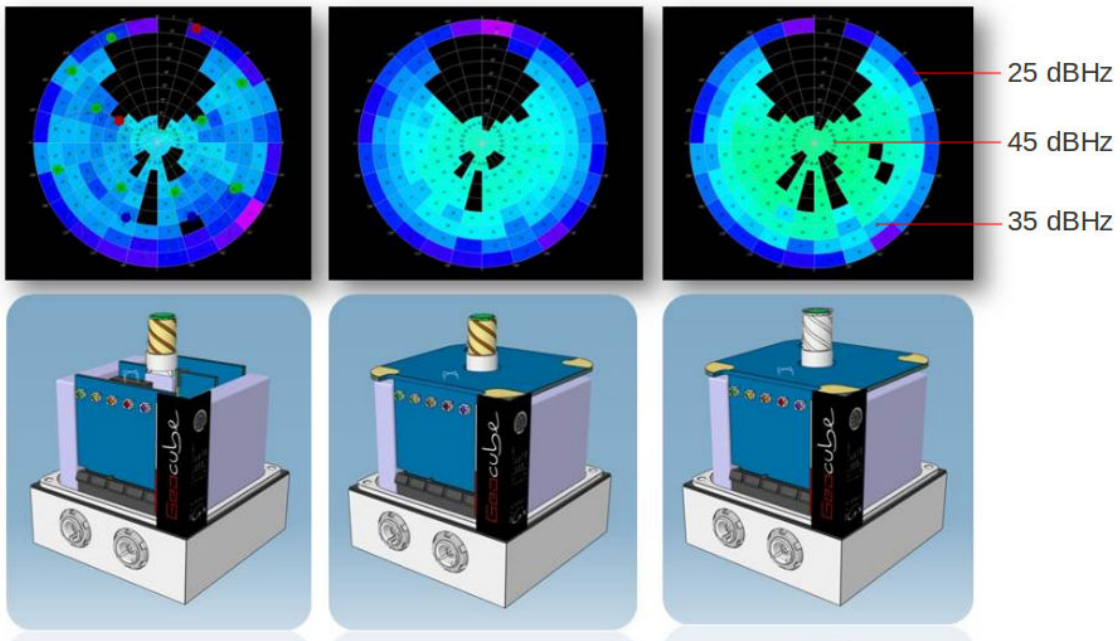

FIGURE 1.8 – Amélioration du SNR lors de l'intégration de l'antenne SL1206 au Geocube. *De gauche à droite : antenne nue, antenne + plan de masse, antenne + plan de masse + gaine amplificatrice (illustration : O.Martin).*

Le module de gestion

Le module de gestion coordonne les différentes tâches réalisées par le Geocube. Il est conçu à partir d'un micro-contrôleur MSP430F5438A de Texas Instrument de la famille des micro-contrôleurs 16bits à très faible consommation. Ce micro-contrôleur possède des capacités de calcul réduites, mais présente l'avantage de consommer très peu d'énergie (10mW en fonctionnement, 0.1mW en veille active). De plus, il permet différents modes d'endormissement ainsi qu'un réveil en seulement 5μs. Afin de piloter ce micro-contrôleur, un système d'exploitation dédié nommé G3OS a été entièrement développé au LOEMI (Fig. 1.9). Il permet de gérer l'arrivée simultanée de plusieurs évènements par ordre de priorité (noyau temps-réel).
D'un point de vue fonctionnel, le module de gestion permet tout d'abord la gestion de l'énergie du Geocube. Cette dernière est fournie soit par deux batteries internes Lithium/polymère de 2200mAh sous 3.7V chacune, soit par une source externe d'énergie, le plus souvent un petit panneau solaire de 10W. La consommation du Geocube s'élève pour sa part à 650mW en pleine activité, mais peut être ramenée à 3mW lorsque le récepteur est placé en mode veille. Ce mode veille est enclenché automatiquement par le module de gestion lorsque l'énergie vient à manquer (Fig. 1.9). Dans ce cas, G3OS éteint progressivement les composants les plus gourmands en énergie (en particulier le GPS et la radio) et finit par plonger le Geocube en hibernation en cas d'extrême disette. Les mesures reprendront progressivement quand l'énergie sera à nouveau disponible.

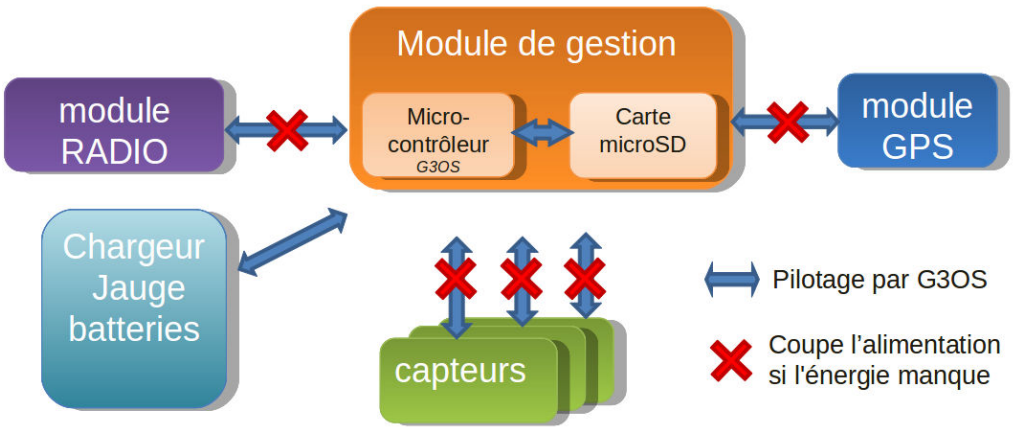

FIGURE 1.9 – Fonctionnement du module de gestion (*illustration : O.Martin*).

Le module de gestion permet d'autre part l'enregistrement dans le Geocube ou la transmission radio des données acquises par les différents capteurs (GPS et couches capteurs) qui lui sont transmises par des liaisons séries (SPI, I2c ou UART). Dans le cas de l'enregistrement des données, le module de gestion transforme les paquets de données en fichiers qu'il écrit sur une carte mémoire microSD de 2 à 8GB. L'utilisation du système de fichiers FAT32 permet la lecture de ces données par n'importe quel ordinateur. Dans le cas d'un transfert radio des données, le module de gestion transforme les paquets de données issus des capteurs dans un format compatible avec l'envoi radio et les transmet au module radio qui se charge de leur envoi.
Enfin, le module de gestion génère le temps du Geocube. Pour permettre une datation précise des évènements, l'horloge interne du micro-contrôleur qui sert d'horloge de référence au Geocube est en effet asservie par la fonction de datation fournie par la puce GPS de telle sorte qu'elle ne s'écarte jamais du temps GPS de plus de 10^{-4} sec.

Le module radio

Le module radio permet au Geocube de communiquer avec l'extérieur, aussi bien avec les autres Geocubes qu'avec le nœud principal du réseau qui assure l'interface avec l'utilisateur. La communication radio rend donc possible la centralisation des données au niveau de ce nœud principal ainsi que le paramétrage du Geocube et la mise à jour de son système d'exploitation G3OS par un utilisateur distant.
Le module radio est principalement composé d'une puce XBEE Pro de chez Digi utilisant la fréquence 2.4GHz. Cette puce implémente le protocole DigiMesh, protocole propriétaire qui présente l'avantage de placer tous les Geocubes du réseau au même niveau : chaque récepteur peut se comporter en routeur et réémettre les messages provenant d'un autre point du réseau. Ainsi, la puce radio se charge de définir le chemin suivi par les données de façon transparente pour l'utilisateur. On tire alors parti du fonctionnement en réseau, car les données d'un Geocube éloigné du nœud principal peuvent lui être transmises après avoir effectué plusieurs bonds, ce qui permet de couvrir une distance plus grande que si une visibilité directe était requise entre ces deux points. Cette portée directe est en effet limitée par la puissance d'émission volontairement faible afin d'obtenir un module radio à faible consommation. Dans une configuration optimale, une portée de 1700m est annoncée par le fabricant, mais en conditions réelles la portée est plutôt de l'ordre de 500m.
L'utilisation du protocole DigiMesh permet d'étendre la taille globale des réseaux envisageables, mais en contrepartie il limite la quantité de données pouvant transiter sur l'ensemble du réseau. Dans le cas des Geocubes, la bande passante est ainsi limitée à 1.2Ko/sec pour l'ensemble du réseau quelque soit le nombre de récepteurs présents, ce qui nécessite une gestion parcimonieuse de la bande passante surtout quand de nombreux récepteurs sont déployés.

Les couches capteurs

L'idée d'un ajout modulaire de couches capteurs à un récepteur socle est venue du constat que l'exploitation de données issues de capteurs variés reste compliquée et nécessite beaucoup de temps de développement à chaque fois qu'un nouveau type de capteur est considéré. Ceci vient en particulier du grand nombre d'interfaces existantes (I2c, SPI, UART...). Il est donc intéressant d'implémenter une fois pour toute ces interfaces dans un récepteur socle chargé de l'ensemble des tâches "logistiques" de la collecte de données. Un nouveau capteur pourra alors être ajouté rapidement au récepteur sans avoir à refaire l'ensemble des développements. Ici c'est le Geocube qui joue ce rôle de "support universel" en particulier au travers du logiciel G3OS. Il peut donc être vu comme un dispositif qui s'occupe de l'alimentation, de la communication, du positionnement et de la datation pour permettre la gestion des données qui sont acquises par des couches capteurs.
Une couche capteur consiste pour sa part en un capteur entouré de l'électronique nécessaire à son adaptation au Geocube. Si le capteur est suffisamment petit (cas des capteurs MEMS : Micro-ElectroMechanical System = microsystème électromécanique) et ne nécessite pas une installation particulière pour être mis en contact avec l'environnement à mesurer, la couche capteur sera fixée sous le Geocube et connectée par un connecteur carte à carte 64 points (Fig. 1.10). Si au contraire le capteur est volumineux ou nécessite d'être déporté par rapport au Geocube (ex : sismomètre, station météo, sonde piézométrique) il pourra être relié au boitier grâce à un connecteur en façade (Fig. 1.10).
Différentes couches capteurs ont été développées à des fins de test par le LOEMI :
- Station météo.
- Capteur de pression, température et humidité de l'air.
- Sonde mesurant la pression et l'humidité du sol.
- Capteur de radioactivité.
- Sismomètre.

Les données acquises par ces capteurs sont datées soit grâce à l'horloge interne du Geocube, soit directement à partir de la puce GPS grâce à une connexion filaire entre le capteur et le GPS si une datation très précise (jusqu'à 1μs) est nécessaire. Dans les deux cas cela permet de dater les mesures de tous les capteurs de l'ensemble des récepteurs d'un réseau de Geocubes dans une unique échelle de temps (le temps GPS) et donc d'étudier de façon pertinente l'évolution spatio-temporelle des phénomènes suivis.

FIGURE 1.10 – Connexion des couches capteurs au boitier du Geocube.
Gauche : connexion carte à carte, droite : connecteur en façade (illustration et photo : O.Martin).

1.3.3 Fonctionnement en réseau et rôle du coordinateur

Le fonctionnement en réseau est au cœur du principe du Geocube. Les données collectées par l'ensemble des Geocubes du réseau sont transmises par radio à un nœud principal constitué d'un petit ordinateur de terrain nommé coordinateur. C'est lui qui traite et archive les données, paramètre les Geocubes et sert d'interface avec l'utilisateur (Fig. 1.11). Pour cela il dispose d'une connexion internet qui lui permet de communiquer avec un terminal distant et d'un modem radio XBEE qui assure le lien avec les Geocubes.

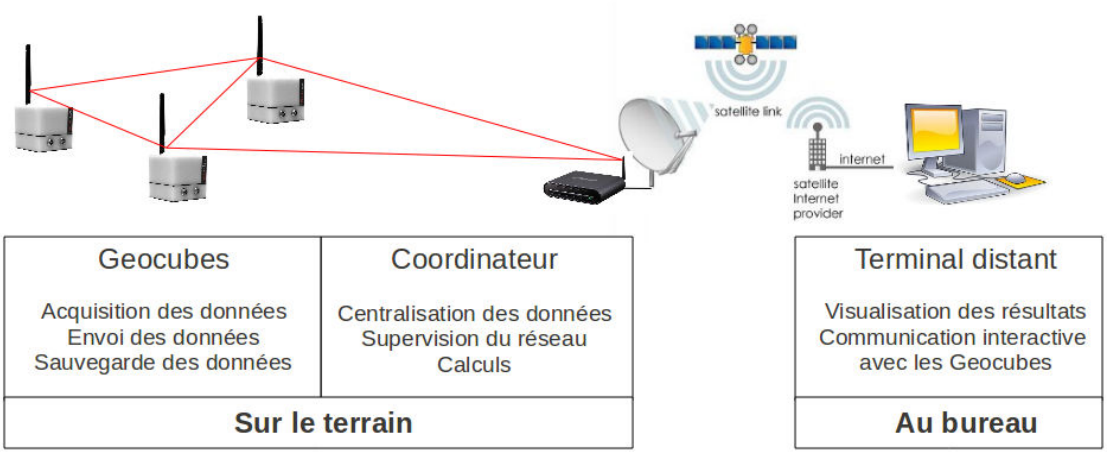

FIGURE 1.11 – Le coordinateur au sein du réseau de Geocubes.

Cette centralisation des données et des tâches de supervision au niveau du coordinateur rend bien sûr le système vulnérable à une faille dans le coordinateur et oblige donc à apporter une attention particulière à ce composant central ; mais elle présente en contrepartie un triple avantage :
- Elle permet de placer aux nœuds du réseau des Geocubes dédiés uniquement à la collecte de

données. Ceci aboutit à des récepteurs simples et donc peu soumis à des risques de panne, mais aussi faciles à déployer et économes en énergie, car les calculs complexes sont laissés au soin du coordinateur.
- Elle permet au coordinateur de superviser le fonctionnement de l'ensemble du réseau. En effet, c'est lui qui contrôle régulièrement l'état des Geocubes et leur envoie des requêtes leur demandant de changer leur configuration en fonction des mesures à effectuer.
- Elle rend possible un calcul GPS en réseau qui aboutit à un positionnement relatif précis et fiable des récepteurs au sein du réseau.
Trois composantes logicielles principales assurent ces fonctionnalités au niveau du coordinateur (Fig. 1.12) :
- *La base de données* : C'est elle qui assure le lien entre l'utilisateur et les autres programmes qui fonctionnent sur le coordinateur. Elle permet l'archivage de l'ensemble des données collectées et traitées par le réseau. Pour consulter ces données, l'utilisateur se contente d'envoyer des requêtes à la base de données. Le management du réseau de Geocubes par l'utilisateur passe lui aussi par la base de données qui lui permet de remplir certains champs dédiés qui seront ensuite interprétés par les autres programmes du coordinateur qui s'en serviront pour générer des commandes de paramétrage des Geocubes. L'utilisation d'une base de données comme interface unique avec l'utilisateur fournit à ce dernier un outil simple et standard pour gérer le réseau. Dans la version actuelle du coordinateur une base de donnée PostGreSQL utilisant le standard SQL pour la génération de requêtes est implémentée.
- *Le superviseur* : Ce programme est conçu pour être le chef d'orchestre du réseau. Lors du déploiement c'est lui qui réalise une "découverte" du réseau qui lui permet de détecter les Geocubes présents sur le terrain. Une fois cette première étape réalisée, le superviseur paramètre les Geocubes afin que le réseau réalise au mieux les mesures spécifiées par l'utilisateur dans la base de données et lance le logiciel de traitement GPS. Il traduit donc les spécifications insérées par l'utilisateur dans la base de données en commandes compréhensibles par les Geocubes. Ce paramétrage peut être mis à jour à n'importe quel instant grâce à une interprétation interactive par le superviseur des spécifications insérées dans la base de données.
- *Le logiciel de traitement GPS* : Ce logiciel permet le traitement des mesures GPS brutes pour en dériver des positions relatives précises des Geocubes au sein du réseau. La centralisation des données avant le calcul permet un traitement en réseau qui améliore la fiabilité et la précision du résultat. Le logiciel de traitement GPS utilise en entrée des données GPS brutes qui lui sont fournies par le pont radio du coordinateur, et fournit en sortie les positions précises des Geocubes qui sont archivées dans la base de données.

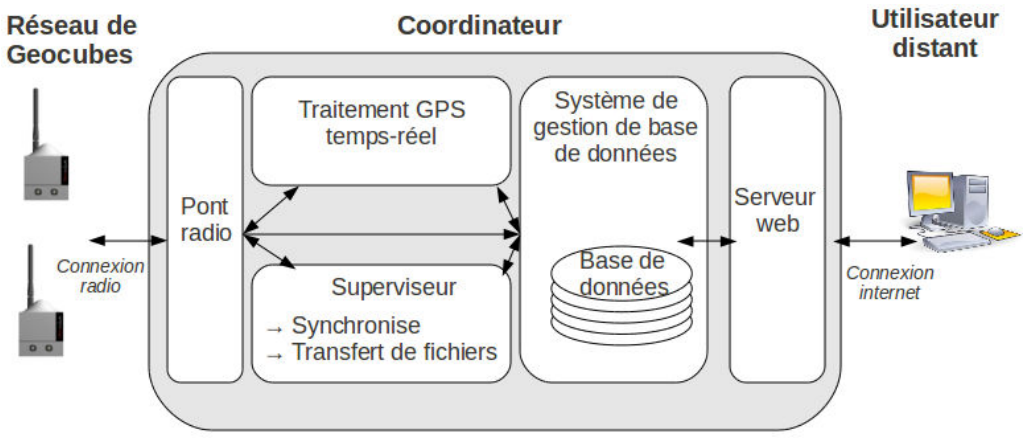

FIGURE 1.12 – Les différentes composantes logicielles du coordinateur.

1.3.4 Bilan : utilisation d'un réseau de Geocubes pour la mesure de déformations

La création d'un réseau de capteurs dont les récepteurs sont conçus autour d'un module GPS est au cœur du principe du Geocube. L'utilisation à des fins de surveillance topographique fait alors partie de ses principales applications. Un réseau de Geocubes utilisé dans ce but permet alors de tirer profit des points forts du GPS pour la mesure de déformations, en particulier sa capacité à fournir une mesure 3D précise de déplacements avec une grande résolution temporelle. Mais l'intégration du GPS dans les Geocubes va plus loin en apportant des améliorations par rapport aux systèmes GNSS classiques grâce à l'exploitation du concept de réseau de capteurs. Ceci conduit en effet au déploiement de réseaux denses qui implique l'augmentation de la résolution spatiale du levé. Cette architecture en réseaux de capteurs facilite également l'acquisition et le traitement des données de façon automatique et en temps-réel grâce à la grande autonomie des récepteurs utilisés et leur communication par l'intermédiaire d'un lien radio.
L'objectif de l'utilisation des Geocubes pour la mesure de déformations est alors de fournir un nouveau type de données augmentant le panel des méthodes de surveillance topographique présentées dans l'état de l'art en utilisant au maximum le tandem "positionnement GPS et réseau de capteurs". En exploitant au maximum les avantages de ces deux éléments, la méthode de mesure de déformations mise au point au cours de cette thèse permet :
- Une acquisition et un traitement automatiques et en temps-réel des données GPS acquises par le Geocube.
- La mesure de déformations 3D avec un haut niveau de précision.
- La mesure d'un champ de déformations possédant une grande résolution temporelle et spatiale.

Chapitre 2

Traitement des données de phase GPS issues des Geocubes pour la mesure en temps-réel de déformations de faible amplitude

Sommaire

2.1 Introduction 36
2.2 Méthode de positionnement relatif 36
2.2.1 Choix de la méthode 36
2.2.2 Formation des doubles différences et pondération associée 38
2.2.3 Calcul en réseau et mise en référence 41
2.2.4 Estimation des positions relatives des Geocubes par filtrage de Kalman 42
2.2.5 Paramétrage du filtre de Kalman et modèle stochastique 44
2.2.6 Résolution des ambiguïtés 44
2.2.7 Etude du terme d'innovation pour les doubles et triples différences . . . 50
2.2.8 Bilan : caractéristiques du positionnement des Geocubes au sein du réseau 52
2.3 Implémentation de la méthode de positionnement 52
2.3.1 Généralités 52
2.3.2 Le module de post-traitement 53
2.3.3 Le module temps-réel 54
2.3.4 Traitement de données décimées 59
2.3.5 Bilan : positions brutes obtenues 60
2.4 Principales sources d'imprécision 62
2.4.1 Biais totalement éliminés par double différentiation : les erreurs d'horloge 62
2.4.2 Biais fortement réduits par différentiation 62
2.4.3 Biais locaux non différentiés : les multitrajets 68
2.5 Atténuation de l'effet des multi-trajets 72
2.5.1 Paramétrage du filtre de Kalman : filtrage strict 72
2.5.2 Cartographie des multitrajets 73
2.5.3 Calcul en réseau 74
2.5.4 Correction sidérale 75
2.5.5 Stratégie retenue pour l'atténuation des multitrajets 76
2.5.6 Prise en compte des multitrajets dans le cas de données décimées 77
2.6 Performances et limitations de la méthode de positionnement proposée 78
2.6.1 Conditions optimales d'utilisation 78

2.6.2 Vérification de l'exactitude des déplacements mesurés par comparaison à d'autres logiciels de traitement GPS 78
2.6.3 Précision finale atteinte 80

2.1 Introduction

Une méthode de traitement GPS a été développée pour permettre l'exploitation des données GPS collectées par un réseau de Geocubes à des fins de surveillance topographique. Elle vise à répondre aux spécifications de mesure de déformations établies précédemment :
- Permettre le positionnement 3D le plus précis possible des récepteurs au sein d'un réseau dense de Geocubes.
- Fournir une solution avec une grande résolution temporelle.
- Permettre un calcul en temps-réel à l'aide d'une chaîne de traitements automatisée.
L'adaptation du traitement GPS aux réseaux de Geocubes implique alors de prendre en compte les contraintes liées à ces réseaux dont les principales sont :
- L'utilisation de récepteurs et d'antennes GPS non géodésiques qui conduisent à des données GPS brutes de moins bonne qualité que l'utilisation de récepteurs géodésiques.
- La faible puissance de calcul des récepteurs Geocubes.
- La faible bande passante et la faible portée du lien radio nécessaire au transfert des données brutes.
Ce chapitre expose la méthode de traitement GPS mise au point pour répondre aux spécifications désirées sous les contraintes liées aux Geocubes. Les choix théoriques aboutissant à la méthode de positionnement adoptée seront tout d'abord présentés. Ensuite, l'implémentation des algorithmes sera détaillée afin de présenter l'adaptation du traitement GPS à une utilisation dans le contexte d'un réseau de capteurs sans fils type Geocube. Enfin, l'analyse des principales sources d'imprécisions entachant le résultat obtenu à l'issue des traitements permettra de déterminer les limites du système de positionnement obtenu et d'en améliorer la précision grâce à des traitements additionnels adaptés.

2.2 Méthode de positionnement relatif

2.2.1 Choix de la méthode

Pour le positionnement des Geocubes au sein du réseau, nous disposons de l'ensemble des observables GPS fournies par la puce LEA-6T à savoir : date d'observation, mesure de C/A code, mesure de phase, mesure de Doppler, rapport signal sur bruit ainsi qu'un indicateur de sauts de cycle.
Ces données ne sont disponibles que pour la fréquence L1 de la constellation GPS. Ceci aboutit à un nombre limité de satellites visibles à chaque instant, en pratique 5 à 10 pour une constellation GPS comptant au total 32 satellites (Annexe. A). Une fois acquises par la puce GPS, ces données brutes sont disponibles au format ubx (Format propriétaire Ublox) [U-Blox ubx Format] et peuvent être utilisées pour le positionnement du récepteur.
Les données de phase sont bien adaptées au positionnement précis, car elles présentent un faible bruit électronique de mesure. En effet, comme les corrélateurs permettent de mesurer la phase avec une précision d'environ un centième de cycle (1 cycle = 19.05cm pour la porteuse L1), le bruit de mesure électronique effectif de la phase est millimétrique. Cependant, les observations de phase ne sont connues qu'à une constante près, multiple de la longueur d'onde. Le processus d'estimation devra donc estimer cette inconnue nommée ambiguïté entière. Malgré la présence de ce terme d'ambiguïté entière, la plupart des méthodes de positionnement précis s'appuient sur ces mesures de phase (par exemple [Dach et al, 2007] [Bertiger et al, 2010]). Deux grands types de positionnement précis utilisent les données de phase :
- Le PPP (Positionnement Ponctuel Précis) utilise les données d'une unique station pour calculer sa position [Zumberge et al, 1997] [Laurichesse et al, 2009]. Ceci permet de positionner des stations isolées et donne des résultats indépendants pour chaque station. Cependant, dans le cas du positionnement du Geocube, cette méthode est quasiment impossible à mettre

en œuvre, car elle nécessite l'utilisation de récepteurs bi-fréquence pour éliminer au premier ordre le biais lié à la traversée de l'ionosphère par les ondes GPS (cf section 2.4.2). Les Geocubes ne disposant que de mesures sur L1, le PPP doit donc être écarté pour l'instant, même si des travaux récents permettent d'entrevoir des possibilités de positionnement PPP à l'aide de récepteurs mono-fréquence [Odijk et al, 2012]. Toutefois ces développements nécessitent encore l'utilisation de stations bi-fréquence situées à proximité de la zone d'étude pour calculer des corrections ionosphériques ce dont nous souhaitons nous affranchir dans le cas des Geocubes.

– Le positionnement différentiel (DGNSS : differential GNSS) s'appuie pour sa part sur une différentiation des observations [Blewitt, 1989]. Les observations utilisées ne sont plus les mesures de phase entre un satellite et un récepteur, mais des différences judicieusement choisies de mesures de phases qui éliminent certains paramètres estimés dans le cas du PPP. Le plus souvent des doubles différences impliquant les mesures relatives à deux satellites et deux récepteurs sont utilisées. Les simplifications engendrées permettent alors d'avoir moins de paramètres à estimer. En contrepartie le calcul conduit à l'estimation de lignes de base (c'est à dire les vecteurs entre stations) et non plus de coordonnées des stations. Le positionnement obtenu est donc relatif et les positions des stations deviennent inter-corrélées.

Pour le positionnement des Geocubes, un traitement différentiel n'utilisant que des données relatives à la constellation GPS (DGPS : Differential GPS) est réalisé. Les lignes de base considérées étant très courtes (<5km), les perturbations affectant chaque point du réseau sont très semblables si elles se rapportent à des phénomènes spatialement corrélés comme les biais atmosphériques, les effets de marée terrestre ou la surcharge océanique. Le positionnement différentiel est alors extrêmement efficace pour éliminer ou limiter drastiquement l'impact de ces phénomènes (Fig. 2.1). En particulier le biais ionosphérique est suffisamment réduit pour que la présence d'une seconde fréquence (L2) ne soit pas nécessaire y compris pour le positionnement relatif précis. Les données mono-fréquence acquises par le Geocube sont alors suffisantes pour son positionnement précis.

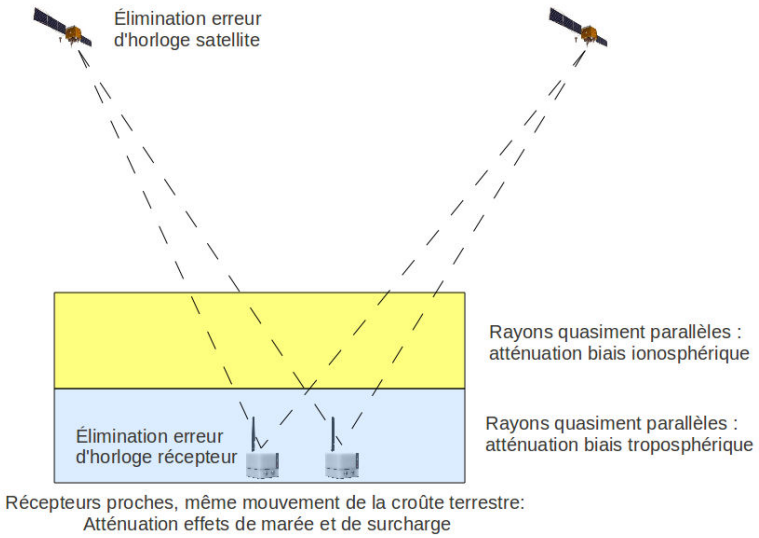

FIGURE 2.1 – Positionnement différentiel et élimination des erreurs spatialement corrélées.

Le choix du DGPS appliqué à de courtes lignes de base conduit donc à une réduction drastique du nombre de paramètres à estimer. Ici seules les positions des récepteurs sont estimées. Les ambiguïtés sont résolues indépendamment par un calcul préliminaire. Les biais résiduels qui peuvent subsister (en particulier les biais liés à la traversée de l'atmosphère) sont modélisés. Les paramètres de position sont estimés par un filtre de Kalman qui permet un calcul époque par époque, c'est à dire qu'une position est estimée à chaque fois qu'une nouvelle observation est disponible. Cette méthode d'estimation a été préférée aux moindres carrés, car ces derniers nécessitent le cumul d'observations avant l'estimation, ce qui conduit à un calcul en temps différé, alors que le filtrage de Kalman autorise un calcul en temps-réel.

Lors d'un positionnement DGPS en temps-réel, le calcul est habituellement effectué au niveau des récepteurs mobiles qui utilisent pour la formation des doubles différences les mesures acquises par une unique station de base considérée immobile. C'est le cas du positionnement RTK (Real-Time Kinematic) [Rizos et al, 2010] dans lequel les données de la station de base sont transmises aux mobiles par radio ou téléphonie mobile. Certaines variantes du RTK reposent sur l'envoi de corrections calculées à partir de plusieurs stations immobiles en plus des mesures de phase de la station de base (NRTK : network RTK) [Rizos et al, 2010], mais les calculs se déroulent toujours au niveau de chaque récepteur mobile. Cependant, dans le cas des Geocubes, les récepteurs ne disposent pas de la puissance de calcul suffisante pour réaliser un traitement RTK. Dans ce cas les données acquises par les récepteurs sont centralisées au niveau du coordinateur qui réalise le calcul de positionnement en impliquant simultanément les données de tous les récepteurs actifs.
Ce calcul en réseau permet alors de :
- Calculer et affiner en temps-réel les positions des stations considérées comme immobiles (références) et donc de détecter leurs éventuels déplacements indésirables.
- Utiliser ces coordonnées estimées des références pour le calcul de toutes les stations mobiles.
- Moyenner au niveau des références les erreurs non éliminées par différentiation, en particulier les multitrajets.
- Mettre en référence l'ensemble du réseau en appliquant des contraintes aux positions des stations de référence.

2.2.2 Formation des doubles différences et pondération associée

Les mesures de phase présentant un bruit électronique de mesure millimétrique, elles constituent des observables privilégiées pour le positionnement précis par GPS. Dans le cas du Geocube ces mesures ne sont disponibles que sur la fréquence L1. L'équation qui lie une observation de phase avec les positions du satellite s et du récepteur r est alors :

$$\phi_r^s = \frac{1}{\lambda_{L1}} \cdot \rho_r^s + \frac{c}{\lambda_{L1}} \cdot (dt_r + dt^s) - N_r^s + \tau_{r,iono}^s + \tau_{r,tropo}^s + \tau_{r,loc}^s + \epsilon \tag{2.1}$$

Avec ϕ_r^s la phase mesurée, ρ_r^s la distance géométrique entre l'antenne du satellite et celle du récepteur, dt_r et dt^s les erreurs d'horloge du satellite et du récepteur, N_r^s le terme d'ambiguïté entière, $\tau_{r,iono}^s$ le biais dû à la propagation de l'onde porteuse dans l'ionosphère, $\tau_{r,tropo}^s$ le biais dû à la propagation de l'onde porteuse dans la troposphère, $\tau_{r,loc}^s$ un biais local dû à l'interaction de l'onde GPS avec l'environnement proche de l'antenne, ϵ le bruit électronique de mesure de phase et c la vitesse de la lumière dans le vide. Cette équation est exprimée en nombre de cycles de l'onde porteuse de longueur d'onde λ_{L1}.
Afin d'éliminer les biais d'horloge du satellite et du récepteur et de minimiser les erreurs spatialement corrélées, l'équation précédente est différentiée deux fois. On commence par faire la différence de deux équations 2.1 pour un récepteur r et deux satellites $s1$ et $s2$, ce qui conduit à une simple différence :

$$\triangle\phi_r^{s1,s2} = \frac{1}{\lambda_{L1}} \cdot \triangle\rho_r^{s1,s2} + \frac{c}{\lambda_{L1}} \cdot (dt^{s1} - dt^{s2}) - \triangle N_r^{s1,s2} + \triangle\tau_{r,iono}^{s1,s2} + \triangle\tau_{r,tropo}^{s1,s2} + \triangle\tau_{r,loc}^{s1,s2} + \triangle\epsilon \tag{2.2}$$

avec $\triangle$ l'opérateur différence.
On remarque que cette simple différence élimine les biais d'horloge du récepteur. En effectuant maintenant la différence entre deux simples différences 2.2 prises pour deux récepteurs $r1$ et $r2$ on obtient une équation de double différence :

$$\nabla\triangle\phi_{r1,r2}^{s1,s2} = \frac{1}{\lambda_{L1}} \cdot \rho_{r1,r2}^{s1,s2} - \nabla\triangle N_{r1,r2}^{s1,s2} + \nabla\triangle\tau_{r1,r2,iono}^{s1,s2} + \nabla\triangle\tau_{r1,r2,tropo}^{s1,s2} + \nabla\triangle\tau_{r1,r2,loc}^{s1,s2} + \nabla\triangle\epsilon \tag{2.3}$$

Cette équation de double différence est totalement débarrassée des erreurs d'horloge des satellites comme des récepteurs. Cependant, l'équation 2.3 comporte toujours des termes de biais de deux types :
– Des biais atmosphériques spatialement corrélés : $\nabla\triangle\tau_{r1,r2,iono}^{s1,s2}$ et $\nabla\triangle\tau_{r1,r2,tropo}^{s1,s2}$.

– Des biais locaux spatialement décorrélés : $\nabla\triangle\tau^{s1,s2}_{r1,r2,loc}$.

Dans le cas d'un réseau de Geocubes les biais spatialement corrélés sont très faibles une fois différentiés, car l'utilisation de courtes lignes de base permet de supposer que les rayons satellite/récepteur impliqués dans l'équation 2.3 sont quasiment parallèles (Fig. 2.1). Les ondes GPS traversent donc à peu près la même atmosphère et les biais atmosphériques différentiés sont très faibles. Leur estimation n'est alors pas nécessaire et une modélisation a priori est utilisée afin d'annuler ces biais résiduels :

– Le biais ionosphérique $\tau^{s}_{r,iono,modèle}$ associé à une observation ϕ^{s}_{r} est modélisé en utilisant le modèle de Klobuchar [Klobuchar, 1987] (Annexe. C) transmis par le message de navigation des satellites.
– Le biais troposphérique $\tau^{s}_{r,tropo,modèle}$ associé à une observation ϕ^{s}_{r} est modélisé par le modèle de Saastamoinen [Saastamoinen, 1972](Annexe. D).

La différentiation n'a par contre pas d'effet atténuateur sur les biais locaux spatialement décorrélés qui présentent, y compris après différentiation, une amplitude centimétrique et une fréquence caractéristique de 10 à 600sec (cf section 2.4.3). La mauvaise description a priori du phénomène causant ces biais empêche leur modélisation ainsi que leur estimation, car leurs modèles stochastiques et déterministes ne peuvent être établis de manière fiable. Ces biais locaux sont alors considérés ici comme une erreur d'observation contribuant au bruit d'observation. Le bruit total d'observation devient alors :

$$\nu = \nabla\triangle\tau^{s1,s2}_{r1,r2,loc} + \nabla\triangle\epsilon \tag{2.4}$$

avec ν le bruit total d'observation.
L'intégration de $\nabla\triangle\tau^{s1,s2}_{r1,r2,loc}$ au bruit d'observation conduit à la corrélation temporelle des observations et donc à un bruit d'observation coloré. Cependant, l'absence de connaissance de son modèle de corrélation temporelle empêche d'utiliser pour l'estimation un filtre de Kalman avec modèle de bruit coloré [Rotella, 2008].
Un filtre de Kalman standard est donc utilisé ici, bien que l'hypothèse de résidus temporellement indépendants ne soit pas remplie. L'effet des biais locaux se répartit alors entre les paramètres de positions et les résidus, ceci en fonction de la géométrie du problème et de la pondération du filtre de Kalman. Ces biais produisent alors simultanément une erreur sur les positions estimées et des résidus corrélés dans le temps, l'équilibre entre ces deux inconvénients dépendant de la pondération du filtre.
Au final, en corrigeant les observations de doubles différences à l'aide des modèles de propagation des ondes dans l'atmosphère et en considérant les biais locaux comme une erreur d'observation, l'équation d'observation pour le filtrage de Kalman issue de la double différence 2.3 est donnée par :

$$\nabla\triangle\phi^{s1,s2}_{r1,r2} - \nabla\triangle\tau^{s1,s2}_{r1,r2,iono,modèle} - \nabla\triangle\tau^{s1,s2}_{r1,r2,tropo,modèle} = \frac{1}{\lambda_{L1}}\cdot\rho^{s1,s2}_{r1,r2} - N^{s1,s2}_{r1,r2} + \nu \tag{2.5}$$

Le terme de gauche correspond à l'observation de double différence dérivée des mesures brutes de phase et corrigée de l'effet résiduel de la traversée de l'atmosphère par l'onde porteuse. Le terme de droite comporte les paramètres à estimer (c'est à dire les coordonnées des récepteurs) ainsi que des données externes : positions des satellites obtenus à partir des orbites des satellites (Annexe. B) et ambiguïtés entières calculées au préalable (cf section 2.2.6).
Pour former la double différence $\nabla\triangle\phi^{s1,s2}_{r1,r2}$, les observations de phase ϕ^{s1}_{r1}, ϕ^{s2}_{r1}, ϕ^{s1}_{r2}, ϕ^{s2}_{r2} doivent se rapporter précisément à la même date. Lors de leur mesure, bien qu'elles se rapportent à la même date dans l'échelle de temps de chaque récepteur, elles ne sont cependant pas acquises simultanément dans l'échelle de temps GPS à cause du décalage des horloges de récepteurs. Ce phénomène est particulièrement marqué dans le cas des Geocubes, car ceux-ci laissent leur horloge dériver de 0.5ms. Pour la formation d'une double différence, ces observations de phase doivent alors être interpolées à la seconde ronde dans l'échelle de temps GPS. Cette interpolation est obtenue de la manière suivante :

$$\phi^{s1}_{r1}(t_{GPS}) = \phi^{s1}_{r1}(t_{Récepteur}) + dt_{r1} * Doppler^{s1}_{r1} \tag{2.6}$$

Avec $\phi_{r1}^{s1}(t_{GPS})$ la phase interpolée à la seconde ronde en temps GPS, $\phi_{r1}^{s1}(t_{Récepteur})$ la phase mesurée à la seconde ronde en temps récepteur, $Doppler_{r1}^{s1}$ le Doppler du satellite $s1$ mesuré depuis le récepteur $r1$ et dt_{r1} l'erreur d'horloge du récepteur $r1$ par rapport au temps GPS. Dans le cas des Geocubes, dt_{r1} est fourni directement comme une observation par la puce GPS qui calcule en continu sa dérive d'horloge grâce aux mesures de code.

Une fois l'équation d'observation établie, il faut lui associer une matrice de variance-covariance des observations qui est requise lors de la phase d'estimation. Dans notre application nous utilisons la formule suivante pour la variance d'une observation de phase ϕ_r^s entre un satellite s et un récepteur r exprimée en $cycles^2$:

$$Var(\phi_r^s) = \frac{a}{sin(E_r^s)^2} + \frac{b}{10^{\frac{SNR}{10}}} \tag{2.7}$$

avec E_r^s l'élévation du satellite et SNR le rapport signal sur bruit de l'onde reçue.
Cette formule permet de prendre en compte dans l'erreur d'observation les contributions du bruit électronique de mesure, des biais locaux ainsi que de la modélisation imparfaite des biais atmosphériques résiduels [Collins and Langley, 1999]. Les deux termes impliqués dans l'equation 2.7 traduisent :

- $\frac{a}{sin(E_r^s)^2}$: part de l'erreur due à la dégradation de la modélisation des biais résiduels aux basses élévations et à l'augmentation de l'impact des biais locaux pour des satellites proches de l'horizon.
- $\frac{b}{10^{\frac{SNR}{10}}}$: part de l'erreur due au bruit électronique de mesure. Cette erreur est fonction de la qualité du signal reçu.

Les coefficients a et b sont déterminés empiriquement pour obtenir une variance compatible avec le bruit de phase observé (Fig. 2.2). Dans notre application nous avons fixé : $a = 2 \times 10^{-4}$ et $b = 5$. Une fois paramétrée, cette formule permet de donner une estimation au premier ordre de la variance des observations impliquées dans les observations de doubles différences. Par contre les erreurs accidentelles (par exemple les multitrajets de grande amplitude (cf section 2.5)) ne sont pas modélisées et doivent être rejetées au cours du processus d'estimation ou corrigées a posteriori.

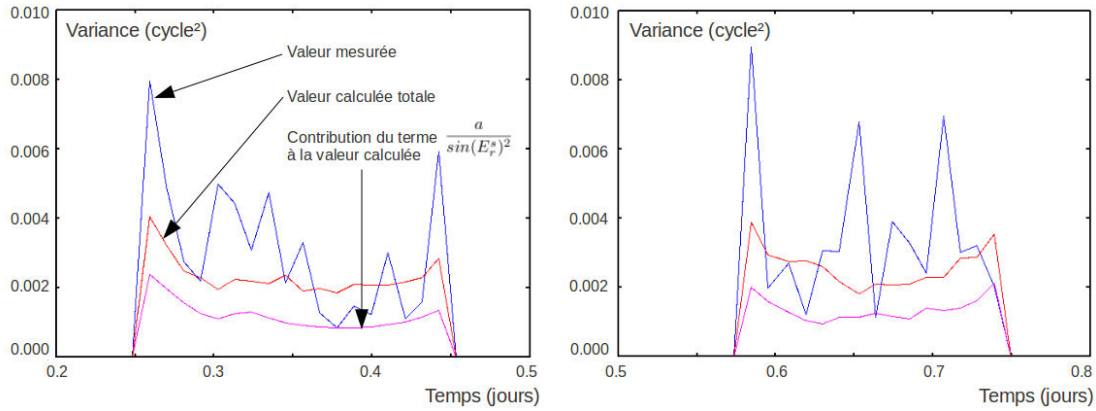

FIGURE 2.2 – Estimation de la variance pour deux doubles différences acquises le 01/08/2012 sur le chantier de Super-Sauze (cf section 3.2).
Bleu : valeur observée, rouge : valeur calculée, magenta : contribution du terme $\frac{a}{sin(E_r^s)^2}$ à la valeur calculée. Moyenne par pas de 15 min.

La variance d'une double différence est alors calculée à partir des variances de chaque observation de phase. Il vient :

$$Var(\nabla\triangle\phi_{r1,r2}^{s1,s2}) = Var(\phi_{r1}^{s1}) + Var(\phi_{r2}^{s1}) + Var(\phi_{r1}^{s2}) + Var(\phi_{r2}^{s2}) \tag{2.8}$$

Afin de limiter la taille des matrices manipulées lors de l'estimation, les doubles différences sont écrites en intégrant un récepteur et un satellite pivot. A chaque époque, un satellite s_{piv} et un

récepteur r_{piv} interviennent dans toutes les doubles différences. Le vecteur d'observation est alors donné par :

$$\mathbf{l} = \begin{bmatrix} \nabla\triangle\phi_{r_{piv},r1}^{s_{piv},s1} \\ \nabla\triangle\phi_{r_{piv},r1}^{s_{piv},s2} \\ \dots \\ \nabla\triangle\phi_{r_{piv},r2}^{s_{piv},s1} \\ \nabla\triangle\phi_{r_{piv},r2}^{s_{piv},s2} \\ \dots \\ \nabla\triangle\phi_{r_{piv},rm}^{s_{piv},sn} \end{bmatrix} \tag{2.9}$$

Les mesures de phase impliquant s_{piv} ou r_{piv} sont donc présentes dans toutes les doubles différences qui deviennent corrélées. Afin de tenir compte de cette corrélation, une matrice de variance-covariance pleine avec des termes covariants convenablement choisis est utilisée. Une double différence étant formée d'une combinaison linéaire de 4 termes du type ϕ_r^s avec des coefficients unitaires, la covariance entre deux doubles différences sera la somme des variances des observations communes :

$$Cov(\nabla\triangle\phi_{r_{piv},r1}^{s_{piv},s1}, \nabla\triangle\phi_{r_{piv},r1}^{s_{piv},s2}) = Var(\phi_{r_{piv}}^{s_{piv}}) + Var(\phi_{r1}^{s_{piv}}) \tag{2.10}$$

La matrice de variance-covariance associée au vecteur d'observation $\mathbf{l}$, notée $\mathbf{Q_{ll}}$ est alors entièrement déterminée par les équations 2.8 et 2.10. L'utilisation de cette matrice de variance-covariance pleine conduit au calcul d'un résultat indépendant du choix des pivots qui ne jouent alors qu'un rôle purement calculatoire.

2.2.3 Calcul en réseau et mise en référence

Le positionnement des Geocubes est réalisé au cours d'un calcul en réseau faisant intervenir en bloc les mesures de phase de tous les récepteurs. Un positionnement relatif basé sur les doubles différences a été choisi, afin de tirer parti de la faible étendue des réseaux considérés pour diminuer drastiquement l'effet de certains biais spatialement corrélés. Les paramètres habituellement estimés sont alors les coordonnées des lignes de base séparant le récepteur pivot des autres récepteurs du réseau. Dans ce cas, au cours de l'estimation, les coordonnées d'un récepteur choisi arbitrairement sont fixées à des valeurs approchées de ses coordonnées réelles, et les lignes de base sont estimées à partir de ce point.
Une fois les lignes de base calculées, une phase de mise en référence du réseau est nécessaire. Elle est effectuée au cours d'une compensation des lignes de base dont les observations sont les lignes de bases calculées précédemment et des contraintes sur la position de certains récepteurs considérés comme fixes et nommés références. Cette compensation permet de vérifier que les références sont effectivement fixes (ou d'estimer leur déplacement dans le cas contraire) et de calculer les coordonnées de tous les points du réseau dans le système de référence des contraintes imposées aux références en propageant les coordonnées de ces points à l'aide des lignes de base compensées (Fig. 2.3).

Cette stratégie consistant à estimer des lignes de base puis à les compenser est bien adaptée pour le post-traitement, mais beaucoup moins pour le temps-réel, car elle demande une fastidieuse compensation du réseau à chaque époque en plus du calcul des lignes de base. Dans notre application dédiée au positionnement en temps-réel, il a été choisi de procéder différemment, afin de réaliser simultanément l'estimation des lignes de bases et la compensation au cours d'une unique inversion par filtrage de Kalman (Fig. 2.3). Pour cela, les paramètres à estimer sont les coordonnées de l'ensemble des Geocubes du réseau, et le défaut de rang introduit est comblé en ajoutant comme équations d'observation des équations de contrainte sur les références. Ce faisant, les coordonnées de tous les récepteurs sont estimées en sortie du calcul et exprimées directement dans le système de référence donné par les équations de contrainte. De plus, les coordonnées des références étant estimées, il est possible de détecter leurs éventuels mouvements parasites.

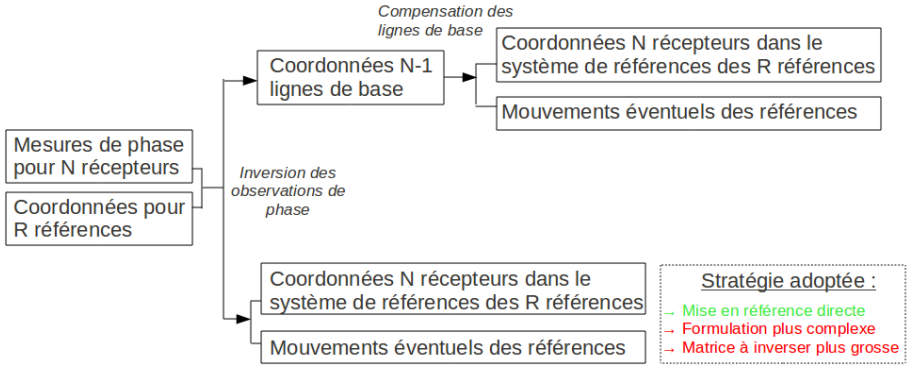

FIGURE 2.3 – Différentes stratégies de mise en référence.

2.2.4 Estimation des positions relatives des Geocubes par filtrage de Kalman

Les équations d'observation définies précédemment sont utilisées en entrée du calcul d'estimation des positions relatives des Geocubes. L'ensemble des positions est calculé en bloc au cours d'un calcul en réseau. Afin d'estimer les positions en temps-réel par un calcul époque par époque, un filtre de Kalman est utilisé [Rotella, 2008]. Considérons un réseau de nr récepteurs dont nf servent de références fixes. Ces récepteurs acquièrent les données de ns satellites. Le vecteur des paramètres à estimer est donné par :

$$\mathbf{x} = \frac{1}{\lambda_{L1}}. \begin{bmatrix} X_{r_1} \\ Y_{r_1} \\ Z_{r_1} \\ ... \\ X_{r_{nr}} \\ Y_{r_{nr}} \\ Z_{r_{nr}} \end{bmatrix} \tag{2.11}$$

Avec $(X_{r_i}, Y_{r_i}, Z_{r_i})$ les coordonnées cartésiennes géocentriques du récepteur r_i exprimées en mètres. On note $\mathbf{Q_{XX}}$ la matrice de variance-covariance associée à ce vecteur des paramètres. Les observations nécessaires à l'estimation sont regroupées au sein du vecteur des observations :

$$\mathbf{l} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\lambda_{L1}}.C_{X_{c_1}} \\ \frac{1}{\lambda_{L1}}.C_{Y_{c_1}} \\ \frac{1}{\lambda_{L1}}.C_{Z_{c_1}} \\ ... \\ \frac{1}{\lambda_{L1}}.C_{X_{c_{nf}}} \\ \frac{1}{\lambda_{L1}}.C_{Y_{c_{nf}}} \\ \frac{1}{\lambda_{L1}}.C_{Z_{c_{nf}}} \\ \nabla\triangle\phi^{s_1,s_2}_{r_1,r_2} \\ ... \\ \nabla\triangle\phi^{s_1,s_{ns}}_{r_1,r_2} \\ ... \\ \nabla\triangle\phi^{s_1,s_{ns}}_{r_1,r_{nr}} \end{bmatrix} \tag{2.12}$$

Avec $(C_{X_{ci}}, C_{Y_{ci}}, C_{Z_{ci}})$ les coordonnées cartésiennes géocentriques exprimées en mètres assignées à la référence r_{ci}, et $\nabla\triangle\phi^{s_1,s_2}_{r_1,r_2}$ une double différence préalablement corrigée à l'aide des modèles d'ionosphère et de troposphère (non représentés ici pour une meilleure lisibilité). Dans ce vecteur d'observation le satellite s_1 et le récepteur r_1 sont pris comme pivots. On associe à ce vecteur d'observation sa matrice de variance-covariance $\mathbf{Q_{ll}}$ définie précédemment (cf section 2.2.2).

Les équations liant les paramètres aux observations sont de la forme générale $\mathbf{l} = h(\mathbf{x})$ et peuvent se décomposer en deux types :

– Equations de contrainte : $\begin{cases} \frac{1}{\lambda_{L1}}.C_{X_{c1}} = \frac{1}{\lambda_{L1}}.X_{c1} + \varepsilon \\ \frac{1}{\lambda_{L1}}.C_{Y_{c1}} = \frac{1}{\lambda_{L1}}.Y_{c1} + \varepsilon \\ \frac{1}{\lambda_{L1}}.C_{Z_{c1}} = \frac{1}{\lambda_{L1}}.Z_{c1} + \varepsilon \end{cases}$

(2.13)

– Equation de double différence :
$\nabla\triangle\phi_{r1,r2}^{s1,s2} = \frac{1}{\lambda_{L1}}.(\rho_{r1}^{s1} - \rho_{r1}^{s2} - \rho_{r2}^{s1} + \rho_{r2}^{s2}) - N_{r1,r2}^{s1,s2} + \varepsilon$
avec $\rho_{ri}^{sj} = \sqrt{(X_{ri} - X_{sj})^2 + (Y_{ri} - Y_{sj})^2 + (Z_{ri} - Z_{sj})^2}$ et $N_{r1,r2}^{s1,s2}$ le terme de doubles différences d'ambiguïtés fixées en utilisant la méthode présentée section 2.2.6.

(2.14)

Cette seconde équation d'observation n'étant pas linéaire, un filtre de Kalman étendu est utilisé pour estimer les paramètres. Il consiste à linéariser le problème à proximité d'une solution approchée, ce qui se traduit par l'usage de la matrice jacobienne $\mathbf{H}$ des équations d'observation au cours de l'estimation :
$\mathbf{H} = \frac{\partial h}{\partial \mathbf{x}} \mid_{\widetilde{\mathbf{x}_k}}$ avec $\widetilde{\mathbf{x}_k}$ la solution approchée issue de l'estimation à l'itération précédente. En effectuant les dérivées partielles des équations d'observation il vient :

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix}
1 & 0 & . & . & 0 & 0 & 0 & 0 & . & . & 0 \\
0 & 1 & & & . & . & . & . & & & . \\
. & & 1 & & . & . & . & . & & & . \\
. & & & 1 & 0 & . & . & . & & & . \\
0 & . & . & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & . & . & 0 \\
0 & . & . & . & 0 & \frac{X_{r1}-X_{s1}}{\rho_{r1}^{s1}} - \frac{X_{r1}-X_{s2}}{\rho_{r1}^{s2}} & -\frac{X_{r2}-X_{s1}}{\rho_{r2}^{s1}} + \frac{X_{r2}-X_{s2}}{\rho_{r2}^{s2}} & 0 & . & . & 0 \\
. & & & & . & \frac{Y_{r1}-Y_{s1}}{\rho_{r1}^{s1}} - \frac{Y_{r1}-Y_{s2}}{\rho_{r1}^{s2}} & -\frac{Y_{r2}-Y_{s1}}{\rho_{r2}^{s1}} + \frac{Y_{r2}-Y_{s2}}{\rho_{r2}^{s2}} & 0 & . & . & 0 \\
. & & & & . & \frac{Z_{r1}-Z_{s1}}{\rho_{r1}^{s1}} - \frac{Z_{r1}-Z_{s2}}{\rho_{r1}^{s2}} & -\frac{Z_{r2}-Z_{s1}}{\rho_{r2}^{s1}} + \frac{Z_{r2}-Z_{s2}}{\rho_{r2}^{s2}} & 0 & . & . & 0 \\
. & & & & . & . & . & & & & . \\
. & & & & . & . & . & & & & . \\
. & & & & . & . & . & & & & . \\
. & & & & . & . & . & & & & . \\
. & & & & . & . & . & & & & . \\
0 & . & . & . & 0 & \frac{Z_{r1}-Z_{s1}}{\rho_{r1}^{s1}} - \frac{Z_{r1}-Z_{s_{ns}}}{\rho_{r1}^{s_{ns}}} & 0 & . & . & 0 & -\frac{Z_{r_{nr}}-Zs_1}{\rho_{r_{nr}}^{s1}} + \frac{Z_{r_{nr}}-Z_{s_{ns}}}{\rho_{r_{nr}}^{s_{ns}}}
\end{bmatrix} \quad (2.15)$$

La solution approchée $\widetilde{\mathbf{x}_k}$ est obtenue en propageant le vecteur des paramètres de l'itération précédente $\hat{\mathbf{x}_{k-1}}$ par une équation de propagation de la forme : $\widetilde{\mathbf{x}_k} = f(\hat{\mathbf{x}_{k-1}}) + \mathbf{w}$, avec f la fonction de propagation et $\mathbf{w}$ le bruit de processus associé à la matrice de variance-covariance $\mathbf{Q_{ww}}$. Dans notre application $f = \mathbf{Id}$ (cf section 2.2.5).
Connaissant les équations d'observation et de propagation ainsi que les matrices de variance-covariance associées, le filtre de Kalman étendu peut être formulé de la façon suivante :
$\widetilde{\mathbf{x}_k}$ représente un état prédit et $\hat{\mathbf{x}_k}$ représente un état estimé. L'indice k représente le numéro de l'itération.

– Phase de prédiction :
$\tilde{\mathbf{x}}_{k+1} = \mathbf{F}_k \cdot \hat{\mathbf{x}}_k$
$\mathbf{Q}_{\tilde{\mathbf{x}}_{k+1}\tilde{\mathbf{x}}_{k+1}} = \mathbf{F}_k \cdot \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}_k\hat{\mathbf{x}}_k} \cdot \mathbf{F}_k^{\mathrm{T}} + \mathbf{Q_{ww}}$
Avec $\mathbf{F}_k$ la matrice associée à l'application linéaire f et $\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}_k\hat{\mathbf{x}}_k}$ la matrice de variance-covariance des paramètres à l'itération k

(2.16)

– Phase d'estimation :
Calcul de l'innovation : $\mathbf{In}_k = \mathbf{l}_k - h(\tilde{\mathbf{x}}_k)$. L'innovation représente le terme inversé par le filtre de Kalman lors de la phase d'estimation. Son comportement est détaillé section 2.2.7.

Calcul de la matrice de variance-covariance de l'innovation :
$\mathbf{Q}_{\mathbf{In}_k\mathbf{In}_k} = \mathbf{H}_k \cdot \mathbf{Q}_{\tilde{\mathbf{x}}_k\tilde{\mathbf{x}}_k} \cdot \mathbf{H}_k^{\mathrm{T}} + \mathbf{Q}_{\mathbf{l}_k\mathbf{l}_k}$. Les observations correspondant à une innovation $\mathbf{In}_k(i)$ telle que $\mid \mathbf{In}_k(i) \mid > 3 \times \sqrt{\mathbf{Q}_{\mathbf{In}_k\mathbf{In}_k}(i,i)}$ sont considérées comme des erreurs d'observation et sont désactivées.
Calcul du gain de Kalman : $\mathbf{K}_k = \mathbf{Q}_{\tilde{\mathbf{x}}_k\tilde{\mathbf{x}}_k} \cdot \mathbf{H}_k^{\mathrm{T}} \cdot (\mathbf{Q}_{\mathbf{In}_k\mathbf{In}_k})^{-1}$
Mise à jour du vecteur de paramètres : $\hat{\mathbf{x}}_k = \tilde{\mathbf{x}}_k + \mathbf{K}_k \cdot \mathbf{In}_k$
Mise à jour de la matrice de variance-covariance des paramètres :
$\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}_k\hat{\mathbf{x}}_k} = (\mathbf{Id} - \mathbf{K}_k \cdot \mathbf{H}_k) \cdot \mathbf{Q}_{\tilde{\mathbf{x}}_k\tilde{\mathbf{x}}_k}$

(2.17)

2.2.5 Paramétrage du filtre de Kalman et modèle stochastique

La phase de prédiction permet de modéliser l'évolution temporelle du système étudié, c'est à dire ici la variation des positions des récepteurs entre deux estimations. Dans le cas de la surveillance topographique de zones quasi-statiques, une propagation stochastique de la position est utilisée, car nous sommes dans l'impossibilité de prédir le mouvement à venir. La position des récepteurs est donc considérée comme constante entre deux époques, mais avec une certaine incertitude qui traduit l'amplitude probable du mouvement. Ceci se traduit par l'équation de propagation présentée section 2.2.4 : $\widetilde{\mathbf{x}_k} = \hat{\mathbf{x}_{k-1}} + \mathbf{w}$. Le vecteur $\mathbf{w}$ représente le bruit de processus c'est à dire la propension du système à s'écarter du modèle de propagation imposé. Lors du filtrage, cette variable n'est pas accessible et seule sa matrice de variance-covariance $\mathbf{Q_{ww}}$ est paramétrable. Elle permet d'imposer à la solution de suivre plus ou moins rigoureusement le modèle de propagation imposé. Dans notre cas, elle permet donc d'imposer plus ou moins d'immobilité aux positions estimées. Le paramétrage de cette matrice est délicat, car la seule hypothèse que nous puissions faire sur les positions est que ces dernières "varient peu". Cependant, la matrice $\mathbf{Q_{ww}}$ doit permettre :
- D'estimer et de détecter les déplacements aussi vite que possible.
- De filtrer la position lorsqu'un manque de données apparait (suite à une constellation de satellites défavorable par exemple), et de stabiliser le résultat final qui ne doit pas diverger dans ce cas.
- D'obtenir un résultat cohérent pour différentes fréquences d'acquisition.

Ces contraintes nous ont amené à adopter un modèle de marche aléatoire pour l'écart type du bruit de processus sur les coordonnées estimées : $\sigma_w = 0.2 \times \sqrt{dt}$ mm, avec dt l'intervalle de temps séparant deux époques de mesure. La constante 0.2 qui intervient est empirique et donne des résultats satisfaisants pour des pas d'échantillonnage allant de 1sec à 30sec. L'augmentation de cette constante conduit à un résultat plus bruité et moins stable lorsque les observations sont peu nombreuses, alors qu'un facteur plus faible lisse la solution mais ralentit la détection d'éventuels mouvements. La valeur choisie est donc issue d'un incontournable compromis.

2.2.6 Résolution des ambiguïtés

Le filtrage de Kalman décrit précédemment permet de mesurer en continu et en temps-réel les mouvements de faible amplitude des récepteurs d'un réseau de Geocubes. Les données nécessaires à ce calcul sont les mesures GPS brutes fournies par l'ensemble des récepteurs ainsi que les orbites des satellites issus du message de navigation (Annexe. B). Cependant, pour fonctionner, ce calcul requiert la connaissance a priori des ambiguïtés de phase auxquelles correspond le terme $N_{r_k,r_l}^{s_i,s_j}$ qui apparait dans l'équation d'observation de doubles différences (équation 2.3).

Principe de résolution des ambiguïtés

Dans notre application les ambiguïtés sont résolues à partir d'une position approchée des récepteurs (X_r) et de la position des satellites dérivée des éphémérides (X_s). Le terme d'ambiguïtés est donné par :
$N_{r_k,r_l}^{s_i,s_j} = E[\nabla\triangle\phi_{r_k,r_l}^{s_i,s_j} - \frac{1}{\lambda_{L1}} \cdot \rho_{r_k,r_l}^{s_i,s_j}]$, avec E[] l'opérateur calculant l'entier le plus proche.
$\rho_{r_k,r_l}^{s_i,s_j} = \rho_{rk}^{si} - \rho_{rk}^{sj} - \rho_{rl}^{si} + \rho_{rl}^{sj}$
$\rho_{rk}^{si} = \sqrt{(X_{rk} - X_{si})^2 + (Y_{rk} - Y_{si})^2 + (Z_{rk} - Z_{si})^2}$

(2.18)

Pour que cette formule fournisse un terme d'ambiguïtés $N_{r_k,r_l}^{s_i,s_j}$ correct, il faut, dans le cas idéal où les erreurs de propagation des ondes sont nulles, que les positions relatives approchées des récepteurs soient connues à mieux que $\frac{1}{2}$ cycle, soit $\frac{\lambda_{L1}}{2}$m. Dans le cas réel, pour lequel les termes d'imprécision $\nabla\triangle\tau_{r1,r2,iono}^{s1,s2}$, $\nabla\triangle\tau_{r1,r2,tropo}^{s1,s2}$ et $\nabla\triangle\tau_{r1,r2,loc}^{s1,s2}$ ne sont pas nuls, les positions initiales relatives doivent être connues plus précisemment. Le seuil permettant une fixation correcte des ambiguïtés dépend alors de l'amplitude des termes d'imprécision, et la valeur $\frac{\lambda_{L1}}{2}$m ne constitue plus qu'un majorant. On retiendra cependant cette valeur théorique pour la suite du raisonnement, en remarquant que la valeur réelle en est très proche dans le cas de très courtes lignes de bases, puis diminue avec l'alongement de la distance inter-récepteurs. Enfin, à partir d'un certain éloignement des récepteurs (dépassant plusieurs kilomètres et donc hors du champ de ce travail), la non prise en compte des erreurs de propagation des ondes rend la méthode proposée inopérante.
Dans le cas de réseaux de Geocubes de faible étendue, la résolution des ambiguïtés revient finalement au calcul des positions relatives approchées des récepteurs du réseau. Une fois cette valeur déterminée, les ambiguïtés sont recalculées à chaque époque à partir de l'équation 2.18 en utilisant la position des récepteurs prédite par le filtre de Kalman. Lorsqu'un nouveau satellite apparait, une nouvelle ambiguïté est calculée de façon similaire. Ces ambiguïtés sont suivies tant que les satellites restent visibles afin de détecter d'éventuels sauts de cycle.
Ici la recherche des positions approchées est basée sur la convergence d'un filtre de Kalman utilisant des triples différences comme observations, et les positions naviguées des récepteurs comme solution initiale.
La chaîne de positionnement des Geocubes est finalement composée de trois étapes successives (Fig. 2.4) :
1) Calcul de positions naviguées à partir du C/A code par les puces GPS incluses dans les Geocubes.
2) Calcul de positions approchées à une précision meilleure que $\frac{\lambda_{L1}}{2}$m par convergence d'un filtre de Kalman utilisant des triples différences comme observations.
3) Suivi en continu et en temps réel des positions des récepteurs au sein du réseau en utilisant des doubles différences comme observations.

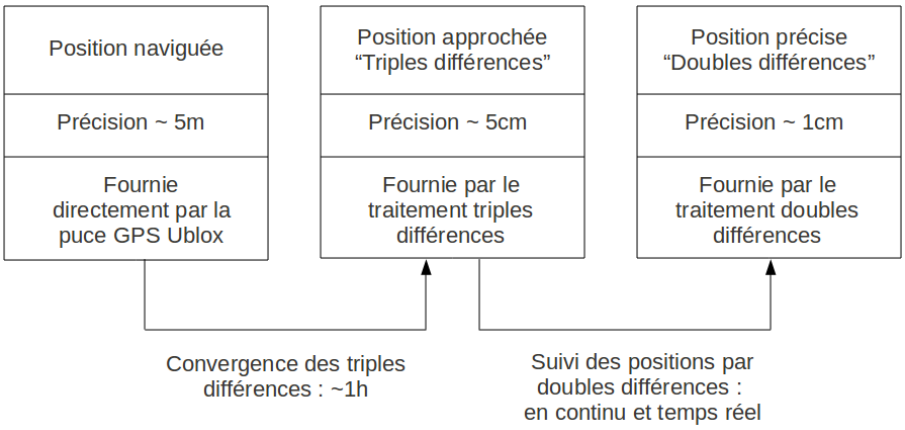

FIGURE 2.4 – Les différentes étapes du positionnement.

Calcul des positions approchées par utilisation de triples différences

Le calcul des positions approchées s'appuie donc sur l'utilisation de triples différences. Une triple différence consiste en une différentiation temporelle de deux doubles différences :

$$\triangle\nabla\triangle\phi_{r_k,r_l}^{s_i,s_j}\mid_{t,t-dt} = \nabla\triangle\phi_{r_k,r_l}^{s_i,s_j}\mid_t - \nabla\triangle\phi_{r_k,r_l}^{s_i,s_j}\mid_{t-dt} \tag{2.19}$$

avec $\nabla\triangle\phi_{r_k,r_l}^{s_i,s_j}\mid_t$ une double différence corrigée des effets atmosphériques mesurée à l'instant t.

La formation de triples différences fait alors disparaître le terme d'ambiguïtés entières en l'absence de saut de cycles :

$$\begin{aligned}&\triangle\nabla\triangle\phi^{s_i,s_j}_{r_k,r_l}\mid_{t,t-dt}=\tfrac{1}{\lambda_{L1}}\cdot\rho^{s_i,s_j}_{r_k,r_l}\mid_t-N^{s_i,s_j}_{r_k,r_l}-(\tfrac{1}{\lambda_{L1}}\cdot\rho^{s_i,s_j}_{r_k,r_l}\mid_{t-1}-N^{s_i,s_j}_{r_k,r_l})\\&\Leftrightarrow\triangle\nabla\triangle\phi^{s_i,s_j}_{r_k,r_l}\mid_{t,t-dt}=\tfrac{1}{\lambda_{L1}}\cdot(\rho^{s_i,s_j}_{r_k,r_l}\mid_t-\rho^{s_i,s_j}_{r_k,r_l}\mid_{t-dt})\end{aligned}\tag{2.20}$$

L'utilisation de cette observable de triples différences débarrassée du terme d'ambiguïtés entières permet alors la détermination des positions approchées des récepteurs grâce à un calcul basé sur :

- La convergence d'un filtre de Kalman.
- L'utilisation d'un récepteur pivot considéré comme fixe au cours du calcul.
- L'arrêt du calcul lorsque les lignes de base sont estimées à une précision suffisante pour pouvoir résoudre les ambiguïtés.

Les principaux éléments intervenant dans ce filtre de Kalman utilisé pour la recherche des positions approchées sont alors :

- Observations : Les observations sont uniquement des triples différences. La mise en référence s'effectue ici sans équation de contrainte en considérant le récepteur pivot (conventionnellement r_1 dans les équations suivantes) comme fixe. On obtient alors le vecteur d'observation suivant :

$$\mathbf{l}=\begin{bmatrix}\triangle\nabla\triangle\phi^{s_{piv},s_1}_{r_1,r_2}\mid_{t,t-dt}\\\triangle\nabla\triangle\phi^{s_{piv},s_2}_{r_1,r_2}\mid_{t,t-dt}\\\dots\\\triangle\nabla\triangle\phi^{s_{piv},s_{nf}}_{r_1,r_2}\mid_{t,t-dt}\\\dots\\\triangle\nabla\triangle\phi^{s_{piv},s_{nf}}_{r_1,r_{nr}}\mid_{t,t-dt}\end{bmatrix}\tag{2.21}$$

  Un pas de temps $dt = 15min$ est utilisé pour la formation des triples différences. Ceci laisse le temps aux satellites de se déplacer dans le ciel, et permet donc de disposer d'une constellation différente pour les deux observations de double différences composant chaque triple différence. Ainsi, la géométrie du système est améliorée et le problème se trouve mieux déterminé. De plus, l'utilisation de doubles différences acquises à quinze minutes d'intervalle permet de diminuer leur corrélation et atténue ainsi l'effet des erreurs temporellement corrélées dans les triples différences. L'utilisation d'arcs temporels assez longs pour la formation des triples différences améliore donc la précision du résultat et permet une convergence plus rapide de la solution.

  La matrice de variance-covariance relative à ces observations de triples différences est construite en sommant les variances des mesures de phase impliquées dans chaque triple différence de façon similaire à la construction de la matrice de variance-covariance relative aux doubles différences (cf section 2.2.2).

- Paramètres : Les coordonnées du récepteur pivot ne sont pas estimées. Les paramètres sont donc les coordonnées de tous les autres récepteurs du réseau :

$$\mathbf{x}=\frac{1}{\lambda_{L1}}.\begin{bmatrix}X_{r_2}\\Y_{r_2}\\Z_{r_2}\\\dots\\X_{r_{nr}}\\Y_{r_{nr}}\\Z_{r_{nr}}\end{bmatrix}\tag{2.22}$$

- Equations d'observations : Les équations d'observation sont uniquement les équations de triples différences :

$$\triangle\nabla\triangle\phi^{s_i,s_j}_{r_k,r_l}\mid_{t,t-dt}=\frac{1}{\lambda_{L1}}\cdot(\rho^{s_i,s_j}_{r_k,r_l}\mid_t-\rho^{s_i,s_j}_{r_k,r_l}\mid_{t-dt})\tag{2.23}$$

La linéarisation du système d'équations d'observation aboutit à la matrice jacobienne suivante :

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} (-\frac{X_{r2}-X_{s1}}{\rho_{r2}^{s1}} + \frac{X_{r2}-X_{s2}}{\rho_{r2}^{s2}})_t - (-\frac{X_{r2}-X_{s1}}{\rho_{r2}^{s1}} + \frac{X_{r2}-X_{s2}}{\rho_{r2}^{s2}})_{t-dt} & 0 & . & . & 0 \\ (-\frac{Y_{r2}-Y_{s1}}{\rho_{r2}^{s1}} + \frac{Y_{r2}-Y_{s2}}{\rho_{r2}^{s2}})_t - (-\frac{Y_{r2}-Y_{s1}}{\rho_{r2}^{s1}} + \frac{Y_{r2}-Y_{s2}}{\rho_{r2}^{s2}})_{t-dt} & 0 & . & . & 0 \\ (-\frac{Z_{r2}-Z_{s1}}{\rho_{r2}^{s1}} + \frac{Z_{r2}-Z_{s2}}{\rho_{r2}^{s2}})_t - (-\frac{Z_{r2}-Z_{s1}}{\rho_{r2}^{s1}} + \frac{Z_{r2}-Z_{s2}}{\rho_{r2}^{s2}})_{t-dt} & 0 & . & . & 0 \\ . & & & & . \\ . & & & & . \\ . & & & & . \\ . & & & & . \\ . & & & & . \\ 0 & . & . & 0 & (-\frac{Z_{r_{nr}}-Z_{s_{ns}}}{\rho_{r_{nr}}^{s_{ns}}} + \frac{Z_{r_{nr}}-Z_{s_{ns}}}{\rho_{r_{nr}}^{s_{ns}}})_t - (-\frac{Z_{r_{nr}}-Z_{s_{ns}}}{\rho_{r_{nr}}^{s_{ns}}} + \frac{Z_{r_{nr}}-Z_{s_{ns}}}{\rho_{r_{nr}}^{s_{ns}}})_{t-dt} \end{bmatrix} \tag{2.24}$$

Le filtre de Kalman ainsi défini est résolu suivant le formalisme décrit section 2.2.4 . Le résultat de ce calcul est moins précis qu'un calcul de doubles différences, car le système est moins bien déterminé (cf section 2.2.7), mais il permet néanmoins l'estimation des positions relatives approchées de tous les récepteurs du réseau à mieux que $\frac{\lambda_{L1}}{2}$m après quelques heures de convergence.

Critère d'arrêt du calcul des positions approchées

La convergence d'un filtre de Kalman basé sur les triples différences permet le calcul des positions relatives des Geocubes au sein du réseau avec une précision suffisante pour la fixation des ambiguïtés, mais son temps de convergence est assez variable. Il est compris entre 1h et 10h et dépend de la précision de la position naviguée initiale, de la géométrie de la constellation GPS, du nombre de satellites visibles et de la qualité du signal GPS reçu par les récepteurs qui conditionne le nombre de sauts de cycles. Il est donc intéressant de développer une méthode permettant de détecter automatiquement quand la position approchée calculée est de qualité suffisante pour résoudre les ambiguïtés. Ceci permet de stopper le calcul de la solution approchée en s'appuyant sur des critères objectifs, et non pas de laisser converger le filtre pendant une durée arbitraire souvent sur-évaluée. Ici une méthode fondée sur une étude des résidus est préférée à l'utilisation des écart-types a posteriori issus du filtre de Kalman sur les triples différences, car ces écart-types ne sont pas rigoureusement représentatifs à cause de la pondération empirique et arbitraire du filtre.

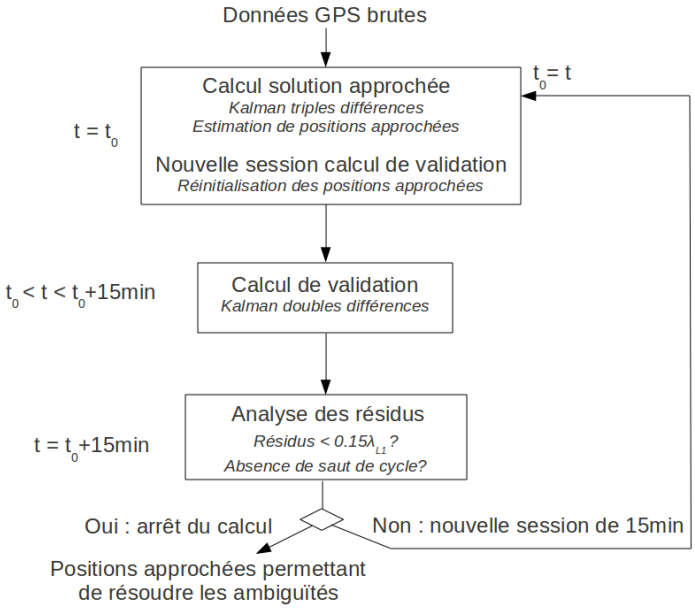

FIGURE 2.5 – Critère d'arrêt du calcul des positions approchées.

Pour valider les positions approchées nous proposons donc la méthode suivante (Fig. 2.5) :

- Le calcul des solutions approchées utilise des arcs de 15 min pour former les observations de triples différences.
- Un calcul basé sur des doubles différences (calcul de validation) est mené en parallèle, mais à la fréquence d'acquisition des données (habituellement 0.03Hz à 1Hz). Il permet d'évaluer la précision de la dernière solution approchée calculée.
- Le calcul de validation s'effectue de façon indépendante par session de 15min. Les positions des récepteurs sont réinitialisées aux valeurs issues du calcul des positions approchées toutes les 15min lorsqu'une nouvelle solution est estimée par ce calcul.
- Au cours de chaque session de 15min, les résidus du calcul de validation sont examinés pour qualifier la solution approchée utilisée pour initier cette session. La position initiale est considérée comme correcte pour la résolution des ambiguïtés si les résidus de toutes les doubles différences restent inférieurs à $0.15\lambda_{L1}$ et si la moyenne quadratique des résidus est inférieure à $0.08\lambda_{L1}$ (Fig. 2.6). Ces seuils ont été déterminés empiriquement.

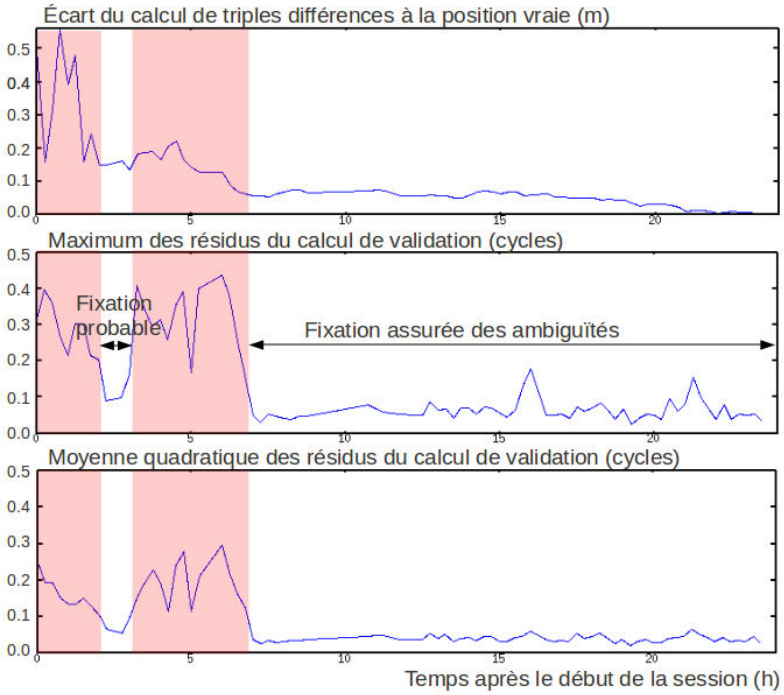

FIGURE 2.6 – Evaluation de la qualité des triples différences pour la fixation des ambiguïtés dans un cas particulièrement difficile (fort masque, position initiale fausse de 9m).

L'utilisation d'un arc de 15min est nécessaire pour disposer d'une constellation différente entre le début et la fin de la session. Ceci permet de voir si les résidus du calcul de validation restent stables lorsque la constellation change, ce qui traduit un calcul correct des ambiguïtés. La validation proposée assure alors que les ambiguïtés peuvent être résolues en utilisant comme solution approchée la position courante issue du calcul basé sur les triples différences qui peut être considéré comme terminé.

Impact du mouvement d'un point sur la recherche de sa position approchée dérivée des triples différences

La méthode proposée de recherche des positions approchées, basée sur l'utilisation de triples différences calculées sur un arc de 15min, permet un calcul automatique et relativement rapide. Il fournit en sortie des positions relatives approchées permettant la fixation des ambiguïtés dans un calcul de doubles différences. Cependant, pour que cette méthode fonctionne correctement, il faut que l'hypothèse de suivi de zone quasi-statique soit vérifiée, comme nous allons le justifier ci-dessous.

Lors du calcul de positionnement relatif basé sur des triples différences, nous avons choisi de fixer un point (Geocube pivot) et de rechercher les positions relatives des autres récepteurs du réseau par rapport à ce récepteur pivot.
Soit P le pivot, M un point inconnu et $\widehat{M}$ sa position estimée. Lors du calcul de triples différences deux hypothèses implicites sont posées :
- M est fixe au cours de l'arc de 15min.
- $\overrightarrow{PM} = \overrightarrow{P\widehat{M}} + \overrightarrow{\widehat{M}M}$.
L'inversion réalisée par le filtre de Kalman lors de la phase d'estimation revient donc à estimer $\overrightarrow{\widehat{M}M}$ pour minimiser l'innovation issue des observables de triples différences qui est donnée par :

$$In = \triangle\nabla\triangle\phi_{P,M}^{s_i,s_j} \mid_{t,t-dt} - \frac{1}{\lambda_{L1}} \cdot (\rho_{P,M}^{s_i,s_j} \mid_t - \rho_{P,M}^{s_i,s_j} \mid_{t-dt}) \tag{2.25}$$

Le terme $\frac{1}{\lambda_{L1}} \cdot (\rho_{P,M}^{s_i,s_j} \mid_t - \rho_{P,M}^{s_i,s_j} \mid_{t-dt})$ est obtenu en utilisant les éphémérides pour calculer la position des satellites et l'estimation de la position $\widehat{M}$ à l'époque précédente pour calculer la position du récepteur. Le récepteur est donc considéré comme fixe pendant les 15min de l'arc.
Les contributions à l'innovation sont alors :

- L'effet résiduel du Doppler des satellites dans $\triangle\nabla\triangle\phi_{P,M}^{s_i,s_j} \mid_{t,t-dt}$ non prédit dans le terme $\frac{1}{\lambda_{L1}} \cdot (\rho_{P,M}^{s_i,s_j} \mid_t - \rho_{P,M}^{s_i,s_j} \mid_{t-dt})$ à cause de la position approchée inexacte du récepteur M.
- L'effet de la rotation de la Terre sur le vecteur d'erreur de position $\overrightarrow{\widehat{M}M}$ au cours de 15min. Si l'erreur $\overrightarrow{\widehat{M}M}$ n'est pas nulle, cet effet produit un déplacement de $\widehat{M}$ à la vitesse : $\overrightarrow{v_R} = \overrightarrow{\Omega_T} \wedge \overrightarrow{\widehat{M}M}$ avec $\overrightarrow{v_R}$ la vitesse apparente du point $\widehat{M}$ due à la rotation de la Terre et $\overrightarrow{\Omega_T}$ le vecteur de rotation instantanée de la Terre.

Au cours de l'inversion, le filtre de Kalman cherche donc à estimer la position $\widehat{M}$ qui minimise l'innovation, qui comprend conjointement la partie liée au Doppler des satellites et la partie liée à la rotation de la Terre.
Si le point M n'est pas fixe au cours des 15min qui servent de base au calcul de la triple différence, une indétermination apparait. En effet, pour la contribution de la rotation de la Terre à l'innovation, le filtre de Kalman cherche à minimiser $\overrightarrow{v_T} = \overrightarrow{v_R} + \overrightarrow{v_M}$ avec $\overrightarrow{v_T}$ la vitesse apparente totale, $\overrightarrow{v_R}$ la vitesse due à la rotation de la Terre et $\overrightarrow{v_M}$ la vitesse due au mouvement, alors qu'il ne devrait minimiser que $\overrightarrow{v_R}$. Ceci provoque alors une erreur sur l'estimation de la position $\widehat{M}$ qui est liée à la vitesse de déplacement $\overrightarrow{v_M}$ par :

$$\| \overrightarrow{v_M} \| = \| \overrightarrow{\Omega_T} \| \times \| \overrightarrow{\widehat{M}M} \| \times sin(\overrightarrow{\Omega_T}, \overrightarrow{\widehat{M}M}) \tag{2.26}$$

On remarque alors que seule la composante de la vitesse de déplacement perpendiculaire à l'axe de rotation de la Terre ($\overrightarrow{v_{M_\perp}}$) dégrade la position estimée. L'erreur de positionnement produite par la présence d'un déplacement du point d'intérêt est finalement donnée par :

$$\| \overrightarrow{\widehat{M}M} \| = \frac{\| \overrightarrow{v_{M_\perp}} \|}{\| \overrightarrow{\Omega_T} \|} \tag{2.27}$$

Si l'on souhaite permettre la résolution des ambiguïtés à partir de la solution approchée fournie par un calcul de triples différences il faut s'assurer que $\| \overrightarrow{\widehat{M}M} \| < \frac{\lambda_{L1}}{2}$m. Ceci revient à imposer : $\| \overrightarrow{v_{M_\perp}} \|$<63cm/jour. Le respect de l'hypothèse de suivi d'une zone quasi-statique (déplacement inférieur à 50cm/jour) permet alors d'assurer que cette condition est remplie. La méthode proposée de détermination des solutions approchées à partir de triples différences permet alors d'obtenir une solution suffisamment précise pour résoudre les ambiguïtés lors du calcul de doubles différences.

2.2.7 Etude du terme d'innovation pour les doubles et triples différences

L'étude de l'innovation du filtre de Kalman permet de mieux appréhender le terme minimisé au cours de la phase d'estimation du filtre. Ceci permet de comprendre par simple analyse graphique les calculs réalisés lors du positionnement par doubles ou triples différences, en particulier le choix des triples différences pour le calcul d'une position approchée et l'utilisation des doubles différences pour la réalisation d'un positionnement précis.
Nous proposons ici d'étudier les variations spatiales de la moyenne quadratique des éléments du vecteur d'innovation (MQI) autour de la position vraie du récepteur. Nous considérons pour cela une ligne de base dont une première extrémité est fixe, tandis que la seconde parcourt un cube de $1m \times 1m \times 1m$ par pas de 5cm formant des cellules cubiques. Le cube exploré est centré sur la position vraie du second récepteur.

Etude du terme d'innovation pour les doubles différences

Dans le cas des doubles différences, si on considère que les ambiguïtés sont calculées à partir de la position testée, le terme étudié est donné par :

$$MQI = \sqrt{\frac{\sum_{i=1..n}(\nabla\triangle\phi^{s_p,s_i}_{r_1,r_2} - \frac{1}{\lambda_{L1}} \cdot \rho^{s_p,s_i}_{r_1,r_2} - E[\nabla\triangle\phi^{s_p,s_i}_{r_1,r_2} - \frac{1}{\lambda_{L1}} \cdot \rho^{s_p,s_i}_{r_1,r_2}])^2}{n}} \tag{2.28}$$

Avec n le nombre de doubles différences, s_p le satellite pivot, ϕ^{s1}_{r1} une observation de phase et ρ^{s1}_{r1} la distance géométrique correspondante calculée à partir de la position courante du récepteur $r1$.
L'évolution spatiale du terme d'innovation (calculé pour une seule époque) dans un plan arbitraire passant par la position vraie présente une structure en "boîte à œufs" avec de nombreux minima locaux dont aucun n'est significativement plus faible que les autres (Fig. 2.7).

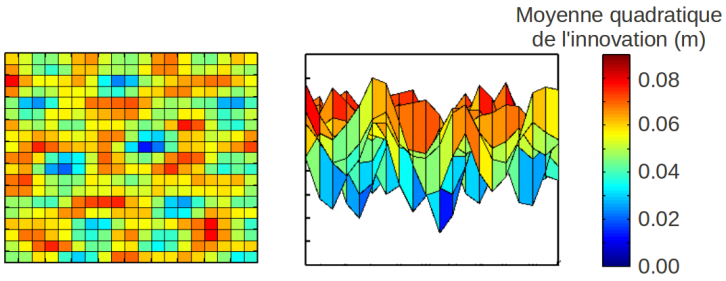

FIGURE 2.7 – Moyenne quadratique de l'innovation pour un calcul de doubles différences sur une seule époque. Coupe passant par la position vraie dans le plan YZ d'un repère cartésien géocentrique.

Cette structure en "boîte à œufs" s'explique par le calcul des ambiguïtés à partir des positions courantes et justifie la nécessité d'une position approchée à mieux que $\frac{\lambda_{L1}}{2}$m pour que le calcul converge vers la position vraie. En effet, si la position approchée est à plus de $\frac{\lambda_{L1}}{2}$m de la position vraie, le filtre de Kalman étendu qui minimise localement la MQI fera converger la position vers le point voisin qui présente un minimum local de MQI, et non pas vers la position vraie.
Cependant, lorsque l'on intègre le terme étudié sur plusieurs époques couvrant une période assez longue (plus de 15min), le pic correspondant à la position vraie devient un minimum global (Fig. 2.8), ce qui explique que seul le jeu d'ambiguïtés calculé à partir de cette position initiale donne une solution stable au cours du temps. Les solutions obtenues à partir d'un autre jeu d'ambiguïtés divergeront quant à elles après un certain temps à cause de l'évolution de la constellation des satellites.

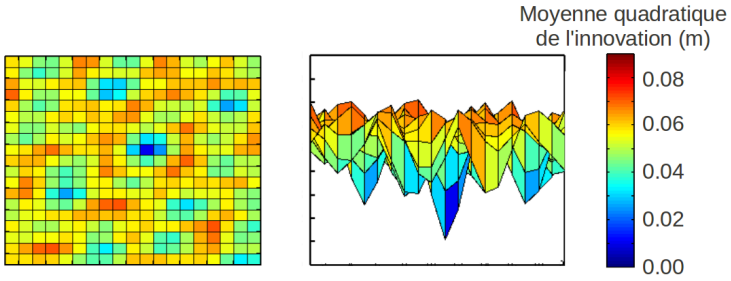

FIGURE 2.8 – Moyenne quadratique de l'innovation pour un calcul de doubles différences ; moyenne sur 15min. Coupe passant par la position vraie dans le plan YZ d'un repère cartésien géocentrique.

Etude du terme d'innovation pour les triples différences

Dans le cas des triples différences, le terme étudié est donné par :

$$MQI = \sqrt{\frac{\sum_{i=1..n}(\triangle\nabla\triangle\phi_{r_1,r_2}^{s_p,s_i} \mid_{t,t-dt} - \frac{1}{\lambda_{L1}} \cdot (\rho_{r_1,r_2}^{s_p,s_i} \mid_t - \rho_{r_1,r_2}^{s_p,s_i} \mid_{t-dt})^2}{n}} \tag{2.29}$$

Ici la coupe du cube résultat calculé pour une seule époque (un unique arc de 15min) selon le même plan que précédemment montre l'existence d'un minimum global (Fig. 2.9), ce qui explique que les triples différences convergent toujours vers la solution vraie quelle que soit la position initiale utilisée. D'autre part, on remarque que le minimum est très plat et pas très bien localisé, ce qui explique que les triples différences donnent des résultats moins précis que les doubles différences pour un calcul époque par époque et nécessitent un temps de convergence non négligeable (quelques heures) avant de fournir une position à mieux que $\frac{\lambda_{L1}}{2}$m, nécessaire pour une résolution correcte des ambiguïtés dans le calcul basé sur les doubles différences.

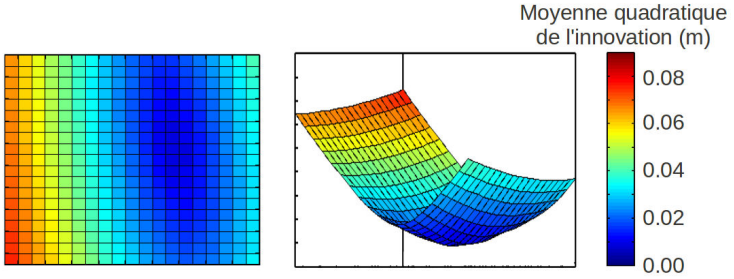

FIGURE 2.9 – Moyenne quadratique de l'innovation pour un calcul de triples différences ; une époque calculée pour un arc de 10min. Coupe passant par la position vraie dans le plan YZ d'un repère cartésien géocentrique.

Méthode alternative de recherche des positions approchées

L'analyse de l'évolution spatiale de la MQI pour les doubles différences montre qu'au bout de 15min d'intégration, la position vraie est facilement discriminable des autres minima locaux (Fig. 2.8). Le calcul des positions approchées en utilisant une recherche basée sur l'évolution spatiale de la MQI en balayant l'espace par pas de 5cm permet donc de réaliser cette étape en utilisant seulement 15min de données brutes, au lieu de quelques heures pour un filtre de Kalman utilisant des triples différences.
Cependant, l'a priori sur la zone de l'espace à explorer est faible, car basé sur la position naviguée obtenue par la puce Ublox à partir du C/A code, ce qui nécessite d'explorer un cube de grandes dimensions : $10m \times 10m \times 10m$ d'après la précision de la position naviguée. Le parcours d'un tel cube par cellules de 5cm de côté est extrêmement gourmand en calculs et ne peut pas être envisagé

dans le cas de réseaux comportant de nombreux nœuds, car la puissance de calcul du coordinateur est limitée. La diminution de volume de calcul est donc nécessaire pour rendre cette méthode de recherche des positions approchées opérationnelle.
L'agrandissement des cellules de recherche pour diminuer le nombre d'opérations n'est pas envisageable, car il conduit à des minima locaux moins marqués et risque de "passer à côté" de la position vraie du récepteur. Une solution possible pour accélérer le calcul consiste alors à fournir un a priori plus précis sur la position du récepteur. Cet a priori peut être obtenu à partir de la MQI calculée sur les triples différences avec de grosses cellules de recherche, car ici le minimum recherché est global et le pic correspondant très large (Fig. 2.9) ; il ne risque donc pas d'être confondu. La combinaison de ces deux étapes, recherche grossière dans un grand cube dérivé des triples différences, puis recherche fine dans un petit cube dérivé des doubles différences, permet alors de calculer une position approchée à 5cm près en seulement 15min. Cette méthode a été testée avec succès, mais son implémentation dans nos logiciels n'est pas terminée, car elle demande une importante phase d'optimisation pour fonctionner dans le cas de réseaux denses.

2.2.8 Bilan : caractéristiques du positionnement des Geocubes au sein du réseau

La méthode de positionnement présentée ci-dessus permet finalement un positionnement relatif des Geocubes au sein d'un réseau local, et constitue donc la composante de surveillance topographique du système Geocube. Pour réaliser le positionnement des Geocubes au sein du réseau deux étapes sont nécessaires :

- Calcul de positions relatives approchées par un filtrage de Kalman utilisant des triples différences comme observations.
- Suivi en continu des positions relatives précises par un filtrage de Kalman utilisant des doubles différences comme observations.

Cette méthode de positionnement a été élaborée pour répondre au mieux aux spécification requises pour le fonctionnement de la composante de surveillance topographique des Geocubes. Elle est caractérisée par :

- La réalisation d'un traitement relatif et en réseau afin de tirer parti de l'aspect local des réseaux de Geocubes pour éliminer les erreurs spatialement corrélées. Ceci permet d'obtenir un positionnement relatif précis.
- La réalisation d'un calcul époque par époque qui donne accès à un traitement en temps-réel et à des séries temporelles de positions avec une grande résolution temporelle.
- L'utilisation des seules données de phase lors du calcul de positionnement, ce qui réduit la quantité de données à faire transiter par le réseau radio (cf section 2.3.4).

2.3 Implémentation de la méthode de positionnement

2.3.1 Généralités

L'ensemble des algorithmes constituant le processus de positionnement présenté précédemment a été implémenté en prenant appui sur le plus petit nombre possible de développements externes. Le but suivi a été de développer un logiciel de traitement GPS tenant compte des spécificités des réseaux de Geocubes ainsi que des besoins de positionnement introduits par ce nouveau type de récepteurs. Le logiciel réalisé permet alors en particulier :
- Le prototypage des algorithmes de positionnement ainsi que leur paramétrage.
- Le traitement de campagnes de mesures réalisées pour tester les Geocubes.
- La mesure de déformations en temps-réel à partir d'un réseau de Geocubes.

Le souhait de réaliser un logiciel destiné à des fins de surveillance automatique et temps-réel nous a poussés à l'implémenter en C/C++ pour permettre une exécution rapide et un portage simple de l'application. Les seules librairies externes utilisées sont Qt pour la gestion automatique d'évènements, Boost pour la gestion des matrices et lapack3 pour leur inversion. L'architecture logicielle présentée figure 2.10 a été adoptée afin de supporter des utilisations très diverses, allant du prototypage à une utilisation de surveillance, en passant par une phase de tests.

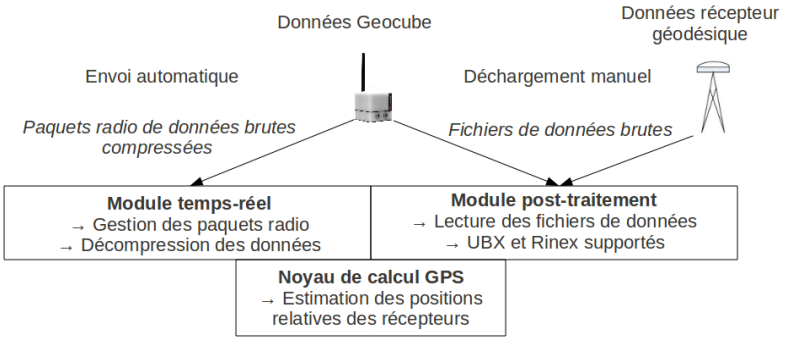

FIGURE 2.10 – Structure du logiciel de positionnement.

Un noyau de calcul GPS commun à toutes les utilisations a tout d'abord été développé. C'est dans ce noyau que sont implémentés les algorithmes de positionnement. Pour fonctionner il nécessite en entrée des observations de doubles ou triples différences dans un formalisme qui lui est propre. Afin de former ces observations à partir de mesures GPS brutes, des sur-couches sont ajoutées à ce noyau pour former des modules de calcul dédiés soit au post-traitement, soit à un usage temps-réel. Ces deux modes d'utilisation ont été séparés pour faire face à des contraintes opérationnelles distinctes : le module temps-réel est destiné à traiter en permanence et au fur et à mesure un flux de données généré par les Geocubes, tandis que le module de post-traitement doit permettre un traitement le plus rapide possible à partir de fichiers de données préalablement enregistrées.

2.3.2 Le module de post-traitement

Le module de post-traitement a été développé afin de tester, de paramétrer et d'évaluer la précision du noyau de calcul dédié à la surveillance topographique à partir d'un réseau de Geocubes. Cette mise au point progressive du noyau de calcul passe en particulier par le traitement répété de jeux de données enregistrés sous forme de fichiers .ubx (format binaire propriétaire de Ublox, [U-Blox ubx Format]). Cette opération permet de corriger d'éventuels bugs, mais aussi d'améliorer le paramétrage du filtre de Kalman.
De plus, le module de post-traitement permet le traitement de données enregistrées au format RINEX qui constitue la norme pour l'échange de données GNSS brutes. Les données acquises par n'importe quel récepteur GNSS peuvent donc être traitées de la même façon que celles acquises par les Geocubes. Ceci permet alors de qualifier le hardware des récepteurs Geocubes (antenne, puce GPS) en comparant les résultats de positionnement obtenus avec le même logiciel de calcul mais avec différents types de matériels (Geocubes vs récepteurs géodésiques).
Le fonctionnement du module de post-traitement est basé sur le traitement de données enregistrées sous forme de fichiers aux formats ubx ou RINEX. Il nécessite le choix par l'utilisateur d'un récepteur maître parmi les références. Il s'agit du récepteur qui a collecté les données de meilleure qualité (période d'acquisition, rapport signal sur bruit, nombre de satellites visibles...). Le fichier du récepteur maître est alors parcouru pour en extraire les données GPS brutes. Les fichiers des autres récepteurs sont asservis sur ce fichier maître et les données sont extraites pour les époques communes avec le fichier maître.
Une fois extraites, les données brutes sont interprétées et triées selon leur qualité. Les données de qualité suffisante sont alors utilisées pour former les observations nécessaires au noyau de calcul (doubles ou triples différences). Une observation est formée dès qu'il existe des données exploitables pour le récepteur maître et au moins un autre récepteur. Si au moins une observation a été formée, elle est transmise au noyau de calcul qui estime les positions des récepteurs pour lesquels on dispose d'observations.
En sortie du module de post-traitement on obtient alors les positions de l'ensemble des récepteurs dont on a fourni les fichiers de données brutes. Ces résultats sont stockés sous forme de fichiers texte dans une arborescence liée au chantier traité.

2.3.3 Le module temps-réel

Le module de traitement en temps réel constitue le mode de fonctionnement standard pour le positionnement des Geocubes au sein du réseau. Il est conçu pour fonctionner directement sur le coordinateur et utilise en entrée les mesures GPS brutes fournies par les récepteurs sous forme de paquets radio. Il génère en sortie des positions estimées en temps réel de telle sorte que le délai entre l'acquisition des données et l'obtention des positions mises à jour soit le plus faible possible. Il est inférieur à 1min dans la majorité des cas. Les positions actualisées des Geocubes sont alors mises en base dans la base de données hébergée sur le coordinateur et constituent le résultat du positionnement. Le choix de définir le temps-réel comme mode de fonctionnement standard pour la composante de positionnement du système Geocube, y compris quand la surveillance temps-réel n'est pas indispensable, vient du constat que les données GPS stockées sous forme de fichiers de données brutes ne sont pas toujours traitées en totalité. La présence d'un résultat calculé "au fil de l'eau" peut au contraire attirer l'œil de l'utilisateur si un mouvement intéressant survient. Il pourra alors décider d'améliorer la solution par des post-traitements supplémentaires ou un recalcul complet de la solution avec un autre paramétrage.

Le module de positionnement en temps-réel nécessite des messages radio porteurs de données GPS brutes pour fonctionner. Lors de son initialisation il paramètre donc les Geocubes pour leur demander d'acquérir les données nécessaires et les envoyer au coordinateur (Fig. 2.11).

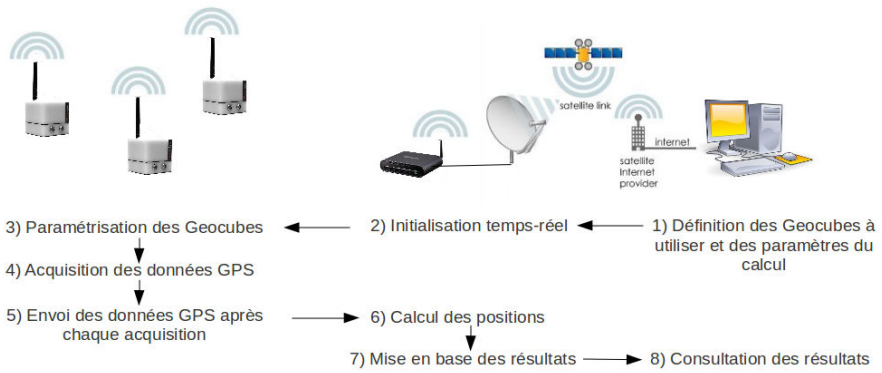

FIGURE 2.11 – Fonctionnement du positionnement en temps-réel.

Le lien radio permet ce transfert des données en temps réel, mais pose en contrepartie un problème d'intégrité des données transmises dû au protocole de communication adopté. En effet, les Geocubes envoient leurs données brutes au coordinateur sous forme de messages radio dès que les données sont acquises, mais ces dernières peuvent mettre un temps indéterminé à arriver ou même se perdre définitivement lors du transfert. Afin de pallier cette incertitude, le module temps-réel gère un buffer tournant de messages radio contenant les données GPS de tous les Geocubes pour n époques (Fig. 2.12).

Lorsqu'un message de données GPS brutes arrive au coordinateur, celui-ci le transfère au module temps-réel qui le place dans la ligne du buffer correspondant à l'époque d'acquisition si cette ligne existe. Dans le cas contraire, la ligne est créée en haut du buffer et l'ensemble des lignes du buffer sont décalées d'une ligne vers le bas. La dernière ligne, correspondant aux données les plus anciennes, est alors extraite du buffer et interprétée. S'il existe des données de qualité suffisante pour au moins une référence et un Geocube mobile, des observations sont formées et transmises au noyau de calcul qui met à jour les positions des Geocubes pour lesquels il dispose d'observations. Il faut noter qu'ici il n'y a pas de notion de récepteur maître comme lors du post-traitement, ce qui permet de ne pas affecter un rôle central à un récepteur particulier, et limite alors le risque de panne du réseau en cas d'avarie de ce récepteur central. L'utilisation de ce buffer tournant permet de réaliser un calcul même si les données de certains récepteurs prennent beaucoup de temps à parvenir jusqu'au coordinateur. Ainsi, les problèmes liés au transfert radio des données se retrouvent contournés, au prix d'un léger retard dans le calcul qui n'est effectué que $n \times dt$ secondes

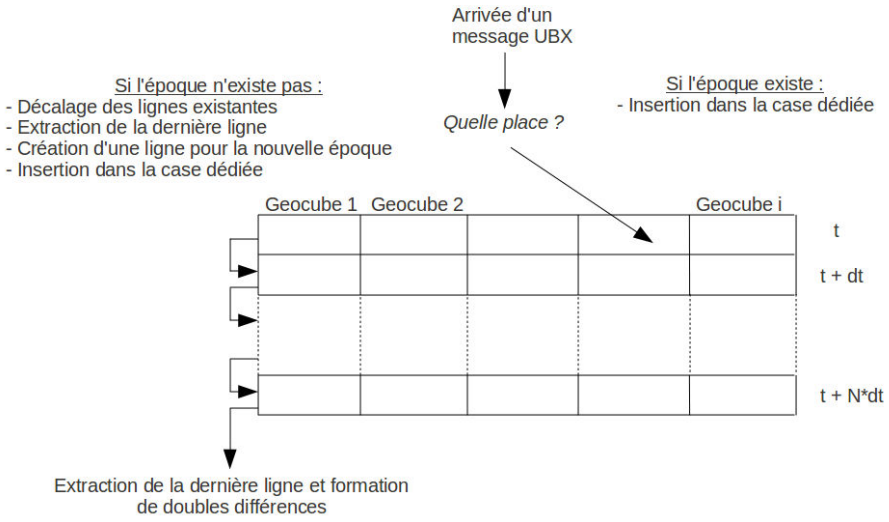

FIGURE 2.12 – Buffer tournant de messages radio.

après l'acquisition des données, avec n la taille du buffer et dt le pas d'échantillonnage des données brutes. Ces deux paramètres varient selon les utilisations et sont fixés pour répondre à un compromis entre le taux de réception des messages et le délai d'attente avant calcul. Un paramétrage standard utilise $n = 3$ pour un pas d'acquisition $dt = 10$, ce qui aboutit à un délai de 30sec avant le calcul de position.
Une autre limitation majeure du protocole radio réside dans la faible bande passante allouée au transfert des données. Elle est limitée à 1.2ko/sec pour l'ensemble du réseau. Or un message ubx comportant les données acquises en une époque par un Geocube captant 10 satellites fait 268octets. Le réseau ne peut donc pas supporter le transfert de données provenant de plus de 4 récepteurs fonctionnant à 1Hz. De plus, même si la fréquence d'acquisition est inférieure à 1Hz, les données seront collectées et envoyées en même temps par les Geocubes, et risquent de créer des collisions sur le réseau lors de l'envoi.
La première réponse apportée à ce problème consiste à implémenter dans le module temps-réel une fonction demandant aux récepteurs d'envoyer leurs données de façon échelonnée entre deux acquisitions. Ceci évite que le réseau radio sature lors de l'envoi simultané de toutes les données succédant à l'acquisition et qu'il demeure ensuite inactif en attendant l'acquisition suivante.
Cependant, si cette méthode permet d'éviter la congestion du réseau, elle ne permet pas de transférer les données de plus de 4 Geocubes par seconde et le nombre de récepteurs du réseau sera alors limité à $4 \times pas\ d'acquisition(ensec)$. Le réseau ne pourra alors théoriquement pas comporter plus de 4 Geocubes fonctionnant à 1Hz ou 40 Geocubes fonctionnant à 0.1Hz. En pratique, dans le cas de grands réseaux, l'efficacité du transfert radio diminue avec le nombre de sauts que doivent réaliser les messages avant de parvenir au coordinateur. En effet, dans le cas de réseaux étendus, certains récepteurs ne sont pas en visibilité radio directe avec le coordinateur. Dans ce cas, leurs messages transitent par d'autres nœuds du réseau avant d'arriver au coordinateur, ce qui contribue à engorger certains tronçons. Les valeurs indiquées sont donc des bornes supérieures pour le nombre de récepteurs intégrables au réseau. Le nombre effectif toléré dépend en pratique de chaque configuration. Il est donc nécessaire d'exprimer les données brutes dans un format le plus compact possible pour permettre le déploiement de réseaux comportant plusieurs dizaines de nœuds et fonctionnant à haute fréquence. La table 2.1 récapitule l'espace occupé par des données brutes pour une époque selon le format utilisé pour coder les données GPS.

On remarque alors que même le format RTCM 3.0 qui est actuellement le plus utilisé pour la communication sans fil de données GPS brutes requiert environ 130octets par récepteur et par époque, ce qui ne permet qu'un nombre maximum théorique de récepteurs utilisables de 9 pour un fonctionnement à 1Hz et de 90 pour un fonctionnement à 0.1Hz.

Format	Taille pour une époque
Rinex Hatanaka	1800 octets
UBX (format natif des Geocubes)	268 octets
RTCM 3.0	130 octets
Format compressé proposé	48 octets

TABLE 2.1 – Différents formats pour le transfert de données GPS brutes.
Espace occupé par les données brutes pour une époque et dix satellites.

Afin de permettre un transfert encore plus parcimonieux des mesures GPS brutes et donc desserrer la contrainte liée à la faible bande passante du module radio, une méthode de compression des données GPS spécialement dédiée aux réseaux de Geocubes a été développée. Elle consiste à définir un format de transfert de données dans lequel seules les données nécessaires au calcul de positionnement sont envoyées et à les exprimer sous la forme la plus compacte possible. Les données transmises sont alors :
- L'instant de mesure.
- Les rapports signal sur bruit.
- Les identifiants des satellites.
- Les mesures de phase.

On notera que les données brutes de mesures de pseudo-distances ne sont pas transmises, car elles ne sont pas utilisées lors du traitement. De même les mesures de Doppler ne sont pas transmises. Pour s'affranchir de ces données, les mesures de phase sont interpolées à la seconde ronde au niveau des Geocubes.
La compression mise au point consiste également à modifier les données transmises afin de diminuer leur taille. Seules les données les plus volumineuses, à savoir l'instant de mesure et les données de phase brutes, sont affectées par cette étape. Le procédé consiste à ne transmettre dans le message radio qu'une information précise mais ambigüe, dont la valeur complète est reconstituée dans le coordinateur par le module temps-réel lors de la réception du message. Pour cela une valeur complète mais imprécise est prédite par le logiciel et la vraie valeur est calculée en la corrigeant d'un appoint issu des données transmises par le message radio (Fig. 2.13).

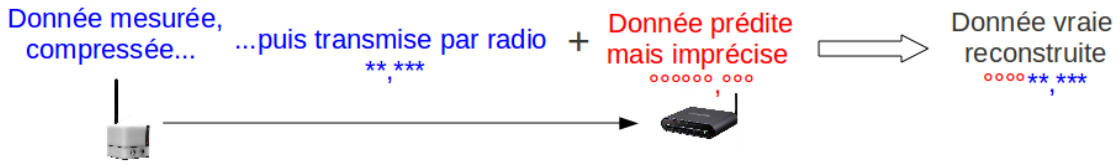

FIGURE 2.13 – Reconstruction de données ambiguës.

Les méthodes de reconstitution de l'instant de mesure et des mesures de phases à partir d'une prédiction calculée sur le coordinateur et des données ambigües transmises par radio sont détaillées ci-dessous.

Compression de la date d'acquisition des mesures

La compression de la date d'acquisition des mesures consiste à arrondir cette dernière à la seconde entière la plus proche et à la tronquer. Les données de phase sont alors interpolées au niveau du Geocube pour être cohérentes avec la date transmise dans le message compressé qui correspond à la seconde entière de la semaine GPS à laquelle l'acquisition a eu lieu.
La date d'acquisition est ensuite reconstituée dans son intégralité au niveau du coordinateur à partir de l'horloge de ce dernier. L'horloge du coordinateur pouvant s'écarter du temps GPS de plusieurs minutes du fait de sa dérive propre, l'algorithme utilisé prévoit que cette horloge puisse être fausse jusqu'à 12h, ce qui assure un fonctionnement correct de la méthode même en cas de grande dérive de l'horloge. L'algorithme de reconstitution consiste alors à reconstruire la date d'acquisition à partir de l'heure du coordinateur (complète mais imprécise) et de la seconde de la semaine (précise mais incomplète) contenue dans le message de données compressées transmis par

radio. Pour cela la formule suivante est utilisée :
$j_{entier} = E[\frac{t_{coordinateur}}{86400} - s_{radio}(86400) + 0.5]$
$s_j = s_{radio}(86400)$
$t_{final} = j_{entier} + s_j$

(2.30)

Avec j_{entier} le jour entier corrigé de l'erreur d'horloge du coordinateur, $t_{coordinateur}$ le temps du coordinateur exprimé en secondes, s_{radio} la seconde de la semaine juste transmise dans le message radio, s_j la seconde juste du jour considéré et t_{final} la date d'acquisition reconstituée. Ici $E[]$ représente l'opérateur partie entière et (86400) représente l'opérateur modulo 86400.

Compression des mesures de phase

L'utilisation de doubles différences assure l'élimination des erreurs d'horloge et permet une réduction extrême des biais spatialement corrélés du fait des courtes lignes de base envisagées pour les réseaux de Geocubes. Ceci implique que les doubles différences observées sont presque entièrement déterminées par la géométrie du système {satellites + récepteurs}. La connaissance d'une position relative approchée des récepteurs fournie par la prédiction du filtre de Kalman permet alors de prédire précisément la valeur des doubles différences à partir de la seule géométrie du problème. Le mouvement des récepteurs étant supposé faible entre deux époques consécutives (hypothèse de la zone d'étude quasi-statique), la prédiction des doubles différences est obtenue avec une précision d'une fraction de la longueur d'onde utilisée (λ_{L1}). Le message radio peut alors transmettre uniquement des phases tronquées à $1 \times \lambda_{L1}$ et les doubles différences réelles seront reconstituées au niveau du coordinateur en utilisant une prédiction "géométrique" des doubles différences et un algorithme proche de celui de la reconstitution de la date d'acquisition. Cependant, si la troncature à $1 \times \lambda_{L1}$ donne de bons résultats lors du suivi des déformations par doubles différences, elle est problématique lors du calcul des positions initiales par un calcul basé sur les triples différences. En effet, lors de ce calcul les positions initiales utilisées sont des positions naviguées d'une précision métrique ce qui rend la prédiction des doubles différences imprécise lors de la formation des observables de triples différences. Dans ce cas, il faut réaliser une troncature moins stricte des mesures de phases pour tenir compte de l'imprécision de la prédiction des doubles différences au cours de la phase de reconstitution. Dans notre application les phases sont codées modulo 1024 cycles (10bits) lors du transfert radio, ce qui implique une ambiguïté d'environ 195m. Cette ambiguïté est supérieure à la précision des solution naviguées (environ 10m) et pourra donc être levée à partir d'une valeur prédite basée sur ces dernières.
Cette troncature modulo 1024 est effectuée au niveau des Geocubes sur des mesures de phases préalablement arrondies à 1/256ème de phase (afin de coder la partie fractionnaire sur seulement 8 bits). Ceci produit un bruit d'arrondi de l'ordre de 0.7mm, inférieur au bruit de mesure des phases brutes qui est millimétrique. Au final, chaque phase est codée sur 18bits prenant en compte la partie entière (10bits) et la partie fractionnaire (8 bits).
Ces phases modulo 1024 sont ensuite transmises par radio au coordinateur qui reconstitue les doubles différences complètes de la façon suivante :

– Calcul de la double différence prédite à partir de la géométrie du problème :

$$\begin{aligned}\nabla\triangle\phi^{s1,s2}_{r1,r2,pred} = &\parallel X^{s1}_{eph} - X_{r1,pred} \parallel - \parallel X^{s2}_{eph} - X_{r1,pred} \parallel - \\ &\parallel X^{s1}_{eph} - X_{r2,pred} \parallel + \parallel X^{s2}_{eph} - X_{r2,pred} \parallel\end{aligned} \tag{2.31}$$

Avec $\nabla\triangle\phi^{s1,s2}_{r1,r2,pred}$ la double différence prédite, X^{si}_{eph} la position du satellite si calculée à partir d'un fichier d'éphémérides, $X_{ri,pred}$ la position du récepteur ri calculée lors de la phase de prédiction du filtre de Kalman et $\|\|$ l'opérateur distance euclidienne.

– Calcul de la double différence observée mais incomplète à partir des mesures de phase modulo 1024 :

$$\nabla\triangle\phi^{s1,s2}_{r1,r2,obs} = \phi^{s1}_{r1}(1024) - \phi^{s2}_{r1}(1024) - \phi^{s1}_{r2}(1024) + \phi^{s2}_{r2}(1024) \tag{2.32}$$

Avec $\nabla\triangle\phi^{s1,s2}_{r1,r2,obs}$ la double différence observée à partir des mesures de phase tronquées et $\phi^{si}_{rj}(1024)$ la mesure de phase entre le satellite si et le récepteur rj tronquées modulo 1024.

– Reconstitution de la double différence :

$$\nabla\triangle\phi^{s1,s2}_{r1,r2,final} = \nabla\triangle\phi^{s1,s2}_{r1,r2,entier} + \nabla\triangle\phi^{s1,s2}_{r1,r2,obs} \tag{2.33}$$

Avec $\nabla\triangle\phi^{s1,s2}_{r1,r2,final}$ la double différence reconstituée et $\nabla\triangle\phi^{s1,s2}_{r1,r2,entier}$ la partie entière correcte calculée de la façon suivante :

$$\nabla\triangle\phi^{s1,s2}_{r1,r2,entier} = E[\nabla\triangle\phi^{s1,s2}_{r1,r2,pred}/1024 - \nabla\triangle\phi^{s1,s2}_{r1,r2,obs}/1024 + 0.5] \tag{2.34}$$

avec $E[]$ l'opérateur partie entière.

Le cas échéant les triples différences sont formées par simple différentiation temporelle des doubles différences reconstituées au niveau du coordinateur.

Message compressé

Finalement le message compressé contenant les données brutes nécessaires au calcul de positionnement envoyé par radio des Geocubes vers le coordinateur possède la structure suivante :

$[T][T][T][PRN^{i1}][\phi^{i1}][\phi^{i1}][\phi^{i1}|SNR^{i1}]...[PRN^{in}][\phi^{in}][\phi^{in}][\phi^{in}|SNR^{in}]$

Avec []=1octet de données, T la date d'acquisition (seconde de la semaine), ϕ^{i1}la mesure de phase modulo 1024 pour le satellite $i1$, SNR^{i1}son rapport signal sur bruit et PRN^{i1} son numéro de satellite.

Un message compressé contenant les données de 10 satellites pour 1 récepteur ne nécessite alors plus que 48 octets (43 octets pour les données et 5 octets pour mimer le protocole ubx) contre 268 octets pour le format ubx natif avant compression. En plus de la déflation des données à envoyer, ceci permet le transfert des informations relatives à une époque par un unique paquet radio (de taille maximale de 72 octets), ce qui contribue à l'augmentation du rendement du réseau.

Qualification du module temps-réel et de la compression des données

Afin de tester le fonctionnement du module temps-réel, incluant l'envoi échelonné des données et leur compression, un réseau de quinze Geocubes a été déployé sur le toit de l'IGN au printemps 2013 (Fig. 2.14). Une session de tests de plus d'une journée a été conduite au travers d'un calcul temps-réel incluant tous les récepteurs présents qui étaient programmés pour acquérir des données GPS à la fréquence de 0.1Hz.

Durée de la session	28h 49min 40sec
Pas d'acquisition	10sec
Nombre d'époques potentielles	10378
Nombre maximum d'échecs de transfert pour un récepteur	161 (1.6%)
Nombre minimum d'échecs de transfert pour un récepteur	0 (0.0%)
Nombre moyen d'échecs de transfert pour un récepteur	36 (0.35%)

TABLE 2.2 – Bilan de fonctionnement du réseau de Geocubes déployé pour tester le module temps-réel.

La table 2.2 récapitule le fonctionnement du réseau. Pour le plus mauvais récepteur le taux de données manquantes ou erronées atteint 1.6% et il est de 0.35% en moyenne. Ce très faible taux d'échec montre que la combinaison de la compression des données brutes et de l'échelonnement de leur envoi permet un transfert en temps-réel pleinement opérationnel.

Parallèlement à l'envoi par radio, les données ont été stockées sur les cartes SD des Geocubes. Un post-traitement réalisé après déchargement des données à la fin de l'expérience a donné exactement le même résultat que le calcul en temps-réel, ce qui confirme que la compression des données n'a aucun impact sur le résultat final. De plus, la concordance des deux résultats assure que le noyau de calcul est utilisé de façon similaire par les modules post-traitement et temps-réel. Ceci confirme la pertinence d'améliorer le noyau de calcul en n'utilisant que le module de post-traitement lors des phases de prototypage et d'inclure ensuite le noyau testé dans le module de surveillance en temps-réel.

FIGURE 2.14 – Vue partielle (coordinateur et certains récepteurs) du réseau de Geocubes déployé pour tester le module temps-réel.

2.3.4 Traitement de données décimées

Le module de traitement en temps-réel qui correspond au mode de fonctionnement standard pour le positionnement des Geocubes a été prévu initialement pour traiter des données acquises en continu avec un pas d'échantillonnage fixe. Habituellement 1, 10 ou 30sec séparent deux acquisitions, le pas d'échantillonnage dépendant de l'application visée. Cependant, ce positionnement en continu implique un fonctionnement permanent de tous les composants des Geocubes (en particulier la radio et le GPS) conduisant à une consommation énergétique proche de la consommation maximale du Geocube : 682mW. L'alimentation des Geocubes devient alors un point sensible.
La consommation des Geocubes étant déjà optimisée pour être la plus faible possible pour un ensemble de tâches données, la seule solution pour faire baisser cette consommation est de diminuer l'activité des récepteurs. Dans le cas de la surveillance de mouvements lents, il peut alors être intéressant de mettre les Geocubes en hibernation la plupart du temps et de n'effectuer des mesures que quelques minutes de temps en temps. Par exemple un fonctionnement des récepteurs 5min par demi-heure aboutit à une consommation 80% plus faible qu'un fonctionnement en continu. Cependant, ce mode de fonctionnement discontinu pose deux problèmes majeurs pour le positionnement :

- L'endormissement et le réveil de l'ensemble des récepteurs du réseau doivent être synchronisés, car le calcul de positionnement nécessite des données acquises simultanément par tous les Geocubes du réseau.
- L'arrêt de la puce GPS du Geocube lors de son endormissement entraîne la perte des ambiguïtés à chaque extinction.

Toutefois, l'algorithme de positionnement et la structure des réseaux de Geocubes permettent de surmonter ces difficultés et de mettre au point un mode de fonctionnement discontinu, basé sur la collecte et le traitement de données décimées, afin d'économiser de l'énergie au niveau des récepteurs. La gestion du réseau et le logiciel de positionnement ont été adaptés dans ce sens :

- Le superviseur a été modifié afin de lui ajouter une fonctionnalité permettant d'éteindre tous les récepteurs du réseau pour une certaine durée à des heures pré-déterminées. Ainsi, il pourra par exemple demander toutes les 30 minutes à l'ensemble des Geocubes du réseau de se mettre en hibernation pendant 25 min. Une fois le message d'endormissement reçu

ceux-ci hiberneront le temps voulu et ne seront alors plus joignables par radio. Comme le temps d'hibernation demandé est le même pour tous, ils se réveilleront simultanément et se mettront alors à acquérir de nouvelles observations et à les transmettre par radio. Lors du réveil des Geocubes une période d'initialisation est cependant à prévoir avant la collecte effective des données GPS nécessaires au positionnement. En effet, les puces GPS incluses dans les Geocubes nécessitent 26sec après leur réveil pour réussir à verrouiller les satellites visibles.

- La gestion des ambiguïtés a également été adaptée afin de permettre leur recalcul rapide après redémarrage des puces GPS. Pour cela l'hypothèse de la surveillance d'une zone quasi-statique est utilisée, et au rédémarrage du GPS les ambiguïtés sont recalculées directement à partir de la position du Geocube prédite par le filtre de Kalman. Cette prédiction est réalisée à partir de la position du récepteur estimée avant extinction du GPS. La méthode de résolution des ambiguïtés utilisée dans notre logiciel de positionnement est donc finalement très efficace pour retrouver les ambiguïtés après une discontinuité de mesure. Elle permet ainsi un positionnement fonctionnant en utilisant des données décimées.

Finalement, dans le cas de mouvements lents, deux adaptations du système de positionnement en temps-réel à partir de réseaux de Geocubes ont permis de définir un nouveau mode de fonctionnement, basé sur l'acquisition et le traitement de données décimées, et diminuant drastiquement la consommation énergétique des nœuds du réseau.

2.3.5 Bilan : positions brutes obtenues

En sortie du noyau de calcul, alimenté par des doubles différences formées par les modules de post-traitement ou de temps-réel, on obtient des positions pour les Geocubes que l'on nommera positions brutes. Il s'agit des positions des récepteurs au sein du réseau, exprimées dans le système de référence imposé par les équations de contrainte sur les coordonnées des références. Ces résultats peuvent être obtenus en temps-réel et les séries temporelles de positions qui en sont dérivées présentent une grande résolution temporelle, imposée par la fréquence d'échantillonnage d'acquisition des données de phase.

Des séries temporelles de positions correspondant à trois cas d'étude couvrant une période de cinq jours sont utilisées pour caractériser le résultat obtenu :

- Un jeu de données acquis sur le toit de l'IGN pour une ligne de base (10m, Fig 2.15) observée avec un ciel dégagé. Un mouvement brusque de 1cm sur la composante Est est généré manuellement aux dates 2.75 et 3.95. Ce second déplacement est suivi par un déplacement opposé à la date 4.6. Ce jeu de données montre que le traitement proposé permet de mesurer avec exactitude ces mouvements synthétiques et accommode rapidement les mouvements brusques.
- Un jeu de données acquis lors de l'étude du glissement de terrain de Super-Sauze (cf section 3.2). La ligne de base considérée (367m, Fig 2.16) est fixe et observée avec un masque de 40^o au Sud induit par un sommet. Ce jeu de données montre la dispersion caractéristique obtenue sous des conditions d'observation difficiles. La comparaison avec le jeu de données précédent montre que la dispersion des positions augmente en cas de forts masques.
- Un jeu de données acquis lors de l'étude du glacier d'Argentière (cf section 3.3). La ligne de base considérée (610m, Fig 2.17) est mobile et sa variation correspond à l'écoulement du glacier par rapport à une de ses rives stables. Ce jeu de données montre le fonctionnement du traitement proposé en limite de l'hypothèse de zone quasi-statique ; en effet le mouvement suivi atteint 16cm/jour.

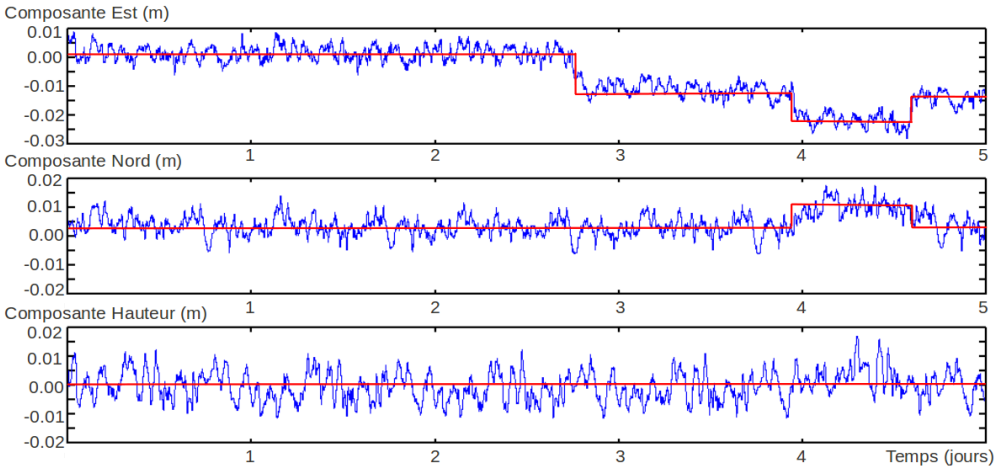

FIGURE 2.15 – Positions brutes : Mouvements synthétiques brusques.
Rouge : mouvement effectué, bleu : mouvement mesuré.

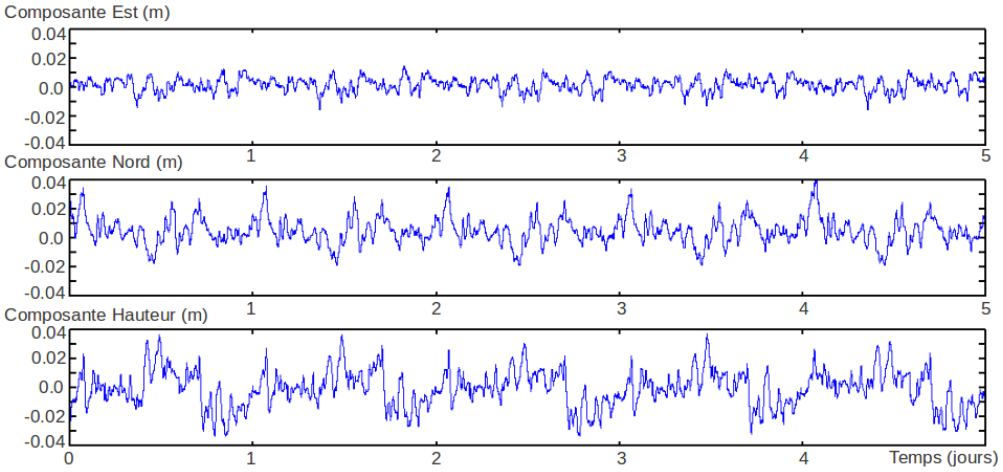

FIGURE 2.16 – Positions brutes : Récepteurs fixes.

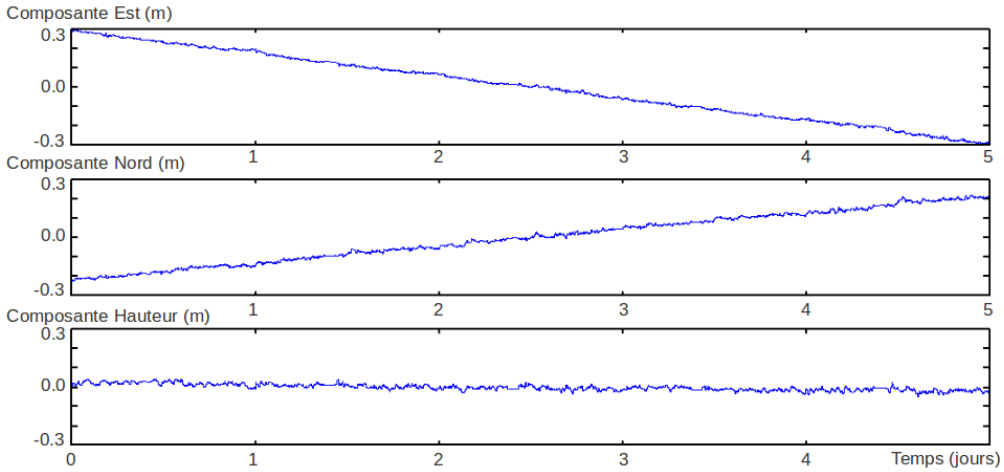

FIGURE 2.17 – Positions brutes : Mouvement rapide (16cm/jour).

2.4 Principales sources d'imprécision

Les solutions brutes obtenues à partir des acquisitions des Geocubes et du logiciel de traitement GPS proposé permettent de mesurer convenablement différents types de déplacements relatifs entre Geocubes mais sont assez bruitées. Une analyse des différentes sources d'imprécision va donc être menée avec trois objectifs :
- Comprendre l'origine des imprécisions constatées.
- Tenter de les corriger afin d'améliorer la précision des résultats obtenus.
- Déterminer les limites du système.

2.4.1 Biais totalement éliminés par double différentiation : les erreurs d'horloge

Les horloges embarquées dans les satellites et le récepteurs afin de générer une échelle de temps pour chaque composante du système GPS ne sont pas parfaites. Elles ne peuvent donc pas être synchronisées exactement avec l'échelle de temps GPS et s'en écartent en dérivant. Elles se recalent cependant régulièrement pour éviter un trop grand écart entre leur échelle de temps propre et l'échelle de temps GPS, mais des différences subsistent malgré tout. Ainsi, l'horloge des Geocubes peut s'écarter du temps GPS de 500ns (cf section 1.3.2), tandis que les horloges des satellites ne peuvent être corrigées à mieux que 5ns en utilisant le message d'éphémérides radio-diffusé (http ://igscb.jpl.nasa.gov/components/prods.html).
Cependant, ces erreurs d'horloges sont totalement éliminées lors de la formation des doubles différences qui servent d'observation pour le positionnement (cf section 2.2.2). Les erreurs d'horloge n'ont donc pas d'impact sur le positionnement des Geocubes grâce à la différentiation des observations utilisée dans notre méthode.

2.4.2 Biais fortement réduits par différentiation

Erreurs d'orbite

Pour permettre un positionnement en temps-réel, des orbites radio-diffusées sont utilisées pour calculer la position des satellites nécessaire lors du positionnement des Geocubes. Ces orbites possèdent une précision métrique (http ://igscb.jpl.nasa.gov/components/prods.html), ce qui est relativement imprécis mais néanmoins suffisant dans le cas des réseaux envisagés. En effet, l'erreur sur l'estimation de la ligne de base en fonction de l'erreur d'orbite peut être estimée par :

$$\frac{db}{b} = \frac{dr}{r} \tag{2.35}$$

Avec b la ligne de base considérée, db l'erreur associée, r la distance satellite-récepteur et dr l'erreur associée. Dans le cas d'une ligne de base de 5km (longueur maximale pour un réseau de Geocubes) on obtient : $dr = 0.25mm$.
Les orbites radio-diffusées sont donc suffisantes dans le cas d'un réseau de Geocubes et l'erreur sur le positionnement induite par les imprécisions des orbites est infra-millimétrique grâce au positionnement différentiel choisi.

Déformations de la croûte terrestre

Les positions relatives de la Terre, de la Lune et du Soleil génèrent des marées terrestres et océaniques. La marée terrestre induit directement une déformation de la croûte terrestre, tandis que la marée océanique génère des surcharges océaniques qui pèsent sur les fonds des océans et induisent d'autres déformations de la croûte. En plus de ces effets sidéraux, des surcharges atmosphériques et hydrologiques liées aux conditions climatiques s'ajoutent aux déplacements précédents de la croûte terrestre, mais sont de plus faible amplitude.
L'effet cumulé de ces phénomènes peut atteindre plusieurs décimètres, mais tous présentent une grande longueur d'onde dépassant largement la taille des réseaux de Geocubes envisagés. Leur effet sur une zone de faible étendue est donc presque le même en tout point. Dans le cas de courtes lignes

de base, la différentiation des observations GPS élimine alors quasi-totalement la contribution des déformations de la croûte terrestre à l'erreur de positionnement relatif.

Biais ionosphérique

L'ionosphère constitue la partie ionisée de l'atmosphère et se situe entre 80km et 800km au dessus de la surface terrestre. L'ionisation de cette partie haute de l'atmosphère est produite par le rayonnement solaire. Sous l'effet de ce rayonnement, les particules de la haute atmosphère perdent un électron et forment un plasma chargé.
La quantité d'électrons (TEC = total electron content) dans l'ionosphère varie avec l'insolation de l'atmosphère. Elle est donc soumise à des variations diurnes, saisonnières, pluri-annuelles (cycle solaire de 11ans) et géographiques (dépendance à la latitude) [Schaer, 1999]. En plus de ces variations cycliques, de brusques variations du TEC se produisent parfois sous l'effet de tempêtes géomagnétiques [Bergeot et al, 2011].
Or l'ionosphère perturbe la propagation des ondes électromagnétiques utilisées par le système GPS pour le transport d'informations. En effet, elle a un effet dispersif sur les ondes GPS qui génère un biais au zénith fonction de son contenu en électrons et de la fréquence de l'onde porteuse. Ce biais se traduit par un retard de la propagation de l'information (code C/A) et une avance de la phase porteuse. Dans le cas des mesures de phase on a :

$$\Delta L^z_{iono} = -\frac{a}{f^2} \times VTEC \tag{2.36}$$

Avec ΔL^z_{iono} le délai zénithal induit par la traversée de l'ionosphère, $a = 40.3 m^2.s^{-2}$ une constante, f la fréquence de l'onde électromagnétique et VTEC la quantité intégrée d'électrons à la verticale du point considéré.
Un VTEC de 1TECU (Total Electron Content Unit, 1 TECU=10^{16}electrons/m^2) produit un biais de 16cm pour la fréquence L1. Or le VTEC peut varier de 10 TECU à plus de 100 TECU, soit un délai zénithal pouvant dépasser 16m sur L1. Ce biais ionosphérique génère alors une erreur lors du positionnement relatif par GPS qui se traduit au premier ordre par un facteur d'échelle sur l'ensemble des lignes de bases mesurées du réseau.
Pour éliminer le biais ionosphérique, une combinaison dite iono-free (ϕ_3) combinant judicieusement les données de phase acquises sur les deux fréquences L1 et L2 est habituellement utilisée :

$$\phi_3 = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \times \phi_1 + \frac{-f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \times \phi_2 \tag{2.37}$$

Cependant, la formation de cette combinaison iono-free n'est possible que si des récepteurs bi-fréquence sont utilisés. Dans le cas de récepteurs mono-fréquence comme les Geocubes, seules les données sur L1 sont disponibles et le biais ionosphérique doit être modélisé et non éliminé par combinaison de fréquences.
Au cours de la modélisation, le biais ionosphérique à une élévation donnée est dérivé du délai zénithal en utilisant une fonction de projection :

$$\Delta L_{iono}(E) = m(E) \times \Delta L^z_{iono} \tag{2.38}$$

Avec $\Delta L_{iono}(E)$ le délai ionosphérique à l'élévation E, ΔL^z_{iono} le délai troposphérique au zénith et $m(E)$ la fonction de projection.

Pour la modélisation du délai zénithal trois solutions sont possibles :

- Utiliser le modèle d'ionosphère transmis dans le message de navigation. Il s'agit du modèle de Klobuchar [Klobuchar, 1987] basé sur une fonction sinusoïdale à 8 paramètres (Annexe. C). Il est calculé par le segment sol à partir d'observations au sol, puis envoyé aux satellites qui le re-transmettent aux utilisateurs via le message de navigation.
- Utiliser des cartes de TEC régionales mesurées par différents organismes selon la zone considérée. Ces cartes sont calculées à partir de mesures effectuées par un réseau régional de stations GPS bi-fréquence et interpolées. Elles permettent une meilleure modélisation de l'état de l'ionosphère que le modèle de Klobuchar, mais ne sont pour l'instant accessibles gratuitement qu'en temps différé.

– Utiliser une modélisation locale du TEC dérivée d'observations réalisées par quelques récepteurs bi-fréquence disposés autour du réseau. Cette solution est écartée ici, car nous souhaitons éviter tout recours à des récepteurs bi-fréquence dans le cas du positionnement des Geocubes.

Dans notre application nous avons choisi d'utiliser le modèle de Klobuchar pour corriger l'ionosphère. Comme nous le verrons par la suite, ce modèle est en effet suffisant dans le cas de réseaux de faible étendue pour réaliser une correction de l'ionosphère intégrée dans un calcul de positionnement en temps-réel n'utilisant que des données GPS mono-fréquence.
Afin de quantifier l'effet résiduel sur les positions estimées de l'ionosphère non modélisée par le modèle de Klobuchar, nous avons traité des lignes de base fixes entre les stations OPTM, PANA, SMNE et MLVL du Réseau GNSS Permanent (RGP : http ://rgp.ign.fr/) de l'IGN (Fig. 2.18). La station OPTM a servi de référence ; elle est distante de 5km de PANA, de 7km de SMNE et de 19km de MLVL. Toutes ces stations sont alignées selon un axe Est-Ouest. Les données utilisées ont été acquises le 2 janvier 2014 et couvrent l'ensemble de cette journée. Les données ont été traitées avec le logiciel réalisé au cours de cette thèse et donc seules les mesures sur L1 sont utilisées.

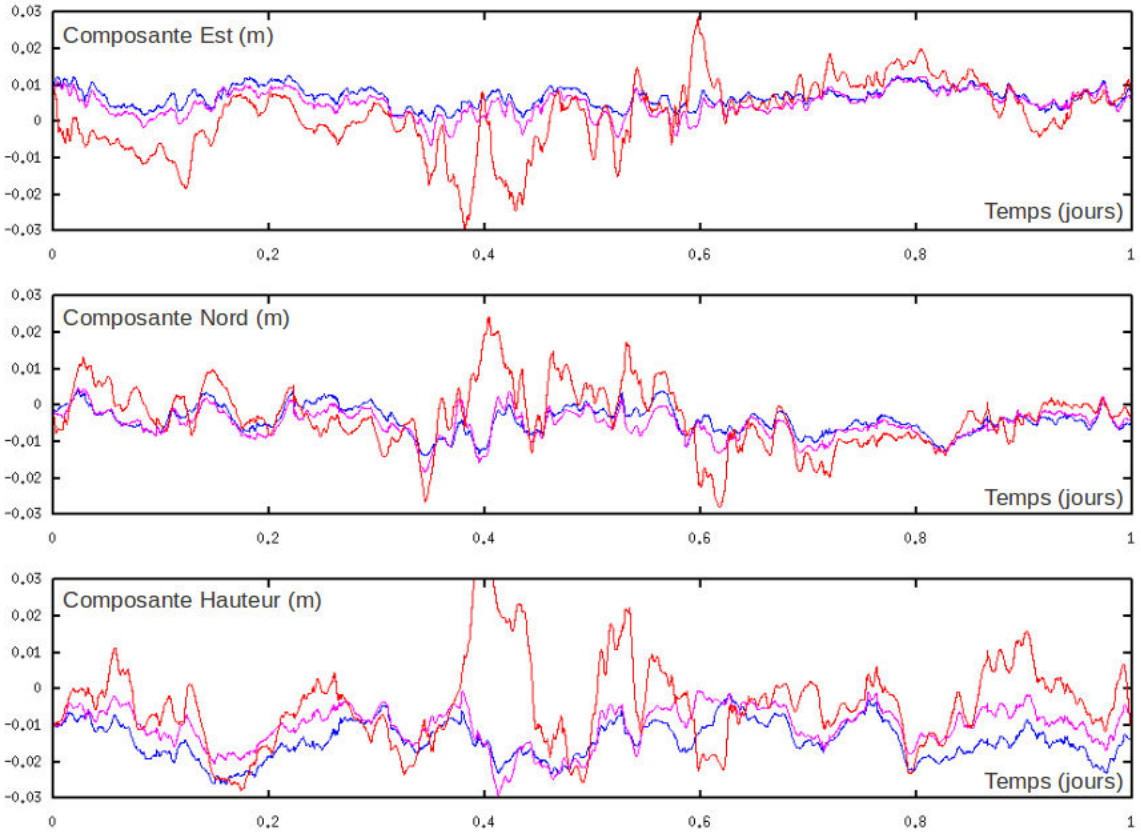

FIGURE 2.18 – Effet de l'ionosphère sur les positions estimées en fonction de la longueur de la ligne de base.
Bleu : ligne de base 5km, magenta : ligne de base 7km, rouge : ligne de base 19km.

Les séries temporelles de positions obtenues présentent une dispersion croissante avec la longueur de la ligne de base (Fig. 2.18). De plus, leurs variations sont corrélées. Une source d'imprécision spatialement corrélée et non différentiée est donc responsable du mode commun de ces dispersions. On peut alors penser qu'un gradient variable dans le temps est présent dans l'ionosphère et que sa structure est assez locale pour qu'il ne soit pas éliminé par la formation de doubles différences lorsque la longueur des lignes de base augmente. Le phénomène de perturbations ionosphériques mobiles (TID = Traveling Ionospheric Disturbances) [Otsuka et al, 2013] présente des caractéristiques temporelles et spatiales qui peuvent expliquer ces gradients locaux variables observés.

Afin de s'assurer que l'ionosphère est bien responsable de la dispersion observée, la ligne de base OPMT-SMNE a été traitée en utilisant deux observables, ϕ_1 et ϕ_2. Pour cela une version de notre programme de positionnement très légèrement modifié pour permettre l'utilisation de données acquises sur L2 est utilisée. Ensuite, une solution iono-free est calculée en combinant les solutions sur L1 (S_{L_1}) et L2 (S_{L_2}) (Fig. 2.19) :

$$S_{L_3} = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \times S_{L_1} + \frac{-f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \times S_{L_2} \tag{2.39}$$

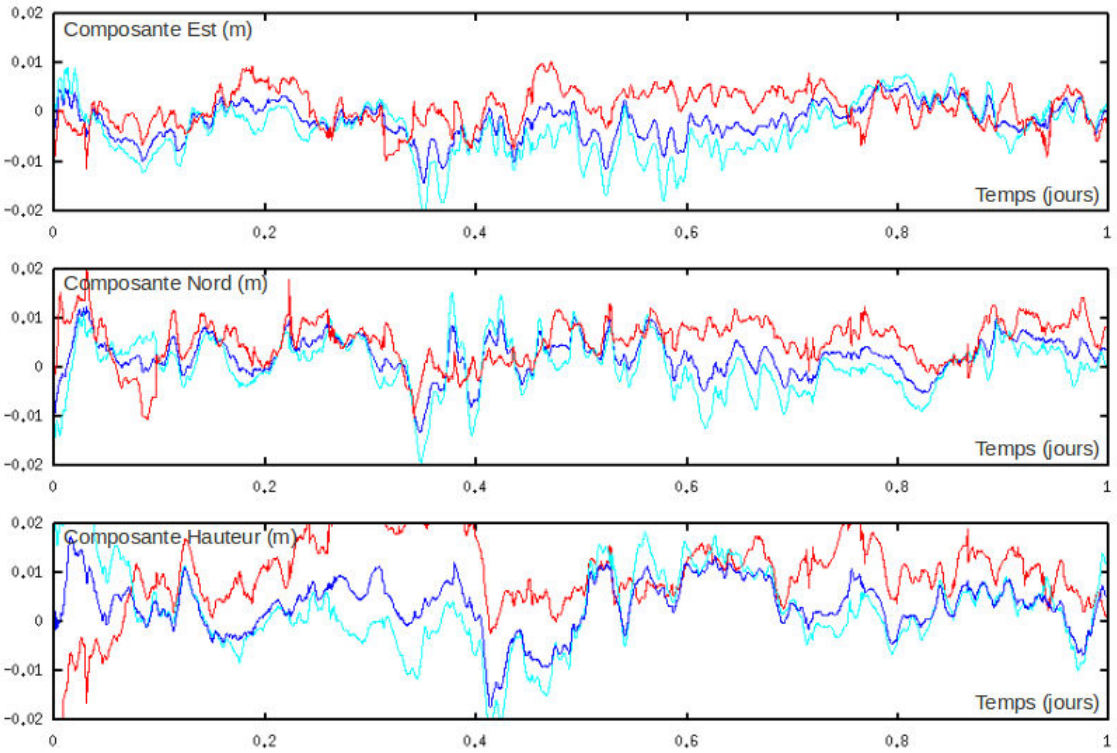

FIGURE 2.19 – Effet de l'ionosphère sur les positions estimées
en utilisant des données sur L1, L2 et L3.
Bleu : calcul L1, cyan : calcul L2, rouge : calcul L3.

On remarque que la solution iono-free (L3) est plus stable que les solutions mono-fréquence (L1 et L2) (Fig. 2.19). En particulier les variations rapides apparaissant au cours de la journée (dates 0.3 à 0.7, ensoleillement et TEC maximum), sont fortement réduites pour la solution L3. Le gain apporté par L3 est cependant atténué par le fait que les données collectées sur L2 sont de moins bonne qualité que les données L1, avec un rapport signal sur bruit plus faible. Ceci conduit alors à des séries temporelles L2 et L3 plus bruitées. D'autre part le résultat est moins net sur la composante verticale à cause d'une dérive inexpliquée impactant la série temporelle L2 (dates 0.0 à 0.4) et donc également L3 par construction de cette solution. Malgré ces limitations, l'ionosphère semble bien responsable de la dispersion des séries temporelles mono-fréquence constatée précédemment (Fig. 2.18).
Finalement on remarque que l'ionosphère non modélisée par le modèle de Klobuchar induit une dispersion des séries temporelles de position lorsque les lignes de base excèdent quelques kilomètres et que la différentiation des observations de phase devient moins efficace. Cependant, dans le cas des très courtes lignes de base considérées au sein des réseaux de Geocubes ($< 5km$), le positionnement différentiel adopté compense les imprécisions de la correction de Klobuchar adoptée pour pallier l'absence de seconde fréquence sur les Geocubes comme le montre le résultat de la ligne de base OPMT-PANA (5km de longueur). On peut alors considérer que la traversée de l'ionosphère représente une source d'imprécision négligeable pour le positionnement relatif des Geocubes.

Biais troposphérique

La troposphère constitue la partie basse de l'atmosphère située à moins de 80km de la surface terrestre. Elle est constituée très majoritairement de particules neutres, non chargées électriquement. Vis à vis des ondes GPS la troposphère peut être vue comme un mélange d'air sec et d'air humide [Kleijer, 2004]. Sa réfractivité peut alors s'écrire sous la forme [Bosser, 2008] :

$$N = N_s + N_h \tag{2.40}$$

Avec N la réfractivité totale de la troposphère, N_s la réfractivité de sa partie sèche et N_h la réfractivité de sa partie humide.
La réfraction des ondes électromagnétiques lors de la traversée de la troposhère se traduit par un retard de propagation. Ce retard dépend de l'élévation ; il atteint environ 2.5m au zénith et 25m à 5^o d'élévation. Cette dépendance en fonction de l'élévation est prise en compte par des fonctions de projections [Kleijer, 2004] [Bosser, 2008] et le délai troposphérique peut alors se décomposer sous la forme :

$$\Delta L_{tropo}(E) = m_s(E) \times \Delta L^z_{tropo,s} + m_h(E) \times \Delta L^z_{tropo,h} \tag{2.41}$$

Avec $\Delta L_{tropo}(E)$ le délai troposphérique à l'élévation E, $\Delta L^z_{tropo,s}$ le délai zénithal sec, m_s la fonction de projection associée, $\Delta L^z_{tropo,h}$ le délai zénithal humide et m_h la fonction de projection associée.
La partie hydrostatique ($m_s(E) \times \Delta L^z_{tropo,s}$) du délai troposphérique représente environ 90% du délai total. Elle est très peu variable et facilement modélisable, par exemple par le modèle de Saastamoinen [Saastamoinen, 1972]. Au contraire, la partie humide ($m_h(E) \times \Delta L^z_{tropo,h}$) est très variable dans le temps et l'espace, et elle est donc difficile à prévoir. Elle doit alors soit être estimée au cours du processus de positionnement, soit être éliminée par différentiation.
Dans le cas d'un réseau de Geocubes, les courtes lignes de base considérées permettent, comme dans le cas de l'ionosphère, de considérer que le biais troposphérique est largement différentié et que l'erreur résiduelle est faible. Cependant la troposphère, contrairement à l'ionosphère, est au contact de la surface terrestre. Une différence de dénivelée au sein du réseau peut donc entraîner une différence du biais troposphérique affectant les rayons formant une double différence (Fig. 2.20).

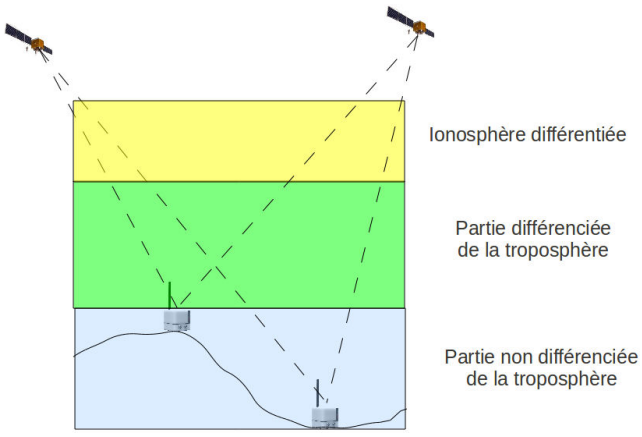

FIGURE 2.20 – Impact de la dénivelée sur la différentiation de la troposhère.

Dans ce cas, le délai troposphérique hydrostatique non différentié peut être modélisé en utilisant le modèle de Saastamoinen (Annexe. D). Cependant, ce modèle n'est pas suffisant pour corriger correctement la partie humide du délai troposphérique. La stratégie classique pour traiter ce délai troposphérique humide consiste alors à l'estimer pour tous les récepteurs du réseau. Cependant, cette variable est très corrélée avec la composante verticale du positionnement, comme le montre la formule suivante [Elosegui et al, 1995] :

$$\delta\phi = \delta H + \frac{1}{sin(E)} \times \delta\Delta L^z_{tropo} + sin(E) \times \delta h \tag{2.42}$$

Avec $\delta\phi$ l'erreur sur la phase, δH l'erreur d'horloge du récepteur (éliminée ici par différentiation), $\delta\Delta L^z_{tropo}$ l'erreur sur le délai troposphérique zénithal, δh l'erreur sur la composante verticale du positionnement et E l'élévation.
Comme les zones présentant de fortes dénivelées sont souvent situées en montagne, elles présentent également de forts masques qui induisent une mauvaise géométrie de la constellation des satellites GPS et perturbent la détermination de la composante altimétrique, car tous les satellites se trouvent dans un petit cône au dessus des récepteurs. Cette mauvaise géométrie rend encore plus difficile la décorrélation des paramètres servant à estimer la composante verticale du positionnement et la partie humide de la troposphère. Cette décorrélation devient impossible dans le cas d'une estimation époque par époque à cause du faible nombre d'observations.
Dans le processus de calcul GPS proposé pour traiter les données issues des Geocubes, la seule issue possible est donc de limiter les dénivelées et de spécifier une dénivelée maximale tolérée au sein des réseaux.
Au cours de ce travail de thèse, deux chantiers présentant une dénivelée interne d'environ 200m ont été traités avec succès sans estimation du délai troposphérique humide. Pour évaluer l'impact de très fortes dénivelées, nous avons alors testé le traitement d'une ligne de base présentant une dénivelée de 650m. Les données ont été acquises par des récepteurs bi-fréquence situés dans la vallée de l'Ubaye au cours de l'été 2012 (réseaux RGP : http ://rgp.ign.fr et OMIV : http ://omiv.osug.fr), en même temps qu'une expérience de test des Geocubes (cf section 3.2). Un traitement réalisé par notre logiciel (utilisation uniquement des données sur L1, formation de doubles différences, calcul époque par époque) s'est traduit par un échec. En effet, la troposphère cause de forts biais dans les doubles différences qui empêchent la fixation correcte des ambiguïtés et font diverger le calcul.

Afin de quantifier l'effet du biais troposphérique humide dans ce cas, les positions des deux stations ont été calculées par un traitement PPP qui permet d'estimer simultanément le biais troposphérique humide. Ces traitements ont été réalisés par P.Bosser (IGN/DRE/ENSG) à l'aide de routines basées sur le logiciel Gypsy-Oasis (http ://gipsy-oasis.jpl.nasa.gov/). Les ambiguïtés ont été fixées [Bertiger et al, 2010] et la Vienna Mapping Function a été choisie comme fonction de projection [Boehm and Schuh, 2003]. La figure ci-dessous (Fig. 2.21) représente les variations des biais troposphériques humides mesurés au cours du mois d'aout 2012 pour les stations SAZ1 et BACT distantes d'environ 4.5km et séparées de 650m de dénivelée.

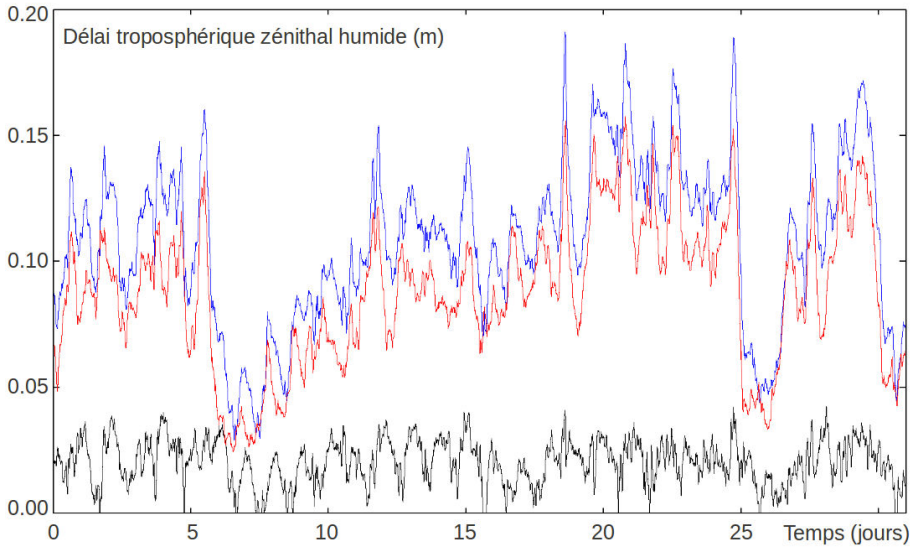

FIGURE 2.21 – Délais troposphériques zénithaux humides pour une dénivelée de 800m (Vallée de l'Ubaye, Aout 2012).
Bleu : station BACT (1205m), rouge : station SAZ1 (1856m), noir : différence. Traitement : P.Bosser (IGN/DRE/ENSG).

On remarque alors que pour une dénivelée de 650m la différence de délais zénithaux humides peut atteindre 4.0cm. Des variations quotidiennes sont à noter avec des maxima atteints en cours

de nuit et des minima atteints dans la journée. Ces variations s'expliquent par la descente de l'air humide dans la vallée pendant la nuit, tandis que l'humidité se répartit sur toute la colonne d'air pendant la journée.
La formule suivante donne une approximation du rapport entre le biais maximal lié à la non estimation de la troposphère humide et la différence de délais zénithaux humides en utilisant une fonction de projection simpliste :

$$\nabla\triangle\tau^{s1,s2}_{r1,r2,tropo,max} = \nabla\Delta L^{z}_{tropo,max} \times (\frac{1}{sin(E_{cut-off})} + \frac{1}{sin(E_{piv-min})}) \tag{2.43}$$

Avec $\nabla\triangle\tau^{s1,s2}_{r1,r2,tropo,max}$ le biais maximal lié à la non estimation de la troposphère humide, $\nabla\Delta L^{z}_{tropo,max}$ la différence de délais zénithaux humides, $E_{cut-off}$ l'angle de coupure et $E_{piv-min}$ l'angle de coupure pour le satellite pivot. En considérant un angle de coupure de 15^o et une élévation minimale du satellite pivot de 40^o le biais maximal lié à la non estimation de la troposphère humide atteint 21.7cm pour la dénivelée de 650m considérée ici. L'amplitude de ce biais explique les sauts dans les ambiguïtés constatés lors du traitement de la ligne de base avec le logiciel dédié aux Geocubes.
Pour éviter les sauts d'ambiguïtés et donc assurer le bon déroulement du calcul, il faut que le biais lié à la non estimation de la troposphère humide soit inférieur à $\frac{\lambda_{L1}}{2}$m. En supposant que la différence de délai zénithal humide soit proportionnelle dans les plus basses couches de l'atmosphère (premier kilomètre) à la dénivelée séparant les récepteurs, il faut limiter cette dénivelée à environ 300m dans le cas traité ici pour assurer le traitement correct des données GPS sans estimation du délai troposphérique humide.
Finalement, si dans la plupart des cas la différentiation sur des courtes lignes de base suffit à éliminer presque entièrement les biais troposphériques, une forte dénivelée entre récepteurs peut compromettre le calcul. Le traitement de lignes de base présentant des dénivelées diverses démontre qu'une dénivelée inférieure à 200m garantit un fonctionnement optimal de notre traitement tandis qu'une dénivelée de 650m le met en échec. L'estimation de biais troposphériques humides en zone de montagne pour un cas particulier de réseau déployé au cours de cette thèse montre alors qu'une dénivelée de 300m ne doit pas être dépassée pour garantir le bon déroulement du calcul GPS.

2.4.3 Biais locaux non différentiés : les multitrajets

Les très courtes lignes de base impliquées lors du positionnement des récepteurs au sein d'un réseau de Geocubes couplées à la différentiation des observations permettent l'élimination ou la grande atténuation de la plupart des sources d'imprécision inhérentes au positionnement par GPS. Le traitement des observations d'une ligne de base de quelques mètres mesurée par deux récepteurs géodésiques aboutit alors à un résultat peu bruité (Fig. 2.23). Au contraire, on constate que les séries temporelles brutes de positions obtenues à partir d'observations acquises par des Geocubes sont relativement dispersées (Fig. 2.16 et Fig. 2.24). Cette différence s'explique par la plus forte sensibilité des Geocubes aux perturbations induites par leur environnement proche : les multitrajets (Fig. 2.22).

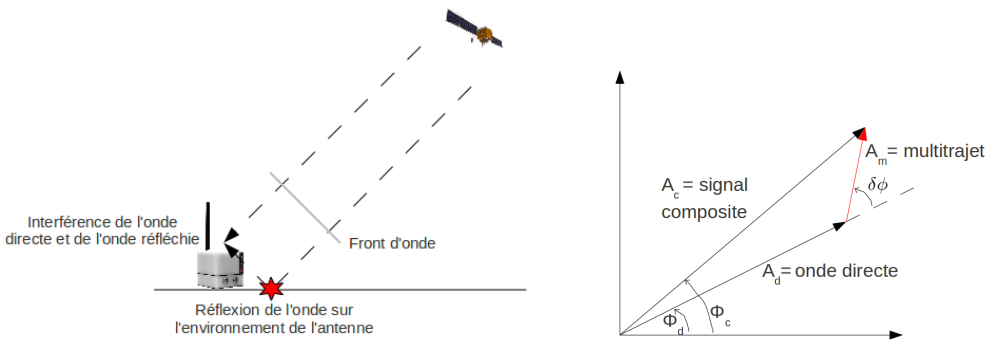

FIGURE 2.22 – Formation d'un multitrajet (gauche) et déphasage induit (droite).

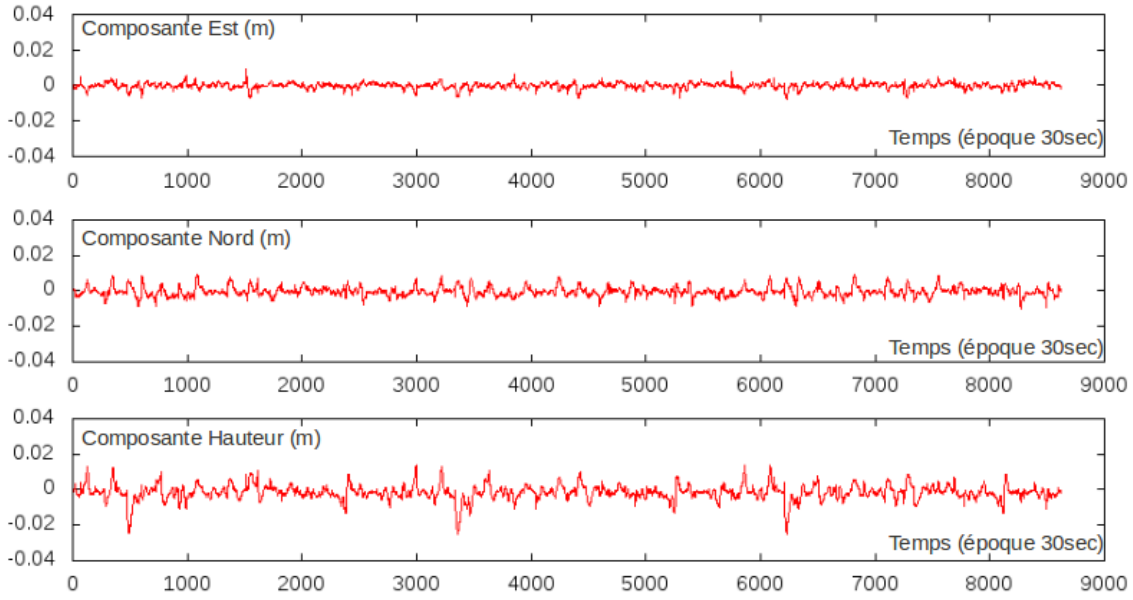

FIGURE 2.23 – Série temporelle d'une ligne de base fixe mesurée par des récepteurs géodésiques.

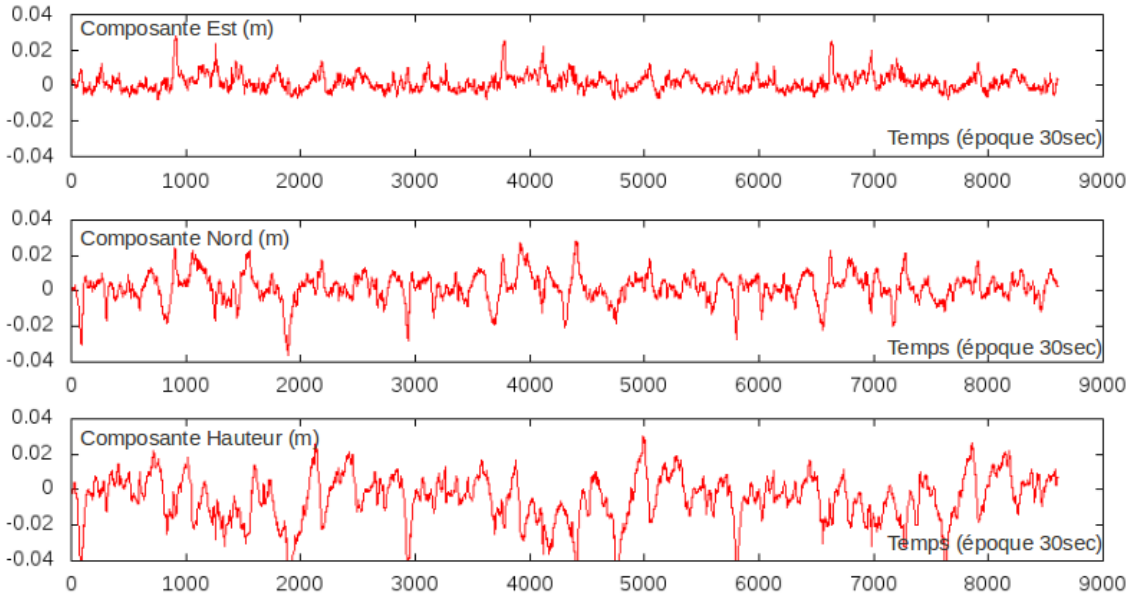

FIGURE 2.24 – Série temporelle d'une ligne de base fixe mesurée par des Geocubes.

Ce phénomène est dû à la réflexion/diffusion des ondes GPS sur l'environnement de chaque récepteur. Les ondes réfléchies interfèrent avec les ondes directes au niveau de l'antenne et forment avec elles un signal composite qui sera enregistré par le récepteur. La phase acquise sera alors égale à la phase "vraie" issue de l'onde directe à laquelle s'ajoute un biais induit par l'onde indirecte. Dans le cas simplifié d'une réflexion spéculaire sur une surface plane, le déphasage provoqué par le multitrajet est donné par [Larson et al, 2007] :

$$\delta\phi = \frac{4\pi h}{\lambda_{L1}} \times sin(\theta) + \phi_0 \tag{2.44}$$

avec $\delta\phi$ le déphasage, h la hauteur de l'antenne au dessus du réflecteur, θ l'angle d'élévation du satellite et ϕ_0 un éventuel biais.

L'amplitude du multitrajet (A_m) est pour sa part directement liée à la réflectivité de la surface pour les ondes électromagnétiques considérées (fréquence L1 dans le cas du Geocube) qui est principalement influencée par la constante diélectrique du sol [Larson et al, 2008].
L'amplitude du signal composite {onde directe + multitrajet} est finalement donnée par [Larson et al, 2008] :

$$A_c^2 = A_d^2 + A_m^2 + 2A_dA_m \times cos(\delta\phi) \tag{2.45}$$

avec A_c l'amplitude du signal composite, A_d l'amplitude de l'onde directe et A_m l'amplitude du multitrajet.
Deux paramètres dictent alors la forme du bruit de multitrajets qui entache les séries temporelles de position :

- La géométrie du système {satellite - réflecteur - antenne} définit la répétition temporelle des "motifs" des multitrajets. Dans le cas du système GPS, comme la constellation des satellites se répète à chaque jour sidéral [Agnew and Larson, 2007], les multitrajets se répètent à l'identique à cette période si la nature et la position des réflecteurs reste constante [Larson et al, 2007] comme on peut l'observer sur les figures 2.23 et 2.24 .
- La nature et l'état du milieu réflecteur définissent l'amplitude des multitrajets en faisant varier la constante diélectrique des réflecteurs. C'est la variation de ce paramètre qui implique les fluctuations inter-journalières des multitrajets.

Le cas particulier d'une session de mesures au cours de laquelle des récepteurs sont soumis à des changements de leur environnement proche permet d'étudier les évolutions temporelles des multitrajets. Les données exploitées ici ont été acquises dans le cadre de la campagne Demevap [Bock et al, 2013]. Deux lignes de base fixes de 4m sont mesurées par des récepteurs géodésiques (Topcon GB1000, antenne Trimble Zephyr geodetic, Fig. 2.25) et traitées à l'aide de notre logiciel. La faible longueur des lignes de base assure que tous les biais spatialement corrélés sont éliminés par différentiation ; les multitrajets sont alors la seule source d'imprécision entachant les positions, bien que les antennes géodésiques utilisées (Fig. 2.25) les rejettent en grande partie.

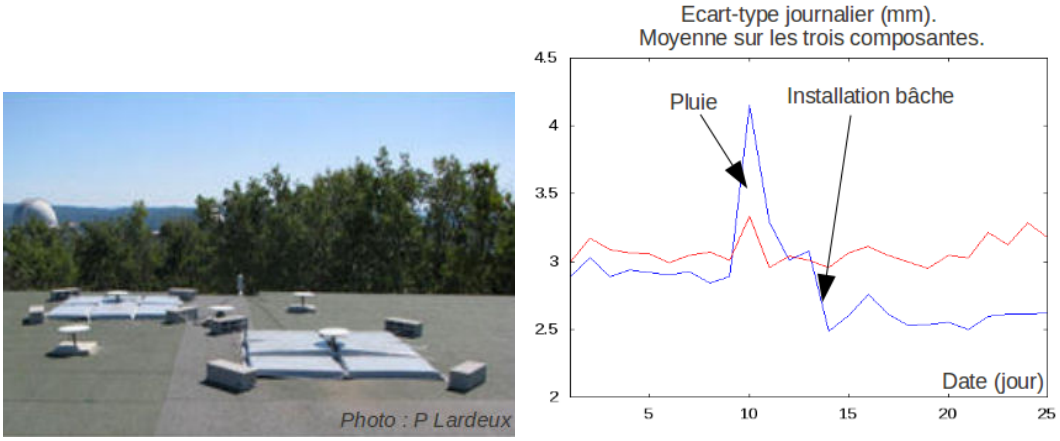

FIGURE 2.25 – Etude de l'effet de l'environnement sur l'amplitude des multitrajets.
Gauche : photo du montage (*photo : P.Lardeux*).
Droite : Variation de la dispersion des séries temporelles sous l'effet des multitrajets.
Rouge : ligne de base sans bâches absorbant les multitrajets, bleu : ligne de base avec bâches à partir du jour 14.

L'évolution de la dispersion journalière des séries temporelles de positions permet d'étudier la variation inter-dates de l'amplitude des multitrajets qui dégradent la solution. Les résultats obtenus mettent alors en évidence :

- L'augmentation de l'amplitude des multitrajets le jour 10 à la suite d'un épisode pluvieux. Ceci s'explique par l'augmentation de la constante diélectrique quand le sol est humide.
- La baisse de l'amplitude des multitrajets pour une des deux lignes de base à la suite de l'installation (jour 14) de bâches absorbant les ondes électromagnétiques dans la fréquence des

ondes GPS à proximité des récepteurs (Fig. 2.25). Une partie des ondes qui se réfléchissaient auparavant sur l'environnement et généraient des multitrajets sont alors absorbées par la bâche, ce qui réduit l'amplitude totale des multitrajets enregistrés.

Cette influence de l'environnement sur les multitrajets a fait l'objet de nombreux travaux permettant de mieux comprendre l'interaction des ondes GNSS avec l'environnement des antennes. Certains auteurs ont alors utilisé les GNSS pour étudier localement certains paramètres environnementaux comme l'humidité du sol [Larson et al, 2008], l'enneigement [Larson et al, 2009] ou la croissance de la végétation [Small et al, 2010]. Ici nous nous plaçons toutefois dans une perspective d'utilisation du GPS à des fins de positionnement et les multitrajets sont considérés comme une source d'imprécision plutôt que comme un signal recherché.

La plus grande sensibilité des Geocubes aux multitrajets par rapport aux récepteurs géodésiques (cf Fig. 2.23 et Fig. 2.24) s'explique en grande partie par l'antenne utilisée pour l'acquisition des données GPS. En effet, la grande majorité des multitrajets viennent de la demi-sphère inférieure au plan horizontal de l'antenne car ils sont générés par des réflecteurs au sol, alors que les ondes directes vient de la demi-sphère supérieure. Afin de rejeter les multitrajets, les antennes géodésiques (Choke-ring, Zephyr...) présentent un lobe de gain qui atténue drastiquement les signaux venant du bas (Fig. 2.26). Au contraire, le lobe de gain de l'antenne des Geocubes est quasi sphérique, ce qui conduit à ne pas dépondérer les multitrajets par rapport aux ondes directes lors de l'acquisition des données brutes (Fig. 2.26).

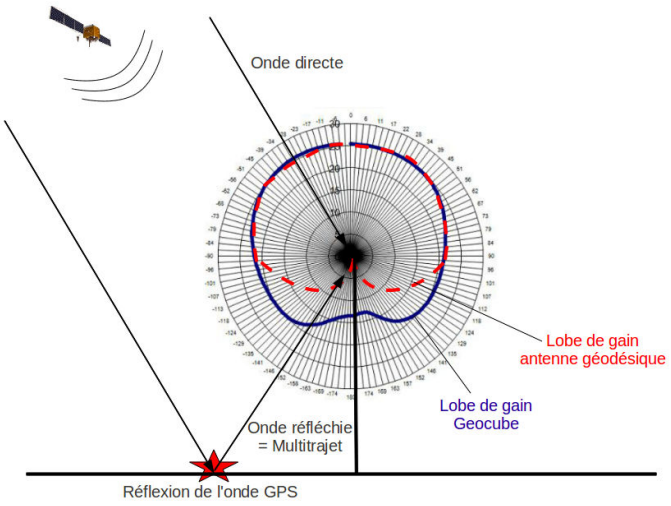

FIGURE 2.26 – Comparaison des lobes de gain d'un récepteur géodésique et du Geocube.
Le lobe de gain du Geocube est issu de la fiche de spécification de l'antenne Sarantel SL1206.

A ces multitrajets générés par l'environnement du récepteur (sol, végétation, bâtiment...) s'ajoutent des variations dans l'espace du centre de phase de l'antenne qui correspond au point où les mesures de phase sont acquises (PCV = Phase Center Variation, variation du centre de phase). Ces variations sont dues à la structure de l'antenne et aux composants du récepteurs qui l'entourent. Le PCV ne dépend que de l'antenne utilisée et de la géométrie du système {satellite - antenne}. Son effet sur les positions est donc extrêmement semblable à celui des multitrajets. En l'absence de calibration des antennes des Geocubes, l'effet du PCV est considéré ici comme un multitrajet généré par l'antenne elle même et s'ajoute au multitrajets "vrais" générés par l'environnement.
Les multitrajets au sens large constituent finalement la principale source d'erreur résiduelle lors du positionnement des Geocubes au sein du réseau. Ce phénomène explique la dispersion des séries temporelles de position constatée section 2.3.5 ainsi que l'aspect répétitif du bruit observé (période d'un jour sidéral). Les Geocubes sont bien plus sensibles aux multitrajets que les récepteurs géodésiques, en particulier à cause de l'antenne bas de gamme utilisée pour l'acquisition des phases GPS brutes. Cependant, le choix de ce type d'antenne conduit à l'obtention de récepteurs

bon marché et peu encombrants qui sont deux caractéristiques indispensables pour les applications visées. Le bruit induit par les multitrajets dans les positions brutes est donc inhérent aux récepteurs utilisés et l'atténuation de cette source d'imprécision nécessite des traitements logiciels pour compenser les limitations du matériel.

2.5 Atténuation de l'effet des multi-trajets

Différentes méthodes d'atténuation des multitrajets ont été développées pour limiter l'impact de cette source d'imprécision sur le positionnement des Geocubes. Pour illustrer leur efficacité, un exemple sera suivi tout au long de cette section. Il s'agit d'un extrait de la campagne de suivi du glissement de terrain de Super-Sauze par un réseau de Geocubes (cf section 3.2). Ici nous nous focalisons sur le suivi d'une unique ligne de base entre le 16 et le 18 août 2012 (longueur : 273m, dénivelée : 50m, pas d'acquisition : 30sec). Les séries temporelles de positions brutes sont présentées Fig. 2.27.

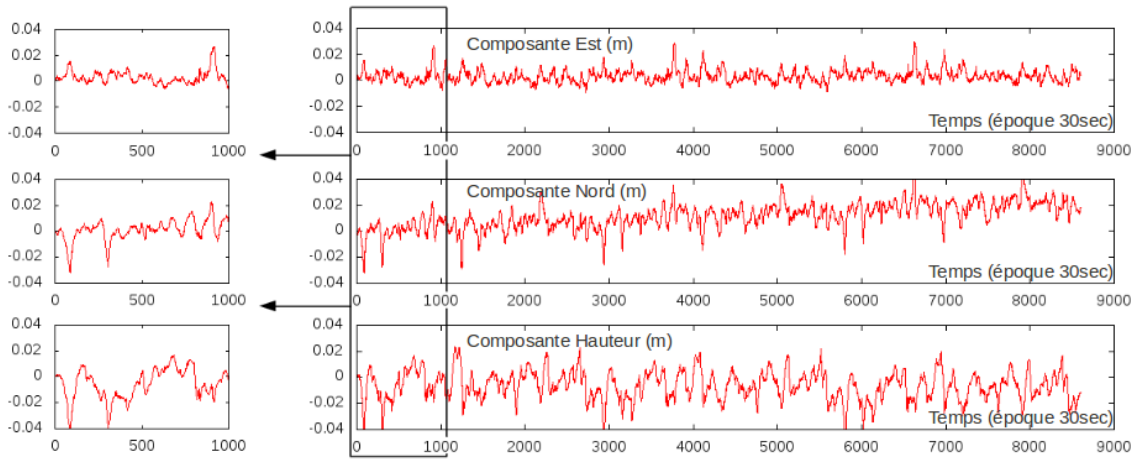

FIGURE 2.27 – Positions brutes du jeu de données utilisé pour l'étude des multitrajets.

Au cours des trois jours d'intérêt, un mouvement de +2cm sur la composante Nord et -1cm sur la composante verticale sont visibles. La série temporelle présente une dispersion caractéristique des mesures effectuées par des Geocubes, principalement due aux effets des multitrajets.

2.5.1 Paramétrage du filtre de Kalman : filtrage strict

Dans les applications de surveillance ou de géodésie, les récepteurs GPS sont fixés entre 0m et 3m au dessus du sol. Cette distance induit une fréquence caractéristique des multitrajets de 10 à 600 secondes [Choi et al, 2004]. Dans ce cas, si seuls des déplacements lents (moins de 20cm par jour) et réguliers interviennent, les mouvements du terrain et les multitrajets présentent des fréquences caractéristiques très éloignées.
Le filtre de Kalman utilisé pour l'estimation des positions (cf section 2.2.4) peut alors être paramétré de façon à séparer les multitrajets et les mouvements lents. Pour cela l'écart type du bruit de processus sur les positions estimées est fortement réduit, d'un facteur 100 par rapport à la valeur utilisée pour le calcul des positions brutes. Les multitrajets présentant une fréquence caractéristique élevée sont alors rejetés dans les résidus tandis que le mouvement lent est estimé par les paramètres de position (Fig. 2.28).

L'abaissement du bruit de processus du filtre de Kalman dans le cas de mouvements lents permet donc le rejet des multitrajets dans les résidus et le calcul de séries temporelles de positions très peu bruitées. Cependant, si le mouvement devient rapide ou brusque, le bruit de processus doit être augmenté pour permettre à la solution d'accommoder rapidement le mouvement. Dans ce cas, une méthode alternative d'atténuation des multitrajets doit être utilisée.

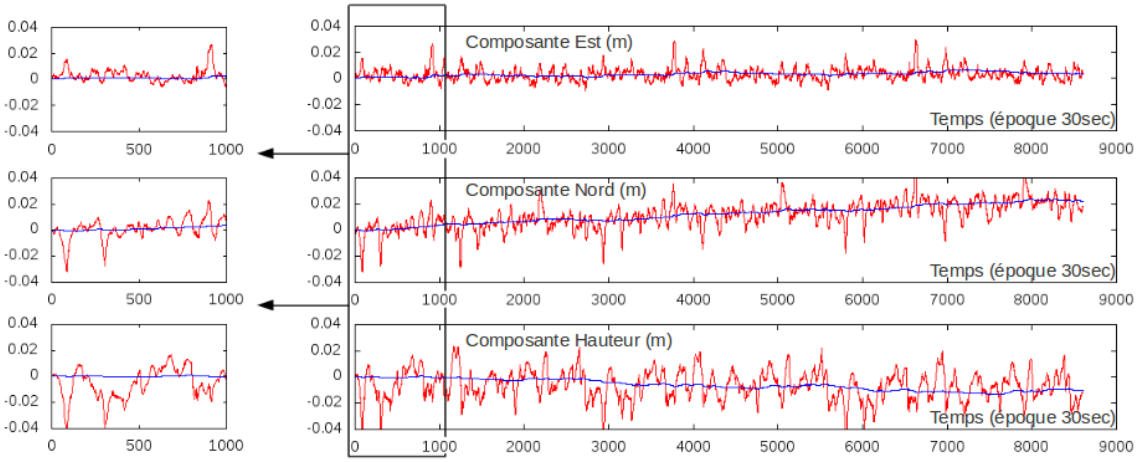

FIGURE 2.28 – Impact d'un filtrage strict sur l'atténuation des multitrajets.
Rouge : données brutes, bleu : données re-traitées.

2.5.2 Cartographie des multitrajets

Certains multitrajets n'impactent que les ondes émises depuis une petite portion du ciel. Il est alors possible d'atténuer leur effet en dépondérant les observations venant de la région du ciel que l'on sait impactée.
Cela nécessite de cartographier au préalable les multitrajets en localisant les forts résidus issus d'un calcul de positionnement réalisé avec un filtre de Kalman possédant un faible bruit de processus (Fig. 2.29). Ce calcul permettant de rejeter la majorité des multitrajets dans les résidus, l'amplitude de ces derniers permet de quantifier les multitrajets qui en sont les principaux contributeurs. Pour réaliser une carte des multitrajets, il suffit alors de découper le ciel en cellules (par exemple $1^o \times 1^o$) et d'affecter à chaque cellule la moyenne quadratique des résidus obtenus pour les satellites présents dans cette portion du ciel. Cette tâche doit toutefois être réalisée sous le contrôle d'un opérateur afin d'assurer qu'un mouvement brusque des récepteurs ne soit pas rejeté par mégarde dans les résidus, ce qui conduirait à dépondérer des mesures venant de zones non impactées par les multitrajets.

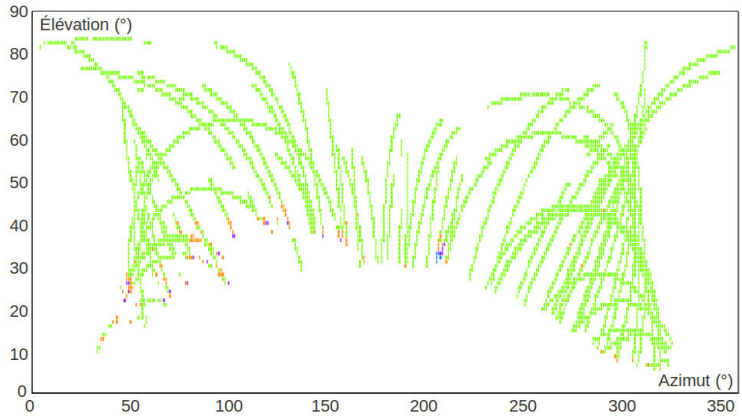

FIGURE 2.29 – Carte de résidus.
Vert : résidu faible, orange : résidu modéré, violet : résidus élevé.

L'analyse de la carte de multitrajets calculée pour notre cas d'étude montre que les multitrajets ponctuels et de forte amplitude interviennent surtout lorsque les satellites émergent de derrière un masque. Ces multitrajets de forte amplitude sont générés par la réfraction de l'onde GPS qui rend un satellite visible alors que l'onde directe est encore occultée. La différence de parcours entre l'onde réfractée observée et le trajet direct déduit des éphémérides des satellites se comporte alors comme un multitrajet.

Cette méthode consistant à dépondérer les mesures venant d'une zone fortement impactée par les multitrajets permet de retirer l'effet des multitrajets qui sont très localisés (Fig. 2.30). Par contre le retrait de multitrajets impactant de nombreuses données de phase n'est pas possible, car leur dépondération reviendrait à dépondérer une grande partie des observations disponibles.

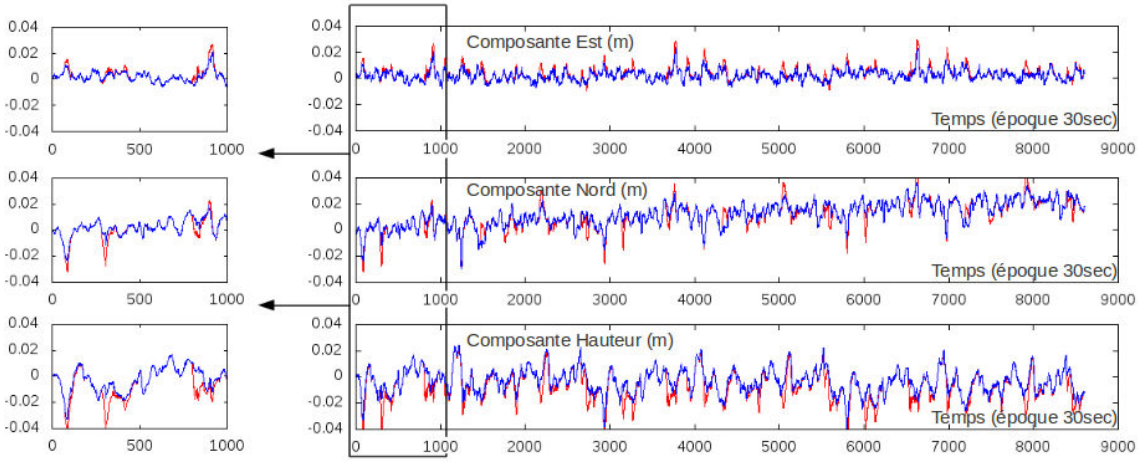

FIGURE 2.30 – Impact de la dépondération des données impactées par les multitrajets sur l'atténuation de cette source d'imprécision.
Rouge : données brutes, bleu : données re-traitées.

2.5.3 Calcul en réseau

Un calcul en réseau permet d'atténuer, dans les séries temporelles de position des mobiles, l'effet des multitrajets affectant les références. En effet, lors d'un positionnement différentiel par ligne de base isolée, les multitrajets impactant la référence et le mobile vont conjointement entacher la position du mobile. Au contraire lors d'un calcul en réseau les multitrajets sur les différentes références étant décorrélés leur effet est atténué par un simple effet de moyenne. De plus, lorsque les coordonnées des références sont estimées comme c'est le cas dans notre méthode de positionnement, la redondance introduite par l'usage de références multiples permet de séparer partiellement les multitrajets des références de ceux des mobiles. Ces multitrajets des références entacheront alors les positions des références et ne perturberont plus les positions des mobiles (Fig. 2.31).

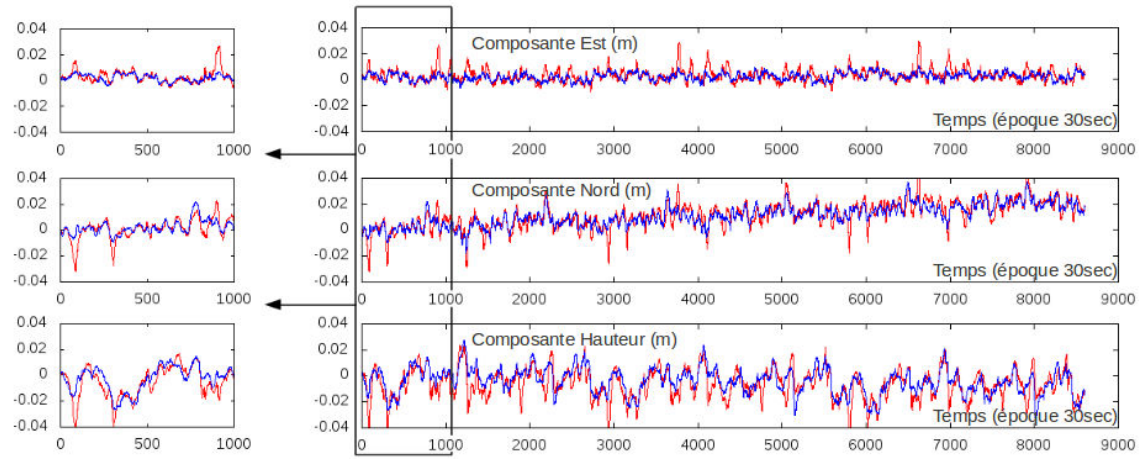

FIGURE 2.31 – Impact d'un calcul en réseau sur l'atténuation des multitrajets.
Rouge : données brutes ; bleu : données re-traitées.

2.5.4 Correction sidérale

Les multitrajets ne dépendent que de la nature des réflecteurs et de la géométrie du système {satellite - réflecteur - antenne}. Comme la constellation GPS se répète à chaque jour sidéral [Agnew and Larson, 2007], les multitrajets se répètent également chaque jour si leur environnement reste inchangé. Dans le cas des zones en déformation lente considérées pour la surveillance topographique, la géométrie de l'environnement par rapport au récepteur reste quasiment constante et seule la variation de la constante diélectrique peut perturber la répétition des multitrajets. En dehors des périodes de changement brutal de météo cette constante diélectrique est assez stable et au premier ordre les multitrajets se répètent à chaque jour sidéral comme on le remarque pour la solution brute (Fig 2.27).
Une méthode très efficace pour corriger l'effet des multitrajets consiste alors à retirer un modèle de multitrajets calculé lors d'une journée de référence aux observations des jours suivants :

$$\nabla\Delta\phi^{s1,s2}_{r1,r2}(t) = \nabla\Delta\phi^{s1,s2}_{r1,r2_{obs}}(t) - Mul^{s1,s2}_{r1,r2}(t_{réf}) \tag{2.46}$$

Avec $\nabla\Delta\phi^{s1,s2}_{r1,r2}(t)$ la double différence corrigée à la date t, $\nabla\Delta\phi^{s1,s2}_{r1,r2_{obs}}(t)$ la double différence observée et $Mul^{s1,s2}_{r1,r2}(t_{réf})$ le modèle de multitrajet calculé à la date $t_{réf} = t - n \times 86160$ avec n un entier.
Cette méthode dite de time stacking a déjà été appliquée avec succès par de nombreux auteurs [Ge et al, 2000] [Radovanovic, 2000] [Dodson et al, 2001] [Choi et al, 2004]. Cependant, habituellement le modèle de multitrajets est calculé lors d'une journée de référence où les récepteurs sont fixes. Ici nous proposons de calculer ce modèle à partir des résidus obtenus lors de l'estimation des positions avec un bruit de processus faible :

$$Mul^{s1,s2}_{r1,r2}(t_{réf}) = Res^{s1,s2}_{r1,r2}(t_{réf}) \tag{2.47}$$

Avec $Res^{s1,s2}_{r1,r2}(t_{réf})$ le résidu correspondant à la double différence $\nabla\Delta\phi^{s1,s2}_{r1,r2_{obs}}(t_{réf})$. Cette méthode permet alors d'utiliser le time stacking même si les récepteurs présentent un mouvement lent au cours de la journée de référence (Fig. 2.32).

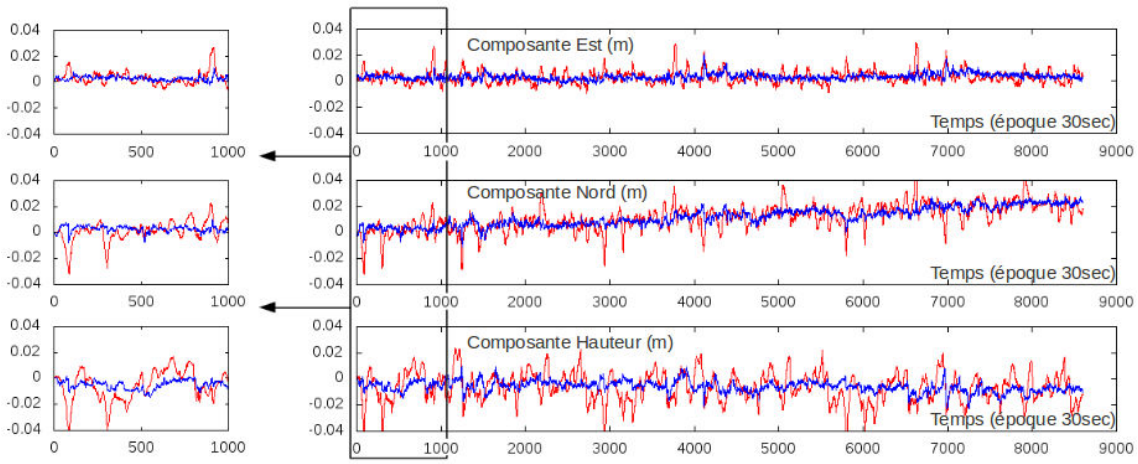

FIGURE 2.32 – Impact d'une correction sidérale sur l'atténuation des multitrajets.
Rouge : données brutes, bleu : données re-traitées.

Tout comme le calcul de la carte de multitrajets, le calcul du modèle de multitrajets à partir de la journée de référence doit être supervisé par un opérateur pour éviter qu'un mouvement brusque ne soit rejeté dans les résidus et entache les résultats des jours suivants. Il faut également noter que cette méthode peut être mise en défaut lorsqu'un changement de temps intervient. En effet, cela produit une variation de la constante diélectrique des réflecteurs/diffuseurs et change la forme des multitrajets qui ne sont plus corrigés par time stacking. Enfin le time stacking présente l'inconvénient d'éliminer tout signal ayant une période caractéristique proche d'un jour sidéral, même s'il ne s'agit pas de multitrajets.

2.5.5 Stratégie retenue pour l'atténuation des multitrajets

Les différentes méthodes d'atténuation des multitrajets présentées ci-dessus sont complémentaires et permettent de minimiser cette source de bruit dans diverses configurations. Cependant, la correction sidérale et la dépondération d'observations à partir d'une cartographie des multitrajets sont redondantes ; elles sont toutes les deux fondées sur la répétition des multitrajets à chaque jour sidéral et l'utilisation d'un jour de référence pour corriger les données ultérieures. La correction sidérale est toutefois plus générale et plus efficace, et elle est conservée au détriment de la cartographie des multitrajets. Finalement, trois outils sont retenus pour le traitement des multitrajets :
- Traitement en réseau : Cette méthode est intégrée dans le calcul initial des positions brutes.
- Filtrage strict : Cette méthode permet une très grande atténuation des multitrajets, mais uniquement dans le cas de mouvements lents des récepteurs.
- Correction sidérale : Cette méthode permet de retirer une bonne part des multitrajets même si les récepteurs sont soumis à des mouvements abrupts ou rapides. Cependant, une phase d'initialisation supervisée est nécessaire.

Deux traitements (filtrage strict et correction sidérale) peuvent alors être ajoutés au calcul des positions brutes pour éliminer une partie de l'effet des multitrajets. Ces traitements peuvent être effectués soit au niveau des mesures de phase avant leur traitement par le filtre de Kalman assurant le positionnement des Geocubes, soit en post-traitement sur les séries temporelles de positions brutes. C'est cette seconde solution qui est retenue pour sa plus grande simplicité calculatoire.
Le traitement automatique s'arrête donc après l'obtention des positions brutes, et la phase d'atténuation des multitrajets nécessite un traitement semi-automatique supervisé par un opérateur qui l'adapte à l'application visée. Pour cela une boite à outils a été développée. Elle permet la réalisation des deux post-traitements proposés (filtrage strict et correction sidérale) avec différents paramétrages.
Après ces traitements additionnels trois solutions sont disponibles pour les séries temporelles de solutions (Fig 2.33) :
- Solution brute : Elle est obtenue en temps-réel. Elle est relativement bruitée, mais accommode rapidement tout type de mouvement.
- Solution fortement filtrée : Elle est obtenue en post-traitement. Elle est très peu bruitée mais accommode lentement les mouvements brusques.
- Solution "Time stacking" : Elle est obtenue en post-traitement. Elle est peu bruitée et accommode rapidement tout type de mouvement. Pour que la correction sidérale sur la solution brute fonctionne de façon optimale, il faut bien sûr que les même satellites participent au calcul avec la même pondération pour les différentes dates. Cette condition est remplie dans la quasi-totalité des cas grâce à l'hypothèse de suivi d'une zone quasi-statique.

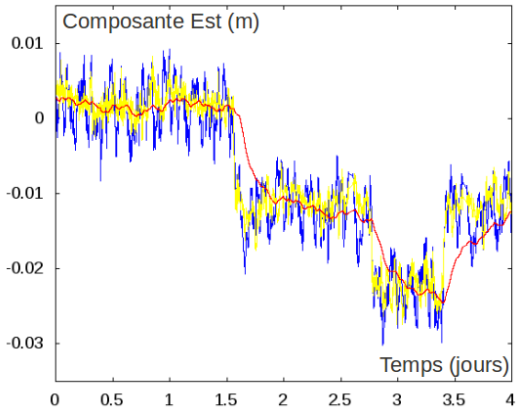

FIGURE 2.33 – Les différentes solutions obtenues.
Bleu : solution brute, jaune : solution correction sidérale, rouge : solution fortement filtrée. Composante Est d'une ligne de base subissant des mouvements synthétiques (cf Fig. 2.15).

2.5.6 Prise en compte des multitrajets dans le cas de données décimées

La prise en compte des multitrajets demande une attention particulière dans le cas du traitement de données décimées. En effet, si le calcul des positions porte sur des données acquises par fenêtres d'acquisition se répétant à heure fixe dans l'échelle de temps UTC, la présence de multitrajets génère un signal basse fréquence en plus du bruit relativement haute fréquence observé lors d'acquisitions continues (Fig. 2.34). Pour mieux comprendre ce phénomène, prenons l'exemple d'un ensemble de fenêtres d'acquisition de 5min qui se succèdent toutes les 30min. Les acquisitions ont donc lieu sur les période 0h00-0h05 UTC ; 0h30-0h35 UTC ; 1h00-1h05 UTC... 23h30-23h35 UTC. Comme les multitrajets se décalent de 4min par jour, les motifs induits entachant la solution un jour donné vont sortir de leur fenêtre d'acquisition dès le lendemain ou le sur-lendemain. Puis, par décalage quotidien de 4min entre le temps sidéral et le temps UTC, ils réapparaîtront dans la fenêtre précédente 6 à 7 jours plus tard. Ce défilement des motifs des multitrajets dans le peigne d'acquisition (union des fenêtres d'acquisition sur un jour) entraîne alors le signal basse fréquence constaté figure 2.34.

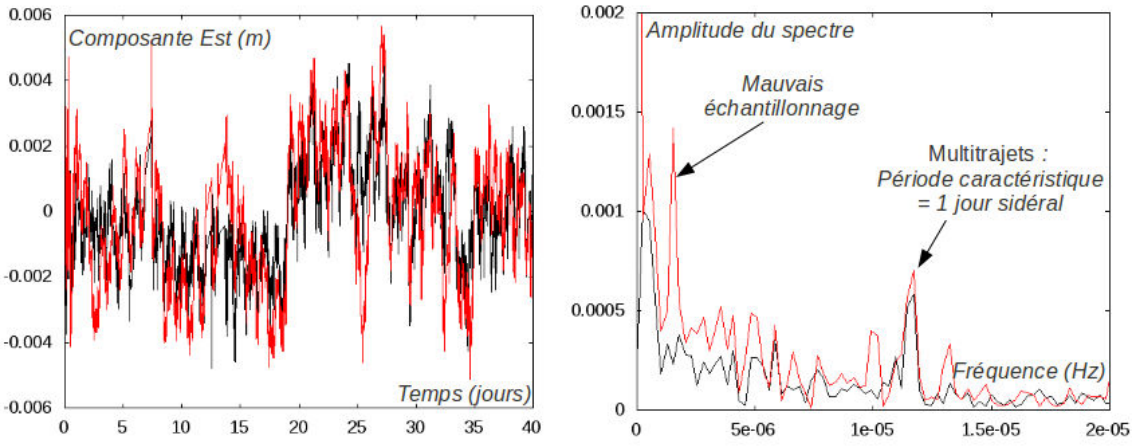

FIGURE 2.34 – Positionnement à partir de données décimées acquises à heure UTC fixe.
Gauche : Domaine temporel, droite : domaine spectral.
Noir : solution continue, rouge : solution décimée.
Etude de la composante Est d'une ligne de base quasi-fixe pendant 40jours.

La meilleure solution pour éliminer ce problème (Fig. 2.35) consiste à décaler les fenêtres d'acquisition de 4min par jour afin de réaliser les acquisitions à heure sidérale constante.

Les multitrajets impactant la solution sont alors semblables à chaque date, ce qui évite les oscillations lentes. On remarque cependant que la solution issue des données décimées est moins bruitée, mais légèrement biaisée par rapport à la solution continue (Fig. 2.35). Ceci vient du fait que l'on échantillonne les multitrajets qui interviennent dans la solution, ce qui transforme une partie du bruit de multitrajets en biais. Cette solution décimée est donc aussi sensible aux multitrajets et à leurs variations que la solution continue, bien qu'une variation des multitrajets se traduira ici plutôt par une variation du biais que par une augmentation du bruit.
Enfin, il faut noter que cette stratégie de décalage des fenêtres d'acquisition permet d'appliquer si nécessaire une correction sidérale sur les positions brutes.

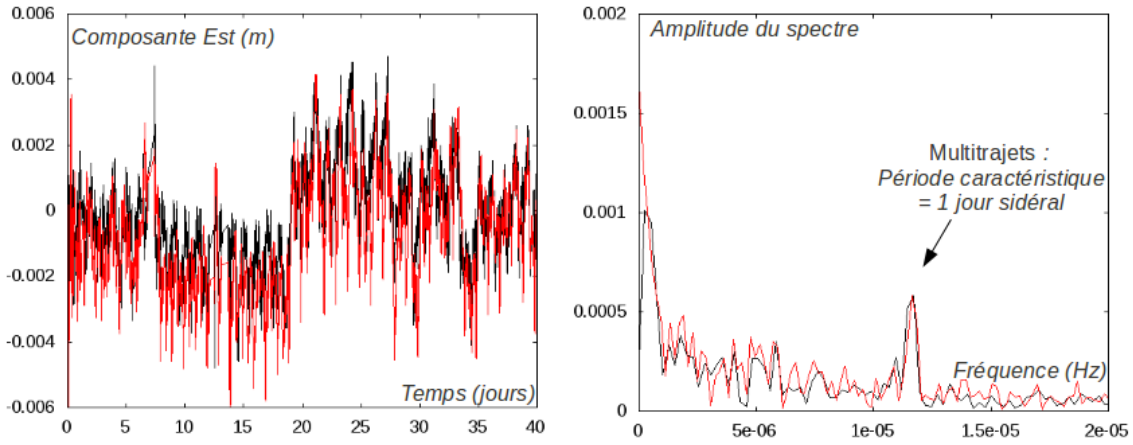

FIGURE 2.35 – Positionnement à partir de données décimées acquises à heure sidérale fixe.
Gauche : Domaine temporel, droite : domaine spectral.
Noir : solution continue, rouge : solution décimée.
Etude de la composante Est d'une ligne de base quasi-fixe pendant 40jours.

2.6 Performances et limitations de la méthode de positionnement proposée

2.6.1 Conditions optimales d'utilisation

L'étude des différentes sources d'imprécision impactant le traitement GPS mène aux conditions d'utilisation suivantes pour un fonctionnement optimal de la composante de positionnement d'un réseau de Geocubes :
- Extension maximale du réseau de quelques kilomètres (< 5km) pour permettre le bon fonctionnement du lien radio et l'élimination de la plupart des biais spatialement corrélés, en particulier le biais ionosphérique.
- Dénivelée maximale de 300m au sein du réseau pour minimiser les imprécisions liées à la troposphère.
- Utilisation de plusieurs références positionnées sur des zones stables afin d'effectuer un traitement en réseau de qualité. Ce traitement permet de détecter un éventuel mouvement parasite d'une référence et aboutit ainsi à une mise en référence correcte des positions relatives calculées.

2.6.2 Vérification de l'exactitude des déplacements mesurés par comparaison à d'autres logiciels de traitement GPS

Afin de nous assurer de l'exactitude des déplacements dérivés de la solution brute de positionnement relatif calculée à partir de notre logiciel, cette solution est comparée à des traitements réalisés par des logiciels indépendants. Pour la réalisation de ces tests, des données acquises en conditions de surveillance sont traitées par les différents logiciels. Ces données ont été acquises au mois d'août 2012 par un récepteur géodésique bi-fréquence (GPS seul) placé sur la partie active du glissement de terrain de Super-Sauze (cf section 3.2) qui se déplace d'environ 5mm/jour sur la période considérée. Ces données nous ont été fournies par l'OMIV (http ://http ://omiv.osug.fr/). Cinq stratégies de calcul ont été utilisées pour calculer les déplacements de ce récepteur (Table 2.3).

Solution	Mode	Logiciel	station de référence	Fréquences	Ambiguïtés	Ionosphère	Troposphère	Opérateur
S1	PPP cinématique	GYPSY [Bertiger et al, 2010]	aucune	L1+L2	fixées	iono-free	estimée	Pierre Bosser (IGN/ENSG)
S2	différentiel cinématique	RTKlib [Takasu and Yasuda, 2009]	BACT (RGP) distance : 4.5km dénivelée : 650m	L1+L2	fixées	iono-free	estimée	Lionel Benoit (IGN/LOEMI)
S3	différentiel cinématique	logiciel Geocubes	Geocube 1021 distance : 300m dénivelée : 70m	L1	fixées	différentiée	différentiée	Lionel Benoit (IGN/LOEMI)
S4	moyenne de S3 sur 24h	logiciel Geocubes	Geocube 1021 distance : 300m dénivelée : 70m	L1	fixées	différentiée	différentiée	Lionel Benoit (IGN/LOEMI)
S5	PPP statique	GYPSY [Bertiger et al, 2010]	aucune	L1+L2	fixées	iono-free	estimée	Pierre Briole (ENS)

TABLE 2.3 – Caractéristiques des différents traitements réalisés.

Les résultats (Fig. 2.36) montrent que notre logiciel estime parfaitement le mouvement du mobile et que la solution obtenue (S3) ne présente pas d'artéfact. Son niveau de bruit est raisonnable, beaucoup plus faible que celui de la solution PPP cinématique (S1) et à peine plus élevé que celui de la solution cinématique différentielle bi-fréquence (S2) qui a pourtant nécessité un très fort lissage pour fournir un résultat correct. De plus, notre solution (S3) présente moins d'artéfacts que les autres solutions cinématiques (S1 et S2). Enfin, on remarque que la solution S4 obtenue à partir des moyennes journalières de S3 est moins bruitée que la solution PPP statique, ce qui montre qu'une fois débarrassée des multitrajets, la solution obtenue à l'aide du logiciel dédié aux Geocubes offre une très bonne précision.
Ces résultats confirment la pertinence de la stratégie de calcul retenue dans notre logiciel si la condition des très courtes lignes de base est remplie. Les séries temporelles de position obtenues sont alors parfaitement cohérentes avec des calculs totalement indépendants, ce qui suggère l'exactitude des déplacements mesurés.

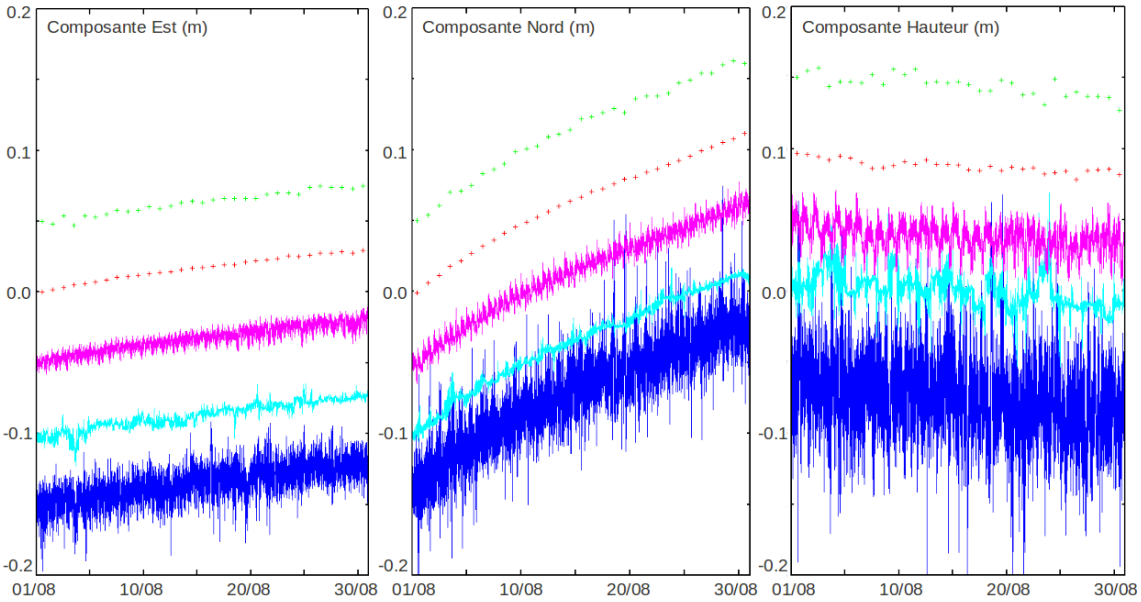

FIGURE 2.36 – Déplacement d'un récepteur mesuré par différentes stratégies de calcul.
Bleu : S1, cyan : S2, magenta : S3, croix rouges : S4, croix vertes : S5.
Les solutions sont décalées deux à deux de 5cm pour plus de lisibilité.

2.6.3 Précision finale atteinte

Afin d'estimer la précision des solutions disponibles après le traitement temps-réel (solution brute) et l'atténuation des multitrajets (solution fortement filtrée et correction sidérale) des données acquises au mois d'août 2012 par trois Geocubes (Table 2.4) installés en conditions réelles de surveillance sur les rives stables du glissement de terrain de Super-Sauze (cf section 3.2) sont traitées par notre chaîne de calcul. La dispersion des séries temporelles obtenues (Table 2.5) est alors utilisée pour estimer la précision des trois solutions proposées.

Ligne de base	Longueur	Dénivelée	Durée de la session	Pas d'acquisition
Base1	367m	58m	40jours	30sec
Base2	554m	167m	35jours	30sec

TABLE 2.4 – Caractéristiques des lignes de bases utilisées pour estimer la précision du positionnement.

Type de solution	Ligne de base	Ecart-type Est	Ecart-type Nord	Ecart-type Hauteur
Brute	Base1	3.5mm	5.1mm	8.9mm
Brute	Base2	4.9mm	4.0mm	6.9mm
Fort filtre	Base1	1.4mm	1.7mm	3.9mm
Fort filtre	Base2	2.2mm	1.3mm	3.7mm
Correction sidérale	Base1	1.9mm	2.5mm	4.6mm
Correction sidérale	Base2	2.9mm	2.5mm	4.9mm

TABLE 2.5 – Dispersions des différentes solutions.

Les résultats obtenus (Table 2.5) montrent que la précision à 1σ de la solution brute peut être estimée à 5mm en planimétrie et 1cm en altimétrie. L'atténuation des multitrajets par post-traitement (correction sidérale ou filtrage strict) permet d'améliorer cette précision et la précision finale à 1σ après post-traitement est estimée à 2.5mm en planimétrie et 5mm en altimétrie.

Chapitre 3

Utilisation de réseaux de Geocubes pour la mesure de déformations d'objets géophysiques de taille kilométrique

Sommaire

3.1 Introduction 81
3.2 Suivi du glissement de terrain de Super-Sauze 82
3.2.1 Contexte 82
3.2.2 Acquisition et traitement des données 82
3.2.3 Analyse des déplacements observés 87
3.2.4 Bilan : apport des Geocubes à l'étude des glissements de terrain 90
3.3 Suivi du glacier d'Argentière 91
3.3.1 Contexte 91
3.3.2 Acquisition et traitement des données 92
3.3.3 Etude du glacier d'Argentière à partir des déplacements mesurés par un réseau de Geocubes 97
3.3.4 Bilan : apport des Geocubes à l'étude des glaciers 104
3.4 Synthèse de l'apport des réseaux de Geocubes à l'étude d'objets géophysiques 105

3.1 Introduction

Pour le test de la composante de surveillance topographique mise au point au cours de cette thèse, nous nous sommes intéressés à l'application des réseaux de Geocubes à l'étude d'objets géophysiques. Nous nous limitons ici à des objets de taille kilométrique afin d'être en accord avec l'extension optimale des réseaux de Geocubes définie précédemment, et d'accéder aux mesures de déformations et de déplacements les plus précises possibles. Pour réaliser les campagnes de tests présentées dans cette partie, un parc de vingt Geocubes assemblés au LOEMI au cours de l'année 2010 a été utilisé. Ces récepteurs correspondent à la version des Geocubes décrite dans la première partie de ce manuscrit (cf section 1.3). Les deux principales expériences réalisées pour cette phase de tests ont été :

- Le suivi du glissement de terrain de Super-Sauze (Vallée de l'Ubaye, Alpes de Haute-Provence) au cours de l'été 2012 (5 juillet – 27 septembre).
- Le suivi de la partie aval du glacier d'Argentière (Massif du Mont-Blanc, Haute-Savoie) au cours de l'automne 2013 (13 septembre – 7 novembre).

Ces deux déploiements sont utilisés ici afin de tester et de qualifier la méthode de mesure de déformations développée en l'appliquant à des données acquises sous différentes conditions opérationnelles de surveillance. L'objectif est de fournir un nouveau type de données de surveillance topographique pour l'étude d'objets géophysiques de faible étendue.

3.2 Suivi du glissement de terrain de Super-Sauze

3.2.1 Contexte

Motivations

Le déploiement de Geocubes sur le glissement de terrain de Super-Sauze au cours de l'été 2012 constitue la première application d'un réseau conséquent de Geocubes à une tâche de surveillance topographique. Cette expérience avait donc comme premier objectif de tester le bon fonctionnement du matériel (récepteurs, coordinateur) ainsi que des composantes logicielles permettant le fonctionnement des Geocubes et du réseau. Le second objectif était de collecter des données GPS brutes afin de tester la composante de surveillance topographique du système. Enfin, des capteurs additionnels ont été ajoutés à la version de base de certains récepteurs afin de valider l'aspect multi-capteurs du Geocube et de fournir des données complémentaires aux déplacements relatifs mesurés par GPS pour la réalisation d'une étude géophysique.
Cette première campagne de test du Geocube a été réalisée en collaboration avec l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg (IPGS) qui a permis l'accès au site et nous a épaulés pour l'étude géophysique, ainsi que la direction Centre Normandie du Centre d'Etudes et d'expertise sur les Risques, l'Environnement la Mobilité et l'Aménagement (CEREMA) et l'Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR) qui ont contribué au développement des couches capteurs ajoutées aux Geocubes.

Le site

Le glissement de terrain de Super-Sauze se situe dans la vallée de l'Ubaye (Alpes de Haute Provence) (Fig. 3.1). Il a pris naissance dans les marnes noires du bassin de Barcelonnette au cours des années 1960 [Malet, 2003]. Il se situe en versant Nord entre 1740m et 2100m d'altitude et mesure 950m de long pour 150m de large. Il s'écoule du Sud vers le Nord. Sa surface est découverte de végétation et elle est soumise à une forte érosion ainsi qu'à d'importantes déformations liées à l'écoulement de la coulée composée de marnes et de débris rocheux (Fig. 3.1) [Malet, 2003]. La vitesse d'écoulement est fortement variable selon les points du glissement de terrain et elle est influencée par les interactions entre la masse en mouvement et la topographie stable sous-jacente [Travelleti and Malet, 2012]. Elle est comprise entre 0.005m/jour et 0.03m/jour et présente de larges variations saisonnières. La coulée accélère au printemps et à l'automne sous l'effet des pluies et ralentit pendant l'été et au cours de l'hiver.
Le glissement de terrain de Super-Sauze a déjà fait l'objet de nombreuses études aussi bien topométriques [Malet et al, 2002] [Travelleti et al, 2008] [Niethammer et al, 2012] [Travelleti et al, 2012] que géophysiques et géotechniques [Malet et al, 2005] [Travelleti and Malet, 2012] qui ont permis d'établir le comportement de la coulée présenté ci-dessus. De plus, la zone est instrumentée et surveillée en permanence dans le cadre de l'Observatoire Multi-disciplinaire des Instabilités de Versants (OMIV : http ://omiv.osug.fr/), ce qui permet d'améliorer régulièrement la connaissance de la coulée. L'étude de ce glissement de terrain largement documenté nous a donc permis de tester le système Geocube dans un environnement bien connu.

3.2.2 Acquisition et traitement des données

Déploiement réalisé

Dix-neuf récepteurs Geocubes ont été déployés sur le glissement de terrain de Super-Sauze pendant 82 jours du 5 juillet au 27 septembre 2012. Ils ont été configurés pour acquérir en continu des données GPS brutes à la fréquence de 0.1Hz. Trois récepteurs ont été installés sur des zones stables entourant le glissement de terrain, tandis que les seize autres ont été déployés sur une

FIGURE 3.1 – Situation (gauche, cercle rouge = glissement de terrain, *fond de carte : geoportail.fr*) et photographie (droite, *photo : O.Martin*) du glissement de terrain de Super-Sauze.

portion active mais restreinte de la coulée afin de former un maillage dense (Fig. 3.2). La distance moyenne entre ces Geocubes placés dans la zone active est d'environ 20m. Les références fixes étaient quant à elles situées respectivement à 150m, 300m et 500m de la zone d'intérêt.

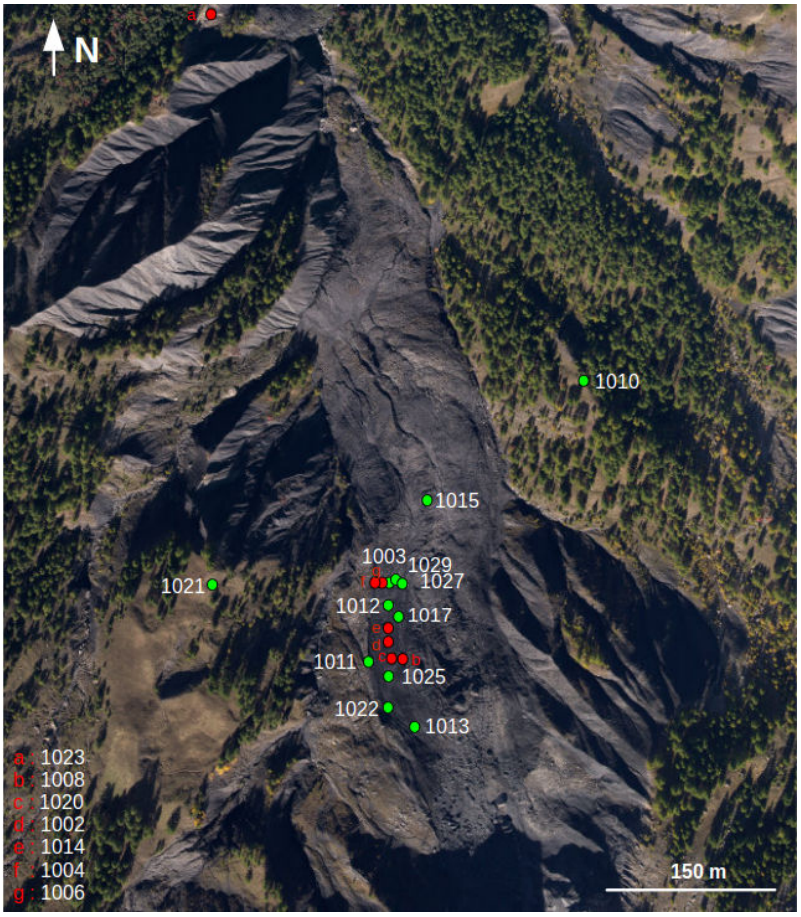

FIGURE 3.2 – Le réseau de Geocubes déployé sur le glissement de terrain de Super-Sauze. *Vert : récepteurs pleinement fonctionnels, Rouge : récepteurs défectueux.*

L'ensemble des récepteurs a été fixé au sol par l'intermédiaire d'une embase fixée dans un tube PVC rempli de béton et enfoncé dans le sol d'environ 30cm (Fig. 3.3). L'installation a été complétée par un coordinateur connecté à internet grâce à une connexion satellite réalisée à l'aide d'une parabole, alimentés tous les deux par un panneau solaire de grande dimension (1.5m×1m) et placés à proximité du Geocube 1021 (Fig. 3.3).

FIGURE 3.3 – Installation des Geocubes et du coordinateur à Super-Sauze (*photos : O.Martin*).

Différentes couches capteurs ont été ajoutées en certains points du réseau (Fig. 3.4), et paramétrées pour acquérir des données en continu à des fréquences d'acquisition dépendant du capteur considéré :

- Une station météo (direction et intensité du vent, pluviométrie, température et humidité de l'air) a été ajoutée au Geocube 1021.
- Un capteur de température, pression et humidité de l'air a été ajouté au Geocube 1015.
- Des sondes permettant la mesure de la température, de l'humidité et de la pression interstitielle du sol ont été ajoutées aux Geocubes 1006, 1008 et 1020.

FIGURE 3.4 – Couches capteurs déployées à Super-Sauze.
De gauche à droite : station météo, capteur P-T-U, sonde d'étude du sol (*photos : O.Martin*).

Le réseau a été paramétré pour stocker les mesures in-situ sur les cartes SD des Geocubes. Grâce à ce dispositif les données ont été traitées en post-traitement. Le post-traitement a été préféré à un traitement temps-réel, car l'infrastructure réseau et le module de traitement temps-réel n'étaient pas encore finalisés. En particulier, l'alimentation du coordinateur et de la connexion internet par satellite était problématique à cause de la grande consommation du matériel choisi pour établir la connexion. Le choix du post-traitement permet alors d'assurer une collecte fiable des données, même en cas de défaillance du réseau. L'infrastructure réseau a tout de même été testée et utilisée au cours de l'expérience pour communiquer avec les Geocubes, évaluer leur état de fonctionnement et paramétrer les acquisitions selon les ressources énergétiques disponibles. De plus, des tests de récupération de fichiers de mesures et de positionnement en temps réel sur de courtes sessions ont été réalisés à la fin de l'expérience.

Fonctionnement de l'installation

Dans un cas idéal, les 19 récepteurs du réseau auraient dû fonctionner en continu pendant les 82 jours de l'expérience. Cependant, seules 62% des mesures réalisables ont été effectivement acquises (Fig. 3.5). Ce chiffre traduit tout d'abord le non fonctionnement de deux récepteurs, l'un à cause d'une antenne GPS défectueuse, l'autre à cause d'un problème dès le démarrage. Si l'on se restreint aux récepteurs qui ont correctement démarré, le taux de succès monte à 73%. Trois causes majeures de dysfonctionnement ressortent alors de l'étude de la défaillance des récepteurs. Tout d'abord un problème dans l'électronique de certains panneaux solaires (4 récepteurs) a conduit à l'extinction prématurée des récepteurs concernés. Ce problème a été résolu lors de revisites du site par l'installation de nouveaux panneaux solaires. Après cette mise à niveau des panneaux solaires, les Geocubes impactés ont fonctionné correctement. La seconde cause de dysfonctionnement est un manque d'étanchéité de certains récepteurs provoqué en particulier par l'ajout des couches capteurs dédiées à l'étude du sol. La présence d'eau dans le récepteur produit alors l'oxydation des circuits électroniques et cause des dégâts irrémédiables sur le Geocube qui cesse de fonctionner. Enfin, la dernière cause d'échec est due à la présence de données erronées sur les cartes SD. Ce phénomène s'est produit lorsque les récepteurs alternaient des périodes de fonctionnement et d'extinction, souvent dues aux autres dysfonctionnements cités précédemment.

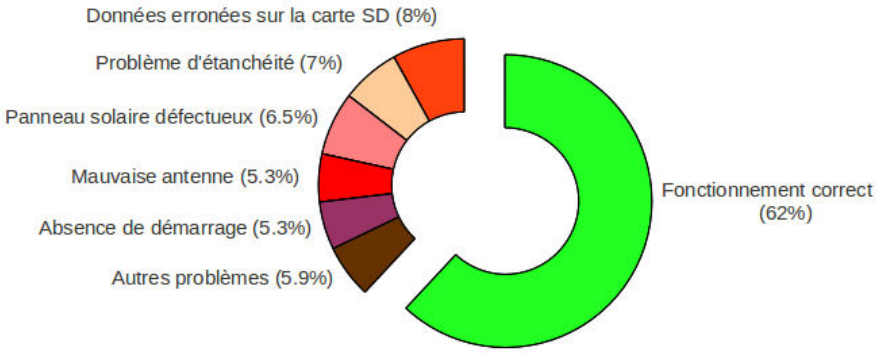

FIGURE 3.5 – Causes de dysfonctionnement des récepteurs.

Les couches capteurs ont pour leur part fonctionné de façon très hétérogène. Les capteurs météo ont fonctionné avec succès tout au long de l'expérience, tandis que les sondes d'étude des propriétés du sol ont acquis très peu de données, car elles ont provoqué l'arrêt de leur Geocube support à la suite d'un manque d'étanchéité.
Enfin, l'infrastructure réseau a fonctionné correctement et les tests de positionnement en temps-réel, de transfert de fichier et de communication à distance avec les différents récepteurs du réseau se sont révélés fructueux. Cependant, la forte consommation de l'antenne satellite nous a amenés à éteindre le coordinateur et la connexion internet pendant la nuit, ce qui a empêché de réaliser de longues sessions de tests de positionnement en temps-réel.

Traitement des données GPS

Les données GPS acquises au cours de l'expérience ont été déchargées des cartes SD des Geocubes après le démontage du réseau. Pour le traitement des données nous nous sommes concentrés sur une session de 40 jours s'étendant du 01/08/2012 au 09/09/2012 qui correspond à la période de fonctionnement optimal du réseau et présente le meilleur compromis entre le nombre de récepteurs opérationnels et la durée de fonctionnement. Au cours de cette période, 10 récepteurs placés dans la partie active du glissement de terrain et 2 récepteurs placés sur les rives fixes et servant de références ont fourni des données exploitables. Un traitement en réseau a alors pu être réalisé. Les données sélectionnées ont été traitées par le module de post-traitement du logiciel de positionnement relatif dédié aux Geocubes. Un angle de coupure de 15^o a été choisi pour le traitement, mais un masque de 40^o au Sud, généré par un sommet, dégrade considérablement la constellation visible. Seules les époques avec plus de 3 satellites visibles ont été traitées afin de

limiter l'impact d'une mauvaise géométrie de la constellation sur le positionnement.
Le mouvement suivi étant un écoulement lent ($< 3cm/jour$) et régulier, un bruit de processus faible $\sigma_w = 0.002 \times \sqrt{dt}$ mm a été utilisé pour paramétrer le filtre de Kalman. Il permet alors de stabiliser la solution lorsque la constellation visible présente une mauvaise géométrie et contribue également à rejeter une large part des multitrajets dans les résidus. La solution obtenue correspond à une solution "filtrage strict" décrite section 2.5.1.
Afin d'obtenir des séries temporelles de positions encore moins bruitées par les multitrajets, des moyennes journalières sur un jour sidéral ont été calculées. Ce traitement dégrade évidemment très largement la résolution temporelle des solutions obtenues, mais il permet de bien appréhender les mouvements lents observés ici. Comme les multitrajets sont quasiment identiques d'un jour à l'autre, la solution obtenue est encore moins dispersée que la solution fortement filtrée.

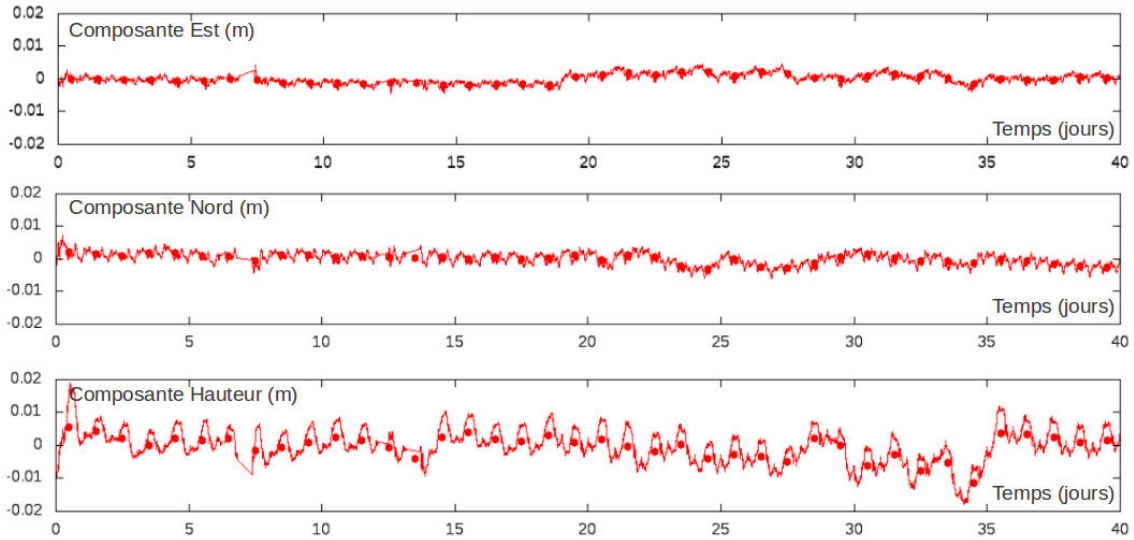

FIGURE 3.6 – Séries temporelles de positions pour une ligne de base fixe.
Ligne continue : solution brute, points : solution journalière.

Le traitement de la ligne de base fixe entre les références (Fig. 3.6) est réalisé en ligne de base isolée afin de vérifier la stabilité des références au cours du temps. On constate alors que les références sont relativement stables au cours des 40 jours d'intérêt, bien que des fluctuations de leurs positions relatives apparaissent, en particulier aux jours 19-21, 25, 30 et 35. Ces faibles variations de position interviennent à la suite de chutes de pluie (Fig. 3.7) et sont à relier à l'effet résiduel des multitrajets sur les positions. Lorsque le sol s'humidifie, sa constante diélectrique change, ce qui conduit à une augmentation de l'amplitude et une variation du modèle des multitrajets (cf section 2.4.3). Lors du calcul de positionnement ce phénomène se traduit simultanément par une augmentation des résidus (Fig. 3.7) dans lesquels sont rejetés les multitrajets haute fréquence, ainsi que par un biais sur les positions (Fig. 3.6) provoqué par une variation du biais induit par les multitrajets sur les paramètres de position. La répartition de l'effet des multitrajets entre résidus et positions dépend du paramétrage du filtre de Kalman (cf sections 2.2.2 et 2.5.1) et ici l'utilisation d'un filtrage "strict" conduit au rejet d'une grande part des multitrajets additionnels dans les résidus. Cependant, des fluctuations notables des positions apparaissent lors des changements d'humidité du sol et la précision des déplacements dérivés des positions relatives est dégradée de plusieurs millimètres à la suite des épisodes pluvieux dans le cas de ce chantier.

Les références peuvent cependant être considérées comme stables au cours de la période d'intérêt si l'on excepte les petites variations de coordonnées causées par les multitrajets. Les déplacements de l'ensemble des Geocubes placés dans la zone active du glissement de terrain sont alors estimés au cours d'un calcul en réseau et permettent de suivre l'évolution de la zone d'intérêt (Fig. 3.8).

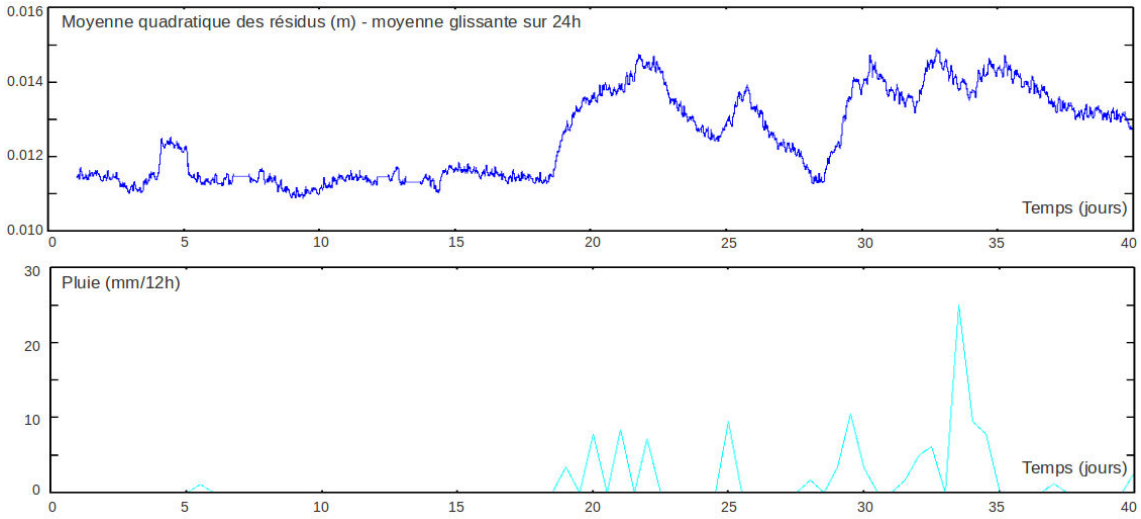

FIGURE 3.7 – Evolution des résidus de la ligne de base fixe entre les références et corrélation avec la pluie.

3.2.3 Analyse des déplacements observés

Etude des déplacements planimétriques

Le maillage dense de vecteurs déplacements dérivés des données collectées par le réseau de Geocubes permet d'étudier l'écoulement d'une partie du glissement de terrain de Super-Sauze. La précision des déplacements mesurés est comparable à la précision obtenue en utilisant des récepteurs GNSS géodésiques [Malet et al, 2002], mais le faible coût des récepteurs permet le suivi de nombreux points. L'amplitude des déplacements observés en 40 jours est en accord avec les résultats obtenus lors d'autres études à partir de différentes méthodes de surveillance topographique [Malet et al, 2002] [Travelleti et al, 2012], mais notre résultat donne de plus accès à la mesure de déplacements précis en de nombreux points encore non documentés. On remarque que le déplacement planimétrique cumulé atteint 55cm en 40 jours pour les points situés en aval mais moins de 10cm sur la même période pour les points les plus en amont.
Le glissement de terrain de Super-Sauze s'étant déclaré au cours de années 1960, on dispose de données sur la topographie avant le déclenchement du glissement [Weber and Hermann, 2000]. Des études géotechniques postérieures [Travelleti and Malet, 2012] ont permis d'affiner cette connaissance et nous disposons finalement d'un modèle numérique de la surface topographique stable (bedrock) au dessus de laquelle l'écoulement a lieu. En confrontant les déplacements mesurés et la topographie du sous-sol stable (fourni par l'OMIV), on constate que sur la partie amont de la coulée les déplacements sont entièrement commandés par cette topographie (Fig. 3.8). Au contraire, sur la partie aval, les déplacements de plus grande amplitude sont canalisés et moins sensibles à la pente du soubassement stable (Fig. 3.8).

Etude des variations temporelles de vitesse

Le calcul époque par époque, ainsi que la grande fréquence d'acquisition (0.1Hz), donnent accès à une grande résolution temporelle des séries de positions obtenues. Ces données peuvent alors être utilisées pour étudier les variations de vitesse des points suivis et dater précisément les variations du régime d'écoulement. La vitesse d'écoulement du glissement de terrain de Super-Sauze est connue pour être commandée par les précipitations et l'humidité du sol [Malet et al, 2002] [Malet et al, 2005]. Ici les déplacements observés sont confrontés aux données météorologiques collectées par la couche capteurs du Geocube 1021 ainsi qu'à des mesures piézométriques (acquises à proximité du Geocube 1003) fournies par l'OMIV, les capteurs dédiés inclus aux Geocubes 1006, 1008 et 1020 n'ayant pas fonctionné correctement.
Focalisons nous sur les variations de vitesse du Geocube 1027 (Fig. 3.9) dont la grande amplitude

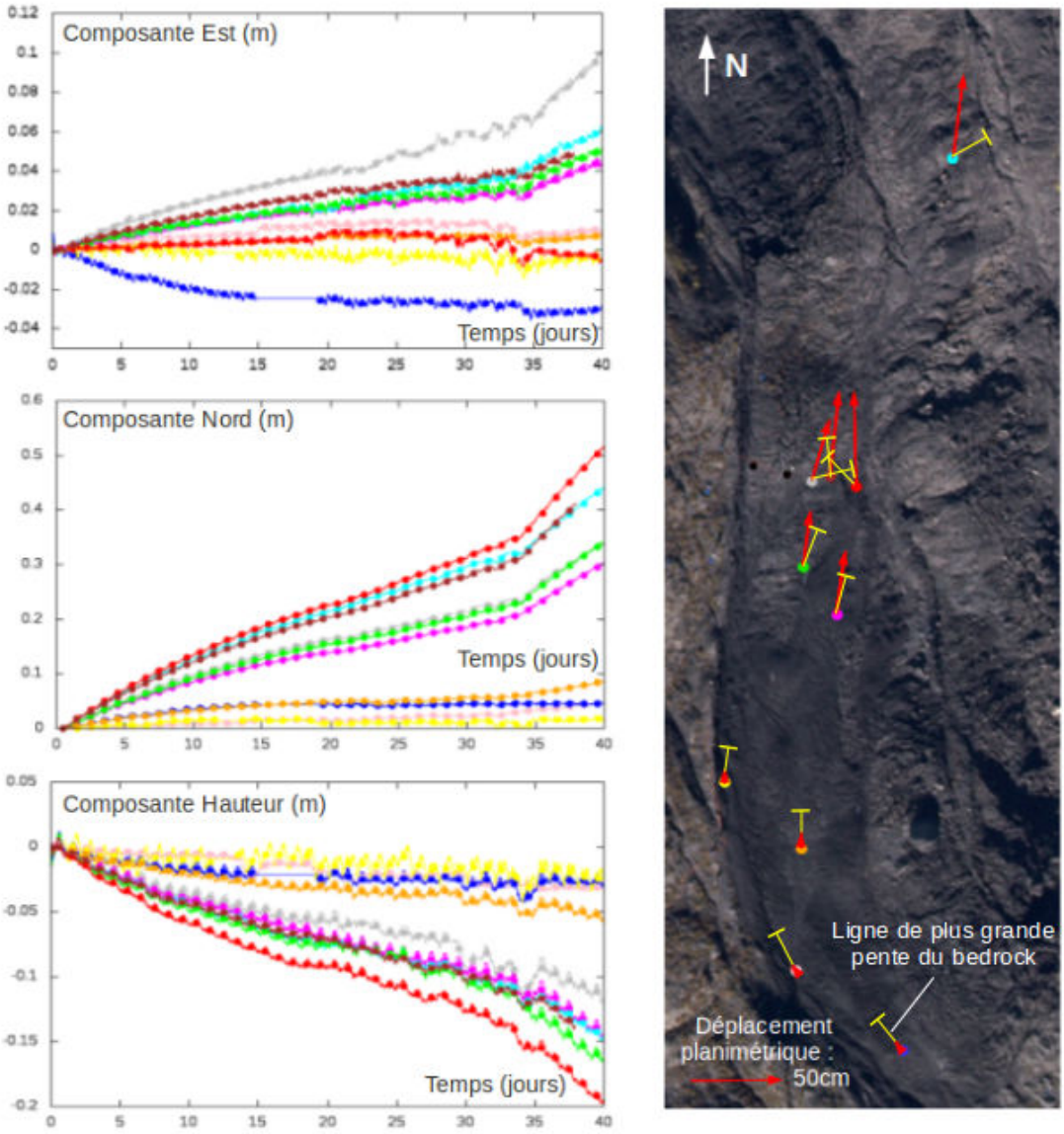

FIGURE 3.8 – Séries temporelles de positions des Geocubes placés dans la zone active du glissement de terrain.
Gauche : ligne continue : solution brute, points : solution journalière.
Droite : vecteurs rouges : déplacements planimétriques cumulés sur 40 jours, segments jaunes : direction de la ligne de plus grande pente de la topographie sous-jacente.

permet de mieux détecter les petits évènements. Ces vitesses sont calculées à partir des solutions "brute" et "journalière". Deux changements de régime apparaissent alors dans la vitesse du récepteur aux jours 20-22 et 33-34.

La première rupture correspond à l'arrêt de la diminution de la vitesse d'écoulement. Cet événement est peu visible sur la série temporelle de positions, mais clairement détectable sur la vitesse qui en est dérivée. Cette petite réactivation est provoquée dans un premier temps uniquement par des précipitations (jours 20 à 24) et non pas par la montée de la nappe d'eau. Cette pluie modérée a donc été suffisante pour réactiver le glissement par la saturation en eau des couches superficielles de la coulée, mais pas assez intense pour générer une hausse de la nappe phréatique. Ensuite, une légère remontée du niveau de la nappe prend le relai en lubrifiant l'interface de glissement et entraîne une légère accélération supplémentaire vers le jour 25. Ce second mode d'accélération correspond au mécanisme le mieux connu d'accélération du glissement de terrain de Super-Sauze

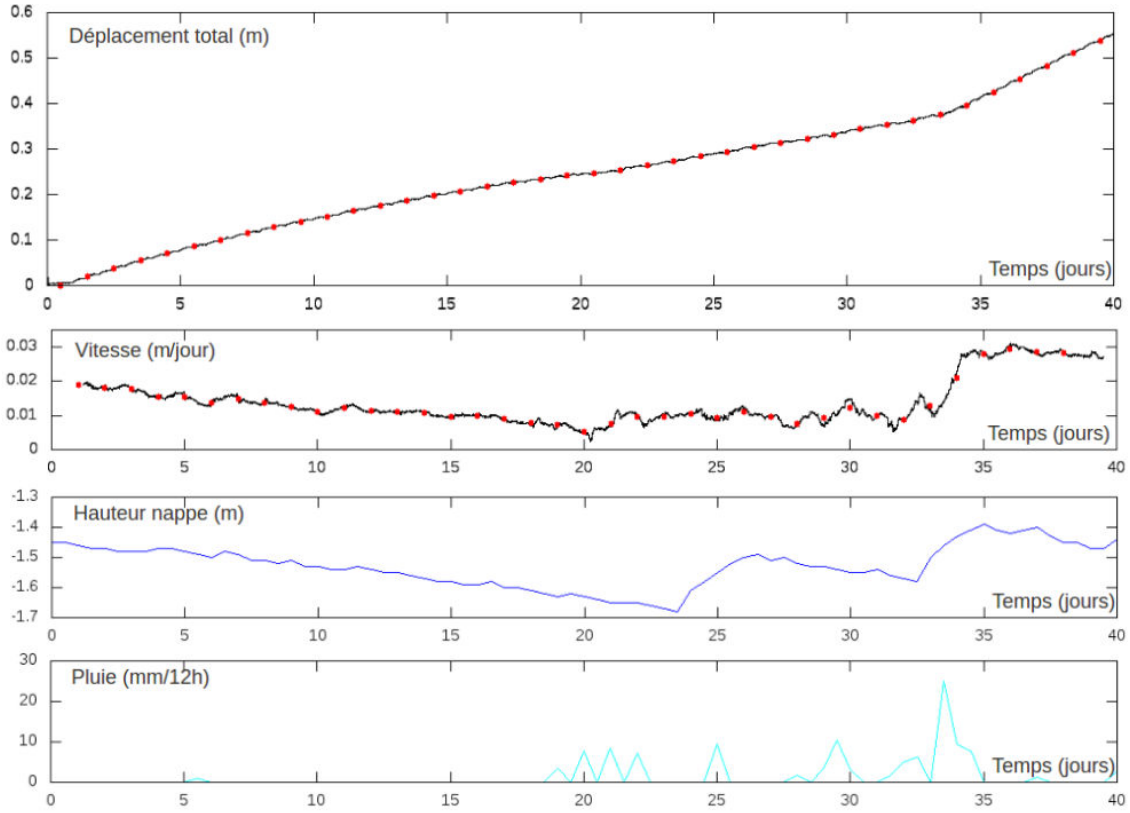

FIGURE 3.9 – Variations temporelles de la vitesse de glissement.
Ligne noire : solution brute, points rouges : solution journalière.

[Malet and Maquaire, 2003].
La seconde rupture correspond à une franche accélération de l'écoulement. Cet événement est déclenché par des précipitations abondantes qui produisent simultanément l'humidification de toute la couche en mouvement, une remontée de la nappe et la lubrification de l'interface de glissement. Cette accélération suit alors le même mécanisme que la réactivation de l'écoulement à partir du jour 25, mais avec une amplitude bien supérieure.

Etude des variations spatio-temporelles de vitesse

Il est alors intéressant d'étudier si les phénomènes de réactivation observés au niveau du Geocube 1027 touchent indistinctement l'ensemble des récepteurs placés sur la partie mobile du glissement de terrain, avec uniquement une modulation en amplitude en fonction de la position, ou si des régimes de réactivation différents sont présents sur la zone.
Pour cela des vitesses moyennes de déplacements ont été calculées sur trois sessions de 10 jours correspondant chacune à un régime différent :

- Jours 4 à 14 (5/08 - 14/08, en jaune sur la Fig. 3.10) : Décélération du glissement de terrain avant les précipitations du mois d'août.
- Jours 20 à 30 (21/08 - 30/08, en orange sur la Fig. 3.10) : Période de faible réactivation.
- Jours 30 à 40 (31/07 - 09/09, en rouge sur la Fig. 3.10) : Période de forte réactivation englobant les fortes précipitations des jours 30 à 35.

La figure 3.10 montre alors que la réactivation de la vitesse d'écoulement ne touche pas tout glissement de terrain de façon similaire. Il apparait que les deux points situés en amont ne sont pas réactivés par les pluies du mois d'août et s'arrêtent en cours de période. Les deux points qui se trouvent directement en dessous d'eux sont faiblement réactivés, tandis que les points situés encore plus en aval et possédant une plus grande dynamique sont largement accélérés par les pluies estivales. Leur vitesse mesurée en début du mois de septembre est alors plus élevée que la vitesse

mesurée début août.
Il apparait donc que les points possédant globalement une grande dynamique sont plus réactivés par les pluies estivales que les points soumis à des déplacements de faible amplitude. Les récepteurs situés en amont du glissement de terrain sont même totalement épargnés par l'accélération et on peut alors supposer que seuls les évènements d'accélération majeurs, intervenant au printemps lors de la fonte du manteau neigeux ou en automne au cours de précipitations intenses et répétées, affectent cette partie du glissement de terrain.

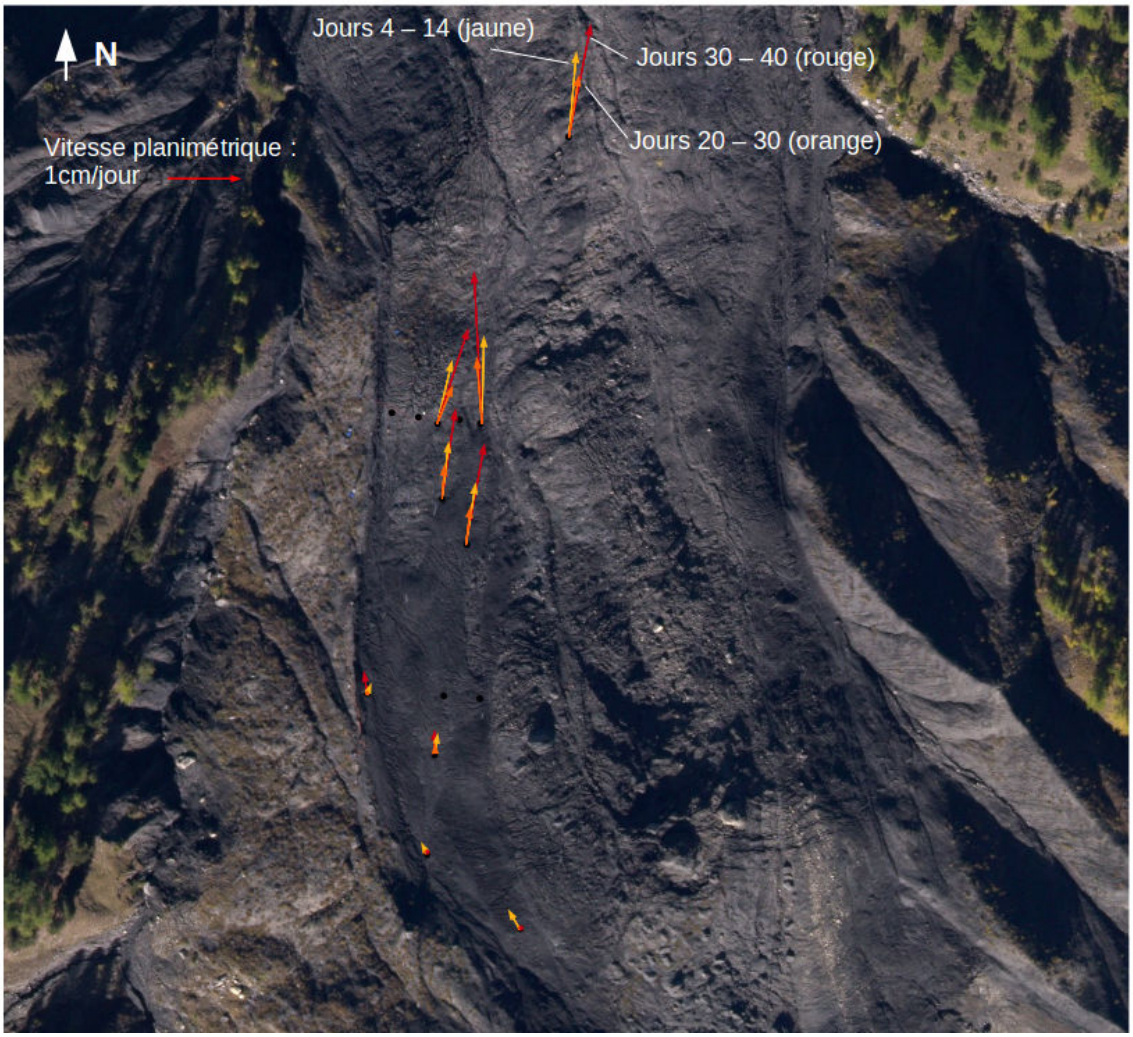

FIGURE 3.10 – Variations spatio-temporelles de la vitesse de glissement.
Vitesses moyennes pour trois périodes de 10 jours.
Jaune : 5-14/08/2012, orange : 21-30/08/2012, rouge : 31/08-09/09/2012.

3.2.4 Bilan : apport des Geocubes à l'étude des glissements de terrain

Ce premier déploiement d'un réseau de Geocubes a permis de tester avec succès le bon fonctionnement de l'infrastructure de collecte de données, aussi bien des données GPS brutes que de certaines données multi-capteurs. Le traitement des données GPS permet également de valider le logiciel de positionnement présenté ici.
Cette étude du glissement de terrain de Super-Sauze à l'aide d'un réseau de Geocubes souligne l'intérêt des réseaux de capteurs avec composante de surveillance topographique pour l'étude d'objets complexes tels qu'un glissement de terrain. En effet, ici, les données issues des instruments de mesure météorologique et de caractérisation du sol sont indispensables pour expliquer les variations

de vitesse observées. Ces dernières sont, pour leur part, essentielles pour comprendre le comportement du glissement de terrain et ses réponses à des variations de l'environnement. D'autre part, la mesure in-situ de déplacements en de nombreux points permet d'étudier avec précision les hétérogénéités des déformations de la zone d'intérêt.
En comparaison avec d'autres systèmes de mesures de déformations, le Geocube se distingue ici par sa capacité à mesurer précisément des déplacements avec une grande résolution temporelle. En particulier, les données collectées ont permis d'identifier une accélération du glissement de terrain par saturation des couches superficielles sans montée de la nappe d'eau. Ce phénomène n'était pas documenté auparavant sur le site de Super-Sauze, car son amplitude est faible et demande donc des mesures très précises.
La possibilité d'effectuer de telles mesures en plusieurs points répartis à la surface du glissement de terrain permet alors l'étude des variations spatiales de ce phénomène de réactivation et a permis de mettre à jour ses hétérogénéités spatiales.

3.3 Suivi du glacier d'Argentière

3.3.1 Contexte

Motivations

Le suivi du glacier d'Argentière par un réseau de Geocubes à l'automne 2013 a été l'occasion de réaliser un second test du système Geocube pour la surveillance topographique. Cette expérience s'intéressait à tester cinq points principaux :

- Le déploiement et le démontage d'un réseau de Geocubes en temps limité avec des contraintes logistiques fortes.
- Le fonctionnement des Geocubes sous des conditions météorologiques difficiles avec beaucoup d'humidité (pluie et neige) et de fortes variations de températures (-10^oC à $+20^o$C).
- L'adaptation d'un nouveau capteur aux Geocubes : le sismomètre (Fig. 3.11). La création de cette couche sismométrique a été réalisée en collaboration avec l'Observatoire Royal de Belgique.
- Le test des logiciels de traitement GPS pour une configuration en limite de l'hypothèse quasi-statique nécessaire pour le bon déroulement des traitements. En effet, pour la zone surveillée, la surface du glacier présente une vitesse de l'ordre de 15cm/jour.
- La comparaison des résultats obtenus avec les Geocubes à d'autres méthodes de surveillance topographique. Cette étude multi-techniques a été menée en collaboration avec les laboratoires LISTIC et EDYTEM de l'université de Savoie.

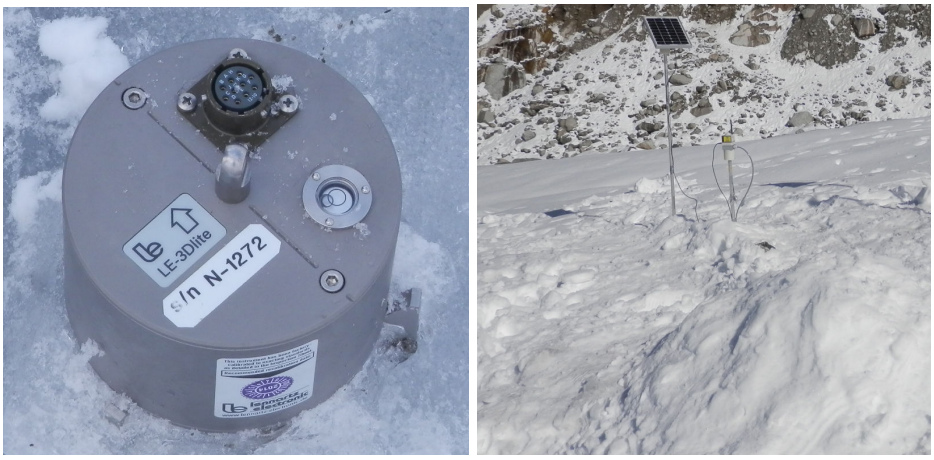

FIGURE 3.11 – Sismomètre intégré au Geocube.
Gauche : vue rapprochée du sismomètre utilisé, droite : déploiement (sismomètre sous la neige).

Nous nous focaliserons ici sur l'utilisation des Geocubes pour la mesure de déplacements et de déformations, et sur l'apport des résultats obtenus à l'étude du comportement du glacier.

L'exploitation des mesures sismiques ayant été réalisée par l'Observatoire Royal de Belgique, elle ne sera pas abordée ici. De même nous ne détaillerons que les apports du Geocube à l'étude du glacier d'Argentière, le croisement de différentes méthodes de mesures de déformations ayant fait l'objet d'une publication séparée (cf section).

Le site

Le glacier d'Argentière est un glacier tempéré de 9km de long qui s'étend de 1750m à 3100m d'altitude (Fig. 3.12). Il est situé dans le massif du Mont-Blanc (Haute-Savoie) au pied du mont Dolent (3823m), de l'aiguille d'Argentière (3900m) et de l'aiguille verte (4122m). Il présente de nos jours une interruption au niveau du lieu dit "le Lognan", à 2250m d'altitude, où une rupture de pente génère une chute de séracs. Cette coupure du glacier est apparue au cours des années 2000 et traduit le retrait et la perte de masse du glacier depuis plusieurs années [Vincent, 2004]. Le glacier atteint 300m d'épaisseur au niveau de la ligne d'équilibre qui se situe vers 2800m et encore 250m d'épaisseur à 2400m d'altitude [Vincent, 2005], mais il s'amincit fortement à proximité des séracs de Lognan sous l'effet de l'augmentation de la pente et ne fait alors plus que 70m d'épaisseur au niveau de la chute de glace [Pétillot, 2008]. Sa vitesse de surface varie d'environ 50m/an en amont à 100m/an en aval et dans les zones de forte pente [Berthier, 2005] [Vincent, 2005]. La vitesse du glacier est également connue pour varier à des échelles de temps inter-annuelles et saisonnières [Vivian and Bocquet, 1973] [Berthier, 2005] [Ponton et al, 2011].

FIGURE 3.12 – Situation (gauche, *fond de carte : geoportail.fr*) et vue panoramique (droite, *photo : O.Martin*) du glacier d'Argentière au niveau de la zone d'étude.

Le glacier d'Argentière a fait l'objet de nombreuses études glaciologiques qui se focalisent sur son comportement sur une longue période (par exemple [Vincent, 2004]). Il est également suivi dans le cadre du réseau GLACIOCLIM d'observation des glaciers (http ://www-lgge.obs.ujf-grenoble.fr/ServiceObs/) qui réalise annuellement des bilans de masse et des mesures de paramètres de la dynamique glaciaire. Il a aussi servi de site de test pour des études visant à adapter différentes méthodes de surveillance topographique à un contexte glaciologique : utilisation d'images optiques terrestres [Fallour et al, 2010] et spatiales [Berthier, 2005], radargrammétrie [Fallour et al, 2011] [Pétillot, 2008] ou positionnement GNSS [Ponton et al, 2011]. Cependant, si les GNSS ont été largement utilisés pour l'étude du glacier d'Argentière, les utilisations basées sur une haute résolution temporelle issue de traitements cinématiques sont rares.

3.3.2 Acquisition et traitement des données

Déploiement réalisé

Treize Geocubes ont été déployés pour étudier les mouvements du glacier d'Argentière du 14 septembre au 7 novembre 2013. Quatre récepteurs complémentaires équipés de sismomètres ont été ajoutés le 17 octobre à proximité de récepteurs déjà installés. Ils ont été utilisés pour tester le fonctionnement de la couche sismométrique, mais n'ont pas servi à la mesure de déformations.
Parmi les treize Geocubes utilisés pour la surveillance topographique, deux ont été fixés sur les

rives stables du glacier pour servir de références et onze ont été positionnés sur la glace afin de former un maillage le plus régulier possible d'une zone restreinte du glacier d'environ 600m×400m située 700m en amont des séracs de Lognan (Fig. 3.13). La largeur de la zone d'étude a été limitée par les zones crevassées situées au bord du glacier qui empêchent le déploiement de récepteurs à proximité des rives (Fig. 3.13).

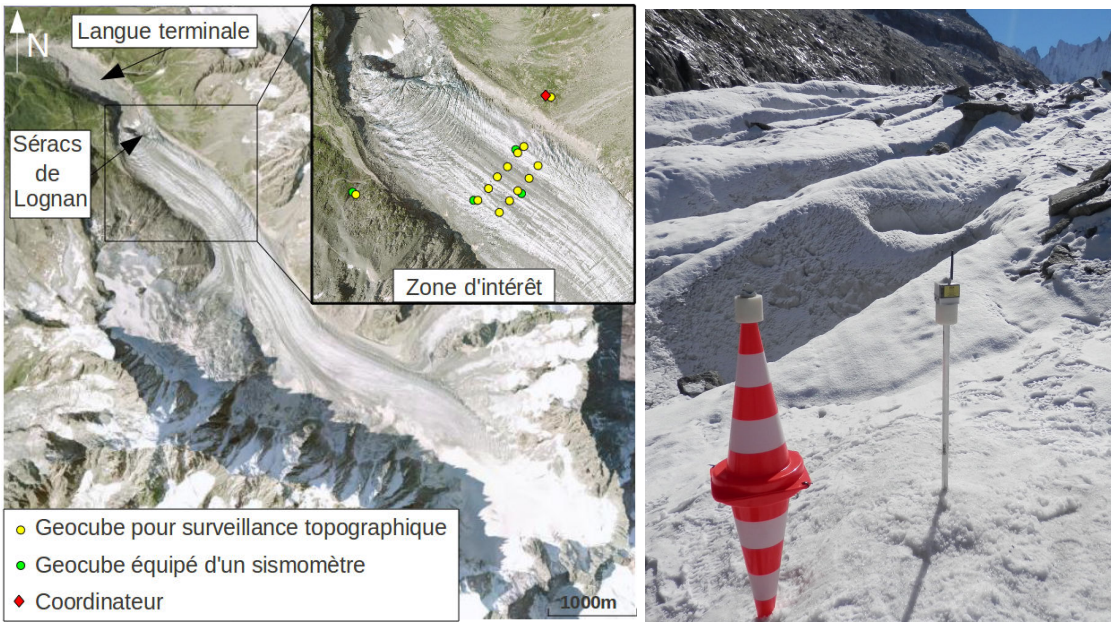

FIGURE 3.13 – Déploiement des Geocubes sur le glacier d'Argentière.
Gauche : carte du déploiement (fond de carte : geoportail.fr), droite : Geocube près des crevasses.

Les Geocubes situés sur les rives du glacier ont été fixés sur des embases vissées dans des dalles de granite (Fig. 3.14), tandis que les Geocubes sur la glace ont été fixés au sommet de tiges en aluminium de 2m de haut enfoncées d'environ 1.5m dans des trous forés à la sonde à vapeur (Fig. 3.14). La verticalité et la stabilité de ces tiges support ont été contrôlées à l'aide d'inclinomètres inclus dans les Geocubes afin de garantir que le déplacement mesuré au centre de phase de l'antenne GPS correspond exactement au déplacement du glacier et n'est pas bruité par l'inclinaison du support. Des petits panneaux solaires ont été utilisés pour l'alimentation de l'ensemble des Geocubes. Ils ont été installés sur le site de la même façon que le récepteur qu'ils alimentaient.

FIGURE 3.14 – Geocubes installés sur le glacier d'Argentière.

L'installation a été complétée par un coordinateur relié à internet grâce à une connexion par satellite et alimenté par un grand panneau solaire (Fig. 3.15). Comme lors de l'expérience de Super-Sauze, le coordinateur a été utilisé uniquement pendant la journée pour contrôler le réseau, mais a dû être arrêté pendant la nuit pour économiser l'énergie. En effet, les conditions sur le site ne permettaient pas de déployer une infrastructure suffisante pour alimenter en continu cette station de base.

FIGURE 3.15 – Coordinateur installé sur la rive droite du glacier d'Argentière.

Cette étude du glacier d'Argentière a été l'occasion de tester le déploiement d'un réseau de Geocubes sous de fortes contraintes logistiques. En effet seule une liaison par hélicoptère (Fig. 3.16) a permis d'accéder à la zone d'étude avec le matériel. Ceci nous a contraints à minimiser le temps d'installation, la quantité de matériel transporté et le nombre d'opérateurs impliqués dans le montage du réseau. Cette expérience nous permet alors de quantifier la main d'œuvre et le temps nécessaires pour déployer un réseau de Geocubes. Ici l'installation de la station de base (Fig. 3.15) et d'un Geocube sur la rive droite a demandé une journée de travail à un opérateur, tandis que deux personnes ont passé une journée à installer les onze récepteurs sur la glace (Fig. 3.16). Le Geocube situé sur la rive gauche a été installé en 30min par un opérateur ne connaissant pas le système. Cette installation complète d'un réseau de Geocubes a donc été effectuée en une journée et n'a demandé qu'environ 30h de travail. De plus, elle a montré qu'un opérateur non spécialiste pouvait facilement et rapidement installer un Geocube.

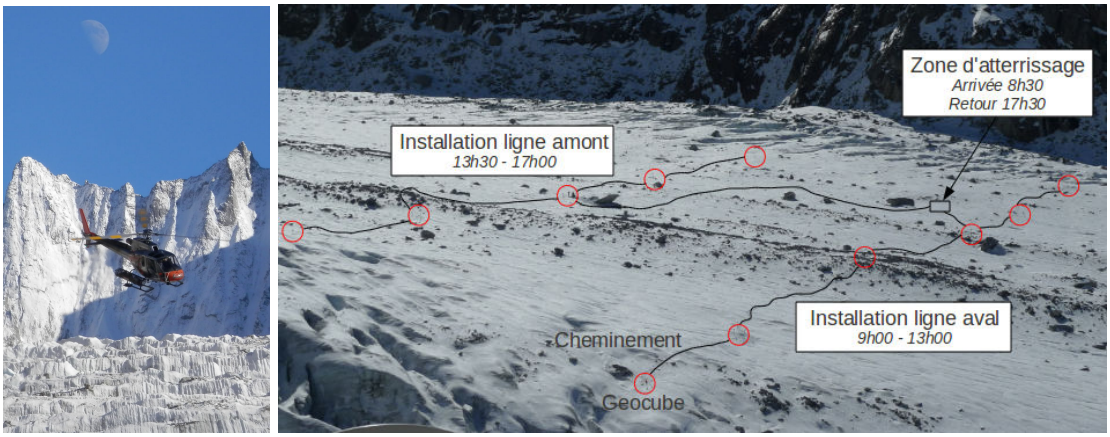

FIGURE 3.16 – Déploiement des Geocubes sur le glacier.
Gauche : hélicoptère utilisé pour le transport, droite : planning du déploiement.

Fonctionnement de l'installation

Les treize Geocubes du réseau auraient dû fonctionner en continu pendant les 55 jours de l'expérience. Cependant, seules 64% des mesures potentielles ont été effectuées, parmi lesquelles seules 52% sont pleinement exploitables (Fig. 3.17).

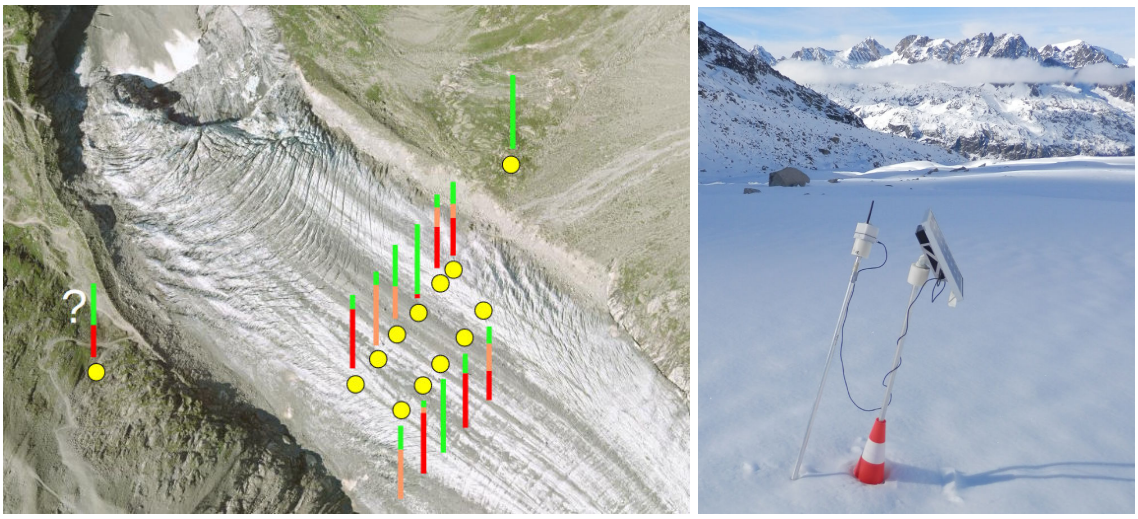

FIGURE 3.17 – Fonctionnement des Geocubes sur le glacier d'Argentière.
Gauche : Bilan du fonctionnement ; vert : fonctionnement correct, orange : récepteur incliné, rouge : dysfonctionnement ou absence de données (fond de carte : geoportail.fr).
Droite : Cas de dysfonctionnement : Geocube incliné et panneau solaire dos au soleil.

Ce faible taux de succès ne s'explique pas par un dysfonctionnement des Geocubes contrairement à l'expérience de Super-Sauze. En effet, après ce premier test, les récepteurs ont été améliorés afin de corriger les défauts constatés. Lors du suivi du glacier d'Argentière, aucune panne des Geocubes n'est donc à déplorer. Ici c'est un problème de monumentation qui a conduit aux échecs d'acquisition. Sous l'influence des températures très élevées pour la saison en début de session (maximales proches de 20°C), l'eau présente dans les trous forés à la sonde à vapeur n'a pas regelé autour des tiges servant à fixer les Geocubes et les panneaux solaires. De nombreux panneaux solaires se sont alors retournés sous l'effet du vent et ont fait dos au soleil (Fig. 3.17). L'alimentation des récepteurs concernés a donc été interrompue rapidement et les Geocubes se sont alors éteints. D'autre part, sous l'effet de la fonte de la glace autour des tiges support et de l'ablation de la surface du glacier, de nombreux Geocubes se sont inclinés (Fig. 3.17), ce qui a conduit au rejet des données pour éviter le mélange du signal de déplacement du glacier avec un bruit dû à l'inclinaison des récepteurs. Une monumentation plus adaptée, utilisant des trépieds et un matériau moins conducteur de chaleur (bois par exemple) pour la fixation des récepteurs dans la glace, pourrait donc permettre d'améliorer drastiquement le taux de fonctionnement des Geocubes et d'atteindre un taux de succès proche de 100% même dans les conditions difficiles (froid, humidité) rencontrées à la surface d'un glacier.

Traitement des données

Les données GPS brutes ont été déchargées des cartes SD des Geocubes après le démontage du réseau. Le calcul de positionnement a alors été effectué en post-traitement en utilisant le logiciel développé au cours de cette thèse.
Pour vérifier la stabilité des références, un premier calcul n'intégrant que ces deux récepteurs a tout d'abord été réalisé. Il nous a conduits à rejeter les mesures du récepteur situé sur la rive gauche du glacier qui présente un comportement erratique, sûrement dû à un dysfonctionnement de son électronique combiné à de mauvaises conditions d'acquisition. En effet, lors de la visite du site le 17/10/2013, ce récepteur a été retrouvé sous une épaisse couche de neige et à quelques centimètres de son embase, emporté par son panneau solaire arraché par le vent.

Une unique référence, située sur la rive droite du glacier, fournit donc des observations fiables pendant toute l'expérience. Sa stabilité a été vérifiée visuellement sur le terrain lors de chaque visite du site puis confirmée par un rattachement au Réseau GNSS Permanent (RGP). Pour cela les coordonnées de ce Geocube de référence ont été calculées tous les cinq jours tout au long de l'expérience par un calcul différentiel en mode statique sur des sessions journalières. Ce traitement a été obtenu à l'aide du logiciel RTKlib [Takasu and Yasuda, 2009]. Ce rattachement a été réalisé en utilisant la station MARG (située à 38km du glacier et 2000m plus bas) qui était la station la plus proche du site fonctionnant tout au long de l'expérience. Malgré l'imprécision du résultat, causée par la longueur de la ligne de base observée par un Geocube mono-fréquence et la grande dénivelée entre les récepteurs, ce traitement montre que la référence reste stable à un niveau centimétrique pendant toute la période d'intérêt (Fig. 3.18).

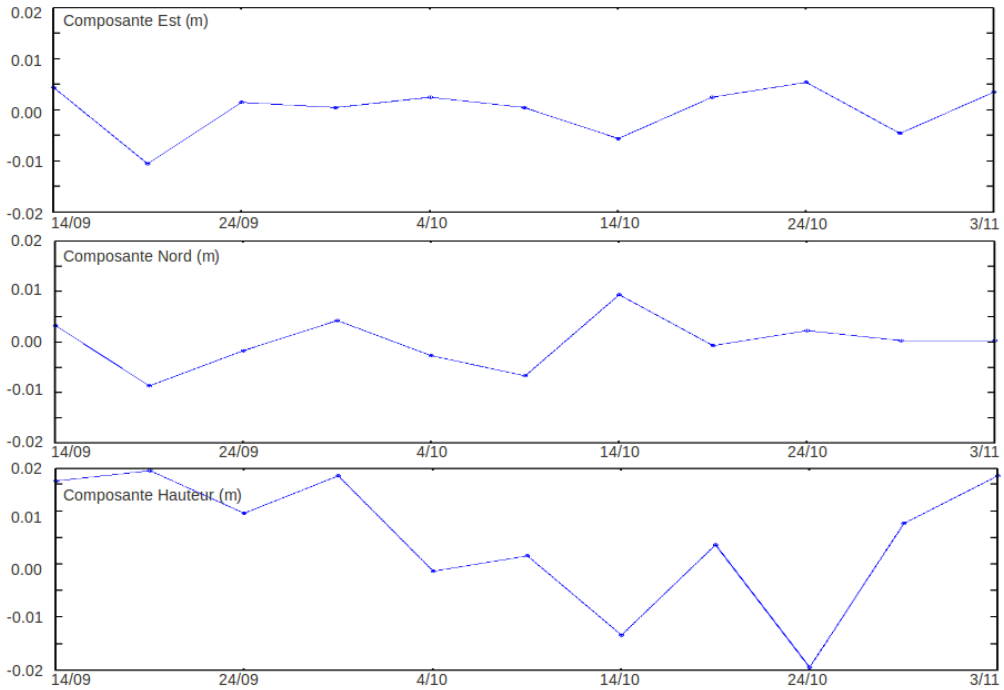

FIGURE 3.18 – Séries temporelles de positions du Geocube de référence par rapport à la station MARG du RGP.

Une fois la stabilité de la référence vérifiée, un traitement en réseau a été réalisé en utilisant les observations de cette référence et de l'ensemble des récepteurs stables et verticaux placés sur le glacier. La stabilité des récepteurs positionnés sur la glace a été contrôlée en utilisant les données acquises par les inclinomètres présents dans les Geocubes. Pour le traitement GPS, un bruit de processus de $\sigma_w = 0.2 \times \sqrt{dt}$ mm a été adopté pour les positions afin de prendre en compte l'amplitude du mouvement attendu pour les Geocubes se trouvant sur le glacier (environ 15cm/jour). Le choix de ce bruit de processus conduit à des séries temporelles entachées de l'effet des multitrajets. Les déplacements obtenus étant très largement linéaires (Fig. 3.19), des séries temporelles de vitesses ont été dérivées des positions brutes. Afin de retirer une partie du bruit de multitrajets lors du calcul des vitesses, les vitesses ont été calculées sur une période d'un jour sidéral (Fig. 3.19). Ceci permet de coupler la correction sidérale des multitrajets avec le calcul de vitesses.

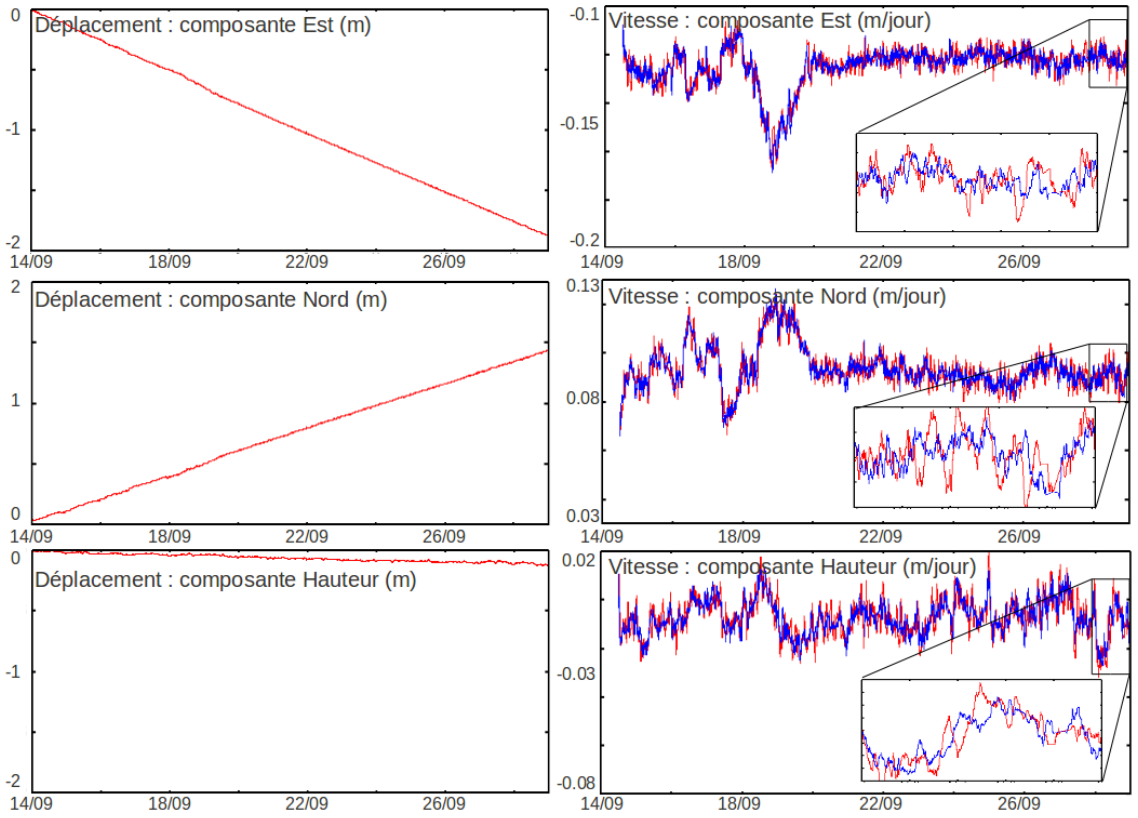

FIGURE 3.19 – Séries temporelles de positions (gauche) et de vitesse (droite) pour un récepteur placé sur le glacier.
Bleu : vitesse calculée sur un arc de 23h56min, rouge : vitesse calculée sur un arc de 25h.

3.3.3 Etude du glacier d'Argentière à partir des déplacements mesurés par un réseau de Geocubes

Etude des variations spatiales de l'écoulement du glacier et mesure des déformations associées

Les données GPS acquises au cours des cinq jours pendant lesquels l'ensemble du réseau de Geocubes a fonctionné correctement sont utilisées pour étudier le mouvement et les déformations de surface de la zone d'intérêt. Un calcul en réseau permet d'estimer les déplacements des onze récepteurs placés sur la glace par rapport au référentiel fixe imposé par la référence établie sur la rive droite du glacier. L'étude des vitesses mesurées (Fig. 3.20) fait apparaître au premier ordre un déplacement en bloc de l'ensemble de la zone étudiée à une vitesse moyenne de 15cm/jour, soit un déplacement de 75cm en cinq jours.

Cependant, au second ordre, on remarque l'existence d'hétérogénéités de vitesse au sein de la zone d'étude. Les Geocubes placés au centre du glacier présentent en effet une vitesse 7.5% supérieure à celle des récepteurs les plus lents situés en marge des zones latérales crevassées.
Ces hétérogénéités de vitesse induisent des déformations au sein de la zone. De telles déformations ont été observées de longue date sur les glaciers et quantifiées à l'aide de tenseurs de déformations [Nye, 1959] [Harper et al, 1998](Annexe. E). Le positionnement GPS, en permettant l'estimation de positions précises, rend pour sa part possible le calcul de tenseurs de déformations en intégrant les déplacements sur de courtes durées [Janssen, 2009]. Nous proposons ici de calculer les déformations à partir des déplacements relatifs mesurés par notre réseau de Geocubes du 14/09 au 18/09/2013 (Fig. 3.25). Les tenseurs de déformations calculés ont été superposés à une orthophotographie dérivée d'images satellite haute résolution (système Pléiades) acquises le 20/09/2013, c'est à dire de manière quasi-synchrone avec les mesures GPS. La figure 3.20 montre alors que l'axe d'extension des tenseurs de déformation est perpendiculaire à la direction des crevasses bordant

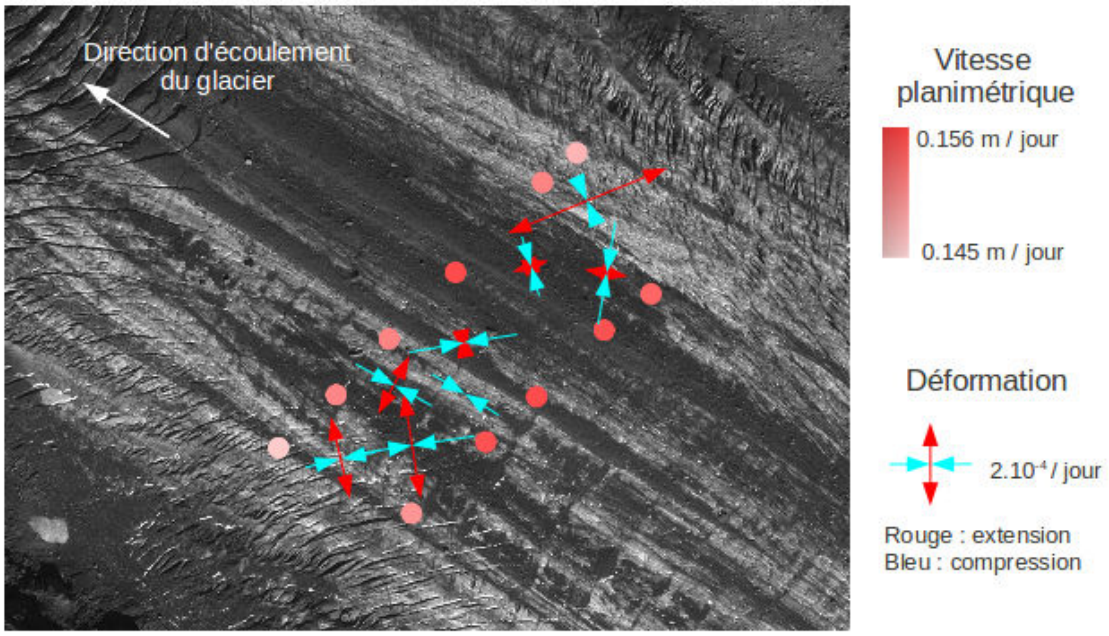

FIGURE 3.20 – Vitesses et déformations mesurées du 14 au 18/09/2013.

la zone d'étude. Cette observation tend à montrer que les crevasses latérales sont générées par les hétérogénéités de mouvement mesurées [Harper et al, 1998], et en particulier par la vitesse plus élevée mesurée au centre du glacier. La concentration de zones fortement crevassées aux bords du réseau de Geocubes (Fig. 3.13) semble confirmer ce résultat.

Processus hydrauliques basaux commandant l'écoulement du glacier d'Argentière

Le glacier d'Argentière est un glacier tempéré, ce qui signifie que toute l'épaisseur du glacier possède une température proche du point de fusion de la glace, soit environ 0^oC. L'écoulement des glaciers tempérés est dû au glissement de la glace sur le lit du glacier avec très peu de déformations verticales [Van Vliet-Lanoë, 2013]. Cet écoulement gravitaire provoqué par la masse du glacier en déséquilibre est fonction de cette masse, de la pente du lit du glacier et du coefficient de frottement de la glace sur le socle stable. Si la masse et la pente topographique du lit du glacier restent constants sur une courte période comme celle étudiée ici, conduisant à une vitesse moyenne observée stable d'environ 15cm/jour (Fig. 3.20 et Fig. 3.23), le coefficient de frottement basal peut connaître des variations de courte période conduisant à des accélérations/décélérations soudaines de la vitesse d'écoulement [Moreau, 2009]. Il est commandé par le stockage et l'écoulement d'eau liquide à la base du glacier [Harper et al, 2007] et des modifications de ces paramètres produisent des variations de la vitesse d'écoulement du glacier.
L'eau présente sous le glacier est issue de la fonte du manteau neigeux, de la fonte de la glace en surface, ou encore de précipitations sous forme de pluie affectant le bassin hydrographique qui alimente le glacier. Cette eau liquide atteint la base du glacier par écoulement dans les crevasses ou les moulins [Moreau, 2009]. Elle est ensuite stockée dans des cavités sous-glaciaires (Fig. 3.21) ou évacuée par l'intermédiaire de conduits de drainage qu'elle creuse par son écoulement.

Lorsqu'une faible chute de pluie se produit, l'eau est stockée dans les cavités ou s'écoule librement dans le réseau de conduits de drainage préexistants (Fig. 3.22). La vitesse d'écoulement du glacier n'est alors pas impactée, car l'eau ainsi stockée ou évacuée n'atteint pas l'interface glace/roche et ne modifie donc pas le frottement du glacier sur son lit. Au contraire, à partir d'un certain seuil, la quantité d'eau à évacuer excède la capacité de stockage des cavités et le débit maximal des conduits de drainage. Le réseau hydraulique sous-glaciaire sature alors, ce qui provoque une augmentation de la pression d'eau dans les conduits et les cavités, ainsi qu'un léger décollement du glacier de son lit qui entraînent finalement l'injection d'eau à l'interface de la glace et du lit du glacier [Harper et al, 2007]. Cette augmentation de la présence d'eau, d'abord à

FIGURE 3.21 – Cavité de décollement sous-glaciaire, glacier d'Argentière (*photo : L.Moreau*).

proximité du réseau hydraulique puis à plus grande échelle, conduit à la diminution du frottement du glacier sur son socle, ce qui entraîne l'accélération de son écoulement (Fig. 3.22) qui peut être mesuré en surface, par exemple par un réseau de Geocubes.
La vitesse d'écoulement du glacier diminue ensuite soit par la baisse du volume d'eau atteignant la base du glacier (diminution des précipitations ou de la fonte), soit par le creusement d'un réseau plus important de conduits de drainage (Fig. 3.22). Les deux phénomènes se superposent fréquemment mais conduisent au même effet : la pression d'eau à l'interface glace/roche diminue, ce qui entraîne un ralentissement de l'écoulement du glacier et le retour progressif à une vitesse d'écoulement proche de celle précédant l'évènement.
Au creusement du réseau de drainage sous glaciaire, intervenant quand une grande quantité d'eau est présente à la base du glacier, succède une phase pendant laquelle les conduits et les cavités se déforment ou se referment peu à peu sous l'effet de la déformation du glacier provoquée par son écoulement (Fig. 3.22). L'espacement entre deux épisodes d'accélération influence donc la capacité du réseau de drainage à évacuer l'eau et fait alors varier le seuil de déclenchement de l'accélération.

Les processus hydrauliques basaux décrits ci-dessus de façon générale varient pour chaque glacier en fonction de nombreux paramètres. Citons par exemple la topographie du lit, sa composition ou encore la structure de la glace basale. Les phénomènes impliqués, pourtant prépondérants pour la compréhension de la dynamique des glaciers, sont encore relativement mal documentés. Ils sont en effet extrêmement difficiles à observer directement, car ils se produisent sous le glacier, donc dans des zones inaccessibles. Les vitesses de surface, mises en relation avec des observations de débit d'eau en entrée et en sortie du réseau hydraulique glaciaire, constituent alors un outil de caractérisation indirecte des processus hydrauliques basaux indispensable à leur compréhension. L'utilisation d'un réseau de Geocubes peut alors fournir des observations précises de la vitesse de surface en de nombreux points, ce qui s'avère très utile pour étudier les processus basaux.
Notons que le site du glacier d'Argentière constitue un cas exceptionnel où la base du glacier est accessible en un point grâce à un tunnel creusé sous le glacier, ce qui a rendu possible différentes études impliquant des mesures sous glaciaires [Moreau, 1995] [Richon et al, 2012].

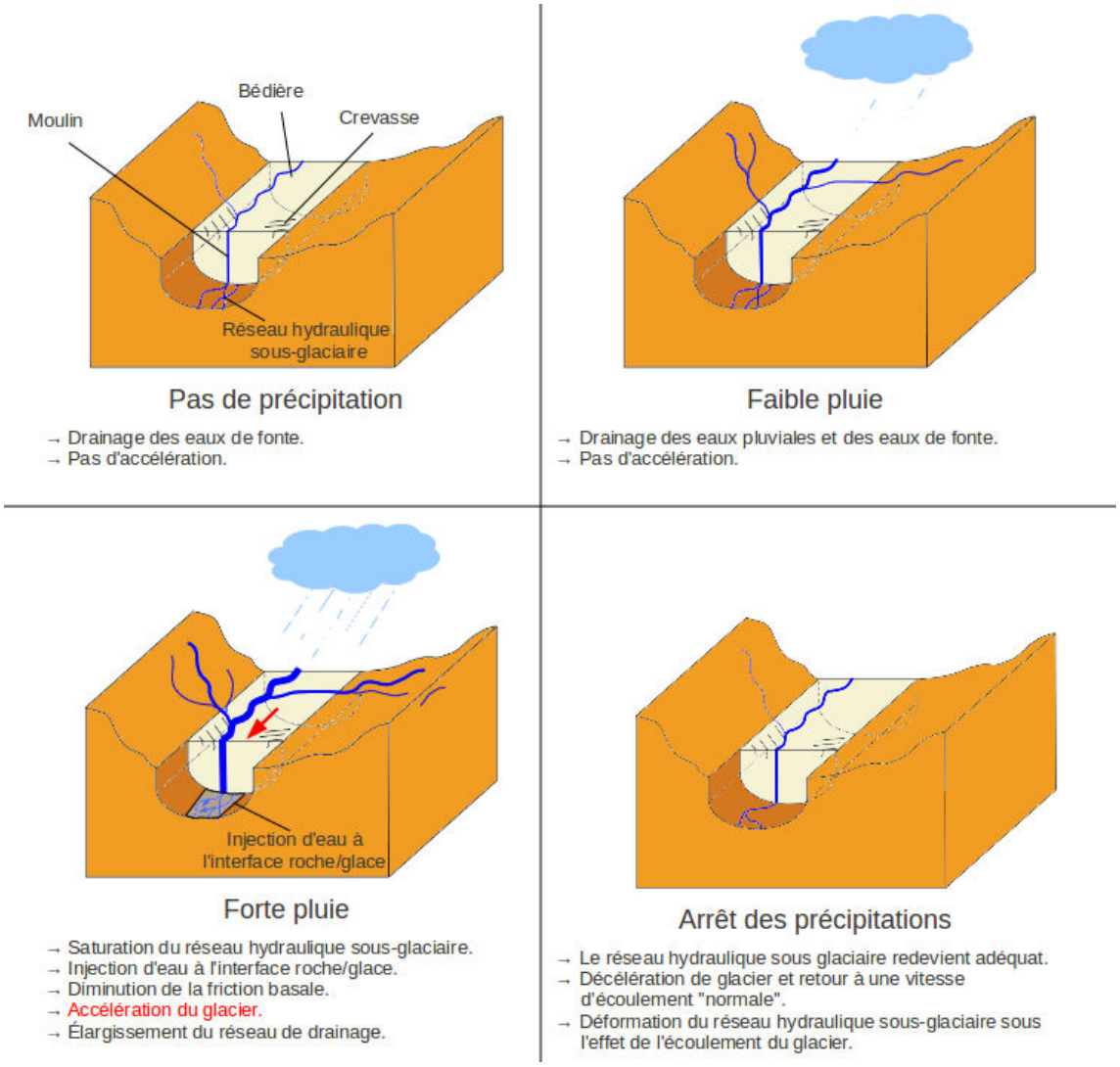

FIGURE 3.22 – Schéma des processus hydrauliques responsables de la variation de la vitesse d'écoulement d'un glacier tempéré.

Etude des variations temporelles de l'écoulement du glacier

La redondance des récepteurs au sein d'un réseau de Geocubes permet l'acquisition de données sur la zone d'étude y compris lorsque certains récepteurs cessent de fonctionner correctement. Dans le cas du suivi du glacier d'Argentière cette redondance a été d'un grand secours, car les difficultés d'instrumentation du site ont conduit à l'indisponibilité de nombreuses données. Parmi les 11 récepteurs fixés sur la glace, un seul a fonctionné correctement pendant toute la durée de l'expérience. Comme les vitesses mesurées aux différents points de la zone d'étude diffèrent peu (Fig. 3.20), les données de cet unique récepteur sont toutefois suffisantes pour étudier les variations temporelles de l'écoulement du glacier pour la zone considérée.
Les mesures de ce récepteur actif tout au long de la session ont été traitées en ligne de base isolée en utilisant la référence fixée sur la rive droite du glacier qui a également acquis des données de qualité pendant cette période. Des vitesses calculées sur une période d'un jour sidéral sont dérivées des positions brutes pour étudier les variations temporelles de l'écoulement du glacier (Fig. 3.23). Ici les séries temporelles de vitesse présentent une grande précision et une grande résolution temporelle qui sont indispensables pour suivre les variations de courte période ou de faible amplitude de la vitesse d'écoulement.

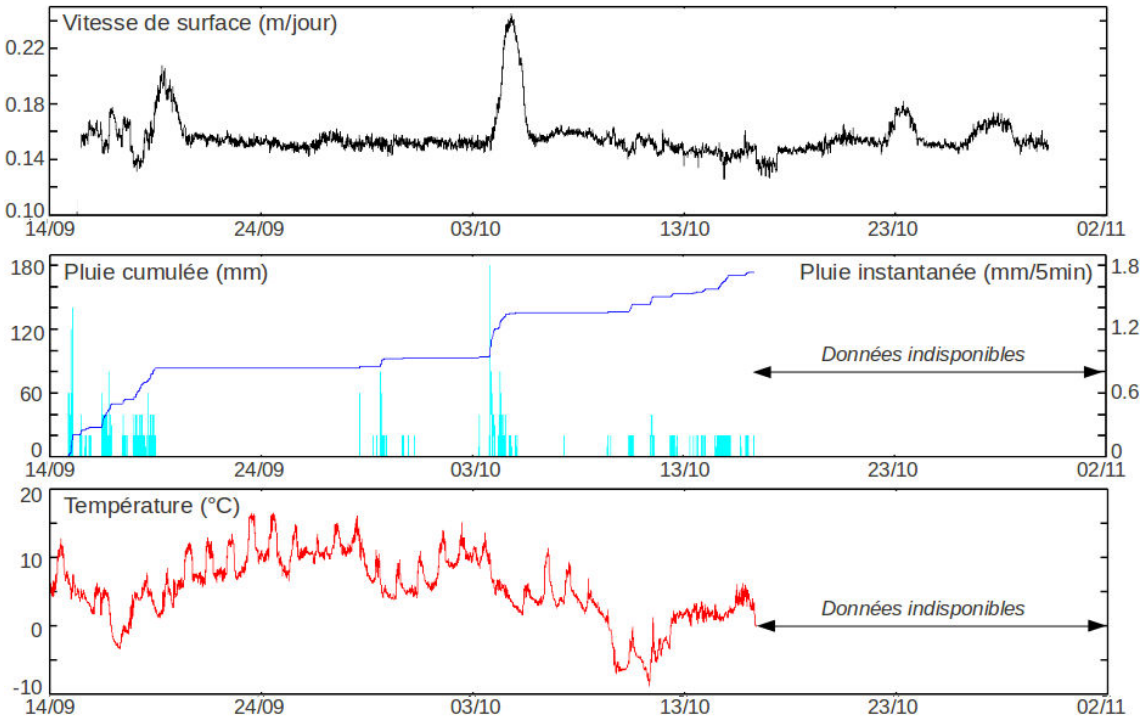

FIGURE 3.23 – Variations temporelles de la vitesse de surface du glacier d'Argentière et leur corrélation avec des paramètres météorologiques.
Les données météorologiques ont été enregistrées à proximité de la référence située sur la rive droite du glacier et nous ont été fournies par Gaiasens SARL.

Les résultats obtenus (Fig. 3.23) montrent que le glacier possède une vitesse d'écoulement quasiment constante d'environ 15cm/jour tout au long de la session, à l'exception de brusques accélérations suivies d'un rapide retour à la normale les 19/09, 5/10, 23/10 et 28/10. Lors de l'accélération la plus importante (05/10), la vitesse de surface atteint 24cm/jour, soit 160% de sa valeur habituelle.
Ces variations de vitesse de la surface du glacier sont mises en relation avec les paramètres météorologiques mesurés sur le site. Pour suivre ces paramètres, une station météo identique à celle utilisée à Super-Sauze (Fig. 3.4) a été ajoutée au Geocube situé sur la rive droite du glacier. Les données acquises par cette couche capteur ont été complétées par une station météo installée à proximité par la société Gaiasens SARL. Ici nous présentons essentiellement les données de cette seconde station qui fournit des résultats plus complets. La comparaison de la vitesse du glacier avec les paramètres météorologiques mesurés montre alors que les accélérations constatées apparaissent à la suite de fortes pluies. Au contraire, les faibles précipitations des 29/09 et 8-16/10 ne provoquent pas de variations de la vitesse de surface du glacier dépassant l'amplitude du bruit de mesure, soit environ 1cm/jour. Il apparait donc qu'un épisode pluvieux d'au moins 30mm cumulés sur une courte période est nécessaire pour déclencher une accélération du glacier. Les températures ont pour leur part une faible influence sur les variations à court terme de l'écoulement du glacier, bien que ce paramètre soit connu pour influencer les variations à plus longue période [Harper et al, 2007]. Cependant, la baisse des températures à partir du 8/10 semble produire une légère décélération de la vitesse du glacier, peut être en tarissant les apports en eau de fonte au réseau hydraulique sous-glaciaire. Les variations de vitesse du glacier au cours de notre expérience sont toutefois très majoritairement commandées par les précipitations.
Ces variations de la vitesse d'écoulement commandées par les précipitations s'expliquent par les processus hydrauliques régnant à la base du glacier présentés précédemment. Les observations réalisées ici permettent alors d'affiner la compréhension du phénomène. En particulier l'évaluation des seuils de précipitation nécessaires à l'accélération du glacier ainsi que la détermination de son

temps de réponse aux fortes pluies fournissent des paramètres intéressants pour l'étude de l'hydrologie sous-glaciaire.
Le suivi du principal évènement d'accélération intervenant les 3-4-5/10 permet d'étudier plus précisément cette corrélation pluie/accélération et le temps de réponse du glacier à une pluie intense. La figure 3.24 montre alors que deux épisodes de pluie distincts provoquent une accélération en deux temps qui aboutit à la vitesse particulièrement élevée observée du 4/10 à 12h au 5/10 à 0h. Les accélérations interviennent environ 2h après le début de chaque épisode pluvieux et la décélération commence environ 6h après la fin du dernier épisode pluvieux majeur. On remarque que les faibles pluies de la nuit du 4 au 5/10 ne sont pas suffisantes pour enrayer la baisse de la vitesse du glacier.

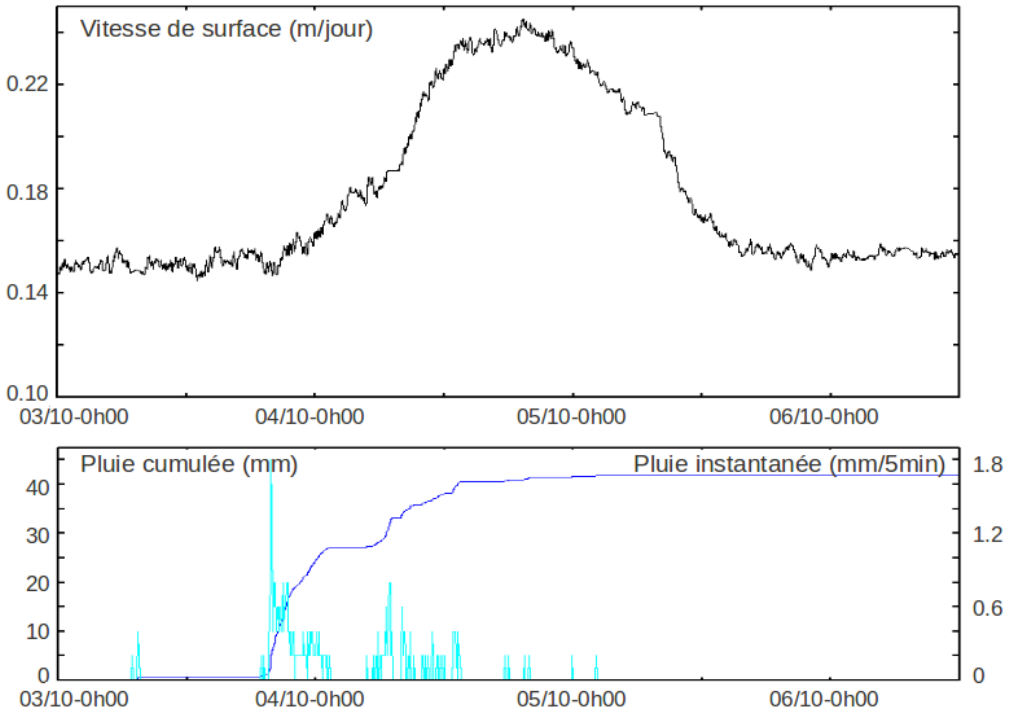

FIGURE 3.24 – Variations temporelles de la vitesse de surface du glacier d'Argentière lors de l'accélération des 3-4-5/10/2013.

Etude spatio-temporelle des déplacements de surface

Différents jeux de données sont utilisés pour caractériser les variations spatio-temporelles des déplacements de surface du glacier, en particulier lors des phases d'accélération suivant les fortes pluies automnales. Un jeu de données de 12 jours concernant cinq récepteurs est tout d'abord utilisé pour calculer des vitesses moyennes sur 12h et étudier au premier ordre les évolution spatio-temporelles de la vitesse du surface (Fig. 3.25). Les résultats montrent que la vitesse de l'ensemble des points de la surface du glacier connaît de fortes variations au cours de la première moitié de la session, en réponse aux pluies se produisant pendant la période, alors qu'elle reste stable au cours la seconde moitié de la session. Les variations de vitesse observées touchent indistinctement l'ensemble des récepteurs présents sur le glacier qui semble alors accélérer ou ralentir sans variation notable du taux de déformation au sein de la zone surveillée. Ceci confirme la pertinence d'utiliser un unique récepteur pour étudier les variations temporelles de grande amplitude de la vitesse d'écoulement du glacier sur toute la zone considérée comme nous l'avons fait précédemment.

Cependant, un examen approfondi des variations de vitesse calculées avec une résolution temporelle de 30sec pour tous les récepteurs actifs lors des accélérations du glacier des 18-20/09 et 4-7/10 permet de remarquer que les accélérations ne suivent pas exactement le même modèle ni le même timing pour les différents points (Fig. 3.26).

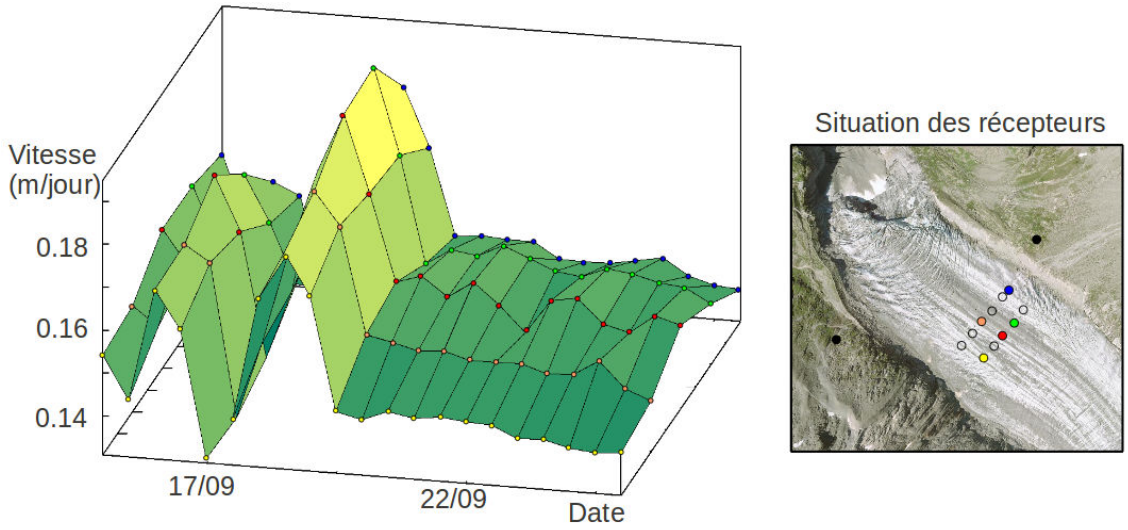

FIGURE 3.25 – Variations spatio-temporelles de la vitesse de surface mesurée du 14 au 25/09/2013.

Il apparait que les deux récepteurs placés sur les moraines centrales du glacier subissent une accélération succédant les épisodes pluvieux intenses retardée de quelques heures par rapport aux points situés sur le reste du glacier. Il est frappant de constater que les points situés hors de ces moraines présentent tous un modèle d'évolution extrêmement similaire, uniquement modulé par l'amplitude des déplacements dictée par l'éloignement des récepteurs aux rives (Fig. 3.26), alors que les récepteurs sur les moraines, pourtant entourés de récepteurs au comportement semblable au travers de toute la zone surveillée, présentent des modèles d'accélération/décélération différents. Cette observation est confirmée par l'examen des modèles d'évolution de la vitesse des quelques récepteurs actifs sur la période du 3-8/10. Dans ce second cas les modèles d'accélération/décélération sont encore plus dissemblants entre les récepteurs situés ou non sur les moraines centrales, surement à cause de la plus grande amplitude de l'accélération du glacier pendant cette période. L'existence des moraines centrales modifie donc localement le modèle d'évolution de la vitesse de la surface du glacier, peut être à cause de la surcharge qu'elles exercent sur le lit du glacier, de leur effet sur le réseau de drainage sous-glaciaire, ou de la structure de la glace sous ces moraines. Des données externes supplémentaires (topographie et nature du lit, structure locale de la glace...) sont toutefois nécessaires pour expliquer rigoureusement ce phénomène très peu documenté mis en lumière ici par notre réseau de Geocubes.

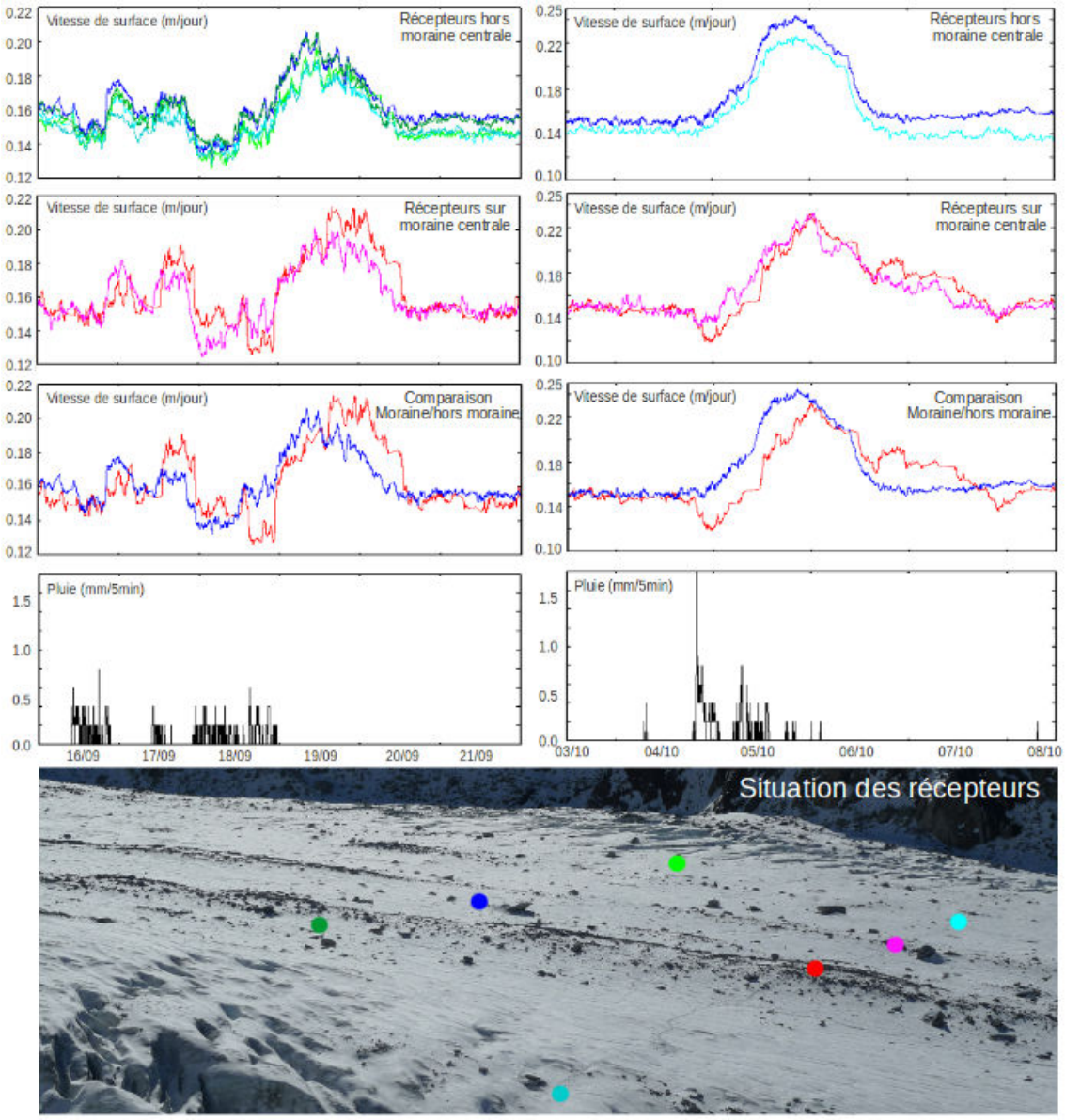

FIGURE 3.26 – Effet de la localisation du point de mesure sur les variations temporelles de la vitesse de surface.

3.3.4 Bilan : apport des Geocubes à l'étude des glaciers

Ce second déploiement d'un réseau de Geocubes était focalisé sur la mesure des déformations et de la dynamique du glacier d'Argentière. Ce cas d'étude présente des mouvements proches de la limite de l'hypothèse quasi-statique nécessaire au bon fonctionnement des algorithmes de calcul, et des conditions climatiques difficiles pour les récepteurs réalisant les mesures. Les résultats obtenus montrent un fonctionnement correct du réseau de Geocubes et le traitement des données acquises permet sans problème la mesure des déplacements de la surface du glacier qui varient de 15 à 25cm/jour. La composante de surveillance topographique d'un réseau de Geocubes constitue donc un outil performant pour le suivi des glaciers et complète avantageusement les solutions GNSS existantes.

Pour une application à l'étude des glaciers, les Geocubes présentent l'avantage de réaliser des mesures in-situ et permettent de vérifier, grâce à l'usage d'inclinomètres inclus dans les récepteurs, que l'implantation de ces derniers reste correcte au cours du temps. Ceci assure que la position mesurée se rapporte à un point bien défini et invariant de la surface d'intérêt. Des déplacements

et des vitesses fiables peuvent alors être dérivées des séries temporelles de positions, alors que la surface du glacier connaît des évolutions au cours du temps telles qu'un changement d'aspect induit par la fonte ou un changement de géométrie induit par les déformations.
D'autre part la densité du réseau déployé, rendue possible par la facilité d'installation et le faible coût unitaire des récepteurs, permet de mesurer les hétérogénéités de vitesse à la surface du glacier qui sont induites par les caractéristiques de son écoulement. La précision du résultat rend même possible le calcul des déformations provoquées par ces hétérogénéités ainsi que leurs variations au cours du temps.
Enfin, la grande résolution temporelle des séries de positions et de vitesse obtenues permet une excellente datation des variations de vitesse d'écoulement du glacier. Cette information, couplée à la mesure des paramètres météorologiques qui commandent les variations d'écoulement, permet d'expliquer la dynamique du glacier à des échelles de temps infra-journalières.

3.4 Synthèse de l'apport des réseaux de Geocubes à l'étude d'objets géophysiques

L'expérience de l'étude d'un glissement de terrain et d'un glacier, ainsi que l'analyse des capacités du système développé permettent de caractériser le type d'objet cible et d'établir l'apport des réseaux de Geocubes à la surveillance topographique de ces objets.
Pour un fonctionnement optimal de la composante de positionnement des Geocubes, le réseau doit être d'étendue limitée avec des distances inter-récepteurs inférieures au kilomètre et inclure des références stables. Les Geocubes sont alors particulièrement adaptés à l'étude de petites zones en mouvement entourées d'un environnement immobile, le plus souvent un socle rocheux comme dans les exemples étudiés ici. Dans le cas d'objets remplissant ces deux conditions, les réseaux de Geocubes permettent trois apports majeurs pour la caractérisation de la surface de la zone active :

1) Une mesure de positionnement in-situ avec une grande résolution spatiale.
Cette mesure est rendue possible par :
- Le faible coût unitaire des récepteurs.
- Un déploiement facile et rapide du réseau.
- Un calcul en réseau optimisé (compression des données) qui aboutit à un résultat cohérent pour l'ensemble des déplacements mesurés.

Elle permet alors :
- La mesure des hétérogénéités de mouvements au sein de l'objet.
- Le calcul des déformations internes de l'objet.
- L'introduction d'une redondance dans les mesures.

2) Une mesure de positionnement précise avec une grande résolution temporelle.
Cette mesure est rendue possible par :
- L'utilisation de très courtes lignes de base éliminant la quasi-totalité des biais spatialement corrélés.
- Le développement de méthodes d'atténuation de l'effet des multitrajets.
- L'utilisation d'un filtre de Kalman qui permet le calcul d'une solution époque par époque.

Elle permet alors :
- La datation précise des variations de vitesse de faible amplitude.
- L'étude des variations spatio-temporelles des déplacements et des déformations.

3) Une mesure de positionnement co-localisée avec la mesure d'autres paramètres physiques.
Cette mesure est rendue possible par l'ajout modulaire de capteurs aux Geocubes.
Elle permet alors :
- L'explication des déplacements observés.
- La fiabilisation de la mesure de déplacements grâce à l'ajout aux Geocubes de capteurs vérifiant que les mesures GPS sont effectuées dans de bonnes conditions.

Finalement, dans le domaine de la géophysique, les Geocubes sont particulièrement adaptés à

l'étude d'objets complexes de petite taille, soumis à des mouvements hétérogènes dans le temps et l'espace et dont l'évolution est commandée par un grand nombre de paramètres environnementaux. Les principales cibles sont alors les instabilités de pente telles que les falaises, les éboulements ou les glissements de terrain, ainsi que les glaciers de type glaciers alpins.
La mesure fréquente de déplacements de surface précis et fiables en de nombreux points de ces objets permet une caractérisation fine de leur surface topographique. Cette donnée peut alors être traitée comme un paramètre d'intérêt à part entière et être interprétée grâce aux mesures complémentaires fournies par les autres capteurs des Geocubes, ou constituer une observable parmi d'autres alimentant un modèle physique de l'objet étudié.

Conclusion et perspectives

Conclusion

Cette thèse portait sur la mise au point de la composante de surveillance topographique du système Geocube. Il s'agissait donc de concevoir, implémenter et tester un logiciel de traitement GPS en temps-réel adapté au cas de récepteurs mono-fréquence déployés en réseaux de taille kilométrique et communiquant entre eux par une liaison sans fil.

A rebours des développements actuels dans le domaine des GNSS, focalisés sur le positionnement en point isolé type PPP et sur une modélisation toujours plus poussée des sources d'imprécision inhérentes aux GNSS, nous avons choisi ici de privilégier un positionnement différentiel en réseau. Ce choix s'explique par la structure des chantiers visés qui rendent la différentiation extrêmement efficace grâce aux très courtes lignes de base envisagées, et par l'utilisation de récepteurs mono-fréquence qui imposent une différentiation des biais ionosphériques pour suppléer à l'absence d'une seconde fréquence lors de l'acquisition des données GPS. Le choix d'un positionnement relatif permet alors une très grande simplification des calculs, la différentiation éliminant quasi-totalement l'ensemble des sources d'imprécision spatialement corrélées. Un filtre de Kalman étendu a été choisi pour estimer simultanément l'ensemble des positions des récepteurs dans un calcul en réseau époque par époque utilisant des doubles différences comme observations. Les multitrajets, spatialement décorrélés, constituent la principale source d'imprécision entachant le résultat de ce calcul. Différentes méthodes d'atténuation de l'effet des multitrajets dans les séries temporelles de position ont donc été développées en portant une attention particulière à leur performance dans le cas de l'étude de mouvements de faible amplitude. Une fois corrigées des multitrajets, les séries temporelles de positions présentent une précision infra-centimétrique combinée à une grande résolution temporelle, égale au pas d'acquisition des mesures brutes. Le calcul en réseau permet de plus d'obtenir un résultat fiable et cohérent en de nombreux points mesurés par un réseau dense de Geocubes.

Après l'obtention d'une stratégie de calcul générant des résultats compatibles avec les spécifications de la surveillance topographique par un réseau de Geocubes, la méthode développée a été adaptée au matériel utilisé et aux contraintes de la surveillance. Pour cela le traitement a tout d'abord été centralisé au niveau du coordinateur, petit ordinateur de terrain présent sur le site à surveiller, afin de suppléer à la faible puissance de calcul des Geocubes. Ensuite, une méthode de compression des données dédiée aux mesures GPS brutes collectées par les Geocubes a été implémentée. Combinée au calcul époque par époque elle permet un positionnement en temps-réel de l'ensemble des Geocubes du réseau. Enfin, un mode d'acquisition et de traitement de données discontinues a été mis au point afin de permettre un fonctionnement du réseau extrêmement sobre en énergie dans le cas particulier du suivi de mouvements lents ou réguliers.

Une fois implémentée sous une forme compatible avec les réseaux de Geocubes, la méthode de surveillance topographique mise au point a été testée au travers de l'étude de deux objets géophysiques : le glissement de terrain de Super-Sauze et le glacier d'Argentière. L'utilisation de réseaux de Geocubes au cours de ces deux études a fourni des observations novatrices de la dynamique des objets considérés, qui illustrent les potentialités du système Geocube. Elles sont caractérisées par :

- Une densité de points de mesure très élevée pour un système GNSS qui place les réseaux de Geocubes à mi-chemin entre les mesures ponctuelles des récepteurs GNSS géodésiques et

les mesures denses des méthodes de type LIDAR ou photogrammétrie. Un tel maillage de l'objet étudié permet de suivre les hétérogénéités de mouvements en son sein ainsi que ses déformations internes.
- Une grande résolution temporelle couplée à une grande précision qui permettent la datation précise d'évènements dans les séries temporelles de position ainsi que l'étude de phénomènes transitoires à une échelle infra-journalière.
- Une intégration des mesures de déplacements mesurées par GPS dans un ensemble plus vaste de paramètres physiques grâce à l'aptitude multi-capteurs du Geocube qui rend la mesure de déplacement moins 'aveugle' et permet ainsi d'expliquer ou de fiabiliser les mesures de déplacement effectuées.

Ces données collectées par les réseaux de Geocubes déployés au cours de cette thèse ont alors permis la mesure de deux phénomènes rarement documentés :
- La mesure de la ré-activation du glissement de terrain de Super-Sauze uniquement par saturation en eau des couches superficielles de la coulée.
- Le suivi précis de la chronologie des accélérations/décélérations du glacier d'Argentière sous l'effet de fortes pluies automnales et la mise en évidence de modèles d'accélération différents en fonction de la localisation à la surface du glacier.

Finalement cette thèse a permis de démontrer la faisabilité d'un positionnement relatif précis et en temps réel de Geocubes au sein d'un réseau local, d'évaluer les capacités d'un tel système et de montrer l'apport de ce nouvel outil de surveillance topographique au travers de tests conduits sous la forme d'études géophysiques de petites structures naturelles. Les développements réalisés, basés sur la version des Geocubes de 2010 (équipés de GPS mono-fréquence et de liens radio de faible portée), permettent un fonctionnement optimal limité à des réseaux de dimensions inférieures au kilomètre et nécessitent un opérateur spécialisé pour paramétrer et gérer les calculs.

Perspectives

En partant du noyau développé au cours de cette thèse, d'ores et déjà opérationnel, des développements supplémentaires permettraient d'étendre les capacités des Geocubes dans le domaine de la surveillance. Trois domaines d'investigation nous semblent particulièrement prometteurs :

Passer du GPS au GNSS en intégrant des puces GNSS dans les Geocubes et en utilisant les mesures des constellations additionnelles dans le logiciel de calcul. Ceci permettrait de disposer de plus d'observations et améliorerait ainsi la précision des résultats bruts et le temps de recherche des positions approchées. Par contre les périodes de revisite différentes pour chaque constellation nécessiteraient d'explorer des méthodes alternatives à la correction sidérale pour l'atténuation des multitrajets. Cette évolution est malheureusement actuellement bloquée par l'absence sur le marché de puce à bas coût combinant des mesures GNSS et une capacité de datation précise d'évènements externes pourtant indispensable à l'adaptation de couches capteurs aux Geocubes.

Agrandir la taille des réseaux potentiels en intégrant aux Geocubes un moyen de communication de plus longue portée que l'actuel module radio ou en optimisant l'utilisation de récepteurs relais pour le transfert des données. Cet allongement des lignes de base nécessiterait alors une adaptation du logiciel de calcul pour pallier la dégradation de la différentiation. L'intégration de quelques récepteurs bi-fréquence fixes entourant le chantier permettant de calculer des corrections ionosphériques et troposphériques locales pourrait être une réponse à cette problématique. Le gain d'un ordre de grandeur sur l'étendue des réseaux semble possible et la longueur maximale des lignes de base tolérées pourrait alors être portée à environ 10km. Ceci ouvrirait alors la porte à de nouvelles applications des réseaux de Geocubes. Dans le domaine de la géophysique, la surveillance de volcans pourrait par exemple être envisagée.

Permettre une surveillance automatique et continue de zones à risque. Ceci demande tout d'abord d'améliorer la fiabilité du coordinateur. Sa connexion internet devrait être améliorée et son fonctionnement en continu devrait être assuré par une meilleure adéquation entre sa consommation et son alimentation. Ceci permettrait déjà un fonctionnement fiable du module temps-réel actuel. Ensuite, ce module de positionnement en temps-réel pourrait être simplifié pour permettre une utilisation par des opérateurs non spécialistes, ce qui nécessiterait une définition rigoureuse de cas d'utilisations particuliers et la création de modèles de traitements adaptés. Enfin, la mise au point d'une procédure de déclenchement automatique d'alarmes lorsqu'un mouvement suspect se produit serait un plus, mais nécessiterait un important développement sur la détection automatique de mouvements dans des séries temporelles bruitées.

Cette dernière piste d'amélioration est actuellement en cours de réalisation au travers d'un processus d'industrialisation du Geocube pour en faire un système de surveillance d'ouvrages d'art et de zones à risques. L'obtention d'un système simple à déployer et à utiliser, faisant preuve d'un fonctionnement stable et continu sur de longues périodes et fournissant des résultats d'une précision comparable à ceux présentés dans cette thèse, mais sans recours à un opérateur spécialisé serait l'aboutissement d'un difficile travail de passage d'un prototype de recherche à un outil de production. Elle serait également la preuve d'une industrialisation réussie et sans aucun doute la clef du succès de ce nouveau Geocube.

Bibliographie

[Avian et al, 2009] Avian M., Kellerer-Pirklbauer A, Bauer A., LiDAR for monitoring mass movements in permafrost environments at the cirque Hinteres Langtal, Austria, between 2000 and 2008, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2009, 9, 1087-1094

[Agnew and Larson, 2007] Agnew D., Larson K., Finding the repeat times of the GPS constellation, *GPS Solutions*, 2007, 11, 71-76

[Beilin, 2011] Beilin J., Calcul de la position d'un satellite GPS à partir du message de navigation, *cours à l'Ecole Nationale des Sciences Geographiques*, 2011

[Bergeot et al, 2011] Bergeot N., Bruyninx C., Defraigne P., Pireau S., Legrand J., Pottiaux E., Baire Q., Impact of the Halloween 2003 ionospheric storm on kinematic GPS positioning in Europe, *GPS Solutions*, 2011, 15, 171-180

[Berthier, 2005] Berthier E., Dynamique et bilan de masse des glaciers de montagne (Alpes, Islande, Himalaya) : contribution de l'imagerie satellitaire, *Thèse de doctorat - Université Toulouse III - Paul Sabatier*, 2005

[Bertiger et al, 2010] Bertiger W., Desai S.D., Haines B., Harvey N., Moore A.W., Owen S., Weiss J.P., Single receiver phase ambiguity resolution with GPS data, *Journal of Geodesy*, 2010, 84, 327-337

[Blewitt, 1989] Blewitt G., Carrier Phase Ambiguity Resolution for the Global Positioning System Applied to Geodetic Baselines up to 2000km, *Journal of Geophysical Research*, 1989, 94, 187-203

[Bock et al, 2013] Bock O., Bosser P., Bourcy T., David L., Goutail F., Hoareau C., Keckhut P., Legain D., Pazmino A., Pelon J., Pipis K., Poujol G., Sarkissian A., Thom C., Tournois G., Tzanos, D., Accuracy assessment of water vapour measurements from in situ and remote sensing techniques during the DEMEVAP 2011 campaign at OHP, *Atmos. Meas. Tech.*, 6, 2777-2802, doi :10.5194/amt-6-2777-2013, 2013

[Boehm and Schuh, 2003] Boehm J., Schuh H., Vienna Mpping Functions, *16th Working Meeting on European VLBI for Geodesy and Astrometry*, 2003

[Bosser, 2008] Bosser 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 - Université Pierre et Marie Curie*, 2008

[Bosser, 2009] Bosser P., Le système GPS, *cours à l'Ecole Nationale des Sciences Geographiques*, 2009

[Buchli et al, 2012] Buchli B., Sutton F., Beutel J., GPS-Equipped Wireless Sensor Network Node for High-Accuracy Positioning Applications, *9th European Conference on Wireless Sensor Networks*, 2012

[Cattin and Brahier, 2011] Cattin P., Brahier J., Géomonitorage par GPS avec des équipements à faible coût, *Géomatique Suisse*, 2011, 06/2011, 306-308

[Cavalié, 2011] Cavalié O, Mesures InSAR et modélisation de faibles de déformations d'origine anthropique (lac de Mead, USA) ou tectonique (faille de Haiyuan, Chine), *Thèse de doctorat - Université Paris XI*, 2011

[Chenal, 2014] Chenal J., Introduction aux techniques de la géogésie spatiale, *cours à l'Ecole Nationale des Sciences Geographiques*, 2014

[Choi et al, 2004] Choi K., Bilich A., Larson K., Axelrad P., Modified sidereal filtering : Implications for high-rate GPS positioning, *Geophysical Research Letters*, 2004, 31, doi :10.1029/2004GL021621

[Collins and Langley, 1999] Collins J.P, Langley R.B, Possible weighting schemes for GPS carrier phase observations in the presence of multipath, *Technical report, U.S. Army Corps of Engineers Topographic Engineering Center*, 1999, 1-40

[Cosser et al, 2004] Cosser E., Robert G., Meng X., Dodson A., Single Frequency GPS for Bridge Deflection Monitoring : Progress and Results, *1st FIG International Symposium on Engineering Surveys for Construction Works and Structural Engineering*, 2004

[Dach et al, 2007] Dach R., Hugentobler U., Fridez P., Meindl M., Bernese GPS Software Version 5.0, *Notice, Astronimical Institute, University of Bern*, 2007, 612p

[Dietrich et al, 2007] Dietrich R., Maas H., Baessler M., Rülke A., Richter A., Schwalbe E., Westfeld P., Jakobshavn Isbræ, West Greenland : Flow velocities and tidal interaction of the front area from 2004 field observations, *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112, doi :10.1029/2006JF000601

[Dodson et al, 2001] Dodson A., Meng X., Roberts G., Adaptive Methods for Multipath Mitigation and Its Applications for Structural Deflection Monitoring, *International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation*, 2001

[Eissa, 2011] Eissa L., Utilisation des méthodes de l'astrogéodésie et de la géodésie spatiale pour des études de déformation de l'écorce terrestre : Représentation des déformations et de leur degré de significativité par un champ régulier de tenseurs, *Thèse de doctorat - Université Paris Est*, 2011

[Elosegui et al, 1995] Elosegui P., Davis J.L., Jaldehag R.T.K., Johansson J.M., Niell A., Shapiro I.I., Geodesy using the Global Positioning System : The effects of signal scattering on estimates of site position, *Journal of Geophysical Reasearch*, 1995, Doi :100 :9921-9934

[Fallour et al, 2010] Fallour R., Vernier F., Friedt J., Martin G., Trouvé E., Moreau L., Nicolas J.M, Monitoring temperate glacier with high resolution automated digital cameras – application to the argentière glacier, *IAPRS, Vol. XXXVIII, Part 3B – Saint-Mandé, France, September 1-3, 2010*, 2010

[Fallour et al, 2011] Fallour R., Harant O., Trouvé E., Nicolas J.M, Gay M., Walpersdorf A., Mugnier J.L, Serafini J., Rosu D., Bombrum L., Vasile G., Cotte N., Vernier F., Tupin F., Moreau L., Bolon, P, Monitoring Temperate Glacier Displacement by Multi-Temporal TerraSAR-X Images and Continuous GPS Measurements, *IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN APPLIED EARTH OBSERVATIONS AND REMOTE SENSING*, 2011, 4, 372 - 386

[Ge et al, 2000] Ge L., Han S., Rizos C., Multipath mitigation of continuous GPS measurements using an adaptive filter, *GPS Solutions*, 2000, 4, 19-30

[Herrera et al, 2009] Herrera G., Fernandez-Merodo J., Mulas J., Pastor M., Luzi G., Montserrat O., A landslide forecasting model using ground based SAR data : The Portalet case study, *Engineering Geology*, 2009, 105, 220-230

[Heunecke et al, 2011] Heunecke O., Glabsch J., Schuhbäck S., Landslide Monitoring Using Low Cost GNSS Equipment – Experiences from Two Alpine Testing Sites, *Journal of Civil Engineering and Architecture*, 2011, 45, 661-669

[Harper et al, 1998] Harper J.T, Humphrey N.F, Pfeffer W.T, Crevasse patterns and the strain-rate tensor : a high-resolution comparison, *Journal of Glaciology*, 1998, 44, 68-76

[Harper et al, 2007] Harper J.T., Humphrey N.F., Pfeffer W.T., Lazar B., Two modes of accelerated glacier sliding related to water,*Geophysical Research Letters*, 2007, 34, doi :10.1029/2007GL030233

[Iinuma et al, 2011] Iinuma T., Ohzono M., Ohta Y., and Miura S., Coseismic slip distribution of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (M 9.0) estimated based on GPS data. Was the asperity in Miyagi-oki ruptured ?, *Earth Planets Space*, 2011, 63, 643-648

[Jaboyedoff et al, 2012] Jaboyedoff M., Oppikofer T., Abellan A., Derron M., Loye A., Metzger R., Pedrazzini A., Use of LIDAR in landslide investigations : a review, *Natural Hazards*, 2012, 61, 5-28

[Janssen, 2003] Janssen V., A mixed-mode GPS network processing approach for volcano deformation monitoring, *Thèse de doctorat - University of New South Wales*, 2003

[Janssen, 2009] Janssen V., Horizontal Strain Rate Distribution on an Active Ice Shelf Rift from in-situ GPS Data, *Journal of Global Positioning Systems*, 2009, 8, 6-16

[Kleijer, 2004] Kleijer F., Troposphere Modeling and Filtering for Precise GPS, *Thèse de doctorat - Leveling Delft university*, 2004

[Klobuchar, 1987] Klobuchar A., Ionospheric Time-Delay Algorithm for Single-Frequency GPS Users, *Aerospace and Electronic Systems*, 1987, 23, 325-331

[Larson and van Dam, 2000] Larson K., van Dam T., Measuring Postglacial Rebound with GPS and Absolute Gravity, *Geophysical Research Letters*, 2000, 27, 3925-3928

[Larson et al, 2007] Larson K., Bilich A., Axelrad P., Improving the precision of high-rate GPS, *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112, doi :10.1029/2006JB004367

[Larson et al, 2008] Larson K., Small E., Gutmann E., Bilich A., Axelrad P., Braun J., Using GPS multipath to measure soil moisture fluctuations : Initial results, *GPS Solutions*, 2008, 12, 173-177

[Larson et al, 2009] Larson K., Gutmann E., Zavorotny V., Braun J., Williams M., Nievinski F., Can we measure snow depth with GPS receivers ?, *Geophysical Research Letters*, 2009, 36, doi :10.1029/2009GL039430

[Laurichesse et al, 2009] Laurichesse D., Mercier F., Berthais J., Broca P., Cerri L., Integer ambiguity resolution on undifferenced GPS phase measurements and its application to PPP and satellite precise orbit determination, *Navigation*, 2009, 56(2), 135-149

[Malet et al, 2002] Malet, J.-P., Maquaire, O., Calais E., The use of Global Positioning System for the continuous monitoring of landslides. Application to the Super-Sauze earthflow (Alpes-de-Haute-Provence, France), *Geomorphology*, 2002, 43, 33-54.

[Malet, 2003] Malet J.P, Les 'glissements de type écoulement' dans les marnes noires des Alpes du Sud. Morphologie, fonctionnement et modélisation hydro-mécanique, *Thèse de doctorat - Université Louis Pasteur*, 2003

[Malet and Maquaire, 2003] Malet, J.P., Maquaire O., Black marl earthflows mobility and long-term seasonal dynamic in south-eastern France, *International Conference on Fast Slope Movement Prediction and Prevention for Risk Mitigation*, 2003

[Malet et al, 2005] Malet J.P, van Asch T.W.J, van Beek R., Maquaire O., Forecasting the behaviour of complex landslides with a spatially distributed hydrological model, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2005, 5, 71-85

[Moreau, 1995] Moreau, L., Comportement d'un glacier tempéré sur son lit rocheux, *Thèse de doctorat - Université Joseph Fourier*, 1995

[Moreau, 2009] Moreau L., L'exploration du cryokarst glaciaire et son intérêt scientifique pour l'étude du drainage des eaux de fonte, *Cahiers de géographie - EDYTEM*, 2009, 8, 163-170

[Mourot, 2008] Mourot P., Méthodes et outils pour l'auscultation et la surveillance des instabilités gravitaires, *Thèse de doctorat - Université de Savoie*, 2008

[Niethammer et al, 2012] Niethammer U., James M.R, Rothmund S., Travelletti J., Joswig M, UAV-based remote sensing of the Super-Sauze landslide : Evaluation and results, *Engineering Geology*, 2012, 128, 2-11

[Noferini et al, 2007] Noferini L., Pieraccini M., Mecatti D., Macaluso G., Atzeni C., Mantovani M., Mercato G., Pasuto A., Silvano S., Tagliavini F, Using GB-SAR technique to monitor slow moving landslide, *Engineering Geology*, 2007, 95, 88-98

[Noferini et al, 2009] Noferini L., Mecatti D., Macaluso G., Pieraccini M., Atzeni C., Monitoring of Belvedere Glacier using a wide angle GB-SAR interferometer, *Journal of Applied Geophysics*, 2009, 68, 289-293

[Nye, 1959] Nye J.F., A method of determining the strain-rate tensor at the surface of a glacier, *Journal of Glaciology*, 1959, 3, 409-419

[Odijk et al, 2012] Odijk D., Teunissen P., Zhang B., Single-Frequency Integer Ambiguity Resolution Enabled GPS Precise Point Positioning, *Journal of surveying engineering*, 2012, 138, 193-202

[Otsuka et al, 2013] Otsuka Y., Suzuki K., Nakagawa S., Nishioka M., Shiokawa K., Tsugawa T., GPS observations of medium-scale traveling ionospheric disturbances over Europe, *Annales Geophysicae*, 2013, 31, 163-172

[Pétillot, 2008] Pétillot I., Combinaison d'informations hétérogènes : intégration d'images RSO pour la surveillance des glaciers alpins, *Thèse de doctorat - Université de Savoie*, 2008

[Ponton et al, 2011] Ponton F., Walpersdorf A., Gay M., Trouvé E., Mugnier J.L, Cotte N., Ott L., Serafini J., Seasonal flow variability of a temperate glacier in the Mont Blanc massif observed by GPS, *Proceedings of the 3rd International Colloquium on Scientific and Fundamental Aspects of the Galileo Programme DK 2011-08-31*, 2011

[Richon et al, 2012] Richon P., Moreau L., Sabroux J.C.,Pili E., Salaün A., Evidence of both M2 and O1 Earth tide waves in radon-222 air concentration measured in a subglacial laboratory, *Journal of Geophysical Researche*, 2012, 117, doi :10.1029/2011JB009111

[Rizos et al, 2010] Rizos C., van Cranenbroeck J., Lui V., Advances in GNSS-RTK for Structural Deformation Monitoring in Regions of High Ionospheric Activity, *FIG Congress 2010*, 2010

[Takasu and Yasuda, 2008] Takasu T.,Yasuda A., Evaluation of RTK-GPS Performance with Low-cost Single-frequency GPS Receivers, *International Symposium on GPS/GNSS 2008*, 2008

[Takasu and Yasuda, 2009] Takasu T., Yasuda A., Development of the low-cost RTK-GPS receiver with an open source program package RTKLIB, *International Symposium on GPS/GNSS*, 2009

[Travelleti et al, 2008] Travelletti J., Oppikofer T., Delacourt C., Malet J.P, Jaboyedoff M., Monitoring landslide displacements during a controlled rain experiment using a long-range terrestrial laser scanning, *XXIst ISPRS Congress*, 2008

[Travelleti and Malet, 2012] Travelletti J., Malet J.P, Characterization of the 3D geometry of flow-like landslides : A methodology based on the integration of heterogeneous multi-source data, *Engineering Geology*, 2012, 128, 30-48

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

[Travelleti et al, 2014] Travelletti J., Malet J.P., Delacourt C., Image-based correlation of Laser Scanning point cloud time series for landslide monitoring International, *Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2014, 32, 1 -18

[Radovanovic, 2000] Radovanovic R., High Accuracy Deformation Monitoring Via Multipath Mitigations by Day-ToDay Correlation Analysis, *Proceedings of ION GPS 2000, Salt Lake City*, 2000

[Raucoules et al, 2003] Raucoules D., Maisons C., Carnec C., Le Mouelic S., King C., Hosford S., Monitoring of slow ground deformation by ERS radar interferometry on the Vauvert salt mine (France) Comparison with ground based measurement, *Remote Sensing of Environment*, 2003, 88, 468-478

[Riesen et al, 2011] Riesen P., Strozzi T., Bauder A., Wiesmann A., Funk M., Short-term surface ice motion variations measured with a ground-based portable real aperture radar interferometer, *Journal of Glaciology*, 2011, 57, 53-60

[Rotella, 2008] Rotella F., Filtrage optimal, *Cours à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes*, 2008

[Saastamoinen, 1972] Saastamoinen J., Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites, in : *The Use of Artificial Satellites for Geodesy, Geophys Monogr Ser.*, 1972, 15, 247-251

[Schaer, 1999] Schaer S., Mapping and predicting the earth's ionosphere using the global positioning system, *Thèse de doctorat - University of Bern*, 1999

[Schwalbe et al, 2008] Schwalbe E., Maas H., Dietrich R., Ewert H., Glacier velocity determination from multi-temporal terrestrial long range laser scanner point clouds, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B5. Beijing 2008*, 2008

[Schwieger, 2009] Schwieger V., Accurate High-Sensitivity GPS for Short Baselines, *FIG Working Week 2009*, 2009

[Singer et al, 2009] Singer J., Schuhbäck S., Wasmeier P., Thuro K., Heunecke O., Wunderlich T., Glabsch J., Festl J., Monitoring the Aggenalm landslide using economic deformation measurement techniques, *Austrian journal of Earth sciences*, 2009, 102, 20-34

[Small et al, 2010] Small E., Larson K., Braun J., Sensing vegetation growth with reflected GPS signals, *Geophysical Research Letters*, 2010, 37, doi :10.1029/2010GL042951

[Squarzoni et al, 2003] Squarzoni C., Delacourt C., Allemand P., Differential single-frequency GPS monitoring of the La Valette landslide (French Alps), *Engineering Geology*, 2005, 79, 215-229

[Stumpf et al, 2014] Stumpf A., Malet J.P, Allemand P., Ulrich P., Monitoring landslide deformation with Pleiades very-high resolution satellite images at decimeter accuracy, *Geophysical Research Abstracts, EGU2014-7930*, 2014, 16

[U-Blox LEA-6] U-Blox, LEA-6 u-blox 6 GPS Modules Data Sheet, *http ://www.u-blox.com*

[U-Blox ubx Format] U-Blox, u-blox 6 Receiver Description Including Protocol Specifications, *http ://www.u-blox.com*

[Van Vliet-Lanoë, 2013] Van Vliet-Lanoë B., Cryosphère. Histoire et environnements de notre ère glaciaire, *Ed. Vuibert*, 2013, 416p.

[Vincent, 2004] Vincent C., Kappenberger G., Valla F., Bauder A., Funk M., Le Meur E., Ice ablation as evidence of climate change in the Alps over the 20th century, *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109, doi :10.1029/2003JD003857

[Vincent, 2005] Vincent C., Plaquette sur l'évolution du glacier d'Argentière, 2005, http ://www-lgge.ujf-grenoble.fr/ServiceObs/images/PlaquetteArgentiereY.pdf

[Vivian and Bocquet, 1973] Vivian R., Bocquet G., Subglacial cavitation phenomena under le glacier d'Argentière, Mont Blanc, France, *Journal of Glaciology*, 1973, 12, 439-451

[Weber and Hermann, 2000] Weber D., Herrmann A., Reconstitution de l'évolution géomorphologique de versants instables par photogrammétrie numérique : l'exemple du glissement de terrain de Super-Sauze (Alpes-de-Haute-Provence, France), *Bulletin de la Société Géologique de France*, 2000, 171, 637-648

[Wright et al, 2004] Wright T.J, Parson B.E, Lu Z, Toward mapping surface deformation in three dimensions using InSAR, *Geophysical Research Letters*, 2004, 31, doi :10.1029/2003GL018827

[Zumberge et al, 1997] Zumberge J.F., Heflin M.B., Jefferson D.C., Watkins M.M., Webb F.H, Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks, *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102, 5005-5017

Annexe A

Le système GPS

Cette synthèse au sujet du système GPS s'inspire de [Bosser, 2009], [Chenal, 2014] ainsi que du site internet du gouvernement américain au sujet du GPS : http ://www.gps.gov.

Présentation générale

Le système GPS (Global Positioning System) est un système de radio-positionnement par satellites mis en place par le département de la défense des Etats-Unis d'Amérique à partir de 1978 pour des applications militaires (guidage balistique, positionnement de troupes...) qui s'est ouvert progressivement aux usages civils au cours des années 1990 - 2000.
L'objectif est de permettre à un utilisateur au sol de répondre quasi-instantanément, 24h/24 et 7j/7 à trois questions :

- Où suis-je ?
- Quelle est ma vitesse ?
- Quelle heure est-il ?

Ce service est disponible pour un nombre illimité d'utilisateurs à un coût modéré grâce au choix d'un système passif où ce sont les satellites qui émettent les informations utiles aux utilisateurs qui ne font que les interpréter.

Historique du projet

Le développement du système GPS a commencé dans les années 1960 et se poursuit aujourd'hui. L'historique ci-dessous présente certaines dates clefs du développement du GPS.

- Années 1960 - 1970 : Réalisation d'études préalables à l'élaboration du système GPS.
- 1978 : Lancement du premier satellite GPS.
- 1983 : Ronald Reagan annonce l'ouverture du système GPS aux utilisateurs civils dès que le système sera opérationnel.
- 1995 : Le système GPS est déclaré pleinement opérationnel (28 satellites en orbite).
- 2000 : Suppression de la dégradation volontaire du signal GPS par l'armée américaine. Le positionnement GPS en mode naturel devient dix fois plus précis qu'auparavant pour les utilisateurs civils. Une précision d'une dizaine de mètres est désormais accessible à tous les utilisateurs.
- 2005 : Début de la modernisation du système GPS avec la mise en orbite progressive de satellites permettant la diffusion de nouvelles fréquences pour le positionnement (L2C puis L5) et la création de nouvelles stations de poursuite pour le contrôle des satellites.
- 2014 : Début de l'émission de messages de navigation civils (phase de test) sur les fréquences L2C et L5 pour tous les satellites qui en ont la capacité (blocs IIR(M) et IIF).

Structure du système GPS

Pour permettre la localisation des utilisateurs, le système GPS est conçu autour de trois segments complémentaires. Le segment spatial est constitué de satellites qui émettent des ondes radio en direction de la Terre, le segment utilisateur permet de capter ces ondes et de s'en servir pour se positionner, tandis que le segment de contrôle est chargé de superviser le fonctionnement du segment spatial.

Le segment spatial

Le segment spatial est constitué des satellites de la constellation GPS. Il comporte au moins 24 satellites répartis sur six plans orbitaux inclinés de 55^o par rapport à l'équateur. Ces satellites évoluent entre 20000km et 20500km au dessus de la surface terrestre à environ 13000km/h. Chaque satellite possède une période de révolution de 11h58 et une période de revisite (temps entre deux passages au-dessus du même point de la surface terrestre) d'un jour sidéral soit 23h56min.
La constellation des satellites GPS est prévue pour permettre la visibilité de quatre à huit satellites avec une élévation supérieure à 15^o depuis tout point du globe.

Pour assurer leur mission au sein du système GPS, les satellites sont dotés de :

- Une antenne permettant de recevoir des informations sur la bande S utilisée pour capter les messages du segment de contrôle : éphémérides à mettre à jour, réglage des horloges atomiques, manœuvres pour re-positionner l'orbite...
- Plusieurs horloges atomiques pour assurer la génération d'un signal stable et précis.
- Des panneaux solaires pour assurer l'alimentation électrique du satellite.
- Un système de propulsion d'appoint pour contrôler l'orbite et l'attitude de la plate-forme selon les commandes du segment de contrôle.

En 2014 trente satellites composent le segment spatial du système GPS :

- 6 satellites du bloc IIA construits par Boeing et lancés de 1990 à 1997. Ils émettent le C/A code (L1), le P(Y) code (L1 et L2) ainsi que le message de navigation (L1 et L2).
- 12 satellites du bloc IIR construits par Lockheed Martin et lancés entre 1997 et 2004. Ils émettent le C/A code (L1), le P(Y) code (L1 et L2) ainsi que le message de navigation (L1 et L2).
- 7 satellites du bloc IIR(M) construits par Lockheed Martin et lancés entre 2005 et 2009. Ils émettent le C/A code (L1), le P(Y) code (L1 et L2), le message de navigation (L1 et L2) ainsi qu'un message civil additionnel (L2C).
- 5 satellites du bloc IIF construits par Boeing et lancés depuis 2010. Ils possèdent des horloges atomiques de meilleure qualité que les satellites des générations précédentes. Ils émettent le C/A code (L1), le P(Y) code (L1 et L2), le message de navigation (L1 et L2) ainsi que deux messages civils additionnels (L2C et L5).

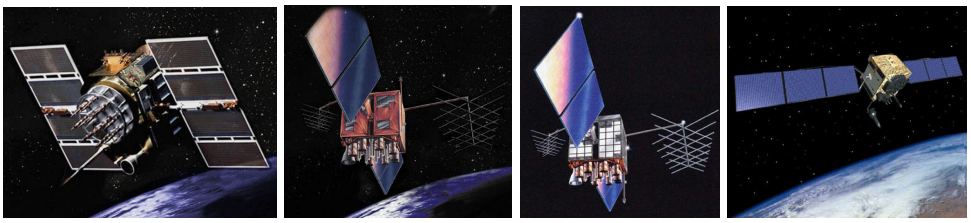

FIGURE A.1 – Les satellites actuels de la constellation GPS.
De gauche à droite bloc IIA, IIR, IIR(M), IIF.
(Source : http ://www.gps.gov/multimedia/images)

Le segment de contrôle

Le système GPS comprend un segment de contrôle constitué d'un petit nombre de stations au sol qui permettent de contrôler et de piloter le segment spatial. Il est composé de :

- Une station de contrôle principale située à Colorado Springs dans la base de Schrivers de l'US Air Force. Elle est chargée de gérer l'ensemble du segment de contrôle. Pour cela elle centralise les données acquises par les stations de poursuite, se sert de ces données pour calculer les éphémérides des satellites, les corrections d'horloge ainsi que les manœuvres à effectuer, et transmet aux stations de transmission les messages et commandes à envoyer aux satellites.
- Seize stations de poursuites (6 US Air Force, 10 NGA). Les cinq stations de poursuite historiques (Hawaii, Colorado Springs, Ascension Island, Diego Garcia, Kwajalein) ont été rejointes par onze nouvelles stations en 2005 et 2006 dans le cadre de la modernisation du système GPS. Les stations de poursuite enregistrent en continu les signaux GPS des satellites en vue et réalisent des observations météorologiques. Elles transmettent ensuite leurs observations à la station de contrôle principale. Les observations réalisées au niveau de ces stations de poursuite sont également utilisées pour la réalisation du système terrestre de référence du système GPS : le système WGS84. Enfin il faut noter que l'horloge maîtresse du système GPS est situé dans l'enceinte de la station de poursuite de l'USNO (United States Naval Observatory) à Washington.
- Quatre stations de transmission. Ces stations envoient aux satellites les éphémérides, corrections d'horloge et ordres de corrections d'orbites calculés par la station de contrôle principale. Pour cela elles utilisent des antennes communiquant avec les satellites sur la bande S.

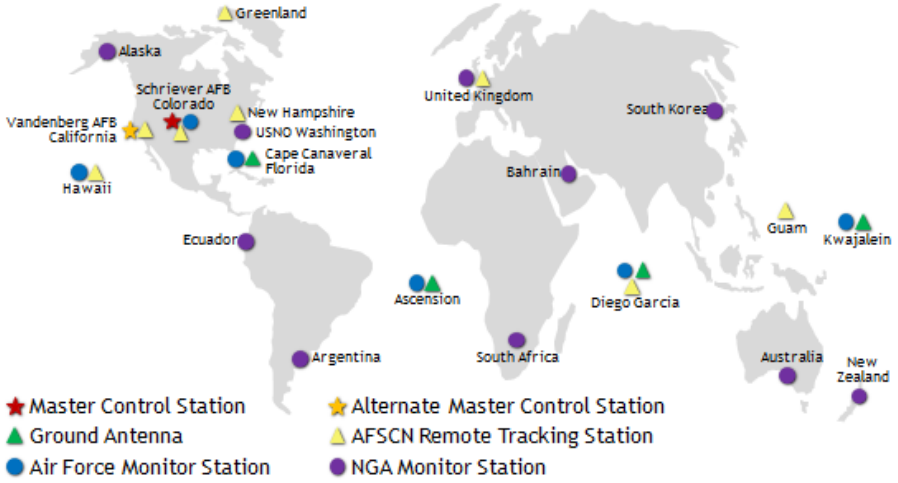

FIGURE A.2 – Localisation des différentes stations du segment de contrôle GPS.
(Source : http ://www.gps.gov/systems/gps/control/)

Le segment utilisateur

Le segment utilisateur est constitué de l'ensemble des utilisateurs du système GPS munis de récepteurs GPS. Le choix d'un système descendant permet un nombre illimité d'utilisateurs et limite le prix des récepteurs GPS (de 100$ à 10000$ selon le modèle).
Pour l'instant (avant la mise en place effective des fréquences L2C et L5) deux services de localisation sont offerts aux utilisateurs du GPS :

- Le service de positionnement standard (SPS) ouvert à tous les utilisateurs et fournissant une exactitude de localisation (à 95%) de 9m en planimétrie et 15m en altimétrie ainsi qu'une datation à 40ns. Ce service s'appuie sur le C/A code et le message de navigation transmis à l'utilisateur sur la bande L1.
- Le service de positionnement précis (PPS) accessible uniquement à l'armée américaine et à certains de ces alliés. Il donne une exactitude de localisation (à 95%) de 2.7m en planimétrie

et 4.9m en altimétrie ainsi qu'une datation à 40ns. Ce service s'appuie sur le code P(Y) transmis sur les bandes L1 et L2.

En plus de ces services de navigation, des utilisations de positionnement précis se sont développées en se basant sur des mesures de phase des signaux GPS. Ce positionnement précis sur la phase possède une précision centimétrique à millimétrique et permet de nombreuses applications, en particulier dans de domaine de la géodésie et de la géophysique. Ces méthodes s'appuient sur un système de référence, des orbites des satellites et des modèles atmosphériques précis calculés et normalisés par des organisations scientifiques regroupées au sein de l'IGS (International GNSS Service : http ://www.igs.org/).

Structure du signal GPS

Les satellites GPS génèrent un signal à la fréquence fondamentale $f_0 = 10.23MHz$ dont la stabilité et la précision sont assurées par les horloges atomiques embarquées. A partir de ce signal sont générées deux ondes porteuses sinusoïdales : L1 ($f_1 = 154 \times f_0 = 1575.42MHz$, $\lambda_{L1} = 19.03cm$) et L2 ($f_2 = 120 \times f_0 = 1227.60MHz$, $\lambda_{L2} = 24.42cm$). Différents messages sont codés par modulation de phase sur ces deux ondes porteuses :

- Des codes pseudo-aléatoires construits selon le principe du "Gold Code" qui servent à l'identification des satellites et à la mesure de pseudo-distances entre les satellites et le récepteur. Il y a deux codes pseudo-aléatoires :
  - Le code C/A (Coarse Acquisition = acquisition grossière) modulé sur L1 à la fréquence de 1.023MHz. Il possède une longueur de 1023 bits ce qui aboutit à une durée de 1ms.
  - Le code P (Precise) modulé sur L1 et L2 à la fréquence de 10.23MHz pour une durée de 7 jours. Le P code est remplacé par le Y code lorsque le mode anti-leurrage est activé. Ces deux codes sont cryptés et déchiffrables uniquement par les utilisateurs habilités (armée américaine et ses alliés).
- Un message de navigation qui permet le transfert aux utilisateurs des éphémérides et des décalages d'horloges des satellites (Annexe. B), d'un modèle ionosphérique mondial (Annexe. C) ainsi que des informations relatives à l'état global du système GPS. Ce message de navigation est modulé sur L1 et L2 à la fréquence de 50Hz. Les informations relatives au satellite envoyant le message sont répétées toutes les 30sec tandis que les informations générales sont transmises en 12min30sec.

Annexe B

Message de navigation et éphémérides des satellites

Cette synthèse au sujet du message de navigation du système GPS et du calcul des éphémérides s'inspire de [Bosser, 2009] et [Beilin, 2011].

Le message de navigation

Le message de navigation du système GPS, émis par les satellites GPS et modulé sur les porteuses L1 et L2, permet de transmettre aux utilisateurs :

- La localisation des satellites dans le référentiel WGS84.
- Le décalage d'horloge des satellites par rapport à l'échelle de temps GPS.
- L'almanach de la constellation : état de santé et position approchée de l'ensemble des satellites de la constellation.
- Un modèle global d'ionosphère : le modèle de Klobuchar (Annexe. C).

Le message de navigation est transmis en 12min30sec à la fréquence de 50Hz. Il se décompose en 25 trames de 1500bits chacune qui sont transmises en 30sec. Chaque trame est composée de :

- La correction d'horloge du satellite émettant le signal (6sec).
- Les éphémérides du satellite émettant le signal (6sec).
- Une fraction des informations nécessaires à la construction de l'almanach de la constellation et du modèle d'ionosphère (12sec).

Une unique trame de 30sec est nécessaire pour obtenir les informations permettant de localiser le satellite en vue et de corriger son horloge. Par contre il faut 25 trames correspondant à l'intégralité d'un message de navigation, soit 12min30sec, pour reconstituer l'almanach de l'ensemble des satellites et le modèle d'ionosphère.
Pour obtenir les informations contenues dans le message de navigation, ce dernier peut être soit décodé à partir des ondes radio-diffusées par les satellites, soit être récupéré au format RINEX sur le serveur d'un site proposant des produits utiles au positionnement GPS (par exemple ftp ://rgpdata.ign.fr).

Calcul des éphémérides des satellites

Dans notre application les éphémérides des satellites sont calculées à partir de fichiers RINEX de messages de navigation. Cette option a été choisie car elle permet de ne pas enregistrer les messages de navigation lors de l'acquisition des données brutes. Les fichiers RINEX sont alors téléchargés à la volée sur le ftp de l'IGN (en temps-réel ou lors du post-traitement) lorsqu'ils sont nécessaires pour le calcul des éphémérides.
Le calcul des éphémérides des satellites s'appuie alors sur les éléments d'orbite contenus dans les fichiers RINEX de navigation qui sont composés d'un en-tête (non détaillé ici) et d'un corps de fichier contenant les éléments utiles pour la localisation des satellites au format suivant :

PRN & $date$	a_0	a_1	a_2
$IODE$	C_{rs}	Δn	M_0
C_{uc}	e	C_{us}	$\sqrt{a}$
TOE	C_{ic}	Ω_0	C_{is}
i_0	C_{rc}	$\overline{\omega}$	$\dot{\Omega}$
$\dot{i}$	C/A_{L2}	$week_{GPS}$	P_{L2}
$precision$	$health$	TGD	$IODC$
$transmission\ date$			

Le PRN et la date permettent d'identifier le satellite et le jour auxquels se réfèrent les éphémérides, les coefficients a_0, a_1, a_2 permettent de calculer l'erreur d'horloge du satellite, et les coefficients C_{rs} à $\dot{i}$ permettent de calculer sa position. Les autres coefficients ne sont pas utilisés ici.
La localisation d'un satellite à partir des informations contenues dans le message de navigation est alors basée sur le calcul de l'orbite du satellite à partir d'éléments képlériens (Fig. B.1) et d'anomalies à la trajectoire képlérienne.

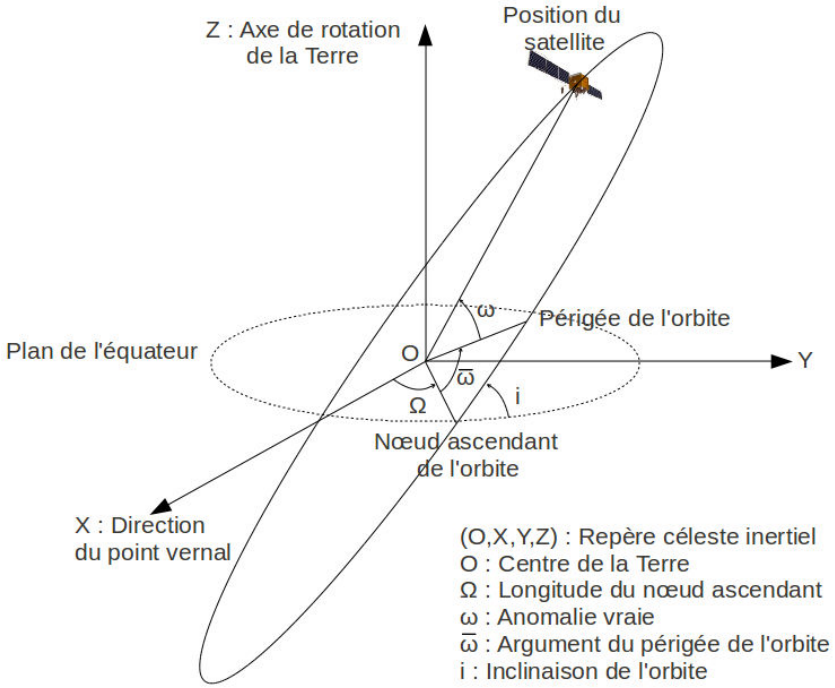

FIGURE B.1 – Localisation du satellite sur une orbite képlérienne.

Les étapes suivantes sont nécessaires pour aboutir à la localisation d'un satellite dans le référentiel WGS84 dans lequel sont calculées les éphémérides des satellites :

Datation de la localisation

Les éléments képlériens et les anomalies sont donnés dans le message de navigation pour une date de référence des éphémérides : le TOE (Time Of Ephemeris). On définit alors le temps orbital t_0 par rapport à l'instant de mesure t (exprimé en temps GPS) et au TOE par :
$t_0 = t - TOE$
Ce temps orbital doit être corrigé de l'erreur d'horloge du satellite (dts) :
$dts = a_0 + a_1 \times t_0 + a_2 \times t_0^2$
$t_0 = t_0 - dts$

Calcul de la position du satellite sur l'orbite

Dans un premier temps on calcule la position du satellite sur l'orbite à l'instant de la mesure. Pour cela on considère tout d'abord une trajectoire képlérienne pour le satellite puis on prend en compte des anomalies à ce modèle.

Calcul du mouvement moyen (orbite képlérienne)
$n = \sqrt{\frac{\mu}{a^3}} + \Delta n$ avec $\mu = 3.986005.10^{14} m^3.s^{-2}$

Calcul de l'anomalie moyenne à la date t (orbite képlérienne)
$M = M_0 + n \times t_0$

Calcul de l'anomalie excentrique (orbite képlérienne)
$E_{k+1} = M + e \times sin(E_k)$. Cette équation, dite équation de Kepler est résolue par itérations successives avec $E_0 = M$ comme valeur initiale.

Calcul de l'anomalie vraie du satellite (orbite képlérienne)
$\omega = 2 \times atan(\sqrt{\frac{1+e}{1-e}} \times tan(\frac{E}{2}))$

Calcul de l'argument de longitude prenant en compte l'anomalie d'ellipticité
$\phi = \omega + \overline{\omega} + C_{us} \times sin(2 \times (\omega + \overline{\omega})) + C_{uc} \times cos(2 \times (\omega + \overline{\omega}))$

Calcul de la distance Terre-satellite prenant en compte l'anomalie d'ellipticité
$r = a \times cos(1 - e \times cos(E)) + C_{rs} \times sin(2 \times (\omega + \overline{\omega})) + C_{rc} \times cos(2 \times (\omega + \overline{\omega}))$

Calcul des coordonnées du satellite dans le plan orbital
$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}_{orb} = \begin{pmatrix} r \times cos(\phi) \\ r \times sin(\phi) \end{pmatrix}$$
Dans la formulation adoptée l'axe des abscisses est dirigé vers le nœud ascendant.

Calcul de la position du plan orbital dans l'espace

Dans un second temps on calcule la position du plan orbital dans l'espace. On calcule cette position en prenant en compte les anomalies d'inclinaison, de nœud ascendant et de non planéité de l'orbite :
Inclinaison : $i = i_0 + \dot{i} \times t_0 + C_{is} \times sin(2 \times (\omega + \overline{\omega})) + C_{ic} \times cos(2 \times (\omega + \overline{\omega}))$
Nœud ascendant : $\Omega = \Omega_0 + \dot{\Omega} \times t_0$

Calcul des coordonnées du satellite en WGS84

Dans un troisième temps on calcule les coordonnées cartésiennes du satellite dans le référentiel WGS84 qui est le système de référence dans lequel sont exprimées les éphémérides radio-diffusées.

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{WGS84} = \begin{bmatrix} cos(\Omega_e \times t) & -sin(\Omega_e \times t) & 0 \\ sin(\Omega_e \times t) & cos(\Omega_e \times t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} cos(\Omega) & -sin(\Omega) & 0 \\ sin(\Omega) & cos(\Omega) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & cos(i) & -sin(i) \\ 0 & sin(i) & cos(i) \end{bmatrix} \times \begin{pmatrix} x \\ y \\ 0 \end{pmatrix}$$
Avec $\Omega_e = 7.2921151467 \times 10^{-5} rad.s^{-1}$ la vitesse de rotation de la Terre.

Finalement ce calcul aboutit à la détermination des coordonnées du satellite d'intérêt avec une précision métrique dans le système de référence WGS84.

Annexe C

Modèle de Klobuchar pour la correction du biais ionosphérique

Cette synthèse au sujet du modèle de Klobuchar s'inspire de [Klobuchar, 1987] ainsi que de la page internet : http ://www.navipedia.net/index.php/Klobuchar_Ionospheric_Model.

Généralités au sujet de la correction du biais ionosphérique par le modèle de Klobuchar

Le biais sur la mesure de pseudo-distance induit par la traversée de l'ionosphère par les ondes GPS peut atteindre une centaine de mètres et constitue de ce fait la principale source d'erreur impactant le positionnement GPS en cas d'utilisation de récepteurs mono-fréquence. Afin de corriger une partie de cette erreur, un modèle d'ionosphère a été implémenté dans le message de navigation du système GPS : il s'agit du modèle de Klobuchar [Klobuchar, 1987]. Ce modèle a pour objectif de traduire les principales caractéristiques de l'ionosphère en tout point du globe à un instant donné. La prise en compte de ce modèle permet aux utilisateurs de récepteurs mono-fréquence de réduire l'erreur quadratique moyenne du positionnement d'environ 50%. Le modèle de Klobuchar est très simple pour permettre un calcul de la correction en temps-réel au niveau de récepteurs possédant une faible puissance de calcul et pour minimiser le nombre de données transmises dans le message de navigation. Le taux d'amélioration de la précision est alors un inévitable compromis entre la complexité du modèle et son efficacité.
Le modèle de Klobuchar pour la correction du biais ionosphérique repose sur le principe suivant : en chaque point de la Terre le délai ionosphérique zénithal est considéré comme constant pendant la nuit et modélisé par une fonction demi-cosinus pendant la journée. L'amplitude et la période de cette fonction sont données par des coefficients calculés par le segment de contrôle à partir des observations des stations de poursuite. Ces coefficients sont ensuite transmis aux utilisateurs par l'intermédiaire du message de navigation. Dans le modèle de Klobuchar l'ionosphère est modélisée par une couche ionisée infiniment mince située à 350km d'altitude.

Implémentation du modèle de Klobuchar

En pratique la correction du biais ionosphérique sur les mesures de pseudo-distances dérivées d'observations sur la porteuse L1 suit les étapes ci-dessous.
Pour toute cette partie les angles sont exprimés en semicircle ($1\,semicircle = \pi\,rad$) afin de respecter le formalisme de [Klobuchar, 1987].

Calcul de la latitude et de la longitude de l'IPP

L'IPP (Ionospheric Pierce Point) correspond au point d'intersection entre le rayon suivi par l'onde GPS et la couche mince représentant l'ionosphère. Ses coordonnées géographiques sont données par :

$\lambda_{IPP} = \lambda + \psi \times \frac{sin(Az)}{cos(\varphi)}$ avec $\psi = \frac{0.0137}{E+0.11} - 0.022$, λ_{IPP} la longitude de l'IPP, λ la longitude géographique du point considéré, φ sa latitude géographique, E l'élévation du satellite et Az son azimut.
$\varphi_{IPP} = \varphi + \psi \times cos(Az)$ avec φ_{IPP} la latitude de l'IPP.
Si $\varphi_{IPP} > 0.416$, $\varphi_{IPP} = 0.416$; si $\varphi_{IPP} < -0.416$, $\varphi_{IPP} = -0.416$

Calcul de la latitude géomagnétique de l'IPP

$\varphi_{M,IPP} = \varphi_{IPP} + 0.064 \times cos(\lambda_{IPP} - 1.617)$ avec $\varphi_{M,IPP}$ la latitude géomagnétique de l'IPP.

Calcul du temps local à l'IPP

$t_{IPP} = 43200 \times \lambda_{IPP} + t_{gps}$ avec t_{IPP} le temps local à l'IPP et t_{gps} l'instant (exprimé en temps GPS) pour lequel on calcule la correction.
Si $t \geq 86400$, t =t-86400 ; Si $t < 0$, t =t+86400.

Calcul de l'amplitude et de la période du délai ionosphérique

L'amplitude et la période du délai ionosphérique zénithal sont calculées à partir des coefficients α_i et β_i qui sont contenus dans l'en-tête des fichiers RINEX de navigation. Ces coefficients correspondent aux champs ION ALPHA et ION BETA. L'amplitude et la période du délai ionosphérique sont alors données par :
$A_{iono} = \alpha_0 + \alpha_1 \times \varphi_{M,IPP} + \alpha_2 \times \varphi^2_{M,IPP} + \alpha_3 \times \varphi^3_{M,IPP}$
$P_{iono} = \beta_0 + \beta 1 \times \varphi_{M,IPP} + \beta_2 \times \varphi^2_{M,IPP} + \beta_3 \times \varphi^3_{M,IPP}$

Calcul de la phase du délai ionosphérique

$\phi_{iono} = 2 \times \pi \times \frac{t-50400}{P_{iono}}$

Calcul de la fonction de projection

$F = 1 + 16 \times (0.53 - E)^3$ avec E l'élévation du satellite.

Calcul du délai ionosphérique oblique pour la pseudo-distance considérée

$$\tau_{iono} = \begin{cases} -5.10^{-9} \times F \times c & si \mid \phi_{iono} \mid \geq 1.57 \\ -(5.10^{-9} + A_{iono} \times (1 - \frac{\phi^2_{iono}}{2} + \frac{\phi^4_{iono}}{24})) \times F \times c & si \mid \phi_{iono} \mid < 1.57 \end{cases}$$

Avec $c = 2.997924580.10^8 m.s^{-1}$ la vitesse de la lumière dans le vide.

Au final on obtient une correction τ_{iono} permettant d'atténuer l'effet de l'ionosphère sur les pseudo-distances. Cette correction a été conçue pour diminuer de 50% l'erreur quadratique moyenne sur le positionnement due à la traversée de l'ionosphère par les ondes GPS.

Annexe D

Modèle de Saastamoinen pour la correction du biais troposphérique

Cette synthèse au sujet du modèle de Saatamoinen s'inspire de [Saastamoinen, 1972] et [Bosser, 2009].

Généralités au sujet de la correction du biais troposphérique par le modèle de Saastamoinen

Le modèle de Saastamoinen [Saastamoinen, 1972] permet de modéliser la troposphère à partir de l'élévation du satellite et de quelques paramètres météorologiques : température, pression et humidité au sol. Il modélise le délai hydrostatique ainsi que le délai humide, bien que la modélisation de ce second terme soit assez grossière à cause de sa grande variabilité temporelle et spatiale.
Le modèle de Saastamoinen présente l'avantage d'être très simple et de ne nécessiter que peu de paramètres extérieurs ; en contre partie sa précision est limitée : il permet de calculer le retard troposphérique total avec une précision décimétrique.
Dans notre application, comme dans la majorité des logiciels utilisant le modèle de Saastamoinen, les paramètres météorologiques ne sont pas mesurés in-situ mais calculés à partir de l'altitude approchée des points de mesure en utilisant un modèle standard d'atmosphère et des paramètres constants au niveau de la mer : $T_0 = 20^oC$, $P_0 = 1013mbar$, $Hr_0 = 50\%$.

Implémentation du modèle de Saastamoinen

En pratique le modèle de Saastamoinen est implémenté de la façon suivante :

Calcul des paramètres météorologiques au point considéré

Les paramètres météorologiques nécessaires au calcul du délai troposphérique ne dépendent que de valeurs de référence au niveau de la mer et de l'altitude du point. Ils sont calculés en utilisant les formules suivantes :

- Température (T) :
$T(^oC) = T_0 - 0.0065 \times H$ avec H l'altitude du point.
$T(K) = T(^oC) + 273.16$

- Pression (P) :
$P = P_0 \times (1 - 0.000226 \times H)^{5.225}$

- Pression partielle de vapeur d'eau (e) :
$Hr = Hr_0 \times e^{-0.0006396 \times H}$ avec Hr l'humidité relative au point considéré (en %).
$e = \frac{Hr}{100} \times 6.11 \times 10^{\frac{7.5 \times (T_0 - 273.16)}{237.3 + T_0 - 273.16}}$

Correction de retard troposphérique par le modèle de Saastamoinen

Le retard troposphérique total (partie hydrostatique + partie humide) est alors donné par :

$\tau_{tropo} = \frac{0.002277}{sin(E)} \times (P + (\frac{1255}{T(K)} + 0.05) \times e - B \times tan^2(\frac{\pi}{2} - E) + \delta R$ avec E l'élévation du satellite.

Les termes B et δR sont calculés à partir de valeurs tabulées. B ne dépend que de l'altitude et δR dépend de l'altitude ainsi que de l'élévation du satellite.

La fonction de projection utilisée dans le modèle de Saastamoinen est très simple ($\frac{1}{sin(E)}$) mais elle est affinée par le terme δR qui permet de modéliser le fait que le délai troposphérique oblique s'écarte aux basses élévations de la valeur prédite par la fonction de projection.

Au final le modèle de Saastamoinen permet de corriger le délai troposphérique total (partie hydrostatique et partie humide) avec une précision décimétrique.

Annexe E

Tenseurs de déformations

Cette synthèse au sujet des tenseurs de déformations s'inspire de [Harper et al, 1998] et [Eissa, 2011].

Le champ de déplacements subit par un échantillon de points d'un solide déformable peut se décomposer en trois parties :

- Une translation de l'ensemble des points.
- Une rotation de l'objet sans déformation.
- Une déformation de l'objet.

La déformation correspond aux changements de la forme de l'objet étudié. Elle est caractérisée par des changements dans les distances séparant les points de l'objet (Fig. E.1).

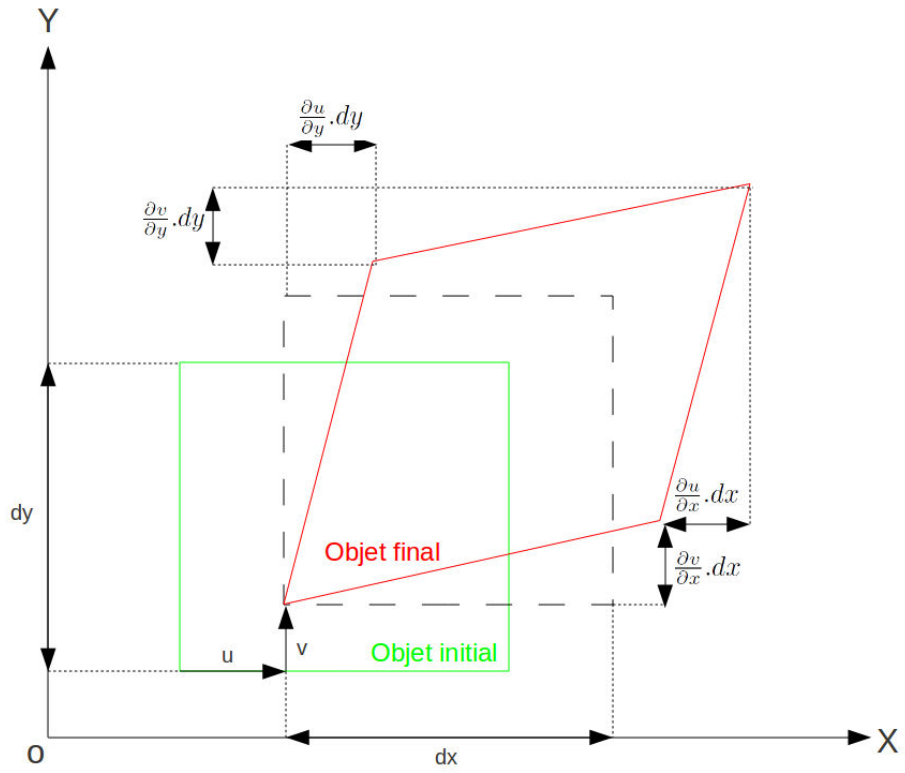

FIGURE E.1 – Déformation bidimensionnelle d'un objet rectangulaire.

Cette déformation peut être décrite par un tenseur de déformations qui constitue la partie symétrique de la matrice de passage de l'espace du vecteur position à l'espace du vecteur déplacement. Le calcul du tenseur de déformations va être décrit ci-dessous dans le cas à deux dimensions utilisé dans cette thèse. Le passage à trois dimensions s'obtient facilement en prolongeant le raisonnement avec une troisième composante. Ici nous nous limitons au cas des coordonnées cartésiennes

qui est suffisant pour l'étude de chantiers de taille kilométrique. Pour l'étude de plus grands objets à la surface de la Terre (plaques tectoniques par exemple) l'utilisation de coordonnées sphériques est préférable pour prendre en compte la courbure de la Terre.
Soit $\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}$ un vecteur déplacement et (O, X, Y) le repère cartésien utilisé pour exprimer les coordonnées des points surveillés. Le tenseur de déformations s'exprime alors sous la forme :

$$\varepsilon = \begin{pmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{1}{2}(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}) \\ \frac{1}{2}(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}) & \frac{\partial v}{\partial y} \end{pmatrix}$$

Ce tenseur de déformations est calculé à partir des coordonnées initiales et des déplacements mesurés pour un échantillon de points de la surface de l'objet d'étude. Ces points forment un dallage de l'espace utilisé pour le calcul de tenseurs de déformations. Un tenseur supposé constant sur le polygone est alors calculé pour chaque polygone du dallage, et l'étude de l'ensemble des tenseurs permet de caractériser les déformations régnant au sein de l'objet.
Chaque tenseur est déterminé par l'inversion d'un système d'équations relatives aux déplacements des sommets du polygone d'intérêt. Pour chaque sommet on obtient le jeu de deux équations suivant :

$$\begin{cases} u(x,y) = \frac{\partial u}{\partial x}.x + \frac{\partial u}{\partial y}.y + C_u \\ v(x,y) = \frac{\partial v}{\partial x}.x + \frac{\partial v}{\partial y}.y + C_v \end{cases}$$

Les observations sont les déplacements mesurés ($u(x,y)$, $v(x,y)$) ainsi que les coordonnées initiales des sommets (x, y) ; les inconnues sont les dérivées partielles des déplacements ($\frac{\partial u}{\partial x}$, $\frac{\partial u}{\partial y}$, $\frac{\partial v}{\partial x}$,$\frac{\partial v}{\partial y}$) ainsi que deux constantes (C_u, C_v). Le système dérivé de ces équations d'observation est résolu par inversion d'un système linéaire dans le cas d'une triangulation de l'espace, ou par moindres carrés dans le cas d'un dallage impliquant des polygones à plus de trois côtés.
Une fois le tenseur de déformations calculé, les axes principaux de déformation ainsi que l'amplitude des déformations dans ces directions sont calculés par diagonalisation du tenseur de déformations. Les vecteurs propres correspondent aux axes principaux de déformation tandis que les valeurs propres donnent l'amplitude des déformations selon ces deux axes. Une valeur propre positive traduit une extension tandis qu'une valeur propre négative traduit une compression.

Au final les tenseurs de déformations permettent de représenter les déformations internes de l'objet qui conduisent au changement de sa forme. Ils permettent en particulier de se focaliser sur la composante des déplacements qui impacte la structure de l'objet. Le recours aux tenseurs de déformations permet ainsi de mesurer ces déformations internes même dans le cas où l'objet est soumis à une translation et/ou rotation importante alors que l'étude des vecteurs de déplacement sera dominée par ces deux classes de mouvements et risque de négliger les déformations de l'objet. Les tenseurs de déformations constituent donc un outil intéressant pour étudier les hétérogénéités de mouvement enregistrées par un réseau d'observation comportant de nombreux points de mesure.