

École Doctorale du Conservatoire National des Arts et Métiers

Laboratoire de Géodésie et de Géomatique (L2G)

THÈSE DE DOCTORAT

présentée par : **Benoît LEGRU**

soutenue le : **23 mai 2011**

pour obtenir le grade de : **Docteur du Conservatoire National des Arts et Métiers**

Discipline / Spécialité : **Géomatique / Géodésie**

MESURE DE DEFORMATION PAR COMBINAISON DE TECHNIQUES GEODESIQUES auscultation par GPS et topométrie

THÈSE DIRIGÉE PAR

M. POLIDORI Laurent
M. DURAND Stéphane

Professeur CNAM, L2G
Maître de conférences, L2G

RAPPORTEURS

M. BRIOLE Pierre
M. KASSER Michel

Directeur de recherches, ENS
Professeur des Universités, ENSG

EXAMINATEURS

CATTIN Paul-Henri
DAUTEUIL Olivier
DELMAS Philippe

Professeur des Universités, G2C
Directeur de recherches, Géosciences Rennes
Professeur CNAM, CNAM

*"Ne mesure le travail qu'une fois la journée terminée et l'ouvrage accompli."
Elisabeth Barrett Browning*

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier sincèrement mon directeur Laurent Polidori et mon coencadrant Stéphane Durand pour m'avoir appuyé et conseillé dans l'écriture de cette thèse tout au long de ces trois années. Ils m'ont permis de la réaliser dans de très bonnes conditions.

La curiosité scientifique, les questionnements et les conseils de Laurent m'ont apporté le recul nécessaire pour mener à bien ce sujet.

Les connaissances approfondies de Stéphane sur le sujet ainsi que sa grande disponibilité m'ont également accompagné dans la rédaction de ma thèse.

Au delà de leurs apports, je tiens également à les remercier pour la confiance qu'ils m'ont accordée lorsqu'ils m'ont proposé de réaliser la première thèse du laboratoire alors nouvellement créé.

Bien sûr, je n'oublie pas tous les autres acteurs essentiels de la thèse, à savoir le Conservatoire National des Arts et Métiers et l'Institut National des Sciences de l'Univers pour leur soutien financier ainsi que les membres du jury Pierre Briole, Michel Kasser, Paul-Henri Cattin, Olivier Dauteuil et Philippe Delmas pour avoir accepté d'évaluer mes travaux.

Je remercie également Angélique Azzini qui a effectué son mémoire d'ingénieur sur un des aspects de ma thèse en 2010. Sa curiosité, son regard neuf sur le sujet et son enthousiasme nous ont permis de faire avancer les travaux.

Je pense également aux autres membres du Laboratoire de Géodésie et Géomatique qui m'ont soutenu pendant ces trois années et notamment Alain, Bilel, Elisabeth, Eric, Frédéric, Ghyslain, Jean-Michel, Joëlle, José, Laurent et Mhamad avec qui j'ai partagé de bons moments.

J'étends aussi ces remerciements à l'ensemble du personnel de l'ESGT pour m'avoir permis de travailler dans de bonnes conditions.

J'ai également une pensée pour mes parents et ma sœur pour leur soutien indéfectible et leurs encouragements tout le long de mon cursus scolaire.

Résumé

La Terre est une planète en constante évolution et sa surface ne cesse de se transformer. Ses déformations soulèvent des questionnements. Depuis plusieurs années, le L2G de l'ESGT s'intéresse à l'étude des déformations par inter comparaison de techniques. Il dispose en cela de différents procédés de mesure. Puis au fil du temps, le laboratoire s'interroge sur l'intérêt de réaliser une combinaison entre différentes techniques de mesure afin d'observer des déformations fines et précises (quelques millimètres).

L'objectif de cette thèse est de démontrer l'intérêt de combiner des mesures GNSS et des mesures topométriques, celles-ci semblant être les plus utilisées, et de les concrétiser. Les résultats présentés sont basés sur des simulations et sur des campagnes de mesures combinées des techniques de GNSS et de topométrie effectuée sur un réseau test d'une étendue locale. Les calculs évoluent en fonction de la distance de la ligne de base et en modifiant les durées de sessions de mesures.

Nous montrons qu'une combinaison par cumul des équations normales améliore la précision du positionnement non seulement par rapport à l'utilisation de chaque technique séparée, mais également par rapport aux méthodes classiques basées sur la combinaison des coordonnées issues des techniques de GNSS et de topométrie.

Mots clés : Géodésie, GNSS, topométrie, déformation, précision, combinaison, matrices normales

Abstract

The Earth is a constantly evolving planet and its surface keeps transforming. Its deformations raise questions. For several years, the L2G at ESGT has been interested in the study of deformations through inter comparison of techniques. For this, it has various measurement processes. Then, with time, the laboratory is now pondering about the interest of combining various techniques of measurement in order to observe fine and precise deformations (a few millimeters).

The aim of this PhD thesis is to demonstrate the interest of combining GNSS and topometric measurements, the latter being apparently the most commonly used. The presented results are based on simulations and campaigns of combined measurement through the use of GNSS and topometric techniques made on a model network of a local area. The calculations made are dependent both on the distance of the baseline and the alteration of the session length.

We show that a combination through the accumulation of the normal equations improves the localisation accuracy regarding not only the use of every separate technique but also the more classic methods based on the coordinates combination provided by GNSS and topometric techniques.

Keywords : Geodesy, GNSS, topometry, deformation, accuracy, combination, normal matrices

Table des matières

Introduction	23
1 La combinaison de techniques	29
1.1 Rappel sur les moindres carrés	29
1.2 Principe de combinaison	31
1.2.1 Les combinaisons en moindres carrés	31
1.2.2 La combinaison entre GPS et topométrie	35
1.3 Combinaison par matrices normales	36
1.4 Amélioration des techniques	37
1.4.1 La topométrie	37
1.4.2 Le GPS	40
1.4.3 Les précisions	56
2 Combinaison sur un réseau à 2 points	57
2.1 Simulation d'un réseau à 2 points	57
2.1.1 Simulation de données	57
2.1.2 Méthodologie	58
2.1.3 Résultats	60
2.2 Campagne	67
2.2.1 Adaptation des instruments	67

TABLE DES MATIÈRES

2.2.2	Données	69
2.2.3	Méthodologie	70
2.2.4	Résultats	71
2.3	Application d'une autre combinaison : combinaison par coordonnées	75
2.3.1	Etat de l'art	76
2.3.2	Application	78
2.3.3	Résultats	78
2.4	Bilan	82
3	Combinaison sur un réseau à 3 points	83
3.1	Simulation	84
3.1.1	Ligne de base fixe	86
3.1.2	Ligne de base variable	90
3.2	Campagne de mesures	92
3.2.1	Préparation de la campagne	93
3.2.2	Données	95
3.2.3	Résultats	96
3.3	Bilan	98
	Conclusion	103
	Bibliographie	106
	Annexes	113
A	Construction des ellipses de confiance	113

TABLE DES MATIÈRES

B Simulation de réseau linéaire : autres sessions	115
C Résultats des 12 sessions de la campagne sur 30 secondes de données	127
D Résultats des 12 sessions de la campagne sur 10 minutes de données	135
Glossaire	143

Liste des tableaux

1.1	Tableau récapitulatif des précisions utilisées en simulation	56
2.1	Récapitulatif des valeurs des demi-grands axes sur 24 heures	60
2.2	Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétrique des techniques topométrique, GPS et combinés simulées sur une session de 30 secondes . .	63
2.3	Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétrique des techniques topométrique, GPS et combinés simulées sur une session de 10 minutes . . .	65
2.4	Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétrique des techniques topométrique, GPS et combinés simulées sur une distance de 200 mètres . .	66
2.5	Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétriques des techniques topométrique, GPS et combinées sur 30 secondes	73
2.6	Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétriques des techniques topométrique, GPS et combinées sur une session de 10 minutes	74
2.7	Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétriques des techniques topométrique, GPS et leur pondération sur une session de 30 secondes . . .	79
2.8	Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétriques des techniques topométrique, GPS et leur pondération sur une session de 10min	81
3.1	Tableau décrivant les mesures du réseau	85
3.2	Tableau récapitulatif des intervalles des valeurs des demi-grands axes pour des distances entre 50 mètres et 800 mètres	91

3.3	Demi-grands axe de l'ellipse du point GMP	96
A.1	Valeurs de k en fonction de la probabilité	114
B.1	Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétrique des techniques topométrique, GPS et combinés simulées sur une session de 1 minute	116
B.2	Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétrique des techniques topométrique, GPS et combinés simulées sur une session de 2 minutes . . .	119
B.3	Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétrique des techniques topométrique, GPS et combinés simulées sur une session de 3 minutes . . .	121
B.4	Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétrique des techniques topométrique, GPS et combinés simulées sur une session de 5 minutes . . .	123
B.5	Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétrique des techniques topométrique, GPS et combinés simulées sur une session de 7 minutes . . .	125
C.1	Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétriques des techniques topométrique, GPS et combinées sur 30 secondes pour la session 1 de la campagne	127
C.2	Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétriques des techniques topométrique, GPS et combinées sur 30 secondes pour la session 2 de la campagne	128
C.3	Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétriques des techniques topométrique, GPS et combinées sur 30 secondes pour la session 3 de la campagne	128
C.4	Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétriques des techniques topométrique, GPS et combinées sur 30 secondes pour la session 4 de la campagne	129
C.5	Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétriques des techniques topométrique, GPS et combinées sur 30 secondes pour la session 5 de la campagne	129

LISTE DES TABLEAUX

C.6 Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétriques des techniques topométrique, GPS et combinées sur 30 secondes pour la session 6 de la campagne	130
C.7 Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétriques des techniques topométrique, GPS et combinées sur 30 secondes pour la session 7 de la campagne	130
C.8 Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétriques des techniques topométrique, GPS et combinées sur 30 secondes pour la session 8 de la campagne	131
C.9 Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétriques des techniques topométrique, GPS et combinées sur 30 secondes pour la session 9 de la campagne	131
C.10 Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétriques des techniques topométrique, GPS et combinées sur 30 secondes pour la session 10 de la campagne	132
C.11 Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétriques des techniques topométrique, GPS et combinées sur 30 secondes pour la session 11 de la campagne	132
C.12 Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétriques des techniques topométrique, GPS et combinées sur 30 secondes pour la session 12 de la campagne	133
D.1 Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétriques des techniques topométrique, GPS et combinées sur 10 minutes pour la session 1 de la campagne	135
D.2 Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétriques des techniques topométrique, GPS et combinées sur 10 minutes pour la session 2 de la campagne	136

D.3 Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétriques des techniques topométrique, GPS et combinées sur 10 minutes pour la session 3 de la campagne	136
D.4 Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétriques des techniques topométrique, GPS et combinées sur 10 minutes pour la session 4 de la campagne	137
D.5 Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétriques des techniques topométrique, GPS et combinées sur 10 minutes pour la session 5 de la campagne	137
D.6 Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétriques des techniques topométrique, GPS et combinées sur 10 minutes pour la session 6 de la campagne	138
D.7 Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétriques des techniques topométrique, GPS et combinées sur 10 minutes pour la session 7 de la campagne	138
D.8 Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétriques des techniques topométrique, GPS et combinées sur 10 minutes pour la session 8 de la campagne	139
D.9 Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétriques des techniques topométrique, GPS et combinées sur 10 minutes pour la session 9 de la campagne	139
D.10 Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétriques des techniques topométrique, GPS et combinées sur 10 minutes pour la session 10 de la campagne	140
D.11 Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétriques des techniques topométrique, GPS et combinées sur 10 minutes pour la session 11 de la campagne	140

LISTE DES TABLEAUX

D.12 Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétriques des techniques topométrique, GPS et combinées sur 10 minutes pour la session 12 de la campagne	141
---	-----

Table des figures

1.1	Schéma détaillé des différentes possibilités de combinaison	32
1.2	Ensemble des combinaisons existantes entre GPS et topométrie	35
1.3	Schéma de combinaison de matrices normales	36
1.4	Schéma représentant les différentes mesures topométriques	38
1.5	Schéma représentant l'impact d'une zone de couverture locale sur le système GPS	42
1.6	Etude de l'erreur de la troposphère sur une courte ligne de base en variant les paramètres du modèle	44
1.7	Schéma de l'effet des trajets multiples [Elósegui et al. 1995]	45
1.8	Figure représentant les effets des trajets multiples sur la double différence L1	47
1.9	Figures représentant les effets des trajets multiples sur une série temporelle de coordonnées	48
1.10	Résidus de double différence avec trajets multiples calculés L1 pour une paire sélectionnée de satellites 7 et 30.	49
1.11	Série temporelle de positions cinématiques	50
1.12	Série temporelle en Est de l'antenne supposée déplacée	51
1.13	Différence de jour sidéral sur les séries temporelles de position en Nord . . .	52
1.14	Série temporelle en Nord résultant du calcul par triple différence en jour sidéral	54
1.15	Carte de trajets multiples pour la station ZIMM , source [GPSPP 2006] . .	55

TABLE DES FIGURES

2.1	Schéma du réseau à 2 points simulé	58
2.2	Schéma d'une ellipse	59
2.3	Evolution de la précision GPS en fonction de la durée de session	61
2.4	Précision planimétrique à 95% de simulation de GPS, topométrie et de la combinaison de techniques sur une session de 30 secondes	62
2.5	Précision planimétrique à 95% de simulation de GPS, topométrie et de la combinaison de techniques sur une session de 10 minutes	64
2.6	Schéma d'installation des instruments sur le même point	67
2.7	Photos des adaptateurs entre antenne GPS et tachéomètre	68
2.8	Schéma du réseau à 2 points de la campagne	70
2.9	Précision planimétrique de 95% de la topométrie, du GPS et de la combi- naison de techniques sur une session de 30 secondes	72
2.10	Précision planimétrique de 95% de la topométrie, du GPS et de la combi- naison de techniques sur une session de 10 minutes	74
2.11	Précisions planimétrique de 95% de la topométrie, du GPS et de différentes combinaisons de techniques de premier niveau sur une session de 30 secondes	78
2.12	Précisions planimétrique de 95% de la topométrie, du GPS et de différentes combinaisons de techniques de premier niveau sur une session de 10 minutes	80
3.1	Schéma du réseau à trois points	83
3.2	Schéma du réseau bi-dimensionnel simulé	85
3.3	Cartes représentant les demi-grands axes des ellipses de confiances de la topométrie pour une ligne de base de 300 mètres et sur une session de 10 minutes	87
3.4	Cartes représentant les demi-grands axes des ellipses de confiances du GPS pour une ligne de base de 300 mètres et sur une session de 10 minutes . . .	88

TABLE DES FIGURES

3.5	Cartes représentant les demi-grands axes des ellipses de confiances de la combinaison de deuxième niveau pour une ligne de base de 300 mètres et sur une session de 10 minutes	89
3.6	Cartes représentant les gains des demi-grands axes des ellipses de confiances de la combinaison de deuxième niveau pour une ligne de base de 300 mètres et sur une session de 10 minutes	90
3.7	Cartes représentant les aplatissements des ellipses de confiances de la topométrie pour une ligne de base de 300 mètres et sur une session de 10 minutes	91
3.8	Cartes représentant les aplatissements des ellipses de confiances du GPS pour une ligne de base de 300 mètres et sur une session de 10 minutes	92
3.9	Cartes représentant les aplatissements des ellipses de confiances de la combinaison de deuxième niveau pour une ligne de base de 300 mètres et sur une session de 10 minutes	93
3.10	Superposition du campus de l'Université et de la carte de précision 3.3	94
3.11	Schéma du réseau de campagne	95
3.12	Comparaison des séries temporelles simulées et réelles des demi-grands axes topométriques (en haut), GPS (milieu) et après combinaison (en bas) sur le point GMP sur une période de 22 heures	97
3.13	Séries temporelles des données réelles des demi-grands axes topométriques, GPS et après combinaison sur le point GMP sur une période de 22 heures . .	98
A.1	Schéma des paramètres géométriques d'une ellipse	114
B.1	Précision planimétrique à 95% de simulation de GPS, topométrie et de la combinaison de techniques sur une session de 1 minute	115
B.2	Précision altimétrique à 95% de simulation de GPS, topométrie et de la combinaison de techniques sur une session de 1 minute	117

TABLE DES FIGURES

B.3	Précision planimétrique à 95% de simulation de GPS, topométrie et de la combinaison de techniques sur une session de 2 minutes	118
B.4	Précision altimétrique à 95% de simulation de GPS, topométrie et de la combinaison de techniques sur une session de 2 minutes	119
B.5	Précision planimétrique à 95% de simulation de GPS, topométrie et de la combinaison de techniques sur une session de 3 minutes	120
B.6	Précision altimétrique à 95% de simulation de GPS, topométrie et de la combinaison de techniques sur une session de 3 minutes	122
B.7	Précision planimétrique à 95% de simulation de GPS, topométrie et de la combinaison de techniques sur une session de 5 minutes	122
B.8	Précision altimétrique à 95% de simulation de GPS, topométrie et de la combinaison de techniques sur une session de 5 minutes	124
B.9	Précision planimétrique à 95% de simulation de GPS, topométrie et de la combinaison de techniques sur une session de 7 minutes	124
B.10	Précision altimétrique à 95% de simulation de GPS, topométrie et de la combinaison de techniques sur une session de 7 minutes	126

Introduction

Le contexte

L'étude réalisée ci-après a été menée au sein du Laboratoire de Géodésie et Géomatique (L2G) de l'École Supérieure des Géomètres et Topographes (ESGT) située au Mans.

Le L2G est un laboratoire de recherche public placé sous la tutelle du Conservatoire National des Arts et Métiers (CNAM). Il a été créé lors de l'implantation de l'école d'ingénieur en 1997. Il est reconnu officiellement par le ministère de la recherche en tant que Jeune Équipe depuis 2007.

L'activité de recherche se développe autour des disciplines regroupées sous le terme de géomatique. La géodésie a toujours eu la plus grande part de l'activité, notamment dans ses applications géophysiques. Selon AFT [2000], la géodésie désigne la science qui étudie la forme de la Terre et les moyens de se positionner à sa surface.

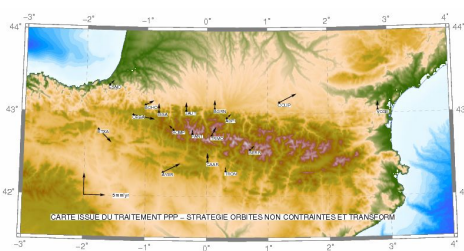


FIGURE 1. Champs de vitesse des Pyrénées sur l'année 2008 [Desoeuvre 2010]

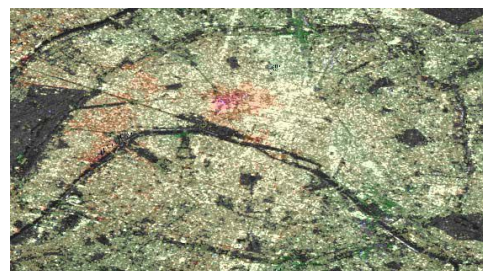


FIGURE 2. Déformation de Paris détectée par InSAR [Mimouni 2008]

L'un des thèmes de recherche du laboratoire est consacré à la géodésie appliquée aux mesures de déformation de l'écorce terrestre. Parmi les travaux passés du laboratoire sur ce thème, citons l'étude de faille en Islande, l'étude de la tectonique des plaques dans les Alpes avec le réseau RENAG ([Legru 2007]) et dans les Pyrénées avec le réseau ResPyr (voir figure 1 [Desoeuvre 2010]) puis l'étude de déformation en zone urbaine (figure 2

[Mimouni 2008]).

La Terre est en constante évolution depuis des milliards d'années et sa surface ne cesse de se transformer. Ses déformations, à toutes les échelles, qu'elles soient d'origine naturelle ou anthropique engendrent des phénomènes qui soulèvent des questionnements. Cela nécessite la mise en œuvre d'une stratégie d'action :

- observation et détection des différents mouvements de l'écorce terrestre
- réflexion sur les origines des phénomènes et les conséquences possibles
- mesure et analyse des déformations
- compréhension et modélisation des phénomènes mis en jeu
- prévention et information sur les risques encourus

qui permettrait d'effectuer une surveillance en continu appropriée.

Au fil du temps, différentes techniques de mesures géodésiques ont été élaborées notamment celles provenant de l'avènement de l'ère électronique. Le L2G dispose aujourd'hui de différentes techniques de mesure pour étudier ces déformations. Elles ont chacune des caractéristiques bien précises. Elles sont de nature spatiale (Global Positioning System (GPS), télédétection et Interférométrie Radar (InSAR)) ou terrestre (topométrie, télémétrie laser, gravimétrie). Elles peuvent être utilisées séparément ou combinées. L'étude de ces techniques, l'évaluation et les tentatives d'amélioration de leurs performances, leur mise en œuvre dans des projets de recherche sont des moyens, dans une situation donnée, de recommander la technique la mieux adaptée.

Le L2G s'est lancé depuis quelques années dans l'approche multi-techniques. En effet, différentes techniques sur la même étude ont permis d'effectuer des éléments de comparaison et par la suite de déterminer des critères de complémentarité. En utilisant ces paramètres, le laboratoire envisage de vérifier la possibilité de faire des combinaisons de techniques. Le laboratoire s'intéresse aux déformations sur des échelles très variées, cela va de l'étude du Grand Ouest de la France à l'étude en zone urbaine et s'est notamment investi sur différentes campagnes de mesure :

- En 2004, le L2G a participé à la campagne française d'étude de la surcharge océanique dans l'Ouest de la France sous l'égide du Groupe de recherche (GDR) G2 ([Vergnolle et al. 2008]). Plusieurs solutions ont été ainsi comparées issues de différentes stra-

tégies pour le traitement des données de géodésie spatiale de différents types (GPS, télémétrie laser, gravimétrie).

- Puis, le site du plateau de Calern a fait l'objet d'étude de comparaison sur les techniques déjà installées (télémétrie laser, GPS, gravimétrie) et sur la station laser mobile ([Nicolas 2000]).
- Parallèlement, des sites plus locaux ont été étudiés ([Doré 2009]), pour ce faire le L2G s'est associé avec l'équipe Géoscience de l'Université de Rennes 1 pour la surveillance du site de Ploemeur (Bretagne sud). Ce site fait d'ailleurs l'objet d'une surveillance multi-techniques (GPS, topométrie, gravimétrie).

Dans chaque cas, ces travaux ont utilisé différentes techniques pour étudier les phénomènes. Les résultats obtenus sont comparables mais présentent des degrés de qualité différents.

Utilité de la thèse

Le travail présenté ici va tenter de vérifier l'hypothèse suivante : "Est-il possible de combiner des techniques géodésiques pour la mesure de déformation?" Il vise non plus à comparer les différentes techniques mais à exploiter leur combinaison. De cette question centrale découlent plusieurs autres questions comme : "Comment combiner?", existe-t-il différentes façons de combiner? A quel niveau du processus de calcul peut-on combiner? ou bien : "A quelle fin peut-on combiner différentes techniques?", quelles améliorations peut-on espérer obtenir?

L'objectif principal de cette étude est d'approfondir les connaissances du laboratoire sur les différentes méthodes de combinaisons de techniques. Pour cela, il faut d'abord comprendre comment pouvoir effectuer la combinaison en général puis permettre la mise en place du cadre conceptuel de la combinaison.

Pour répondre aux questions précédemment posées, nous avons fait différents choix qui vont limiter le cadre de notre étude :

- Dans l'absolu, toutes les techniques citées précédemment pourraient être combinées en binôme ou en pluralité. Pour notre étude, nous réduirons notre champ d'action à la combinaison de deux techniques que sont le GPS et la topométrie qui apparaissent

complémentaires.

- Le contexte de l'étude est l'auscultation. Celle-ci peut mettre en œuvre ces deux techniques.

L'auscultation est la surveillance et le diagnostic des ouvrages ainsi que la surveillance des sols. Elle est principalement adaptée à la gestion de risques.

L'auscultation présente des caractéristiques définies :

- La zone d'étude est de faible étendue allant jusqu'à quelques kilomètres carrés.
- Les sessions de mesures sont de courte durée. Elles vont de quelques secondes à plusieurs heures. Durant les sessions, les mesures sont effectuées en continu.
- L'amplitude des déformations auxquelles on souhaite accéder est de l'ordre du millimètre.

Les résultats obtenus avec l'auscultation sont principalement des séries temporelles de coordonnées des points mesurés.

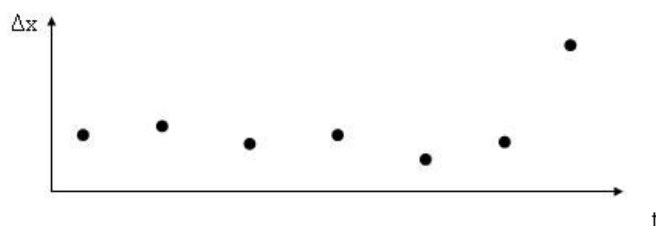


FIGURE 3. Série temporelle d'un point ausculté

Le schéma 3 représente de manière simplifiée la position d'un point en fonction du temps. Bien que l'on puisse supposer que le dernier point montre une déformation, il est impossible de le vérifier. Il faut donc regarder les précisions sur les coordonnées calculées.

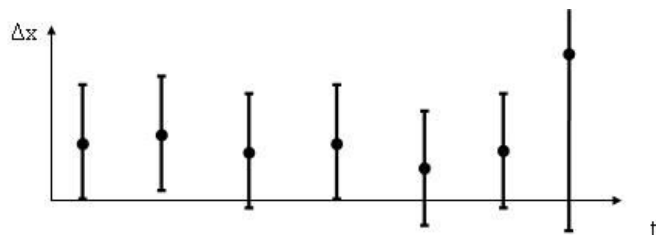


FIGURE 4. Série temporelle d'un point ausculté avec des barres d'erreurs importantes

Le schéma 4 reprend les points du schéma 3 et y ajoute des barres d'erreurs importantes.

Si l'on regarde le dernier point, on peut observer qu'au vu de la barre d'erreur importante le point ne montre pas une déformation mais plutôt une erreur dans la mesure.

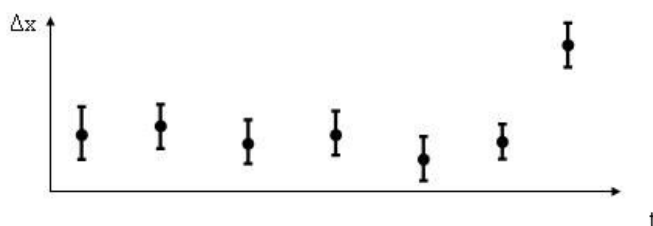


FIGURE 5. Série temporelle d'un point ausculté avec des barres d'erreurs fines

Le schéma 5 reprend les points du schéma 4 et remplace les barres d'erreurs par des barres d'erreurs plus fines. Si l'on regarde le dernier point, on peut observer qu'au vu de la barre d'erreur affinée le point montre une déformation.

Ceci confirme qu'il est nécessaire d'améliorer la précision des résultats et pas uniquement leur exactitude.

Pour mettre en œuvre la combinaison GPS/topométrie, nous choisirons une stratégie de combinaison basée sur la matrice normale. La combinaison devra être testée sur la base de simulations numériques et d'expérimentations sur le terrain dans des conditions contrôlées. Cette recherche s'effectue avec le souci de préparer à l'avenir de futures actions de recherche afin de généraliser des combinaisons de différentes techniques de mesure au sein du laboratoire.

Plan de la thèse

Dans les chapitres suivants, nous allons répondre aux différentes questions que nous venons de poser.

Dans un premier temps, nous étudierons le principe de combinaison en utilisant le processus de calcul basé sur les moindres carrés. Les combinaisons seront abordées de façon théorique et généralisée. Nous énumérerons les différentes combinaisons possibles en les distinguant selon l'étape d'intervention pendant le processus de calcul. Les différentes combinaisons seront divisées en deux catégories, les combinaisons de premier niveau qui

interviennent après calcul en s'appuyant sur les résultats et les combinaisons de deuxième niveau qui interviennent pendant le calcul en s'appuyant sur les données brutes. Nous nous intéresserons plus particulièrement à la combinaison par matrice normale. Afin d'obtenir des précisions les plus fines possibles, nous allons, avant de combiner, chercher à améliorer la précision du GPS en nous intéressant aux trajets multiples.

Dans un second temps, nous étudierons un cas pratique sur un réseau à deux points. Cette étude se fera sur la base de simulations numériques réalisées à partir de modélisation. Afin de les valider, une campagne sera mise en œuvre suite à une adaptation nécessaire des instruments de mesure.

Enfin, suivant le même principe décrit précédemment, nous vérifierons la viabilité de la combinaison sur un réseau à trois points.

Nous concluerons sur les différentes possibilités que la combinaison par matrice normale nous offre.

Chapitre 1

La combinaison de techniques

Dans le cadre de l'auscultation, la précision du calcul est aussi importante que les résultats. Ainsi, il ne s'agit pas uniquement de résoudre une équation mais aussi de pouvoir évaluer les résultats. Pour cela, les géodésiens utilisent différentes méthodes de calcul telles que les moindres carrés, le filtre de Kalman ou encore la méthode intégrale. La méthode de combinaison proposée dans ce document se base sur la méthode des moindres carrés. Cette méthode est utilisée par toutes les techniques géodésiques. Ainsi, il m'a paru plus judicieux de l'utiliser dans notre problématique de combinaison de techniques.

Avant de décrire les niveaux de combinaison, il est nécessaire de faire un rappel sur les moindres carrés pour être en phase sur les notations qui vont suivre.

1.1 Rappel sur les moindres carrés

D'après [Mikhail and Ackermann 1976], la méthode des moindres carrés est une méthode d'ajustement sur les estimations de paramètres inconnus à partir de leur équation d'état et d'observations. Un ajustement n'a de sens que si les observations sont redondantes, c'est-à-dire que si le nombre d'observations n est supérieur au nombre de paramètres à calculer m . Les moindres carrés ajustent les paramètres inconnus de telle sorte que la somme des carrés des résidus pondérés $\sum_i p_i \nu_i^2$ (p_i le poids, ν_i les résidus) soit minimale.

L'objectif est de déterminer la valeur des inconnues x . Nous avons recueilli des observations y , issues de mesures effectuées et nous possédons également une équation d'état f telle que $y = f(x)$.

1.1. RAPPEL SUR LES MOINDRES CARRÉS

En supposant que f est non linéaire, il est nécessaire d'appliquer le développement de Taylor au premier ordre sur une valeur approchée x_0 de x :

$$y - f(x_0) = f'(x_0) \cdot (x - x_0) \quad (1.1)$$

pour déterminer x .

Comme il peut y avoir plusieurs inconnues x , il est donc nécessaire d'avoir plus d'observations que d'inconnues. Compte tenu du nombre d'observations, il est plus facile de s'exprimer en terme de matrices. Ainsi, on remplacera l'équation 1.1 par

$$B = A.X \quad (1.2)$$

$$\begin{array}{lll} (y - f(x_0)) & = & B \quad : \text{ vecteur des observations} \\ \text{où } (f'(x_0)) & = & A \quad : \text{ matrice des dérivées partielles} \\ (x - x_0) & = & X \quad : \text{ vecteur des inconnues} \end{array}$$

Suite à la résolution de cette équation, on obtient la valeur ajustée des inconnues $\hat{X}$. A partir de cette équation, il est possible de calculer les résidus :

$$V = A.\hat{X} - B \quad (1.3)$$

On rappelle que les moindres carrés ajustent les paramètres inconnus de telle sorte que la somme des carrés des résidus pondérés soit minimale. En langage matriciel, cela donne l'équation :

$$A^T.P.V = 0 \quad (1.4)$$

avec P la matrice de pondération. En remplaçant V par son expression de l'équation 1.3 dans l'équation 1.4, on obtient la relation :

$$A^T.P(A.X - B) = 0 \quad (1.5)$$

Pour pouvoir déterminer $\hat{X}$, il suffit de résoudre l'équation :

$$\underbrace{(A^T.P.A)}_{\text{matrice normale } N} . X = \underbrace{A^T.P.B}_{\text{matrice de second membre } C} \quad (1.6)$$

L'une des manières pour obtenir $\hat{X}$ est d'inverser N .

Comme l'équation d'état a été linéarisée au premier ordre au départ, l'ajustement $\hat{X}$ n'est pas l'ajustement vrai. On introduit donc un paramètre de convergence c tel que $\hat{X} \leq c$. Si ce n'est pas le cas, il faut réitérer en introduisant les nouvelles valeurs $X = X_0 + \hat{X}$ comme nouvelles valeurs approximatives.

Après convergence, on obtient les valeurs des inconnues telles que $X = X_0 + \hat{X}$.

Les moindres carrés permettent également d'obtenir la précision de X . Il devient donc nécessaire de calculer les résidus des observations. A partir de ces résidus, il est possible de calculer le coefficient de qualité du calcul σ_0^2 : l'estimateur du facteur unitaire de variance.

$$\sigma_0^2 = \frac{\hat{V}^T.P.\hat{V}}{n - m} \quad (1.7)$$

Ayant ce paramètre, il est possible de calculer les précisions des résultats grâce à la matrice inverse de N pondérée ou appelée la matrice de variance-covariance pondérée Q :

$$Q = \sigma_0^2.N^{-1}$$

1.2 Principe de combinaison

1.2.1 Les combinaisons en moindres carrés

Chaque technique géodésique a ses avantages et ses inconvénients. On peut constater que certains avantages d'une certaine technique peuvent compenser les inconvénients d'une autre. L'idée serait alors de combiner ces deux techniques de telle sorte qu'un maximum de conditions se compense et apporte une amélioration. Il existe pour cela différents niveaux de combinaison de techniques géodésiques. Les combinaisons les plus souvent utilisées étant décrites dans la figure 1.1.

1.2. PRINCIPE DE COMBINAISON

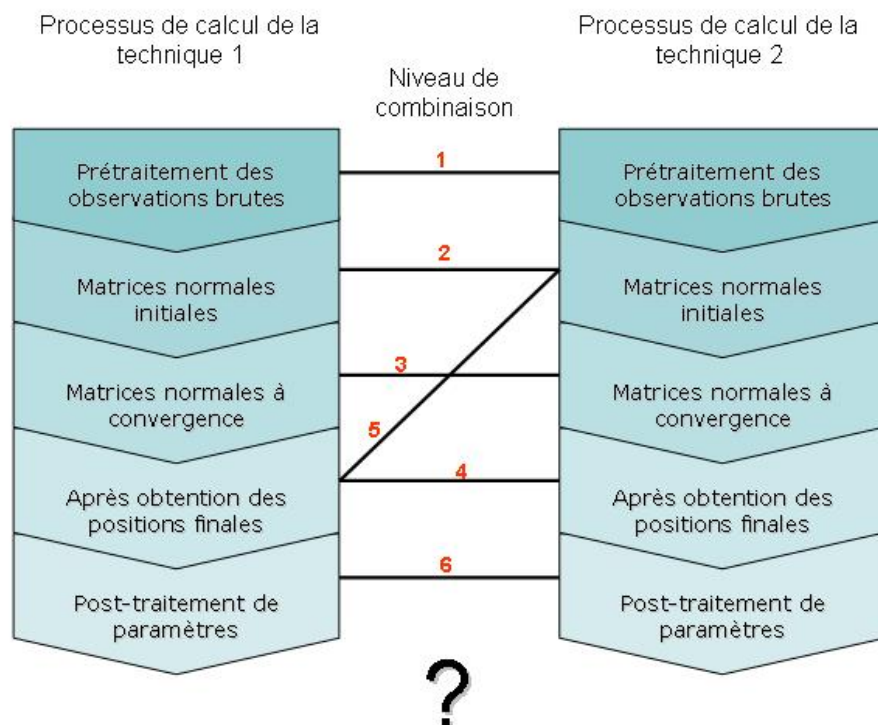


FIGURE 1.1 – Schéma détaillé des différentes possibilités de combinaison

Les différentes combinaisons sont détaillées ci-après. Les numéros inscrits pour chaque combinaison dans la figure 1.1 correspondent aux numéros des paragraphes suivants.

1. La combinaison des observations brutes consiste à combiner les mesures brutes de chaque technique afin de créer de nouvelles mesures. Elle est rarement utilisée pour combiner deux techniques différentes. En revanche, elle est très souvent utilisée pour combiner plusieurs types de mesures différents provenant d'une même technique. Prenons l'exemple du GPS où sont créées les nouvelles mesures L3 et L4 en combinant les ondes L1 et L2.

2. Les équations normales initiales sont calculées à partir des équations différentielles. Ces équations peuvent être concaténées pour faire un seul système de calcul global. Cela permet de traiter toutes les mesures en bloc. Ainsi, les coordonnées finales auront déjà été ajustées par rapport à toutes les techniques. Par contre lors du processus de calcul, plus

de contraintes apparaissent. Il faut prendre en compte le référentiel de chaque technique et transformer les inconnues pour en avoir le maximum en commun. Elle garantit un niveau de précision élevé car le nombre total de mesures est amplement supérieur aux nombres de paramètres inconnues et permet également de déterminer plus rapidement les paramètres annexes (ambiguïtés, zéro du cercle...). Étant donné que cette combinaison devra être effectuée à chaque itération du calcul, le temps total de processus pourrait s'alourdir. A partir de deux techniques et en suivant l'équation 1.6, l'équation de combinaison est :

$$X = (k_1.N_1 + k_2.N_2)^{-1} . (k_1.C_1 + k_2.C_2) \quad (1.8)$$

L'objectif de mon travail est de permettre à court terme de réaliser ce type de combinaison entre les techniques GNSS et topométriques.

3. Les équations normales à convergence sont les équations normales extraites des calculs de chaque technique après avoir atteint la convergence du système. Le principe est le même que la combinaison précédente à part le fait que la combinaison ne s'effectue qu'une seule fois et uniquement après la convergence atteinte par chaque processus de calcul.

La combinaison par matrices normales est utilisée par plusieurs projets importants tels que :

- Le logiciel d'orbitographie GINS du CNES (cf [Marty 2002]) utilise cette combinaison pour déterminer des orbites de satellites à partir de stations GPS, LASER, DORIS et VLBI.
- L'ITRF 2008 est le premier ITRF à utiliser la combinaison des matrices normales pour calculer les paramètres du référentiel mondial (cf [Altamimi et al. 2011]).

4. La combinaison des coordonnées de chaque technique est la combinaison en aval du processus de calcul. La combinaison de coordonnées est utilisée lorsqu'il faut raccorder plusieurs réseaux. Ceci est très souvent utilisé lors d'auscultations de longue durée effectuées par différentes techniques en alternance (cf [Nishimura et al. 2003]) ou simultanément. L'éventail de mesures de ces réseaux peut provenir de dates et de conditions de campagne différentes. A partir de points communs, on contraint les réseaux en mettant des poids différents pour chaque technique. Lorsque ces coordonnées sont recalculées en fonction de

ces poids, elles sont considérées comme connues et donc comme constantes. Ensuite, chaque réseau est recalculé pour pouvoir s'ajuster à ces constantes dans le processus de calcul. On obtient ainsi un réseau dense mais non homogène. A partir de deux techniques pondérées par α et respectivement β , on obtient

$$X_f = \alpha.X_1 + \beta.X_2 \quad (1.9)$$

5. La combinaison mixte est une combinaison qui s'effectue à partir de techniques à différentes étapes du processus de calcul. Le cas le plus fréquemment utilisé consiste à prendre les coordonnées finales calculées par une technique et de les utiliser comme paramètres initiaux pour le calcul d'une autre technique. La combinaison de coordonnées GPS et de mesures brutes topométriques est la combinaison la plus utilisée lors de travaux topographiques. Lors d'un lever de terrain ou d'auscultation, le réseau de points est mesuré par rapport à un repère local lâche. A l'aide du GPS, les points du réseau considérés comme référence s'intègrent dans le système de référence global. Ainsi, le réseau étudié devient géoréférencé. On peut également utiliser le vecteur GPS comme mesure (cf [Columbus 2009] et [Geolab 2009]).

6. La combinaison après traitement de différentes techniques est utilisée pour rechercher des paramètres dans un modèle de déformation géophysique ou géotechnique. Cela combine différentes techniques qui ont surveillé le même phénomène, pas forcément en même temps, chacune indépendamment les unes des autres. Chaque technique permet la détection d'une déformation qui lui est propre. Cette combinaison est en fait un calcul par les moindres carrés supplémentaire où seul le paramètre recherché est l'inconnu, les résultats des techniques sont les mesures. Cette combinaison est utilisée pour la surveillance volcanique à partir de séries temporelles de gravimètres et d'antennes GPS entre autres ([Vasco et al. 2007]).

1.2.2 La combinaison entre GPS et topométrie

Les techniques étudiées dans ce document sont le GPS et la topométrie. Nous allons voir les différentes combinaisons possibles entre ces deux techniques.

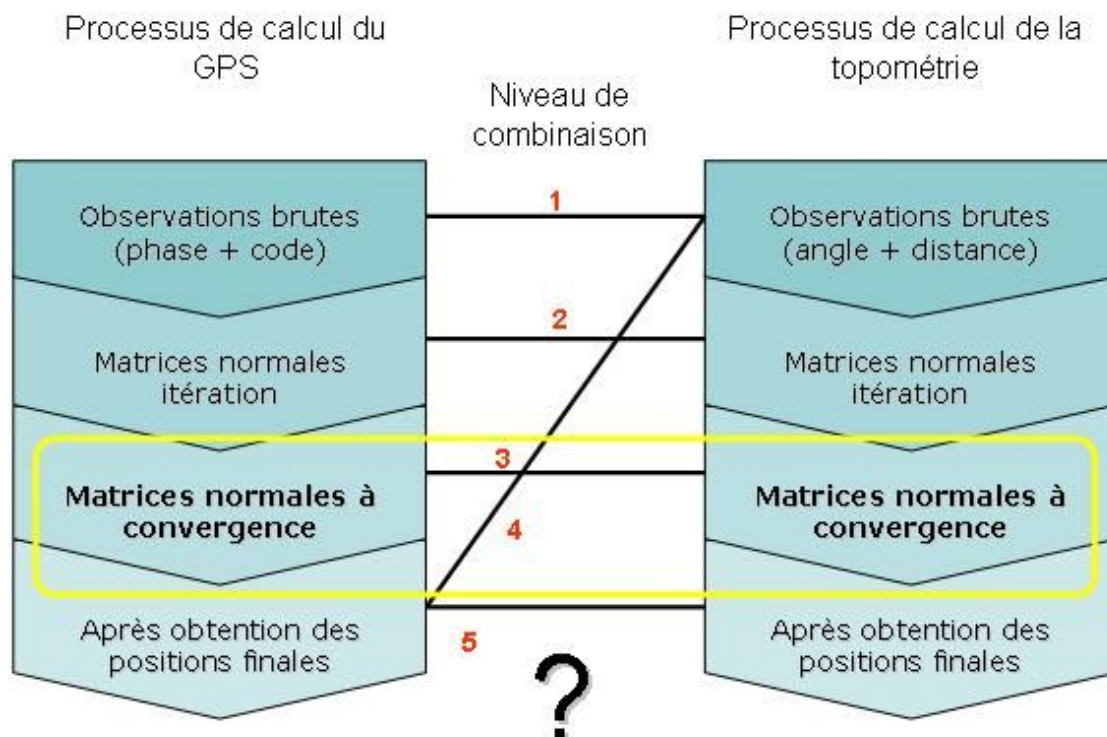


FIGURE 1.2 – Ensemble des combinaisons existantes entre GPS et topométrie

On retrouve dans le schéma 1.2 les combinaisons appliquées à ces deux techniques.

1. Combinaison par observation brutes
2. Combinaison par matrices normales à itération
3. Combinaison par matrices normales après convergence
4. Combinaison par coordonnées

On s'intéressera plus particulièrement à la combinaison cerclée de jaune : la combinaison par matrice normale.

1.3 Combinaison par matrices normales

La combinaison par matrices normales qui nous intéresse s'effectue lors de la convergence du processus de calcul du GPS et de la topométrie. Il suffit ensuite d'extraire les matrices normales et les facteurs unitaires de variance estimés de chaque technique.

La matrice normale de la combinaison du GPS et de la topométrie s'obtient par la simple concaténation pondérée de la matrice normale topométrique (N_{topo}) et de la matrice normale GPS (N_{gps}). Les matrices sont pondérées par leur facteur unitaire de variance (k_{gps} et k_{topo}). On obtient alors la matrice normale combinée (N_{fusion}), qu'il suffit d'inverser pour obtenir la matrice de variance/covariance combinée (Σ_X) et accéder aux précisions des points (cf figure 1.3).

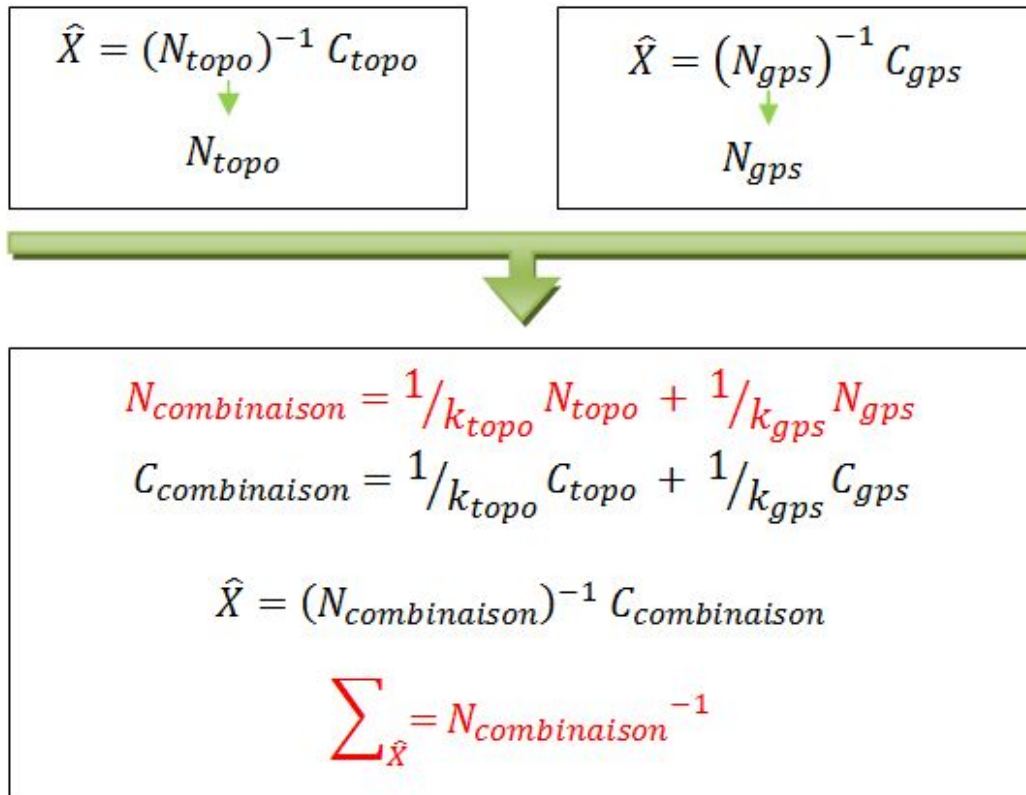


FIGURE 1.3 – Schéma de combinaison de matrices normales

1.4 Amélioration des techniques

Avant de combiner le GPS et la topométrie pour voir s'il est possible d'améliorer la précision, il serait intéressant d'obtenir la meilleure précision possible pour chacune des deux techniques prises séparément.

1.4.1 La topométrie

1.4.1.1 Théorie

La topométrie réunit les différentes techniques de mesures locales de la géodésie terrestre. Elle inclut le nivellement, les observations astronomiques et les triangulations. La majorité des observations est référencée à un système géodésique local lié à l'instrument. Pour la suite de ce document, nous nous intéresserons uniquement aux mesures réalisées avec des stations totales. Ces mesures sont basées sur le principe de la triangulation et de la télémétrie. Les mesures effectuées sont des angles (horizontal et vertical) et une distance entre deux points (cf figure 1.4). Ces mesures permettent de calculer un positionnement relatif, où des instruments pouvant faire toutes les mesures combinées sont le plus souvent utilisés (théodolite, tachéomètre, station totale...). Nous allons détailler les mesures ci-après.

La lecture horizontale H est un angle horizontal entre le plan vertical passant par le zéro du limbe du cercle horizontal de l'instrument et le plan vertical passant par le point visé. Ce zéro du gisement de limbe est une variable inconnue secondaire du problème.

La distance zénithale Z est l'angle entre la direction du zénith et la direction de la cible.

La distance suivant la pente D représente un paramètre important pour le positionnement. Cela fournit des relations géométriques entre les points et établit l'échelle d'un réseau géodésique classique.

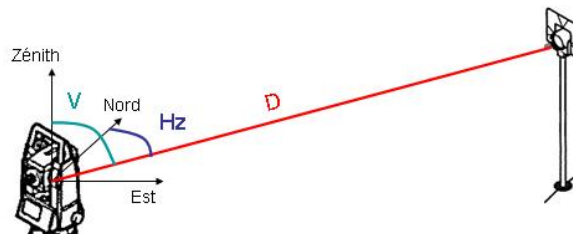


FIGURE 1.4 – Schéma représentant les différentes mesures topométriques

Les mesures effectuées d'un tachéomètre T sur une cible C sont donc : une distance zénithale, une lecture horizontale et une distance pente. La modélisation des coordonnées locales de la cible C (X_C, Y_C, Z_C) à partir de mesures faites par une station de coordonnées locales (X_T, Y_T, Z_T) est :

$$\begin{aligned} X_C &= X_T + D \cdot \cos H - H_0 \cos Z \\ Y_C &= Y_T + D \cdot \sin H - H_0 \cos Z \\ Z_C &= X_T + D \cdot \sin Z \end{aligned} \quad (1.10)$$

avec H_0 le gisement du zéro du limbe horizontal.

1.4.1.2 Amélioration des mesures

Tous les instruments ont des caractéristiques particulières qui peuvent évoluer dans le temps et qui ont besoin d'être connues pour que des résultats corrects puissent être déduits des mesures. Ces caractéristiques peuvent être divisées en deux parties :

1.4. AMÉLIORATION DES TECHNIQUES

1. les facteurs internes : stabilité des composants électroniques
2. les facteurs externes : variations des conditions météorologiques

1. Les facteurs internes Les facteurs internes sont des erreurs systématiques liées à des caractéristiques particulières de l'instrument et peuvent être améliorées par des corrections instrumentales (étalonnage). Dans un tachéomètre, l'instrument pouvant être étalonné est le couple prisme - distancemètre. Un étalonnage de distancemètre peut être effectué sur une base d'étalonnage (ESRF [Martin and Gatta 2006], CERN) ou en utilisant un dispositif interférométrique.

$$D_{Vraie} = D + C + b.D + e_c + \nu \quad (1.11)$$

où :

D est la distance mesurée

C : constante d'addition (constante de prisme + zéro du tachéomètre)

b : facteur d'échelle

e_c : erreur cyclique du phasemètre

ν : erreur accidentelle

Ces erreurs peuvent être étalonnées pour être soustraites à la mesure de distance par diverses méthodes de calibration. Pour une détermination correcte des erreurs cycliques, la méthode préconisée dans notre cas est l'utilisation d'un banc d'étalonnage et d'un interféromètre laser.

Le banc utilisé à l'ESGT est un banc de 50 mètres de long, or les instruments vont être utilisés dans les campagnes de mesure sur des distances allant jusqu'à 1 kilomètre. La distance corrigée mentionnée ci-dessus doit donc être revue pour prendre en compte ce delta. Néanmoins, seul le facteur d'échelle (b) est à corriger, les autres paramètres de l'équation étant indépendants de la distance corrigée. Ce facteur d'échelle sera corrigé par la prise en compte des facteurs externes.

2. Les facteurs externes Les facteurs externes sont des erreurs liées à des caractéristiques particulières de l'environnement et peuvent être améliorées par une modélisation du gradient de l'indice de réfraction fondée sur des mesures environnementales.

Ce gradient de l'indice de réfraction n devra en général être déterminé avec beaucoup de soin. Il dépend des paramètres de l'atmosphère environnante (température T en Kelvin, pression partielle en vapeur d'eau H en mbar et pression atmosphérique P en mbar). Pour calculer n à partir de ces paramètres, on utilise des modèles d'indice de réfraction. Ces modèles varient les uns des autres et s'améliorent au fil du temps. Trois modèles coexistent pour la gamme de longueur d'onde du distancemètre électronique de la station. Le modèle officiel de l'IAG¹ est le modèle [Ciddor and Hill 1999]. Nous avons préféré utilisé le modèle de Barrel et Sears ([Barrell and Sears 1939]) qui reste le modèle communément utilisé par les professionnels de la topométrie.

Ainsi à partir du n obtenu, les mesures effectuées lors des campagne par le tachéomètre vont être corrigées. Ces corrections sont plus détaillées dans ([Kasser 1993]).

1.4.2 Le GPS

GNSS est le terme générique désignant les systèmes de positionnement et de navigation par satellites. Le fonctionnement est continu et indépendant des conditions météorologiques. Les plus connus sont les systèmes américain GPS, russe GLONASS et européen GALILEO. Nous allons uniquement parler de GPS par la suite.

Les bases et le fonctionnement du GPS sont expliqués dans plusieurs ouvrages de référence ([Hofmann-Wellenhof et al. 2001]). Il convient néanmoins de préciser les équations principales du GPS utilisées dans la suite du document.

L'équation de propagation peut être calculée de deux manières différentes :

- calcul à partir du code pseudo-aléatoire porté par le signal. La mesure est appelée pseudodistance, précise à 10cm - 1m.
- calcul à partir du décalage de phase. On parle de mesure de phase. La précision de la mesure est de quelques millimètres.

1. <http://www.gfy.ku.dk/iag/resolutions/res99.html>

1.4. AMÉLIORATION DES TECHNIQUES

Bien que les mêmes principes peuvent s'appliquer, l'équation de propagation du déphasage du signal diffère. La distance basée sur la propagation du signal ne se calcule plus en faisant la différence entre le temps d'émission et de réception, mais le nombre de fois où la phase s'est répétée. A cela s'ajoute le déphasage modulo 2π entre la phase émise et la phase reçue. La mesure obtenue est le déphasage et le compteur de phase. Le nombre de cycles entiers N qu'on appelle ambiguïté est à déterminer pour l'instant de la première mesure.

Les expressions courantes de la pseudodistance ρ et de la mesure de phase φ entre un satellite p et un récepteur k pour un signal i donné est :

$$\rho_{i,k}^p = D_k^p - c.\Delta t_k + c.\Delta t^p + I_{i,k,D}^p + T_k^p + \delta a_{k,i,D}^p + \delta m_{k,i,D}^p + \epsilon_{k,i,D}^p \quad (1.12)$$

$$\varphi_{i,k}^p = D_k^p - c.\Delta t_k + c.\Delta t^p - \lambda_i N_{i,k}^p - I_{i,k,\varphi}^p + T_k^p + \delta a_{k,i,\varphi}^p + \delta m_{k,i,\varphi}^p + \epsilon_{k,i,\varphi}^p \quad (1.13)$$

avec :

- D_k^p : distance géométrique entre le satellite p et le récepteur k
- Δt_k : erreur d'horloge du récepteur k
- Δt^p : erreur d'horloge du satellite p
- λ_i : longueur d'onde de la porteuse
- $N_{i,k}^p$: ambiguïté entière sur la fréquence i entre le satellite p et le récepteur k
- $I_{i,k}^p$: allongement dû à l'ionosphère sur la fréquence i
- T_k^p : allongement dû à la troposphère
- $\delta a_{k,i}^p$: allongement lié aux variations du centre de phase (PCV)
- $\delta m_{k,i}^p$: allongement de trajets multiples
- $\epsilon_{k,i}^p$: erreurs accidentelles

1.4.2.1 Le GPS en auscultation

Le GPS est une méthode géodésique de mesures globale adaptée pour les surveillances sur toute la surface de la Terre. Or, le type de zone de couverture étudié dans ce document

est une zone locale de moins d'un kilomètre carré. Il est donc possible d'appliquer certaines simplifications aux vues de la surface étudiée.

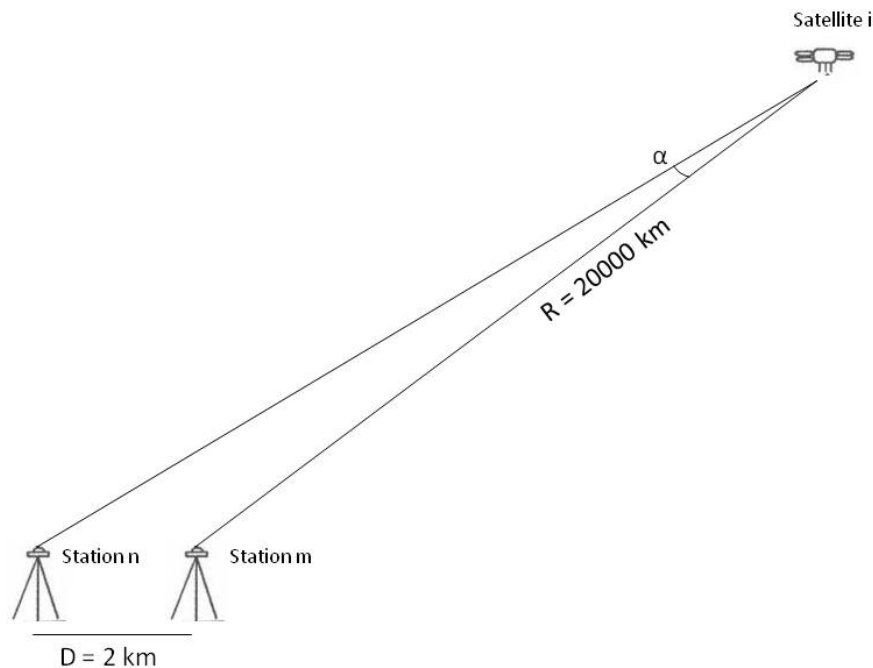


FIGURE 1.5 – Schéma représentant l'impact d'une zone de couverture locale sur le système GPS

les PCV Dans une zone d'étude locale, les antennes ne sont pas séparées de plus de moins d'un kilomètre. Comparée aux 20000 km séparant les antennes des satellites, cette distance est très petite. Comme indiqué dans [Wübbena et al. 2007], sur des courtes lignes de bases, les erreurs liées au PCV sont submillimétriques. Elles sont donc négligées dans notre cas.

les erreurs d'orbites La ligne de base b dans notre cas est au maximum de 1 km. L'erreur radiale δr sur l'orbite r des satellites est liée à l'erreur de la ligne de base δb par la relation :

$$\frac{\delta b}{b} = \frac{\delta r}{r} \quad (1.14)$$

En prenant une erreur standard sur l'orbite de 1 m sur les éphémérides radiodiffusées, l'erreur sur la ligne de base n'excède pas 0.05 mm. Nous avons donc décidé de ne pas la prendre en compte dans les calculs. L'utilisation des éphémérides radiodiffusées est suffisant pour les études que l'on souhaite effectuer.

l'ionosphère D'après la figure 1.5, on peut voir que les chemins empruntés par les signaux émis par le satellite sont très proches, dus à l'angle entre les signaux très faible (un dix-millième de radian ou plutôt 20" de degré). Pour cette raison, on peut considérer que les signaux suivent des chemins très proches dans la haute atmosphère, ce qui inclut l'ionosphère. Or d'après [Fund 2009], cette erreur est dépendante de l'élévation du satellite émetteur. Comme l'angle d'élévation entre les antennes et le satellite sont identiques (à 20" de degré près), on peut considérer que cette erreur est la même et donc qu'elle est éliminée par les doubles différences effectuées.

la troposphère Les chemins empruntés par les signaux émis par le satellite sont plus éloignés en basse altitude (taille de la ligne de base). A l'inverse de l'ionosphère, on ne peut pas considérer cette erreur identique sur chacun des signaux. Pour l'éliminer ou la réduire, il faut donc modéliser les effets troposphériques. Ces effets sont dépendants de la pression, température et humidité de l'atmosphère.

Deux modélisations sont disponibles :

- Les grilles des modèles atmosphériques (VMF1, [Boehm and Schuh 2004]). On peut s'apercevoir que les nœuds des grilles sont forts espacés (un pas de 15°) et la valeur interpolée sera similaire entre les deux stations séparées de seulement 1 km.
- les modèles empiriques de la troposphère ([Hofmann-Wellenhof et al. 2001]).

Soit le modèle de Saastamoinen ([Saastamoinen 1972]) au zénith dont l'équation est :

$$\Delta_{Tropo} = \frac{1}{\sin z} 0.002277 \left[p + \left(\frac{1255}{T} + 0.05 \right) e \right] \quad (1.15)$$

1.4. AMÉLIORATION DES TECHNIQUES

avec z l'élévation, p la pression atmosphérique en millibar, T la température en Kelvin et e la pression partielle de vapeur d'eau en millibar. Les paramètres standard atmosphériques sont 15°C pour la température, 1000 mbar pour la pression et 500 mbar pour la pression partielle de vapeur d'eau.

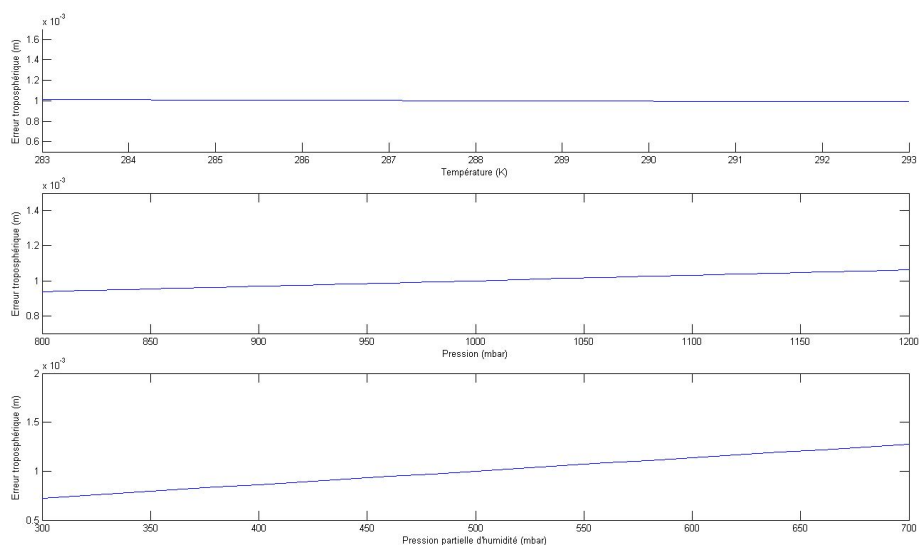


FIGURE 1.6 – Etude de l'erreur de la troposphère sur une courte ligne de base en variant les paramètres du modèle. La figure du haut représente la variation de la température, celle du milieu la variation de la pression et enfin celle du bas la variation de la pression partielle de vapeur d'eau

D'après la figure 1.6, en faisant varier ces paramètres un à un, on obtient donc la variation nécessaire de chacun d'entre eux pour obtenir une modification de 1 mm de cet effet troposphérique. On remarque ainsi que sur une différence d'angle de $20''$, l'erreur troposphérique avoisine toujours le millimètre. Cette erreur est donc acceptable et sera négligée par la suite.

Pour faciliter les calculs ultérieurs, nous allons émettre l'hypothèse que les effets troposphériques sont éliminés également. Il faut tout de même prendre garde aux réactions atmosphériques qui se déroulent à un angle d'élévation très bas. Pour cela, on bloquera l'angle de coupure à 15° . Après avoir la double différence, la nouvelle équation du GPS devient alors :

$$\varphi_{i,j}^{k,l} = \frac{f}{c}(\rho_i^k - \rho_i^l - \rho_j^k + \rho_j^l) - (N_i^k - N_i^l - N_j^k + N_j^l) + \Delta\nabla\delta m \quad (1.16)$$

1.4.2.2 L'erreur principale : les trajets multiples

Dans notre cas, les trajets multiples sont le facteur qui limite le plus la précision pour les applications de positionnement précis avec GPS. Ces trajets multiples ne sont pas éliminés par la double différence, même sur une ligne de base inférieure au kilomètre. De plus, les trajets multiples dépendent de l'environnement de chaque récepteur.

Simulation

Pour montrer les effets des trajets multiples sur la phase, nous avons d'abord décidé de simuler les effets des trajets multiples sur la phase. D'après [Elósegui et al. 1995], les trajets multiples proviennent de l'augmentation de la distance parcourue due au trajet indirect suivi par les signaux émis.

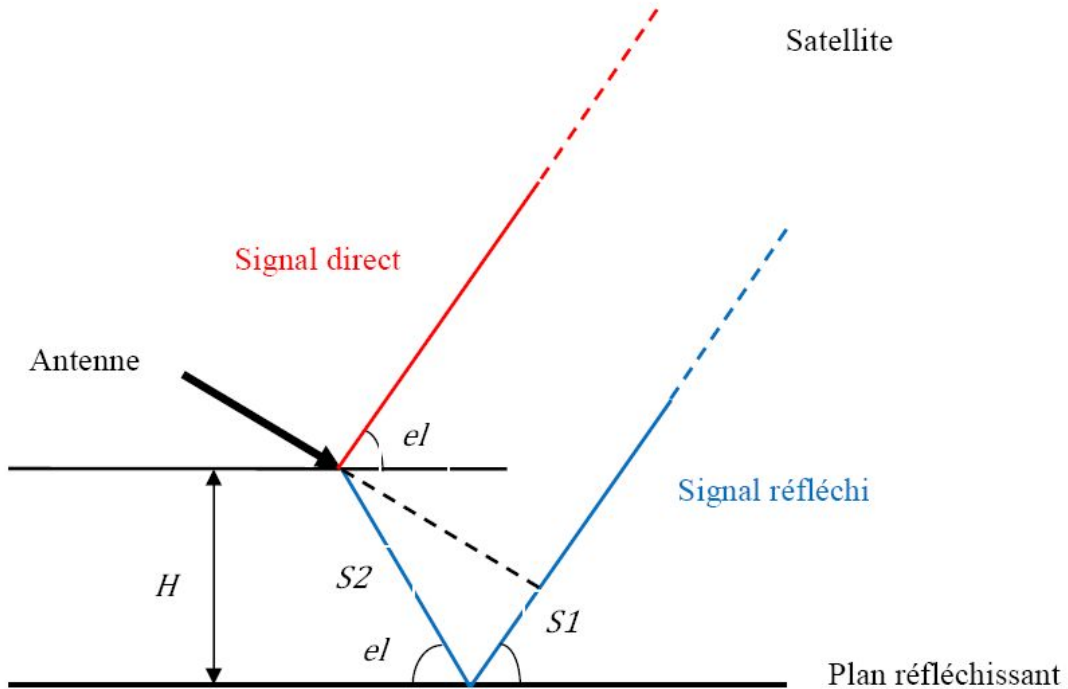


FIGURE 1.7 – Schéma de l'effet des trajets multiples [Elósegui et al. 1995]

1.4. AMÉLIORATION DES TECHNIQUES

A partir du schéma 1.7, il est possible de calculer cette augmentation en fonction de différents paramètres comme la hauteur H de l'antenne, le coefficient de réflexion du signal α du matériau réfléchissant le signal λ et l'angle d'élévation el du satellite. On obtient un décalage de la phase :

$$\delta\varphi = \arctan \left(\frac{\alpha \sin \left(4\pi \frac{H}{\lambda} \sin(el) \right)}{1 + \alpha \cos \left(4\pi \frac{H}{\lambda} \sin(el) \right)} \right) \quad (1.17)$$

A partir de l'équation 1.17, nous avons donc cherché à retrouver les effets des trajets multiples sur les doubles différences. Pour cela, nous avons simulé des mesures L1 GPS.

Les données en entrée sont 2 jours de données d'1 heure d'éphémérides de 11 satellites en octobre 2007 et de coordonnées de récepteurs théoriquement situés sur le toit de l'ESGT et espacés de 25 mètres. Pour simuler les signaux, les distances théoriques entre les satellites et les récepteurs ont été calculées pour chaque époque et a été rajoutée pour chaque mesure une erreur aléatoire de $\pm 2\text{mm}$. La double différence de ces deux signaux est ensuite calculée pour obtenir un signal de référence.

Pour une des deux antennes que l'on considère comme inconnue en coordonnées, on applique au signal L1 un décalage calculé à partir de l'équation 1.17 en prenant comme valeur des paramètres 1.50 mètre comme hauteur d'antenne et un coefficient de réflexion du signal de 0.1 correspondant au sol recouvert de béton. L'élévation est calculée en fonction d'une série temporelle de coordonnées de satellites provenant d'un fichier de navigation observé en octobre 2007 et des récepteurs qui se trouvent théoriquement sur le toit de l'ESGT. Ce décalage calculé est ensuite additionné au signal simulé de l'antenne. La double différence entre ce signal et le signal de l'antenne de référence est enfin calculée.

La figure 1.8 montre clairement l'implication des trajets multiples sur la double différence du signal. En effet, une double différence sans trajets multiples (courbe rouge de la figure 1.8) est un signal avec un simple bruit blanc d'une amplitude de 8 mm. Lorsque des trajets multiples sont introduits (courbe bleue de la figure 1.8), on obtient ainsi un signal avec un bruit coloré dont l'amplitude a augmenté jusqu'à 80 mm. Il serait intéressant de voir l'implication des trajets multiples dans le calcul de position de l'antenne GPS.

Les figures 1.9 montrent les effets des trajets multiples sur la série temporelle de co-

1.4. AMÉLIORATION DES TECHNIQUES

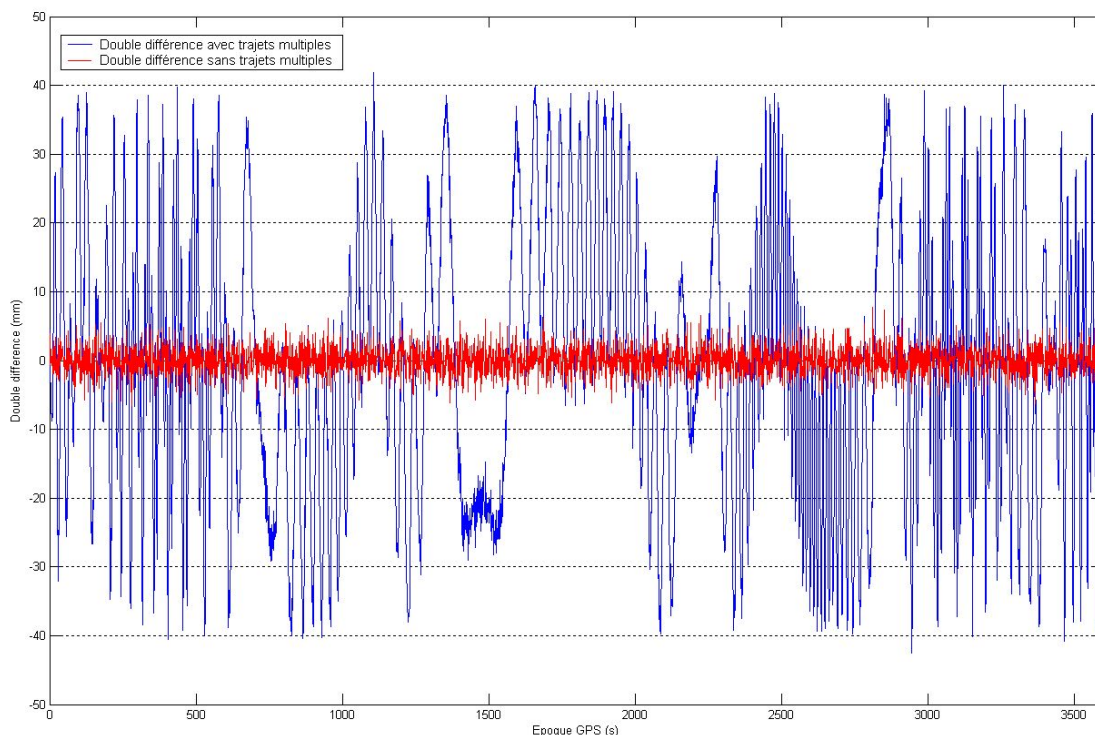


FIGURE 1.8 – Figure représentant les effets des trajets multiples sur la double différence L1. La courbe rouge représente une double différence entre deux satellites 30 et 2 et deux antennes espacées de 25 m sur une durée de 1 heure. La courbe bleue montre la même double différence avec un décalage lié aux trajets multiples

ordonnées de l'antenne. Les courbes rouges représentent les séries temporelles des trois composantes de l'antenne inconnue lorsque le signal émis par les satellites ne subit aucune dégradation. Ces courbes montrent que ces séries donnent la position de l'antenne avec un bruit blanc d'une amplitude de 4 mm. Lorsque les trajets multiples dégradent le signal, les séries temporelles des trois composantes correspondantes (courbes bleues) montrent que le bruit coloré détecté dans la courbe bleue de la figure 1.8 réapparaît avec une amplitude de 60 mm pour les composantes planimétriques et de 150 mm pour la composante altimétrique. Ces figures prouvent que les trajets multiples sont des éléments qu'il faut éliminer ou réduire au maximum du signal émis.

1.4. AMÉLIORATION DES TECHNIQUES

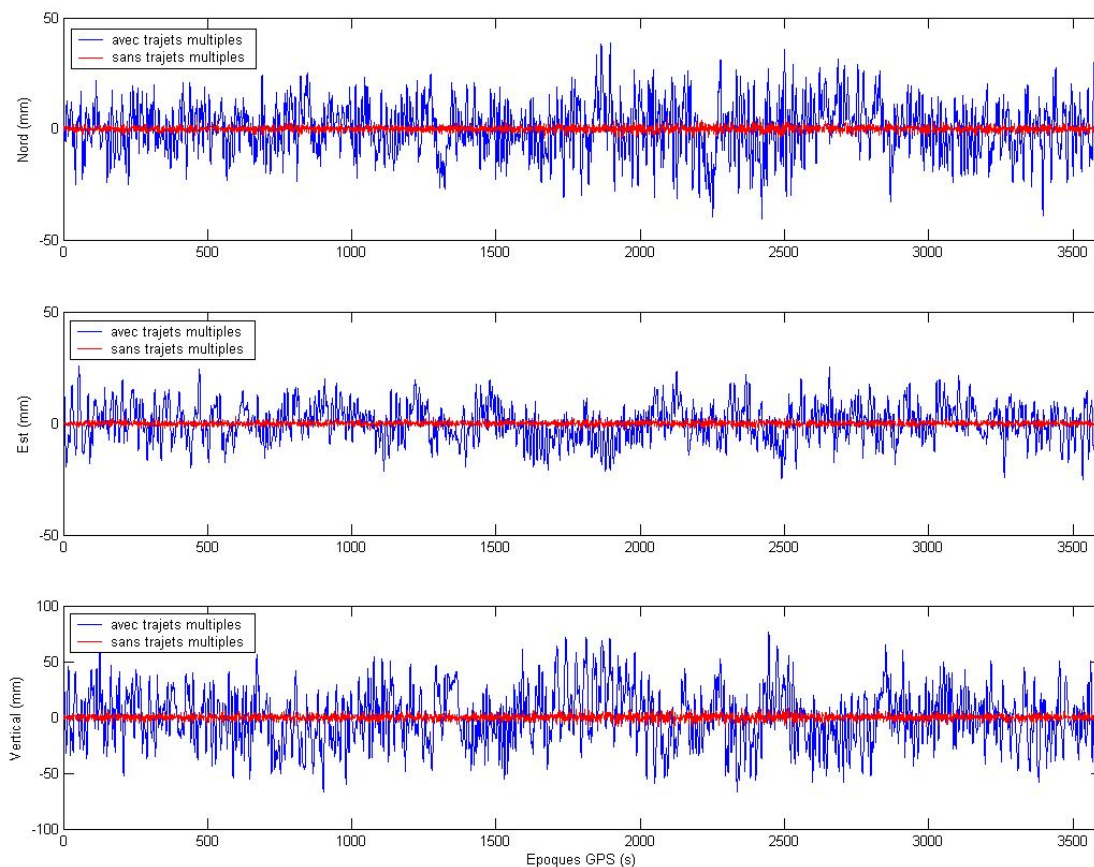


FIGURE 1.9 – Figures représentant les effets des trajets multiples sur une série temporelle de coordonnées. Les courbes rouges représentent la série temporelle de l’antenne inconnue calculée à partir des doubles différences précédentes sur une durée de 1 heure. Les courbes bleues montrent la série temporelle calculée à partir des doubles différences ayant un décalage lié aux trajets multiples

Données réelles

Pour montrer les effets des trajets multiples sur des données réelles, nous avons mis en place une expérience sur le toit de l’ESGT les 4 et 5 novembre 2007. L’antenne permanente de l’ESGT (MAN2) a été utilisée comme antenne de référence. Une seconde antenne a été mise en place à 20 mètres. Les mesures statiques furent enregistrées sur une période de deux heures (13h à 15h) à une cadence de 1 seconde sur les deux jours.

La position relative des 2 antennes est déterminée à partir de toutes les observations en utilisant la méthode de la double différence en mode statique. La position des satellites

1.4. AMÉLIORATION DES TECHNIQUES

est fournie par les éphémérides radiodiffusés. D'après les hypothèses de la section 1.4.2.1, les résidus de ces observations ne devraient contenir que les effets des trajets multiples et les erreurs accidentelles.

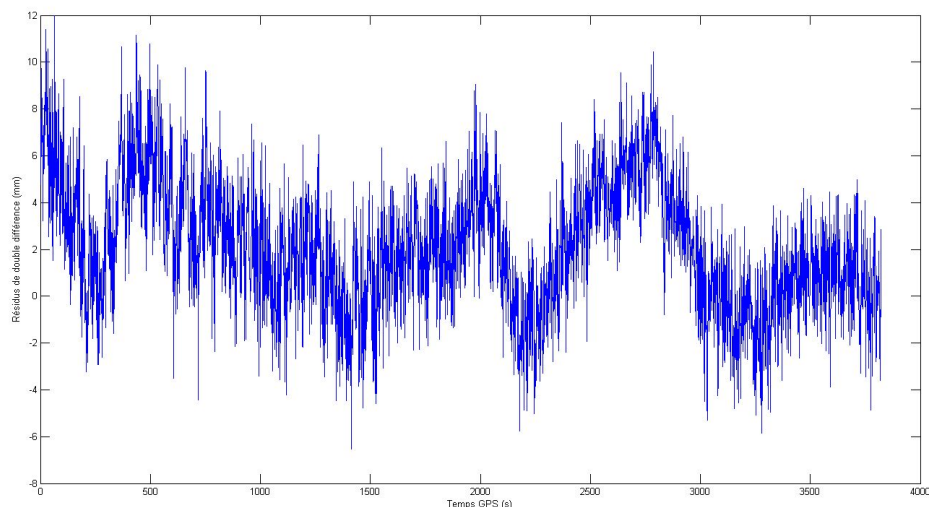


FIGURE 1.10 – Résidus de double différence avec trajets multiples calculés L1 pour une paire sélectionnée de satellites 7 et 30.

La figure 1.10 montre les résidus de double différence pour une paire de satellites sélectionnée où les trajets multiples entrent en jeu lors d'un cas réel. On peut facilement y voir que l'erreur provenant des trajets multiples, de l'ordre de $\pm 20\text{mm}$ ce qui correspond à l'amplitude du signal simulé, est modulée par un bruit de mesure plus faible.

Le fait que les trajets multiples d'une telle amplitude peuvent se retrouver dans les mesures de phase GPS limite la précision du positionnement cinématique (cf 1.11) de l'ordre du centimètre. Plusieurs méthodes existent pour réduire ces trajets multiples.

Amélioration par moyenne et positionnement statique

Le fait que les trajets multiples d'une telle amplitude peuvent se retrouver dans les mesures de phase GPS limite la précision de positionnement cinématique (cf 1.11) au niveau du centimètre. Pour des observations statiques, une précision de l'ordre du millimètre peut être atteinte après un temps d'observation conséquent (cf [Leica 2006]). Ces périodes doivent durer au minimum quelques minutes .

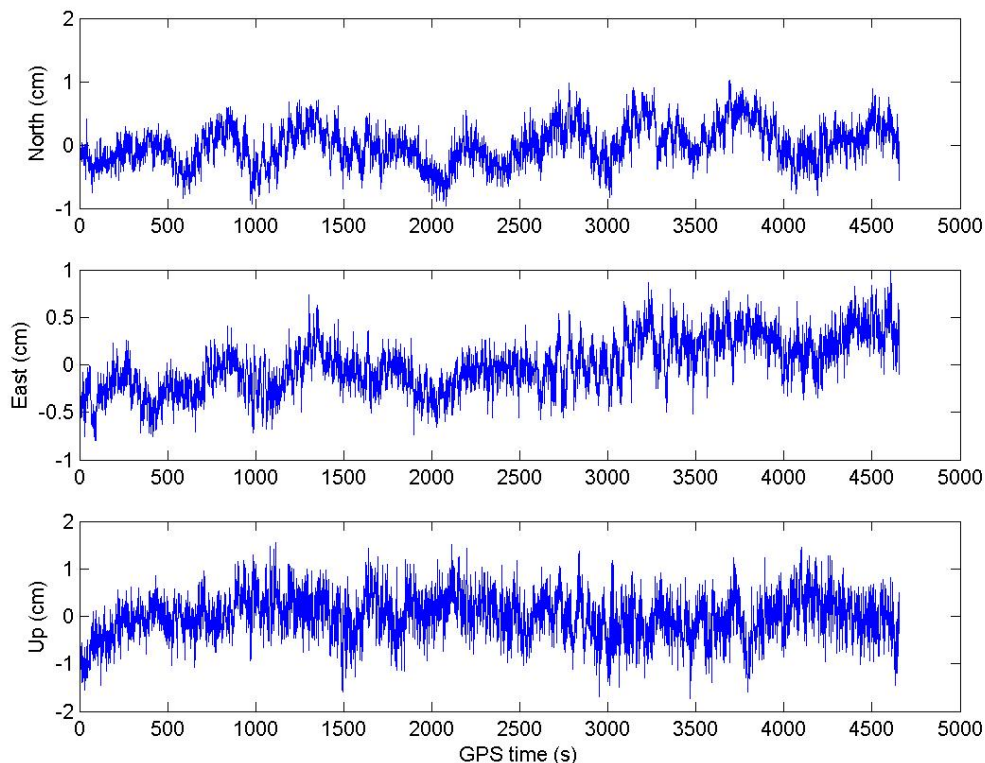


FIGURE 1.11 – Série temporelle de positions cinématiques

La méthode principalement utilisée est de calculer une moyenne temporelle. Une fenêtre de quelques minutes réduit principalement les bruits des mesures mais le signal périodique des trajets multiples reste visible. Cette valeur peut être réduite en faisant des moyennes sur de plus long termes.

Cependant, le fait de moyennner ne peut fonctionner uniquement que si l'on utilise des observations statiques et surtout si les déformations sont des phénomènes observés sur le long terme.

Amélioration par méthodes du jour sidéral

Les satellites GPS font une révolution autour de la Terre en 11h 58min 2s, ce qui correspond à la moitié d'un jour sidéral (23h 56min 4s). On peut donc dire que la constellation des satellites, à partir d'un point de la Terre, a la même configuration chaque jour sidéral.

1.4. AMÉLIORATION DES TECHNIQUES

C'est-à-dire le même satellite est visible à la même élévation et au même azimut.

Si l'environnement local de l'antenne reste inchangé d'un jour sur l'autre, la géométrie du signal direct et du signal retardé est la même. C'est-à-dire, les erreurs des trajets multiples sont également les mêmes. La différence de 2 mesures séparées d'un jour sidéral devrait donc être libérée de cette erreur.

Une seconde expérience a été mise en place. Pour pouvoir apprécier les améliorations des méthodes de minimisation des trajets multiples, on a effectué une étude sur les toits de l'Université du Maine où plusieurs antennes sont restées en place pendant plusieurs jours. Des mouvements factices ont été appliqués à une antenne spécifique. Ces mouvements recréent des déformations de petites amplitudes et de durées très courtes :

- 2 cm (1400 s)
- 1 cm (3200 s)
- 5 mm (4200 s)
- 2 mm (5200 s)
- 1 mm (6300 s)

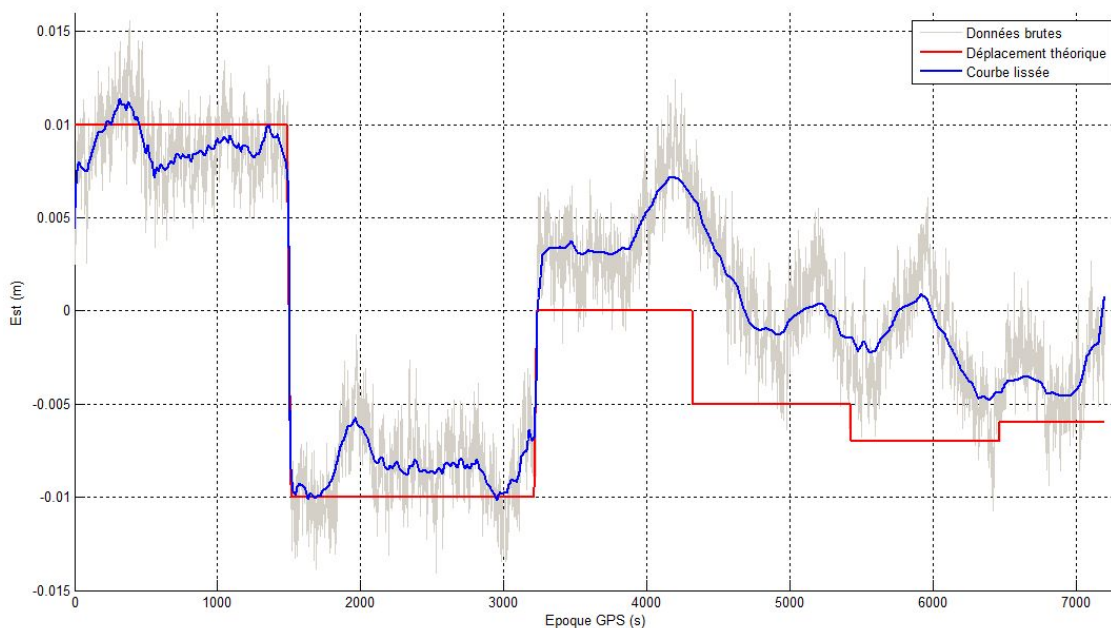


FIGURE 1.12 – Série temporelle en Est de l'antenne supposée déplacée

Une série temporelle de positions a été calculée en utilisant les mêmes paramètres que

l'expérience précédente à ceci près qu'un calcul systématique a été effectué.

La figure 1.12 représente ces déformations et servira pour les prochains calculs de référence. Ainsi, on pourra voir les impacts sur la position de la minimisation des trajets multiples. Sur cette figure, on aperçoit les déformations de l'ordre du centimètre (2 cm vers l'Ouest et 1 cm vers l'Est).

Plusieurs possibilités de calcul permettant de minimiser les trajets multiples vont être décrites ci-après.

Différence de jour sidéral sur les séries temporelles de position

L'une des méthodes permettant de minimiser les trajets multiples sans effectuer des calculs très poussés est d'effectuer la différence en jour sidéral sur la série temporelle de position après calcul (cf [Bock et al. 2000]). En effet, l'erreur de position liée aux trajets multiples devrait être la même si l'on décale la série temporelle d'un jour sidéral. Donc, la différence entre deux positions séparées d'un jour sidéral devrait être libérée de cette erreur. Il est d'ailleurs conseillé d'utiliser le jour sidéral précédent, le jour sidéral suivant, d'en faire la moyenne et de l'appliquer sur la série temporelle pour bien encadrer ces erreurs.

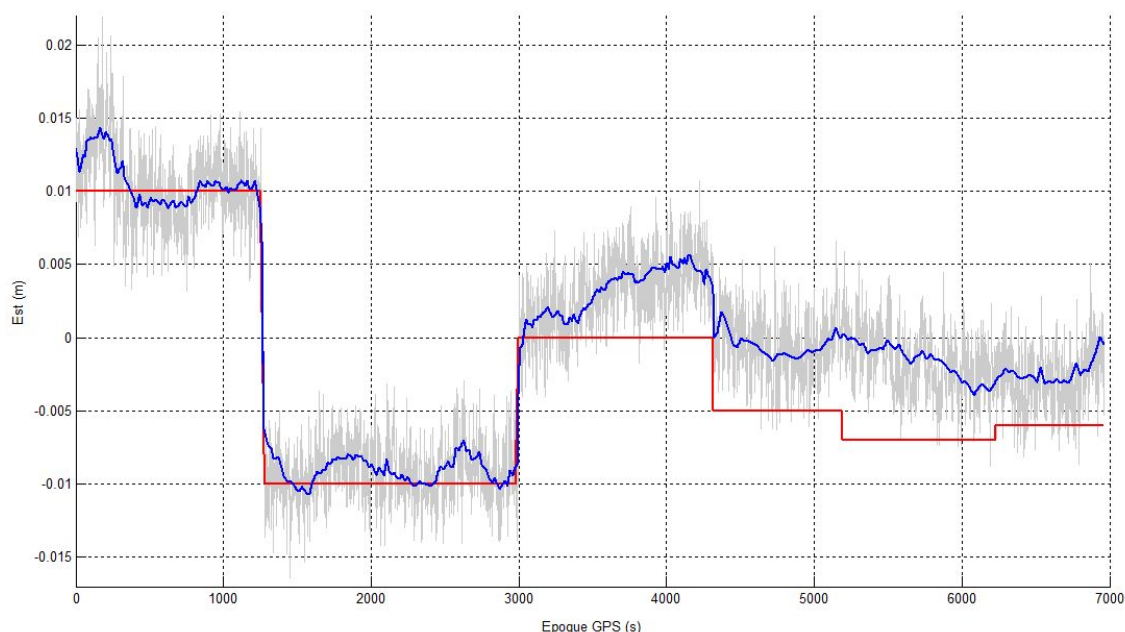


FIGURE 1.13 – Différence de jour sidéral sur les séries temporelles de position en Nord

La figure 1.13 représente l'application de cette méthode sur l'étude qui nous concerne. On peut voir aisément qu'une nouvelle déformation s'est révélée (5 mm vers l'Ouest). Cette déformation était noyée par le bruit et les trajets multiples dans la figure 1.12. De plus, les erreurs provoquées par les trajets multiples sont réduits : il ne reste pratiquement que du bruit blanc. Par contre, l'inconvénient majeur est l'accroissement du bruit blanc. En effet, ce bruit est plus important que dans la figure de référence. Aucune figure sur la composante Nord n'est montrée car aucune déformation résiduelle n'a été détecté.

Triple différence en jour sidéral sur les observations brutes

Une autre méthode permettant de minimiser les trajets multiples se réalise à l'intérieur du processus de calcul de positionnement en réalisant une troisième différence, celle-ci étant temporelle, en jour sidéral sur les observations brutes (cf [Wübbena et al. 2001]). Ainsi, l'erreur liée aux trajets multiples sera minimisée avant même de calculer les positions. De plus, le rapport de l'erreur maximale des trajets multiples sur un cycle d'ambiguïté est de l'ordre de 10. Ainsi, cette erreur ne modifie en rien le calcul d'ambiguïtés entières des observations brutes. Donc la troisième différence pourra être effectuée après leur résolution, permettant ainsi d'alléger le calcul. En prenant la formule précédente 1.13 sur les récepteurs k et l et les satellites p et q et sur deux temps t et $t+sd$, on obtient :

$$\begin{aligned}\varphi_{i,j}^{k,l}(t, t + sd) &= \varphi_{i,j}^{k,l}(t + sd) - \varphi_{i,j}^{k,l}(t) \\ \varphi_{i,j}^{k,l}(t, t + sd) &= \frac{f}{c} \left((\rho_i^k - \rho_i^l - \rho_j^k + \rho_j^l)(t + sd) - (\rho_i^k - \rho_i^l - \rho_j^k + \rho_j^l)(t) \right) \\ &\quad - \left((N_i^k - N_i^l - N_j^k + N_j^l)(t + sd) - (N_i^k - N_i^l - N_j^k + N_j^l)(t) \right)\end{aligned}\quad (1.18)$$

La figure 1.14 représente l'application de cette méthode sur l'étude qui nous concerne. Comme la méthode précédente, on peut apercevoir des déformations supplémentaires (5 mm et 2 mm vers l'Ouest). Ces déformations étaient noyées dans le bruit coloré dû aux trajets multiples. Ce bruit est réduit de manière significative. A l'instar de la méthode précédente, le bruit blanc est plus important mais moins que sur la figure précédente. Il est donc plus aisé de déterminer les déformations instantanées.

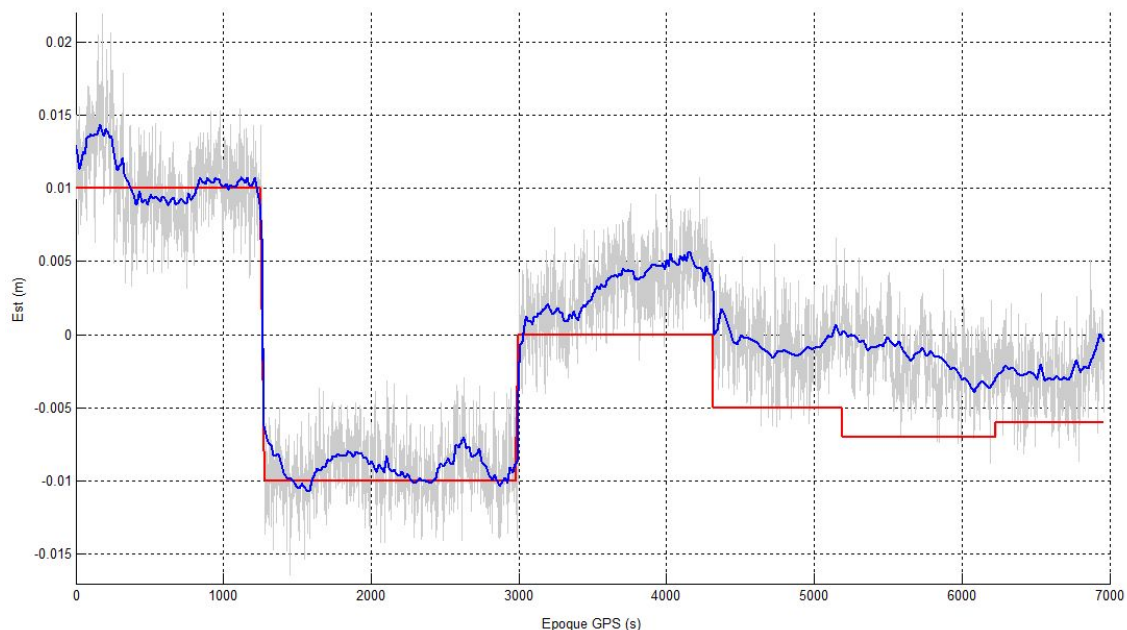


FIGURE 1.14 – Série temporelle en Nord résultant du calcul par triple différence en jour sidéral

Carte de trajets multiples

Les trajets multiples sont des erreurs liées à l'environnement de l'antenne. Comme la valeur des trajets multiples est liée à la position des satellites dans le ciel, le déplacement de ces satellites induit une instabilité temporelle de trajets multiples. Or, il a déjà été déterminé que les trajets multiples sont identiques lorsque les satellites se retrouvent à la même position (élévation et azimuth). C'est-à-dire pour chaque position de satellite dans le ciel, il existe un retard fixe lié aux trajets multiples. Ce retard peut être réappliqué à chaque fois qu'un satellite passe à cet azimuth et à cette élévation. En étendant cette idée sur toute la partie du ciel, il est possible de cartographier les retards des trajets multiples en fonction des azimuth et des élévations des satellites. [Marel and Gündlich 2006] proposent une méthode permettant de calculer ces retards pour chaque position. Comme effectué à la figure 1.10, les résidus des doubles différences sont calculés et extraits des séries temporelles. Il faut ensuite faire une inversion du problème pour retrouver, à partir des résidus de double différence, les résidus de zéro différence c'est-à-dire les résidus de chaque signal capté par l'antenne. Cette étape est particulièrement difficile puisque l'on augmente le nombre d'inconnues sans augmenter le nombre d'équations. De nombreuses hypothèses

1.4. AMÉLIORATION DES TECHNIQUES

doivent être donc émises.

Afin d'obtenir une carte parfaitement échantillonnée, il est conseillé d'utiliser 15 jours de données au minimum. Un mois est plutôt conseillé pour pouvoir avoir une répartition stochastique des échantillons et séparer au mieux les retards des trajets multiples aux bruits blancs des résidus.

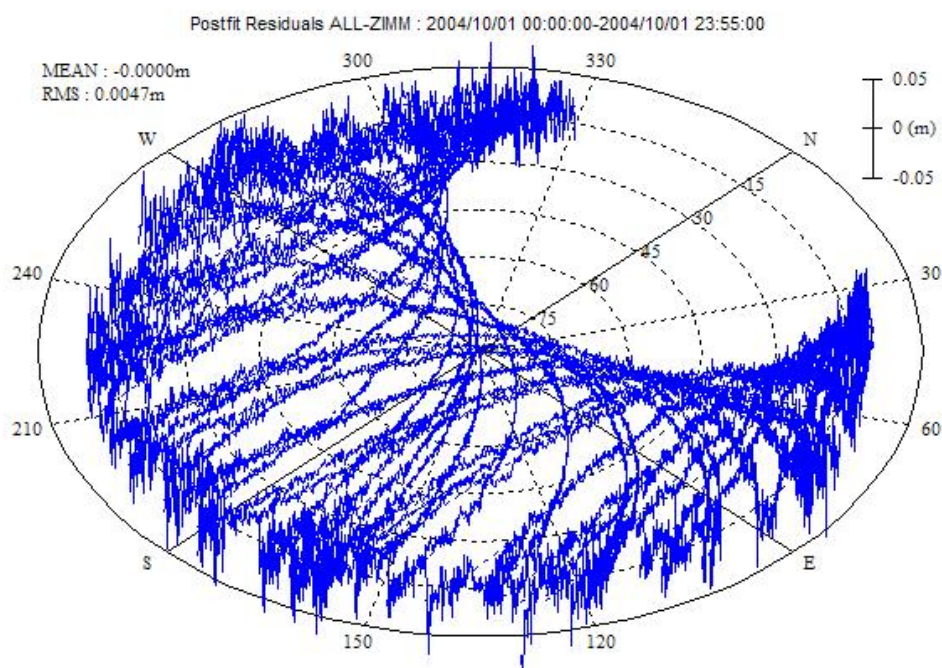


FIGURE 1.15 – Carte de trajets multiples pour la station ZIMM , source [GPSPP 2006]

Avec une carte de trajets multiples, on connaît l'erreur brute, en fonction de l'élévation de l'azimut du satellite. Ainsi pour réduire considérablement l'effet lié aux trajets multiples, il suffit de retirer du signal émis par le satellite la valeur de trajets multiples de la carte. Ces cartes ne sont pas répandues, cela est dû à la lourdeur et la difficulté des calculs. Pour le moment, seules les antennes IGS Core, les antennes utilisées comme référence absolue de l'IGS, ont leur carte de trajets multiples. Ces cartes ne sont pas utilisables pour notre cas d'étude car la durée des sessions est trop courte pour obtenir suffisamment de données.

1.4.3 Les précisions

Suite à ces améliorations, on obtient les précisions sur les instruments qui vont être utilisés lors des campagnes réalisées dans les chapitres suivants. Ces précisions seront également prises en compte lors de simulations.

Les précisions utilisées sont résumées dans le tableau 1.1.

Mesure simulée	Précision
Ligne de base GPS	$\pm 3 \text{ mm} + \pm 0.5 \text{ ppm}$
Distance pente	$\pm 0.5 \text{ mm} + \pm 1 \text{ ppm}$
Lecture horizontale	$4.7 \cdot 10^{-6} \text{ rad}$
Distance zénithale	$4.7 \cdot 10^{-6} \text{ rad}$

TABLE 1.1 – Tableau récapitulatif des précisions utilisées en simulation

Chapitre 2

Combinaison sur un réseau à 2 points

Ce chapitre traite de l'application de la combinaison de techniques géodésiques sur un réseau à 2 points, en fonction de la distance entre le point stationné et le point visé. En effet, la précision des coordonnées du point visé dépend de cette distance, aussi bien pour le GPS (ligne de base) que pour la topométrie (cf équation 1.10). Il a donc semblé intéressant d'analyser l'influence de la distance sur la précision des coordonnées obtenue par la combinaison ainsi que son amélioration.

2.1 Simulation d'un réseau à 2 points

Avant de tester la combinaison par matrices normales sur des données réelles, des simulations sont effectuées pour comprendre et appréhender les résultats attendus.

2.1.1 Simulation de données

Dans le but de tester la combinaison de matrices normales, un réseau d'observations a été simulé. 41 stations ont été alignées dans la même direction sur une longueur de 800 mètres, chacune d'elles séparée de 20 mètres (cf schéma 2.1).

Il existe deux types de simulation possibles pour traiter des matrices normales : la première est de générer des mesures à partir de modèles connus et de les traiter pour extraire les matrices recherchées, la deuxième est de générer directement les matrices normales à partir de modèles sans générer de mesures. Pour notre étude, nous avons choisi la deuxième simulation. En effet, pour créer des matrices normales, il n'est pas nécessaire d'avoir des

2.1. SIMULATION D'UN RÉSEAU À 2 POINTS

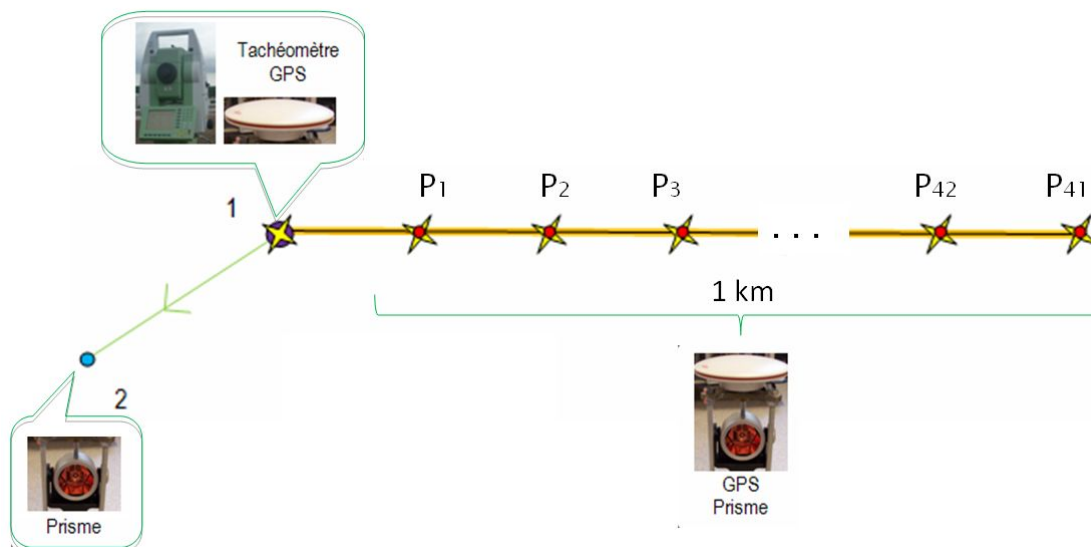


FIGURE 2.1 – Schéma du réseau à 2 points simulé

mesures. On a juste besoin de la modélisation, des précisions a priori et des coordonnées approchées. Aucune mesure n'a donc été simulée.

2.1.2 Méthodologie

On cherche à créer les matrices normales N_{topo} et N_{gps} pour obtenir :

$$\Sigma = (N_{topo} + N_{gps})^{-1} \quad (2.1)$$

Simulation de N_{topo} Les matrices normales sont obtenues grâce au logiciel CoMeT créé par le L2G. Ce logiciel permet de modéliser les mesures topométriques de manière tridimensionnelle, en considérant la Terre comme un ellipsoïde de révolution et en tenant compte de la déviation de la verticale à l'aide d'une grille d'ondulations du géoïde (RAF09 dans notre cas). Cette manière de modéliser les observations topographiques est identique à celle utilisée par différents logiciels professionnels d'ajustement de réseaux tels que les logiciels Geolab de la société Bitwise Ideas ([Geolab 2009]) ou Columbus de la société Best Fit ([Columbus 2009]). La modélisation adoptée est décrite plus en détail dans ([Steeves 1984]). Ce logiciel a été validé dans le mémoire de fin d'étude [Guerin 2010] où le logiciel CoMeT a été comparé avec d'autres logiciels de compensation de mesures topométriques

2.1. SIMULATION D'UN RÉSEAU À 2 POINTS

et dont les résultats obtenus sont similaires à ceux de Géolab et Colombus.

Simulation de N_{gps} A ce jour, il n'existe pas à notre connaissance de logiciel de traitement GPS capable de créer des matrices normales sans simuler des mesures. C'est pourquoi nous avons choisi d'utiliser les scripts Matlab¹ initialement créés lors de la thèse de Stéphane Durand ([Durand 2003]) que nous avons modifiés pour pouvoir obtenir des matrices normales. Puisque l'ionosphère est considéré comme négligeable dans notre étude (cf chapitre 1.4.2.1), la modélisation est limitée à L1 uniquement. De plus, comme il n'y a pas de mesures, nous avons considéré un modèle avec ambiguïtés résolues.

Les résultats sont donnés selon un indice de confiance de 95 %. Pour l'altimétrie, les résultats sont sur une seule dimension, obtenus grâce à la variance de l'altimétrie et donc sont représentés sur un intervalle de confiance. En ce qui concerne la planimétrie, les résultats obtenus sont sur deux dimensions dépendantes l'une de l'autre (est et nord). Comme elles sont dépendantes, il existe un terme supplémentaire aux variances qui est la covariance. Pour pouvoir analyser ces trois termes, il est nécessaire de les représenter en bloc. Ainsi, ils seront donnés suivant des ellipses de confiance à 95%. Il en ressort 3 paramètres que

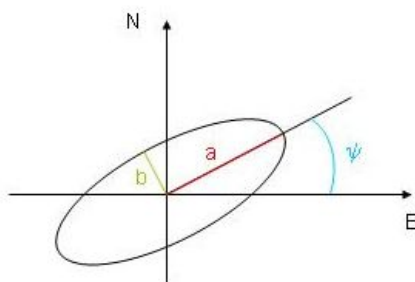


FIGURE 2.2 – Schéma d'une ellipse

nous avons analysé : le demi grand axe, l'aplatissement et l'azimut de l'ellipse.

La construction de ces ellipses est expliquée dans l'annexe A.

1. Matlab est logiciel de calcul et de programmation scientifique (cf [Matlab 2009])

2.1.3 Résultats

2.1.3.1 Géométrie du GPS

Une étude intéressante à faire est d'analyser l'évolution des résultats en fonction de la géométrie de la constellation des satellites. En effet, la constellation GPS composée de 32 satellites est organisée de façon à ce qu'un point terrestre puisse capter le signal d'au moins 4 satellites à n'importe quel moment de la journée. Un point à la surface de la Terre observe la même géométrie de la constellation GPS tous les jours sidéraux ou toutes les 23 h 56 min 04 s. Nous avons donc choisi de simuler 24 sessions de 10 minutes sur une durée de 24 heures afin d'observer l'influence de la géométrie de la constellation sur la précision du positionnement GPS.

Longueur de ligne de base (m)	Demi grands axes (mm)
100	2.3 à 3.0
300	2.4 à 3.1
500	2.4 à 3.2
700	2.5 à 3.2

TABLE 2.1 – Récapitulatif des valeurs des demi-grands axes sur 24 heures

D'après le tableau 2.1, les valeurs des demi grands axes ne présentent pas de variations importantes. Avec 10 min d'observations toutes les heures, la variation a une moyenne de 0.7 mm. Nous constatons alors que la géométrie de la constellation des satellites GPS n'a pas d'influence majeure sur les valeurs des précisions.

2.1.3.2 Précision du GPS en fonction de la durée de session

La précision du GPS varie en fonction de sa durée de session. Cela influe sur l'impact de la combinaison par matrices normales. Il est donc intéressant d'étudier l'évolution de la combinaison en fonction de la durée de session. Ces résultats nous amèneraient à déterminer les durées de sessions sur lesquelles la combinaison aura le plus d'impact.

Nous allons simuler la précision formelle du GPS en fonction de la durée de session. Nous avons fixé la distance entre les deux stations à 100 mètres. Pour chaque session simulée, un fichier d'éphémérides est réalisé. Il contient plusieurs jeux de coordonnées de

2.1. SIMULATION D'UN RÉSEAU À 2 POINTS

11 satellites, un pour chaque seconde de la durée de la session. A partir de ces fichiers et des coordonnées de ces stations, des matrices normales sont simulées et utilisées pour calculer les précisions planimétriques et altimétriques du GPS.

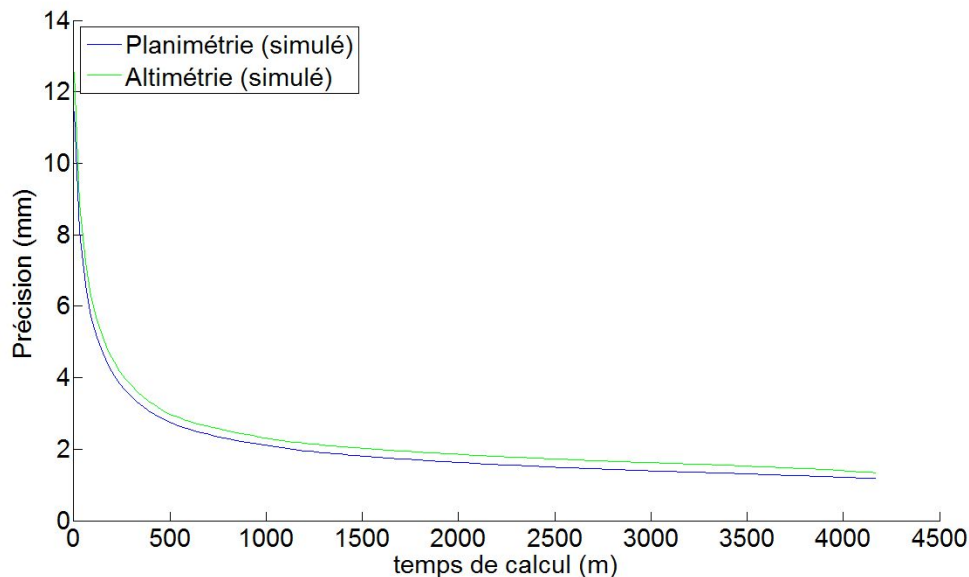


FIGURE 2.3 – Evolution de la précision GPS en fonction de la durée de session

D'après la figure 2.3, la précision GPS s'améliore en fonction de la durée de session. On remarque que la pente d'évolution est très rapide entre 30 secondes et 10 minutes. Ensuite, la pente devient beaucoup plus faible et tend vers une asymptote rendant ainsi les sessions postérieures à 10 minutes superfétatoires. Ce phénomène est lié au degré de liberté du calcul. En effet, plus la durée de la session est grande, plus le nombre d'observations augmentent alors que le nombre d'inconnus reste constant.

Comme le domaine d'étude qui nous intéresse est l'auscultation, la durée des observations est courte. Pour cela, nous avons décidé d'effectuer les calculs sur des sessions allant de 30 secondes (temps quasi-réel pour obtenir un jeu de mesures) à 10 minutes (suffisamment courts pour détecter des déformations de court terme et suffisamment longs pour avoir suffisamment de données pour le mode statique).

2.1. SIMULATION D'UN RÉSEAU À 2 POINTS

Après avoir déterminé la précision formelle, il est intéressant de voir la précision du GPS en fonction non plus de la durée de session mais de la distance entre les points.

2.1.3.3 Précision de la combinaison en fonction de la distance

Les résultats présentés ici sont les ellipses de confiance à 95% de chaque technique prise séparément et après combinaison. Les précisions de chaque technique et de leur combinaison ont été calculées sur plusieurs sessions allant de 30 secondes à 10 minutes. Seuls les résultats sur des sessions de 30 secondes et 10 minutes sont représentés dans ce chapitre. Les résultats des autres sessions (1 minute, 2 minutes, 3 minutes, 5 minutes et 7 minutes) figurent dans l'annexe B.

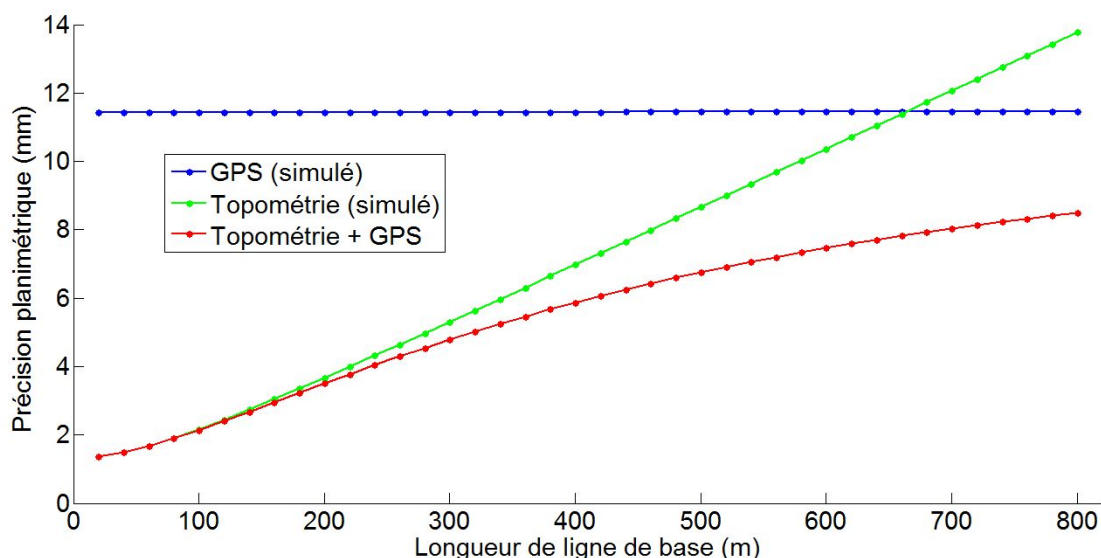


FIGURE 2.4 – Précision planimétrique à 95% de simulation de GPS et topométrie, comparées avec la précision de la combinaison de techniques sur une session de 30 secondes

Session de 30 secondes

La figure 2.4 montre comment les précisions planimétriques des techniques GPS et topométriques évoluent en fonction de la distance lorsqu'on les compare aux résultats obtenus après avoir appliqué la combinaison des matrices normales. Les courbes de précision de la topométrie et du GPS se croisent aux alentours d'une ligne de base de 650 mètres. La figure montre que la combinaison des deux techniques n'améliore pas vraiment la précision

2.1. SIMULATION D'UN RÉSEAU À 2 POINTS

planimétrique pour les distances inférieures à 200 mètres lorsqu'elle est comparée à la topométrie. Pour des distances supérieures à 200 mètres, la combinaison améliore sensiblement la précision planimétrique par un facteur 1.5 par rapport aux techniques prises séparément. L'amélioration maximale est atteinte pour des distances supérieures à 650 mètres (le point de croisement entre les deux courbes).

Longueur de la ligne de base (m)	Demi grand axe (mm)		
	Topométrie	GPS	Combinaison
100	1.76	9.01	1.74
200	3.42	9.01	3.24
300	5.10	9.01	4.56
400	6.79	9.01	5.66
500	8.49	9.01	6.53
600	10.18	9.01	7.22
700	11.88	9.02	7.76
800	13.57	9.02	8.18

Longueur de la ligne de base (m)	aplatissement		
	Topométrie	GPS	Combinaison
100	0.29	0.22	0.28
200	0.62	0.22	0.35
300	0.73	0.22	0.47
400	0.78	0.22	0.50
500	0.80	0.22	0.50
600	0.82	0.22	0.48
700	0.83	0.22	0.45
800	0.84	0.22	0.43

TABLE 2.2 – Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétrique des techniques topométrique, GPS et combinés simulées sur une session de 30 secondes

Le tableau 2.2 résume, pour un échantillon de distances, les paramètres des ellipses de confiance à 95% (demi grand axe et aplatissement) et ce pour les trois cas étudiés.

Dans le cas du GPS, le demi grand axe et l'aplatissement sont quasiment constants. Chaque ellipse d'erreur est presque circulaire (aplatissement est aux alentours de 0.22) montrant ainsi que la précision est la même quelle que soit la direction. De plus, on peut noter que l'azimut de la direction du demi grand axe est de 4° , ce qui est dû au fait que pour un réseau simulé à la latitude du Mans (48° Nord), il n'y a pas de satellite GPS dans la direction du Nord.

2.1. SIMULATION D'UN RÉSEAU À 2 POINTS

Dans le cas de la topométrie, le demi grand axe et l'aplatissement augmentent en fonction de la longueur de la ligne de base. En effet, le demi grand axe augmente d'un facteur 8 (de 1.76 à 13.57) tandis que l'aplatissement croît d'un facteur 3 (de 0.29 à 0.84). L'azimut de la direction du demi grand axe est de 103° pour toutes les longueurs de ligne de base, direction perpendiculaire au vecteur de la ligne de visée. Ces valeurs montrent que l'ellipse de confiance a un aplatissement plus fort pour la topométrie que pour le GPS.

L'ellipse de la combinaison de techniques est presque circulaire (aplatissement de 0.4) et sa taille reste plus petite que la plus petite des deux techniques (gain de 1 à 1.5). Ainsi, la combinaison prend bien les avantages de chaque technique.

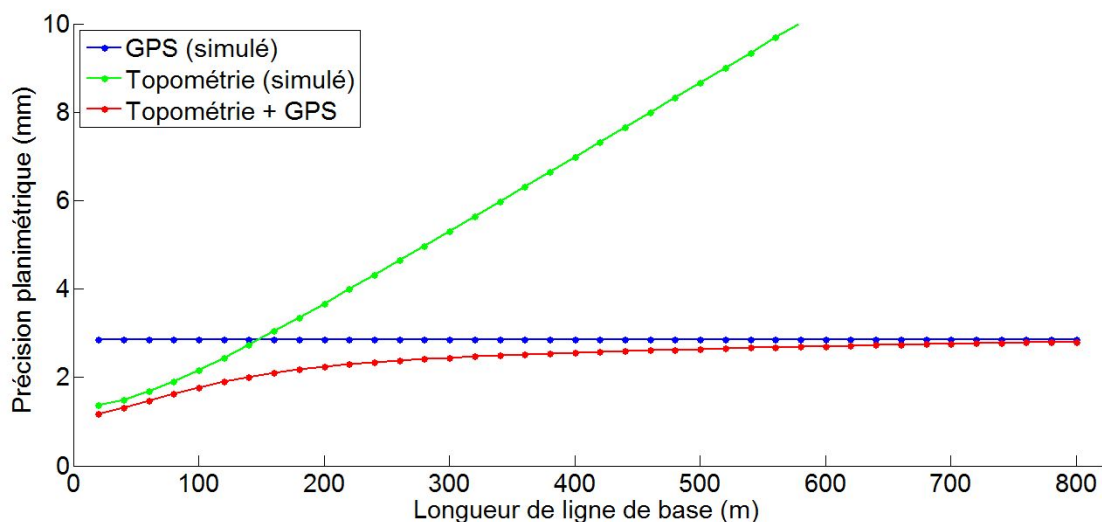


FIGURE 2.5 – Précision planimétrique à 95% de simulation de GPS et topométrie, comparées avec la précision de la combinaison de techniques sur une session de 10 minutes

Session de 10 minutes

La figure 2.5 montre les précisions planimétriques des techniques GPS et topométriques et de leur combinaison sur une session de 10 minutes avec une ligne de base variant de 20 à 800 mètres. Contrairement à la session précédente, les courbes de précision de la topométrie et du GPS se croisent aux alentours d'une ligne de base de 150 mètres. La figure indique que les allures suivent la même logique que précédemment. La combinaison améliore sensiblement la précision planimétrique par un facteur 1.5 par rapport aux techniques prises séparément

2.1. SIMULATION D'UN RÉSEAU À 2 POINTS

jusqu'à une distance de 400 mètres où la courbe de la combinaison se superpose à celle du GPS. L'amélioration maximale est atteinte pour des distances supérieures à 150 mètres (le point de croisement entre les deux courbes).

Longueur de la ligne de base (m)	Demi grand axe (mm)		
	Topométrie	GPS	Combinaison
100	1.76	2.58	1.42
200	3.42	2.58	1.94
300	5.10	2.58	2.14
400	6.79	2.58	2.23
500	8.49	2.58	2.28
600	10.18	2.58	2.31
700	11.88	2.58	2.33
800	13.572	2.58	2.34

Longueur de la ligne de base (m)	aplatissement		
	Topométrie	GPS	Combinaison
100	0.29	0.22	0.28
200	0.62	0.22	0.42
300	0.73	0.22	0.45
400	0.78	0.22	0.44
500	0.80	0.22	0.42
600	0.82	0.22	0.39
700	0.83	0.22	0.36
800	0.84	0.22	0.34

TABLE 2.3 – Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétrique des techniques topométrique, GPS et combinés simulées sur une session de 10 minutes

Le tableau 2.3 résume, pour un échantillon de distances, les paramètres des ellipses de confiance à 95% (demi grand axe et aplatissement) et ce pour les trois techniques. On retrouve la même logique que précédemment, toujours avec un décalage.

L'ellipse de la combinaison de technique est presque circulaire (aplatissement de 0.4) et se rapproche de celle du GPS (0.34 à 800 mètres pour 0.22 pour le GPS). L'azimut reste constant sur une valeur de 1°.

2.1.3.4 Précision de la combinaison en fonction de la durée de session

Nous venons de voir l'évolution de la précision de la combinaison en fonction de la distance. Or, nous avons démontré que l'un des composants de la combinaison (le GPS) a sa précision qui évolue en fonction de la durée de session. Il convient donc d'étudier

2.1. SIMULATION D'UN RÉSEAU À 2 POINTS

l'évolution de la précision de la combinaison en fonction non plus de la distance mais de la durée de session.

L'évolution est remarquée aussi bien sur le GPS que sur la combinaison. On choisit comme exemple la distance de 200 mètres où l'évolution est la plus notable.

Durée de la session (min)	Demi grand axe (mm)		
	Topométrie	GPS	Combinaison
0.5	3.42	9.01	3.24
1	3.42	6.38	3.09
2	3.42	4.92	2.84
3	3.42	3.70	2.65
5	3.42	3.27	2.36
7	3.42	2.97	2.15
10	3.42	2.58	1.94

Durée de la session (min)	aplatissement		
	Topométrie	GPS	Combinaison
0.5	0.62	0.22	0.35
1	0.62	0.22	0.42
2	0.62	0.22	0.44
3	0.62	0.22	0.42
5	0.62	0.22	0.49
7	0.62	0.22	0.45
10	0.62	0.22	0.42

TABLE 2.4 – Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétrique des techniques topométrique, GPS et combinés simulées sur une distance de 200 mètres

D'après le tableau 2.4, l'aplatissement et l'azimut de l'ellipse du GPS restent constants (0.21 et 8.5°) quelque soient la durée de session. En revanche, la taille de l'ellipse diminue en fonction de la durée de session, comme prévu par la figure 2.3.

L'ellipse de la combinaison subit plus de modifications. Comme le GPS, sa taille diminue en fonction de la durée de session mais avec une pente plus douce (1.08 à 0.50) que celle du GPS (1.58 à 0.50). De même, l'aplatissement se réduit et passe de 0.5 à 0.3, se rapprochant également de l'aplatissement du GPS. La même chose concerne l'azimut où il passe de -9° à 1° , se rapprochant des 8.5° du GPS. On remarque également que l'intervalle où la combinaison est active se réduit avec la durée de session.

Les résultats provenant de la simulation sont encourageants. Néanmoins, pour savoir

si ces résultats sont réalistes, il faut les comparer à des résultats obtenus sur des données réelles.

2.2 Campagne

La méthode de combinaison par matrices normales va être mise en pratique pour déterminer l'apport de cette combinaison. Pour cela, une campagne est réalisée en pleine campagne, proche de l'ESGT.

2.2.1 Adaptation des instruments

Il est préférable d'effectuer des mesures de chaque technique au même moment pour qu'elles soient faites sous les mêmes conditions. Les deux techniques GPS et topométrie doivent avoir un appareil centré sur le point à mesurer. Le problème majeur est rencontré car les instruments ne s'encastrent pas alors qu'il faut qu'ils soient impérativement alignés sur la verticale du point (cf figure 2.6).

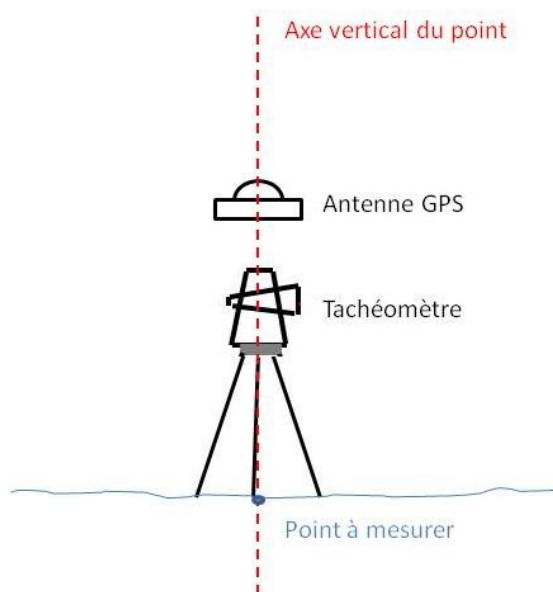


FIGURE 2.6 – Schéma d'installation des instruments sur le même point

Pour que cela soit possible, il faut créer des adaptateurs qui permettent d'avoir une antenne GPS superposée avec un prisme ou un tachéomètre, selon le point. L'antenne doit

obligatoirement se situer au dessus de l'instrument topométrique pour pouvoir capter les signaux GPS sans interférence.



FIGURE 2.7 – Photos des adaptateurs entre antenne GPS et tachéomètre

J'ai réalisé des adaptateurs au sein du L2G pour pouvoir mesurer le même point avec deux instruments au même moment. Ces adaptateurs sont compatibles avec les embases des trépieds installés sur les points stationnés. Les deux instruments se retrouvent l'un sur l'autre, alignés sur la verticale du point (cf 2.7). Le décalage fixe entre les instruments a été mesuré par nivellement électronique avec une précision submillimétrique. Il vaut 34.2 cm entre la base de l'antenne GPS et la hauteur des tourillons du tachéomètre et 9.6 cm entre la base de l'antenne GPS et le centre du prisme.

L'alignement des instruments utilisés a été réalisé dans le laboratoire de métrologie de l'ESGT dans des conditions environnementales contrôlées. Le centrage de cet alignement a été mesuré régulièrement sur une durée d'une heure. On a pu observer alors une erreur de centrage stable de 2 mm. Cette erreur nous semble acceptable. Il faut rappeler qu'il s'agit de la création d'un prototype et que nous nous sommes surtout intéressés à la

2.2. CAMPAGNE

faisabilité de l'assemblage. Ce prototype est essentiellement composé de planches de bois et de tiges métalliques. Ces matériaux sont sensibles aux aléas environnementaux sur de longues durées. Ils peuvent se déformer de quelques dixièmes de millimètres et ainsi décaler l'alignement. Lors de la campagne, ce centrage n'a pas été contrôlé dans des conditions environnementales réelles. Cela n'a pas semblé nécessaire car les sessions de mesure étaient trop courtes pour avoir un impact significatif sur le centrage. De plus, les points stationnés restaient fixes et l'objectif de l'étude était de mettre l'accent sur la précision et non pas sur l'exactitude.

Il existe déjà des adaptateurs commerciaux entre antennes GPS et tachéomètres réalisés par Trimble ou Leica ([Leica 2009]). Ces adaptateurs permettent de positionner une antenne GPS sur la poignée d'une station totale compatible. Les deux instruments sont parfaitement alignés. Cependant, ces adaptateurs ne pouvaient fonctionner pour des détections de déformations de petite amplitude. En effet, l'antenne GPS est complètement dépendante du tachéomètre, ce qui fait que lorsque ce dernier tourne pour changer de cible ou pour faire le double retournement, l'antenne se met à tourner sur elle-même également. Ceci pose problème car l'antenne devient instable et les PCV ne sont plus immobiles : il n'est plus possible de les corriger.

2.2.2 Données

Dans le but de réaliser des observations et de confirmer les résultats de la simulation, des campagnes de mesures sont nécessaires. Ces campagnes ont été réalisées les 22 et 29 mai 2009 sur 4 sessions. Le réseau d'observation est composé de 5 points posés le long d'une route droite, avec un azimut de 95° (cf schéma 2.8).

Ces points sont alignés et sont séparés à 200 mètres d'intervalle. Un tachéomètre et une antenne GPS sont installés sur un point à l'extrémité du réseau où tous les autres points peuvent être observés. Un prisme et une antenne GPS sont installés sur les 4 autres points. Les données sont obtenues à partir de plusieurs sessions d'une heure étalées sur 2 jours.

Les instruments GPS sont des récepteurs GPS LEICA SR530. Les mesures GPS sont enregistrées à 30 secondes d'intervalle et les mesures topométriques sont effectuées par la méthode du tour d'horizon.

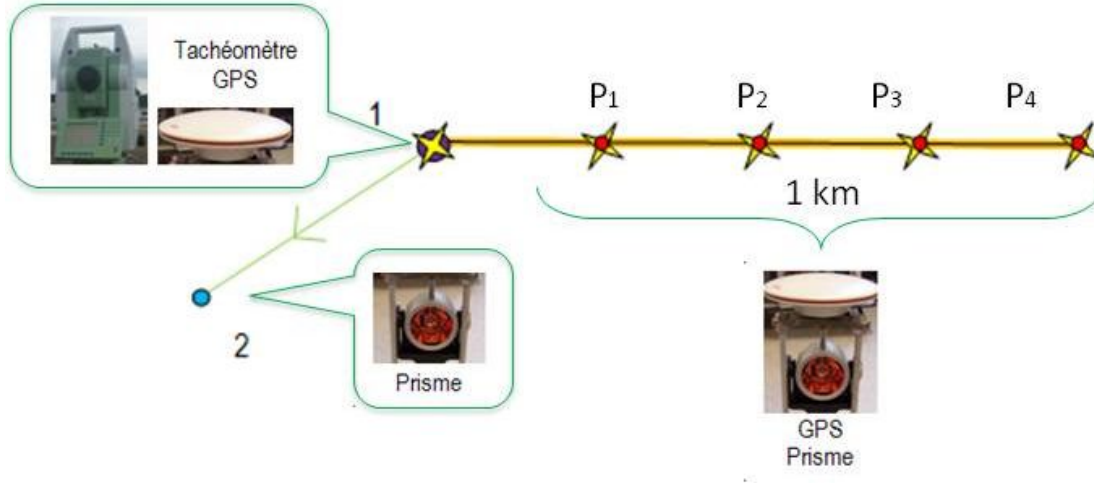


FIGURE 2.8 – Schéma du réseau à 2 points de la campagne

Le tachéomètre est un Trimble EltaS10 et les prismes sont des prismes LEICA calibrés avec le banc d'étalonnage du laboratoire. Un prisme de référence est ajouté pour cette méthode. Chaque point est visé toutes les minutes par double retournement. Les données topométriques sont corrigées des effets troposphériques par l'intermédiaire de capteurs météorologiques standards.

Chaque session est composée de mesures de phase GPS (à partir de satellites visibles) et d'un jeu de mesures topométriques (angle horizontal, angle vertical et distance suivant la pente). On obtient au final 12 sessions de 10 minutes de données réparties sur la durée de la campagne.

2.2.3 Méthodologie

Contrairement à la simulation, nous avons obtenu des mesures. Ainsi, il est possible de pondérer les matrices normales par le facteur unitaire de variance (cf équation 1.7). La matrice de la combinaison Σ s'obtient à partir des données GPS (N_{gps} , k_{gps}) et topométriques (N_{topo} , k_{topo}) :

$$\Sigma = (1/k_{gps} \cdot N_{gps} + 1/k_{topo} \cdot N_{topo})^{-1} \quad (2.2)$$

2.2. CAMPAGNE

Les observations topométriques récupérées sont la distance zénithale, la lecture horizontale et la distance pente. L'ensemble des observations effectuées lors de la durée de session est enfin analysé pour séparer les éventuelles erreurs puis moyenné pour obtenir un seul jeu de mesures. Les mesures sont ajustées avec le logiciel CoMeT avec les mêmes paramètres qu'en simulation.

Les observations GPS sont des observations horaires avec un intervalle de 30s et des orbites radiodiffusées. Étant données les conditions particulières de cette étude expliquées dans le paragraphe 1.4.2.1 et pour pouvoir manipuler les paramètres à volonté, les scripts Matlab de traitements GPS modifiés sont utilisés. Les paramètres de calcul sont déterminés ainsi :

- puisque l'ionosphère est considérée comme négligeable, les mesures GPS sont limitées à L1 uniquement
- sur une zone de couverture locale, le calcul d'ambiguïté se fait avec la méthode d'arrondi

2.2.4 Résultats

A partir des données de la campagne, les processus de calcul présentés dans le paragraphe précédent sont utilisés. Comme pour le paragraphe précédent, deux cas seront étudiés : le cas cinématique à 30 secondes de durée de session et le cas statique à 10 minutes de durée de session. Les résultats sont donnés suivant des ellipses de confiance à 95%. Ils affichent les moyennes et intervalles des valeurs des 12 sessions mesurées lors de la campagne. Pour obtenir les valeurs des 12 sessions, voir l'annexe C pour les sessions de 30 secondes et l'annexe D pour les sessions de 10 minutes.

2.2.4.1 Session de 30 secondes

Les précisions planimétriques obtenues sont montrées dans la figure 2.9 où elles sont dessinées ainsi que les résultats de la simulation montrés dans la figure 2.4. Dans le cas de la topométrie (figure du dessus), les valeurs moyennes sont très proches des valeurs simulées et plus précises sur des distances plus grandes. Les barres sont également petites.

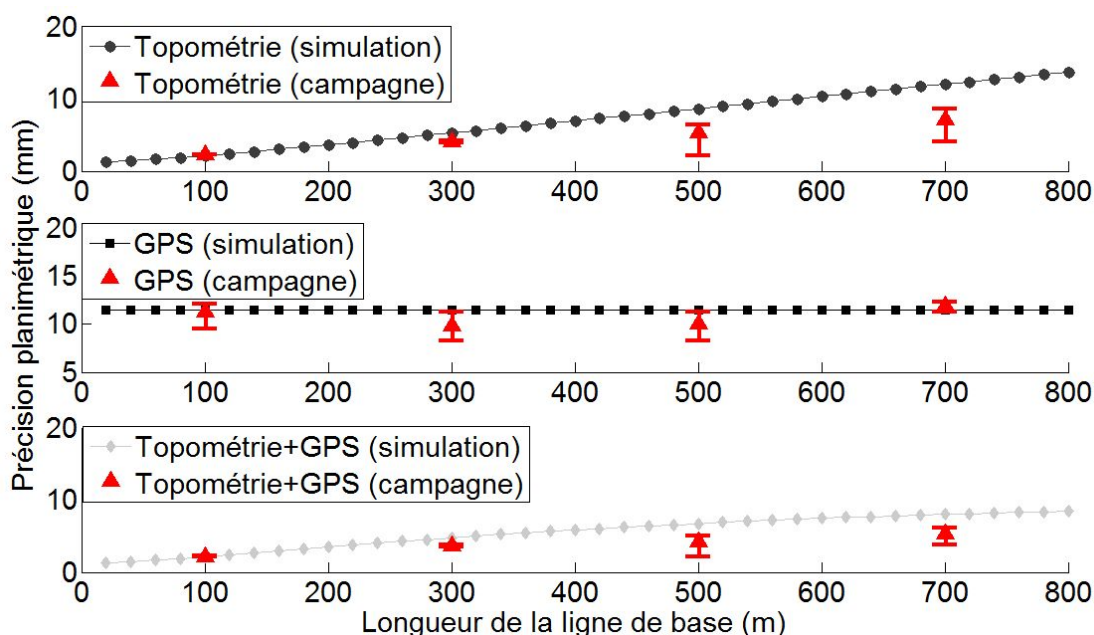


FIGURE 2.9 – Précision planimétrique de 95% de la topométrie (en haut), du GPS (au milieu) et de la combinaison de techniques (en bas). Les valeurs simulées de la figure 2.4 sont dessinées sur chaque figure. Pour chaque distance, le triangle correspond à la valeur de la moyenne obtenue des sessions et les intervalles d’erreur l’étendu des valeurs. La durée de session est de 30 secondes

Dans le cas du GPS (figure du milieu de 2.9), il semble que les valeurs simulées sous-estiment la précision : chaque valeur de précision calculée à partir de données réelles est proche de la courbe simulée. Les paramètres de simulation sont corrects par rapport aux données réelles.

Quoi qu’il en soit, comme montré dans la figure 2.9 (figure du dessous), les précisions atteintes après combinaison sont assez similaires voire meilleures que celles obtenues par la simulation. Cela serait dû à la différence en topométrie. On peut également noter que les barres d’erreur après combinaison sont plus petites même si les barres d’erreur du GPS et de la topométrie sont assez grandes. Ceci démontre clairement les avantages de la combinaison.

Le tableau 2.5 résume les paramètres des ellipses de confiance à 95% obtenus dans cette campagne. Chaque valeur est obtenue en faisant la moyenne des résultats de toutes les sessions. Deux conclusions peuvent en être tirées. Combiner les mesures GPS et les

2.2. CAMPAGNE

Longueur de la ligne de base (m)		100	300	500	700
Topométrie	a (mm)	2.30	4.18	6.36	8.55
	f	0.38	0.75	0.79	0.84
	azim (deg)	6.98	4.71	4.36	3.74
GPS	a (mm)	9.48	8.23	8.22	11.26
	f	0.31	0.25	0.28	0.33
	azim (deg)	352.95	346.57	357.24	4.87
Combinaison	a (mm)	2.21	3.63	4.23	5.29
	f	0.34	0.32	0.43	0.43
	azim (deg)	0.01	349.62	352.68	350.29
	gain	1.1	1.2	1.5	1.7

TABLE 2.5 – Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétriques des techniques topométrique, GPS et combinées sur 30 secondes

mesures topométriques diminue la valeur du demi grand axe des ellipses à 95%, surtout sur de longues lignes de bases (2.21 mm au lieu de 2.30 mm pour la topométrie à 100 mètres et 5.29 mm au lieu de 8.55 mm à 700 mètres). De plus, les valeurs des gains augmentent en fonction de la distance, atteignant son maximum de 1.7 à 700 mètres comme prédit par la simulation (1.7 à 650 mètres). Le deuxième avantage de la combinaison de ces deux techniques est la réduction de l'aplatissement qui est toujours en deçà de 0.5. Ces résultats confirment les tendances observées en simulation.

2.2.4.2 Session de 10 minutes

Les précisions planimétriques obtenues sont montrées dans la figure 2.10 où elles sont dessinées par dessus les résultats de la simulation montrés dans la figure 2.4. Dans le cas de la topométrie (figure du dessus), on obtient les mêmes résultats que pour la session précédente.

Dans le cas du GPS (figure du milieu de 2.10), il semble que les valeurs simulées sousestiment la précision : chaque valeur de précision calculée à partir de données réelles est au dessus de la courbe simulée mais la courbe reste dans les barres d'erreur.

Quoi qu'il en soit, comme montré dans la figure 2.10 (figure du dessous), les précisions atteintes après combinaison sont assez similaires de celles obtenues par la simulation. La courbe reste également dans les barres d'erreur.

Le tableau 2.6 résume les paramètres des ellipses de confiance à 95% obtenus par cette

2.2. CAMPAGNE

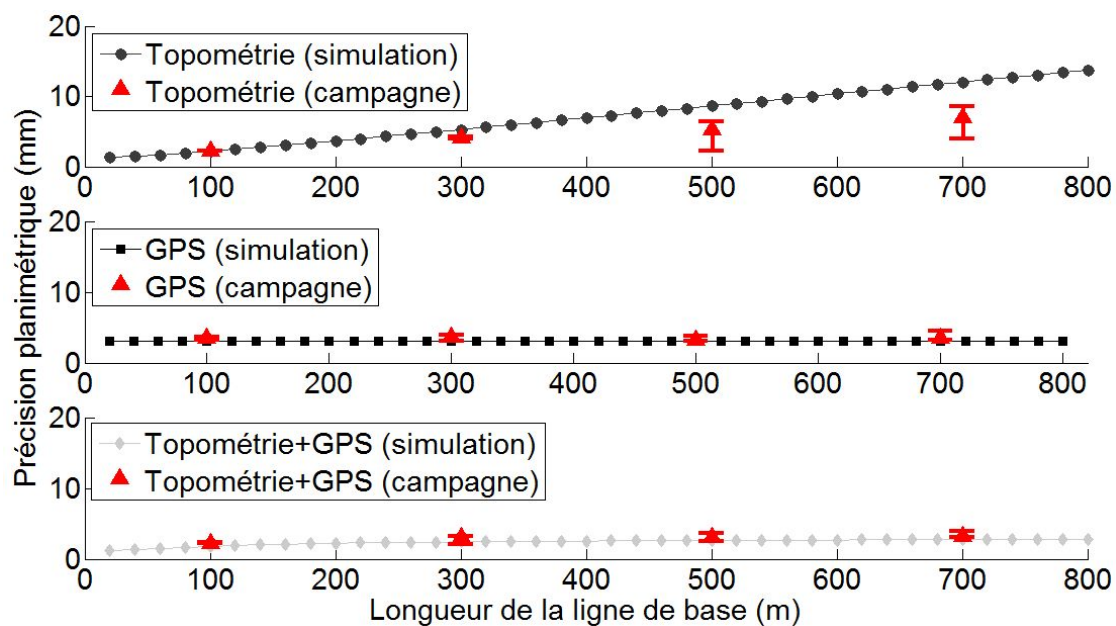


FIGURE 2.10 – Précision planimétrique de 95% de la topométrie (en haut), du GPS (au milieu) et de la combinaison de techniques (en bas). Les valeurs simulées de la figure 2.4 sont dessinées sur chaque figure. Pour chaque distance, la barre d'erreur indique la portée des valeurs de précision obtenues par l'ensemble des données puisque le triangle en est la moyenne. La durée de session est de 10 minutes

Longueur de la ligne de base (m)		100	300	500	700
Topométrie	a (mm)	2.30	4.18	6.36	8.55
	f	0.38	0.75	0.79	0.84
	azim (deg)	6.98	4.71	4.36	3.74
GPS	a (mm)	3.46	3.66	3.27	3.44
	f	0.23	0.23	0.23	0.23
	azim (deg)	9.96	9.96	9.96	9.96
Combinaison	a (mm)	2.20	3.04	3.05	3.24
	f	0.27	0.35	0.35	0.35
	azim (deg)	5.34	29.08	27.41	23.02
	gain	1.1	1.2	1.2	1.2

TABLE 2.6 – Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétriques des techniques topométrique, GPS et combinées sur une session de 10 minutes

campagne. Chaque valeur est obtenue en faisant la moyenne des résultats de toutes les sessions. Deux conclusions peuvent en être tirées. Combiner les mesures GPS et les mesures topométriques diminue le demi grand axe des ellipses à 95%, surtout sur de longues lignes de bases (0.56 mm au lieu de 0.89 mm pour la topométrie à 100 mètres). Les gains obtenus

2.3. APPLICATION D'UNE AUTRE COMBINAISON : COMBINAISON PAR COORDONNÉES

restent toujours supérieurs à 1. Comme prévu par la simulation (à 150 mètres), le gain maximum est obtenu entre 100 et 300 mètres. Le GPS ne reçoit pas beaucoup d'amélioration. Le deuxième avantage de la combinaison de ces deux techniques est la réduction de l'aplatissement qui est toujours en deçà de 0.4. Ces résultats confirment les tendances observées en simulation.

En utilisant la combinaison de techniques, il est possible d'améliorer la précision du calcul final. Les résultats montrent que la combinaison de techniques peut améliorer la précision d'un facteur 2 dans le meilleur des cas. Chaque technique apporte uniquement ses avantages. Ainsi, lorsque l'une d'elles est peu précise, les résultats de la combinaison suivent ceux de l'autre technique combinée. De plus, la combinaison est toujours au moins aussi précise que la plus précise des techniques impliquées.

Au vue des résultats intéressants obtenus avec la combinaison par matrices normales, il serait intéressant d'appliquer les mêmes données sur une autre combinaison moins lourde à mettre en place. D'après le tableau 1.1, la combinaison en aval de la combinaison par matrices normales est la combinaison par coordonnées. Nous allons donc tester nos données avec cette combinaison.

2.3 Application d'une autre combinaison : combinaison par coordonnées

L'exemple de combinaison étudiée ci-après est la combinaison de coordonnées. Cette combinaison fait une moyenne des coordonnées finales en pondérant chaque technique.

2.3.1 Etat de l'art

Calcul de coordonnées

$$\hat{X} = \alpha.\hat{X}_{gps} + \beta.\hat{X}_{topo}$$

Calcul de précision

$$\Sigma = \alpha^2.N_{gps}^{-1} + \beta^2.N_{topo}^{-1}$$

α et β : facteurs de pondération à choisir

La pondération est quand à elle très variée en fonction de l'application et l'estimation de l'opérateur. Trois pondérations sont à noter :

- la pondération par la précision a priori des techniques (cf [Vasco et al. 2007])
- la pondération par le facteur de variance (cf [Nishimura et al. 2003])
- la pondération par la confiance de l'opérateur dans chacune des techniques (cf [Cervelli and Segall 2002])

2.3.1.1 Pondération par la précision a priori

[Vasco et al. 2007] étudie le changement de volume du parc Yellowstone sur plusieurs campagnes (1992-95 et 1996-2000). Différentes techniques ont été utilisées pour mesurer les déformations : l'InSAR, le GPS et le nivellement (non utilisé pour la seconde campagne). Chaque technique a mesuré indépendamment sur des sessions de longues durées et des résultats sont calculés chaque jour. Au final, les résultats des techniques ont subi la combinaison 6 du schéma 1.1 à partir de coordonnées des 3 techniques pour ensuite inverser le problème et détecter le changement de volume.

2.3.1.2 Pondération par le facteur de variance

[Nishimura et al. 2003] parle de l'étude du tremblement de terre au Japon survenu le 27 juillet 2003. Pour détecter la déformation, les techniques de l'InSAR, du GPS et du nivellement ont été utilisées. Chaque technique a sa propre campagne indépendante : mesures GPS sur le mois de juillet 2003 (antennes GPS permanentes, antennes en campagne sur piliers, antennes sur trépieds), mesures InSAR RADARSAT séparées de 2 mois et mesures de nivellement annuelles tous les mois de juillet. Ces mesures calculées indépendamment ont

2.3. APPLICATION D'UNE AUTRE COMBINAISON : COMBINAISON PAR COORDONNÉES

donné des résultats qui ont été combinés par la combinaison 6 du schéma 1.1 en utilisant le facteur unitaire de variance et les incertitudes des méthodes pour les pondérer. Comme dans l'article précédent, ces résultats ont été utilisés pour faire un calcul supplémentaire sur une modélisation de déformation.

2.3.1.3 Pondération par confiance empirique

[Cervelli and Segall 2002] a étudié le tremblement de terre à Hawaii du 12/09/1999. Pour cela, la déformation a été mesurée par l'utilisation de l'InSAR, du GPS, d'inclinomètres et du nivellement. Chaque technique a sa propre campagne indépendante : utilisation d'images ERS de 1998 et de 2000 pour les mesures Insar, utilisation d'antennes GPS (stations bi fréquences calculées par Gipsy, stations mono fréquence calculées par Bernese(lignes de base courtes)) de juin à octobre 1999, utilisation d'inclinomètres permanents et utilisation de mesures de nivellement de deux campagnes (avril et octobre 1999). Pour apprécier la déformation, les techniques ont été combinée par la combinaison 4 du schéma 1.1 en utilisant les matrices de variance-covariance de chaque technique pour effectuer une pondération sur chaque donnée. La combinaison a permis d'améliorer l'exactitude des résultats par rapport au modèle de prédiction de la déformation. Les précisions ne semblent pas avoir changé.

2.3.1.4 Bilan

Dans ces articles, ces pondérations sont surtout utilisées en géophysique pour améliorer des modèles de déformation et les comparer à des modèles de prédiction. Ainsi, l'exactitude a été plus importante que la précision des résultats. Notre contexte diffère de celui des articles précédents. En effet, nous nous intéressons plus à la précision des résultats, notre zone d'étude est plus restreinte (1 km^2 par rapport au parc de Yellowstone qui fait plus de 100 km^2) et la campagne est à court terme (quelques heures comparées à plusieurs mois). De plus, ces combinaisons ont été utilisées sur des données journalières. Nous allons donc les appliquer à nos besoins, c'est-à-dire sur des sessions à court terme.

2.3. APPLICATION D'UNE AUTRE COMBINAISON : COMBINAISON PAR COORDONNÉES

2.3.2 Application

Chacune des pondérations précédentes (la pondération par la précision a priori des techniques, la pondération par le facteur unitaire de variance, la pondération par la confiance de l'opérateur dans chacune des techniques) va être mise en pratique pour déterminer l'apport de cette combinaison. Pour cela, nous allons utiliser les données de campagne réalisée en pleine campagne, proche de l'ESGT. Comme il s'agit uniquement de tester la combinaison par coordonnées, les calculs sont effectués sur une seule session. Contrairement à l'état de l'art où les sessions duraient au minimum une journée, la session dans les tests dure 10 minutes.

2.3.3 Résultats

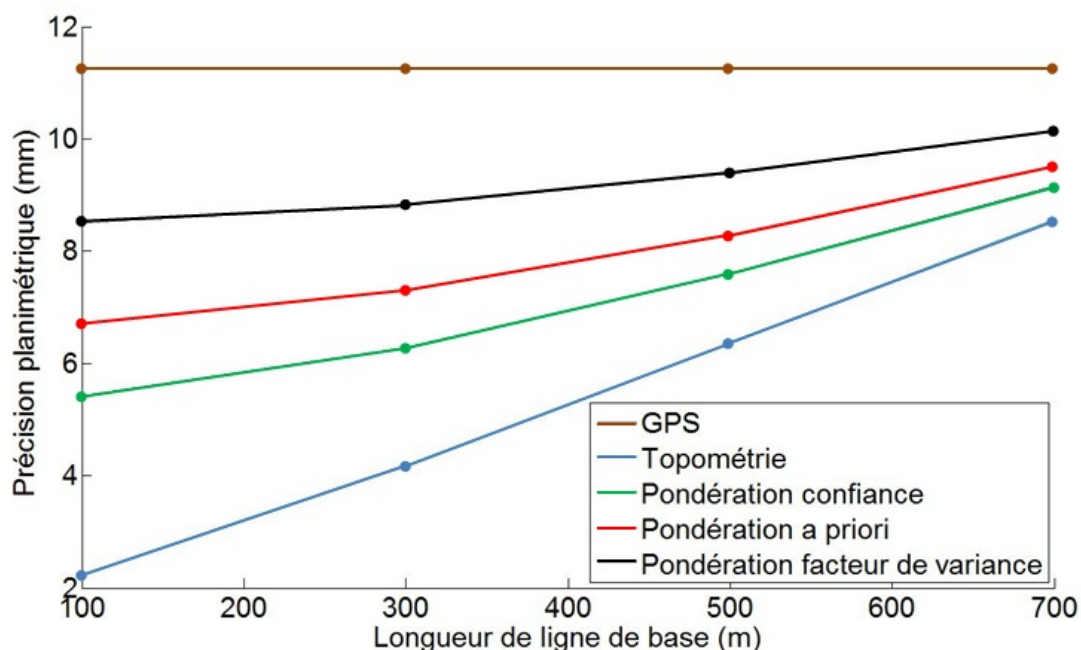


FIGURE 2.11 – Précisions planimétrique de 95% de la topométrie, du GPS et de différentes combinaisons de techniques de premier niveau (pondération par la précision a priori, pondération par le facteur unitaire de variance et pondération par confiance de l'instrument) sur une session de 30 secondes

Session de 30 secondes

Les précisions planimétriques attendues sont affichées sur la figure 2.11 (en haut). Ces

2.3. APPLICATION D'UNE AUTRE COMBINAISON : COMBINAISON PAR COORDONNÉES

précisions varient en fonction de la distance, variation moindre en ce qui concerne le GPS. Les courbes des pondérations suivent la même allure que celle du GPS avec une pente plus accentuée vers les 300 mètres. Les précisions des pondérations se ressemblent même si certaines ont une meilleure précision en absolu. Dans les premiers 300 mètres, on peut voir que la précision des pondérations se situe entre la précision de la topométrie et celle du GPS. Autrement dit, la combinaison par pondération des coordonnées n'améliore rien à la précision des coordonnées par rapport à la technique topométrique seule. En ce qui concerne la composante verticale, la figure 2.11 (en bas) montre que les courbes des pondérations restent entre les courbes des deux techniques. Comme le calcul précédent, cela n'apporte aucune amélioration en amplitude. Nous nous concentrons donc uniquement sur la partie attitude de la planimétrie par la suite.

Longueur de la ligne de base (m)		100	300	500	700
Topométrie	a (mm)	1.89	3.58	5.80	7.96
	f	0.38	0.39	0.55	0.60
	azim (deg)	-0.93	-9.32	-7.44	-6.17
GPS	a (mm)	9.44	9.44	9.44	9.44
	f	0.34	0.34	0.34	0.34
	azim (deg)	25.66	25.66	25.66	25.67
Pondération par facteur de variance	a (mm)	7.12	7.25	7.56	8.08
	f	0.34	0.30	0.26	0.24
	azim (deg)	24.88	29.26	38.20	-39.12
Pondération par confiance	a (mm)	4.51	4.97	6.23	7.86
	f	0.34	0.23	0.30	0.40
	azim (deg)	22.11	44.24	-21.62	-12.91
Pondération par a priori	a (mm)	5.61	5.89	6.63	7.85
	f	0.34	0.26	0.25	0.31
	azim (deg)	23.76	35.07	-34.38	-20,14

TABLE 2.7 – Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétriques des techniques topométrique, GPS et leur pondération sur une session de 30 secondes

Le tableau 2.7 résume les paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétriques des techniques topométrique, GPS et leur pondération sur une session de 30 secondes. Les méthodes de pondération ont des résultats similaires si ce n'est le biais expliqué précédemment. Comme prévu grâce à la figure 2.12 du haut, on peut voir que le demi grand axe des ellipses des méthodes de pondération se situe entre les demi grand axes des deux techniques, suivant une progression bien que trois fois moins rapide que celle du demi grand

2.3. APPLICATION D'UNE AUTRE COMBINAISON : COMBINAISON PAR COORDONNÉES

axe de la topométrie. Ensuite, le demi grand axe des pondérations a une valeur inférieure aux deux autres, pouvant atteindre un facteur de diminution de 1.5 pour la pondération par confiance par rapport au demi grand axe du GPS. Enfin, il serait intéressant de prolonger les courbes avec des données supplémentaires pour voir ce qui se passe lorsque les courbes se croisent. L'aplatissement reste stable et vaut aux alentours de 0.3 pour le GPS et les méthodes de pondération. Cela suggère une ellipse plutôt circulaire. Au contraire, l'aplatissement de la topométrie progresse très rapidement, passant de 0.38 à 0.60.

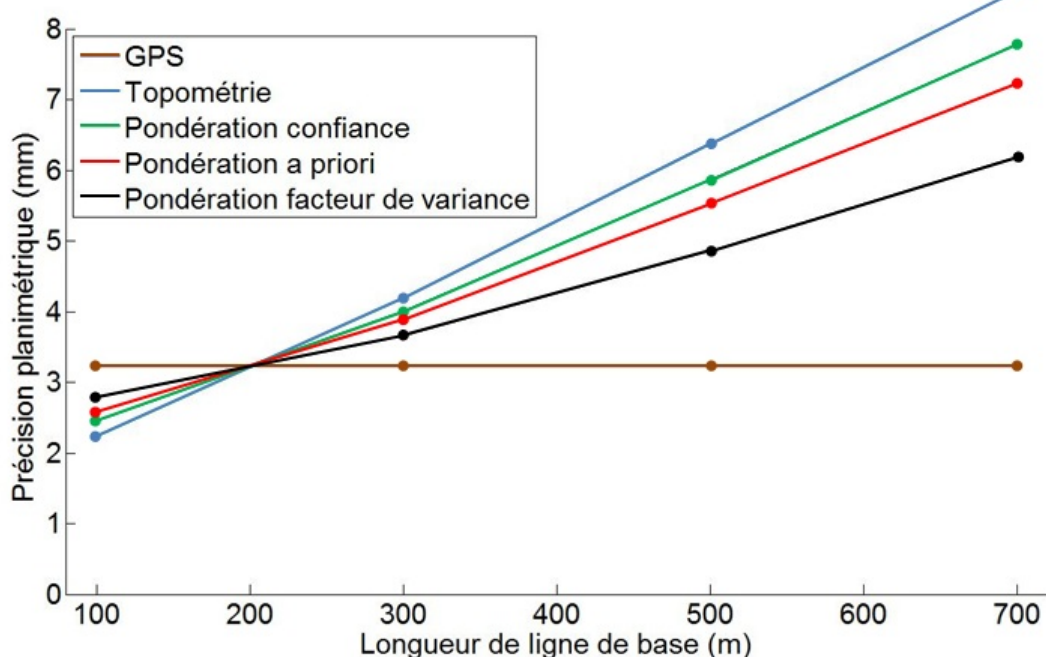


FIGURE 2.12 – Précisions planimétrique de 95% de la topométrie, du GPS et de différentes combinaisons de techniques de premier niveau (pondération par la précision a priori, pondération par le facteur unitaire de variance et pondération par confiance de l'instrument) sur une session de 10 minutes

Session de 10 minutes

Comme on peut le constater sur les figures 2.12, les courbes en planimétrie des pondérations resteront toujours entre les courbes des deux techniques. Cela n'apporte aucune amélioration en amplitude. Nous nous concentrons donc uniquement sur la partie attitude

2.3. APPLICATION D'UNE AUTRE COMBINAISON : COMBINAISON PAR COORDONNÉES

de la planimétrie par la suite.

Longueur de la ligne de base (m)		100	300	500	700
Topométrie	a (mm)	1.89	3.58	5.80	7.96
	f	0.38	0.39	0.55	0.60
	azim (deg)	-0.93	-9.32	-7.44	-6.17
GPS	a (mm)	2.67	2.67	2.68	2.68
	f	0.23	0.23	0.23	0.23
	azim (deg)	9.96	9.96	9.96	9.96
Pondération par facteur de variance	a (mm)	2.21	2.86	4.18	5.54
	f	0.22	0.21	0.40	0.50
	azim (deg)	6.81	-16.52	-9.23	-6.99
Pondération par confiance	a (mm)	2.01	3.34	5.27	7.18
	f	0.30	0.33	0.51	0.58
	azim (deg)	1.64	-10.57	-7.79	-6.33
Pondération par a priori	a (mm)	2.08	3.17	4.91	6.63
	f	0.32	0.35	0.53	0.59
	azim (deg)	0.81	-10.11	-7.67	-6.28

TABLE 2.8 – Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétriques des techniques topométrique, GPS et leur pondération sur une session de 10min

Le tableau 2.8 résume les paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétriques des techniques topométrique, GPS et leur pondération sur une session de 10 minutes. Les méthodes de pondération ont des résultats similaires si ce n'est un biais de pente entre leurs valeurs provenant sans doute du coefficient de pondération attribué aux matrices. Comme prévu grâce à la figure 2.12 du haut, on peut voir que le demi grand axe des ellipses des méthodes de pondérations se situe entre le demi grand axe du GPS et le demi grand axe de l'ellipse de la topométrie. De même, l'aplatissement des ellipses des méthodes de pondération suit une progression qui va de 0.3 à 0.5 entre 100 metres et 700 metres. Cette progression est 1.7 fois plus lente que celle de l'aplatissement de l'ellipse de topométrie. La progression du GPS reste pourtant la meilleure avec une progression en fonction de la distance de ligne de base nulle. L'azimut de l'ellipse du GPS est stable et reste à 10° quelque soit la distance. Pour la topométrie l'azimut subit une régression passant de 0° à moins de 6° . Quant aux méthodes de pondération, l'azimut subit également la même régression que la précédente, allant de -10° à 6° entre 100 metres et 700 metres.

Le fait de pondérer les deux techniques permet d'améliorer chaque paramètre final de la technique dont ce paramètre est le moins précis. Lorsque ces techniques sont bien balancées

entre les avantages et les inconvénients, cette méthode est efficace. Malheureusement dans ce cas d'étude, le GPS est le plus souvent le plus précis des deux techniques donc la pondération est inefficace hormis pour l'azimut.

Le fait d'étudier la pondération avec le GPS en mode statique a permis d'obtenir une amélioration concrète sur la taille de l'ellipse de précision, surtout au niveau du croisement des courbes des deux techniques. Néanmoins, le reste des résultats reste le même pour l'aplatissement qui reste réglé sur celui du GPS. Le seul point qui se montrait en faveur de la topométrie devient sur ce cas complètement ératique, n'ayant aucune suite logique.

2.4 Bilan

Ces tests ont montré que la combinaison par pondération donne des résultats qui semblent inadéquats sur la zone de recherche de cette étude et qui n'améliorent en rien les précisions des techniques prises séparément. Comme prédit dans le bilan des articles, ces combinaisons n'améliorent pas les précisions des techniques mais plutôt leurs exactitudes. Ces techniques sont plus orientées vers la modélisation et la combinaison pour détecter des paramètres de déformation en effectuant un calcul de modélisation supplémentaire. Il semble donc logique d'essayer d'autres types de combinaisons plus poussés, plus en amont du calcul. A noter que la combinaison de premier niveau étend tout de même les possibilités d'auscultation sur des chantiers car elle permet d'obtenir des critères sur la technique à utiliser en fonction de différents critères comme la taille du chantier.

La combinaison de matrices normales est de loin plus pertinente que la combinaison par pondération.

Il faut cependant rappeler que ces conclusions ne sont vraies uniquement que pour le cas particulier de notre étude. En effet, cette combinaison n'a été testée que sur une réseau linéaire sur une longueur inférieure au kilomètre et sur une durée de session de 10 minutes maximum. Il serait intéressant cependant de regarder ce que cette combinaison pourrait apporter sur un réseau non plus à 2 points mais à 3 points.

Chapitre 3

Combinaison sur un réseau à 3 points

Suite aux résultats favorables obtenus au chapitre précédent, il apparaissait intéressant de complexifier la géométrie du réseau.

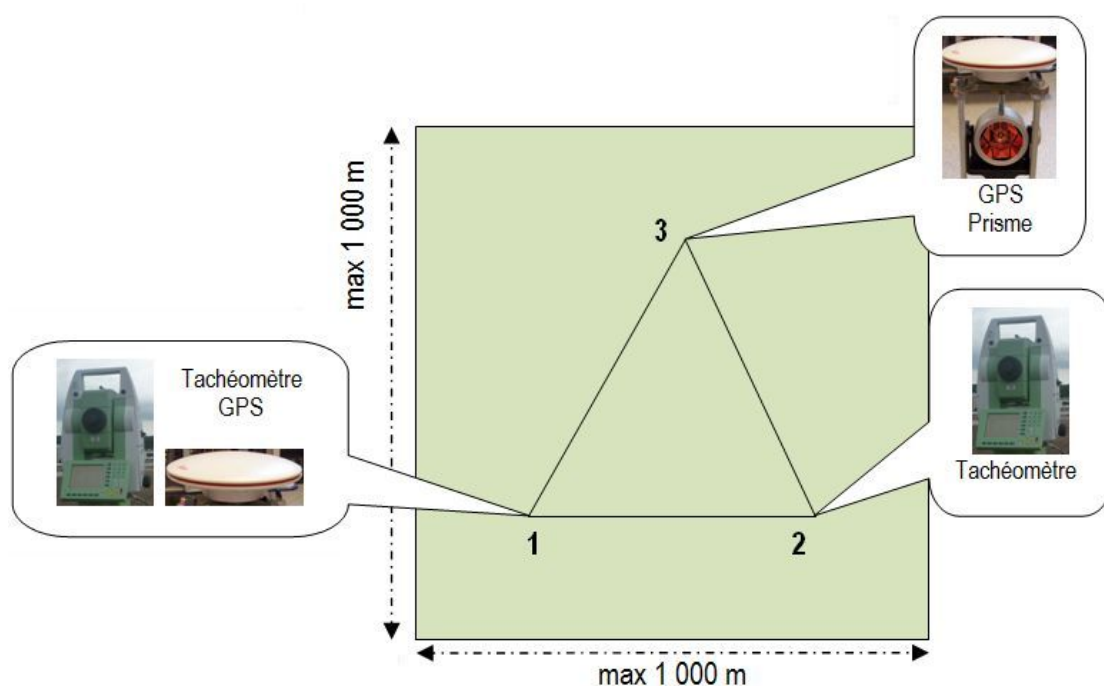


FIGURE 3.1 – Schéma du réseau à trois points

A partir du réseau linéaire, l'ajout d'une station topométrique crée un réseau à trois points. Ces trois points sont composés de deux stations topométriques et d'un point ausculté. Les observations GNSS se feront comme précédemment, avec deux récepteurs en positionnant la base sur l'une des stations topométrique (point 1) et le mobile sur le point

ausculté (point 3) comme le montre la figure 3.1. La surface d'étude devient alors un carré de 1 km^2 . Dans cette zone, nous cherchons à évaluer la précision obtenue sur la détermination du point visé (point 3) en utilisant les mesures issues des deux techniques abordées.

Cette étude particulière a été réalisée en 2010 par Angélique Azzini dans le cadre de son travail de fin d'études du diplôme d'ingénieur ESGT. Les résultats présentés résument les travaux, détaillés dans son mémoire [Azzini 2010], dont une partie a fait l'objet d'une publication dans la revue I2M [Azzini and Durand 2010].

3.1 Simulation

Avant de tester la combinaison par matrices normales sur des données réelles, des simulations sont effectuées pour comprendre et appréhender les résultats attendus.

Dans cette fenêtre de 1000 mètres de côté, il existe un nombre illimité de configurations d'un réseau à trois points. En prenant les mêmes paramètres de calcul que dans le chapitre précédent, nous nous sommes concentrés sur l'étude de deux aspects liés à la géométrie du réseau :

- Si l'on considère dans un premier temps que la distance entre les deux instruments topométriques (points 1 et 2) reste constante, il serait alors intéressant d'étudier l'influence de la position du point ausculté 3 dans le réseau sur la précision du positionnement en utilisant de manière séparée les techniques topométrique et GNSS et leur combinaison.
- Si l'on fait en plus varier cette fois la distance entre les points 1 et 2 du réseau, les précisions obtenues en fonction de la position du point 3 ausculté devraient montrer des modifications, et ce, avant et après combinaison des techniques.

Suite à ces remarques, Nous avons donc décidé de construire un simple réseau à 3 points illustré par la figure 3.2. Le réseau est ainsi constitué de deux stations totales positionnées sur les points 1 et 2 et définies comme connues en coordonnées 3D. La visée d'orientation se fait sur l'un des deux points stationnés (ici de 2 vers 1). Une des deux stations possède un récepteur GNSS (ici le point 1). Le point inconnu 3 est équipé d'un récepteur GNSS

3.1. SIMULATION

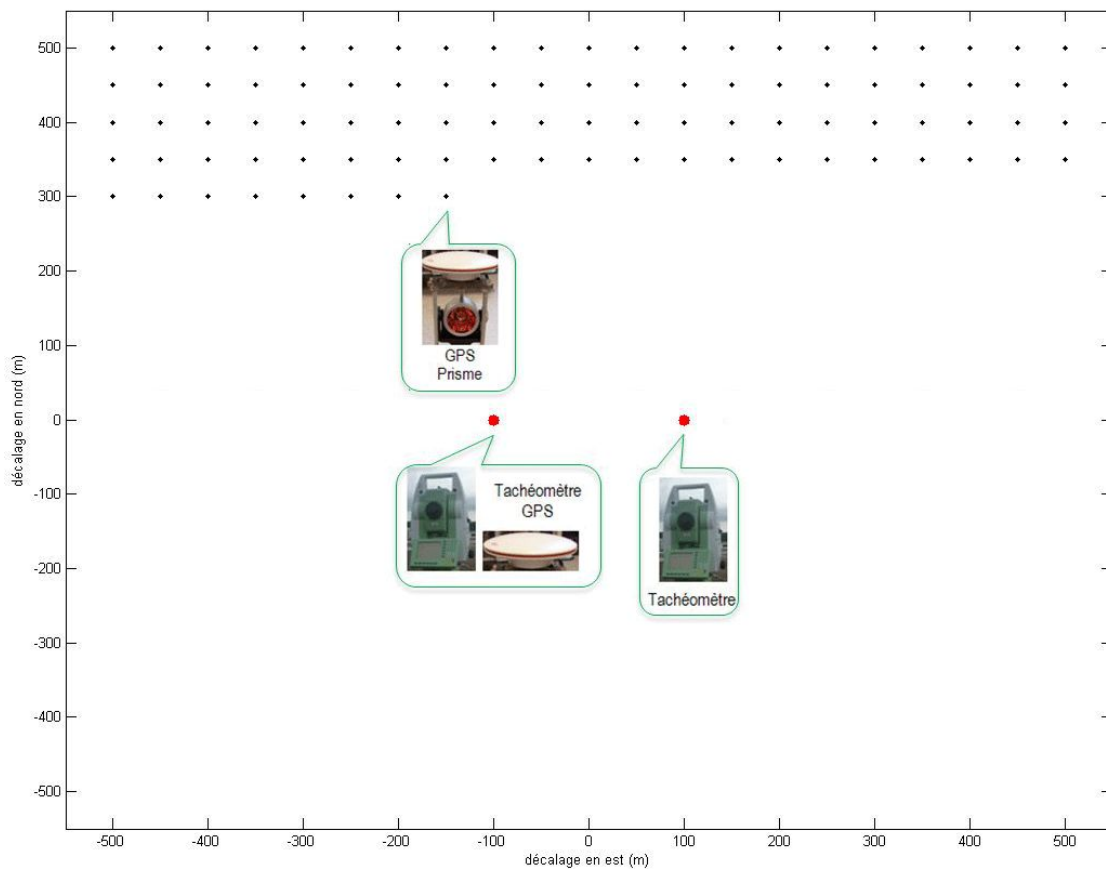


FIGURE 3.2 – Schéma du réseau bi-dimensionnel simulé

et d'un prisme pouvant être observé par les deux stations totales aux points 1 et 2. Les mesures sont récapitulées dans le tableau 3.1.

Point/Mesure	S2 (tachéomètre)	P3 (prisme + GPS)
S1 (tachéomètre+GPS)	Hz	Dp, Hz, V, L1
S2 (tachéomètre)	/	Dp, Hz, V

TABLE 3.1 – Tableau décrivant les mesures du réseau

Les études sont faites sur des sessions de 10 minutes. La simulation des données et la méthodologie sont les mêmes que dans le chapitre précédent.

La simulation se concentre sur le réseau test dans lequel nous ferons varier plusieurs paramètres. Deux possibilités sont analysées : ligne de base entre les points 1 et 2 fixe et ligne de base variable.

3.1.1 Ligne de base fixe

Le point ausculté 3 est considéré comme mobile. Dans le réseau, dont les dimensions sont fixées, nous modifions sa position par pas de 50 mètres en est et par pas de 50 mètres en nord. Ainsi, nous obtenons un quadrillage de valeurs serré et homogène.

Les figures 3.3, 3.4 et 3.5 présentent les valeurs des demi-grands axes en fonction de la position planimétrique du point 3 ausculté pour une distance entre les stations totales (points 1 et 2) de 300 mètres. En considérant que le point 3 se situe exactement au milieu des points stationnés 1 et 2, l'axe des abscisses représente la position en Est du point 3 et l'axe des ordonnées sa position suivant la composante Nord.

Si on s'intéresse à la figure 3.3 on peut remarquer que la valeur du demi grand axe augmente en fonction de l'éloignement du point P3 par rapport aux points S1 et S2, passant de 1.7 mm (proche du point S2) à 10.6 mm. On aurait pu penser observer sur la figure une variation de la valeur du demi grand axe en fonction de l'éloignement avec une forme symétrique de part et d'autre des points S1 et S2. On observe au contraire une dégradation plus rapide de l'incertitude lorsque le point P3 se décale vers l'ouest du point S2 que lorsqu'il se décale vers l'est par rapport au point S1. Ce phénomène résulte de la non symétrie des mesures de simulation où il existe uniquement une mesure de lecture horizontale "d'orientation" du point S2 vers le point S1, la mesure réciproque étant absente.

En ce qui concerne la figure 3.4, comme seuls les points S1 et P3 sont équipés d'un récepteur GNSS, le demi grand axe est centré sur S1 et augmente naturellement en fonction de la distance du point P3 au point S1, passant de 3 mm à proximité du point S1, à 3.4 mm à une distance de 820 m.

Si l'on compare les deux cartes, on peut remarquer que les précisions se superposent aux alentours de 200 m. Cela confirme les résultats du chapitre précédent où la topométrie est plus précise sur de courtes distances alors que le GPS prend le pas à partir d'un point de croisement (200 m dans notre cas).

Regardons maintenant les résultats obtenus lors de la combinaison des techniques dans la figure 3.5. On constate que la valeur du demi grand axe de l'ellipse à 95 % sur les coordonnées planes du point P3 varie de 1.2 mm (à proximité du point S1) à 3 mm aux

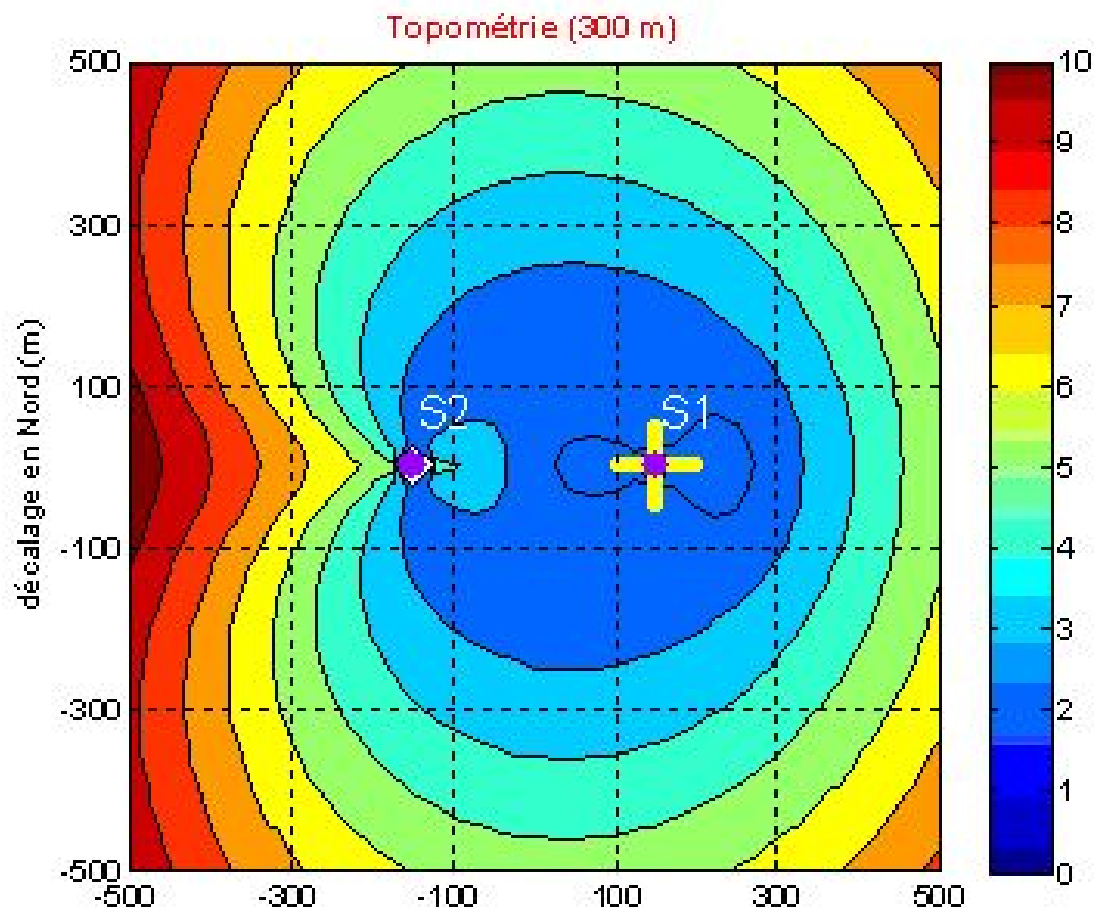


FIGURE 3.3 – Cartes représentant les demi-grands axes des ellipses de confiances sur une surface de 1 km^2 de la topométrie pour une ligne de base de 300 mètres et sur une session de 10 minutes

extrémités de la zone d'étude. En comparaison des résultats obtenus par les techniques topométrique seule (figure 3) et GNSS seule (figure 4), les valeurs de demi grands axes obtenues sont toujours plus petites après combinaison des techniques.

Si l'on s'intéresse maintenant au gain obtenu par la combinaison par matrices normales, on peut voir que le gain peut varier en fonction de la position du point visé dans le réseau. En effet, le gain peut aller de 1 au centre jusque 1.9 au nord et au sud. Cela prouve que la géométrie du réseau est importante.

La seconde information étudiée est l'aplatissement de ces ellipses. Comme les figures

3.1. SIMULATION

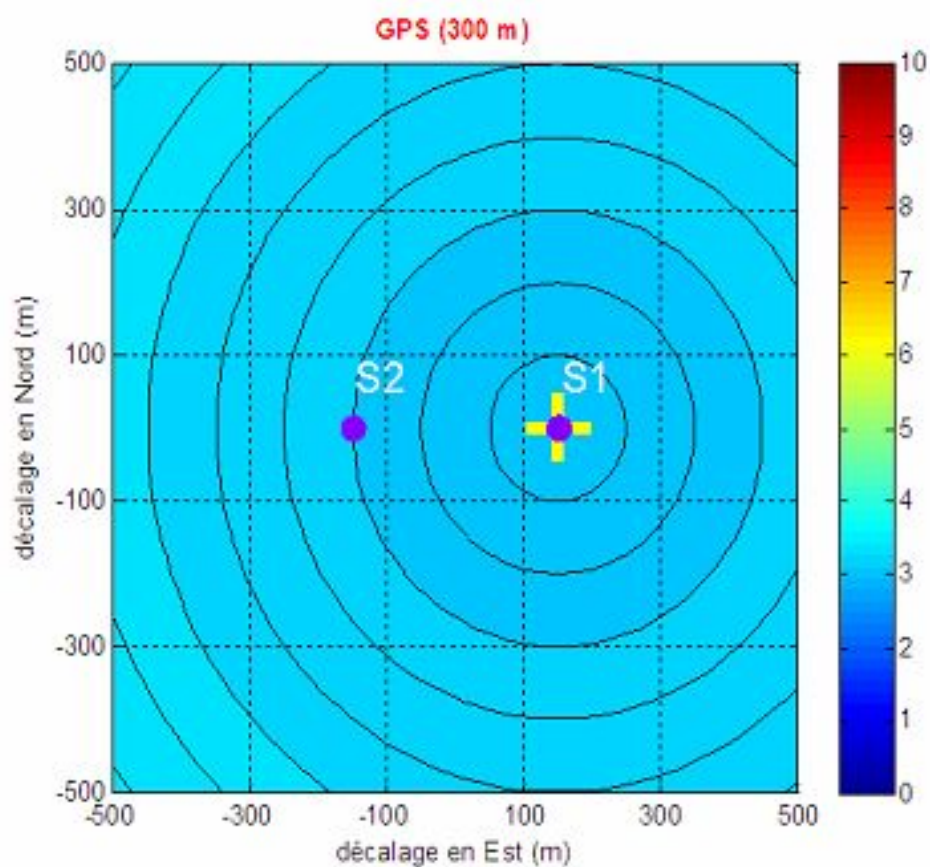


FIGURE 3.4 – Cartes représentant les demi-grands axes des ellipses de confiances sur une surface de 1 km^2 du GPS pour une ligne de base de 300 mètres et sur une session de 10 minutes

précédentes, les figures 3.7, 3.8 et 3.9 présentent les valeurs des aplatissements en fonction de la position planimétrique du point 3 ausculté pour une distance entre les stations totales (points 1 et 2) de 300 mètres. En considérant que le point 3 se situe exactement au milieu des points stationnés 1 et 2, l'axe des abscisses représente la position en Est du point 3 et l'axe des ordonnées sa position suivant la composante Nord.

Comme pour les demi grands axes, la figure 3.7 montre que l'aplatissement de l'ellipse du point ausculté (P3) augmente avec l'éloignement par rapport aux points S1 et S2 passant de 0.07 à 0.84 avec une valeur moyenne de 0.56. On constate que les aplatissements sont répartis sur l'ensemble des valeurs entre 0 et 1, avec une prédominance des valeurs entre 0.5 et 0.8. Les ellipses de confiance dans le cas de la technique topométrique sont donc

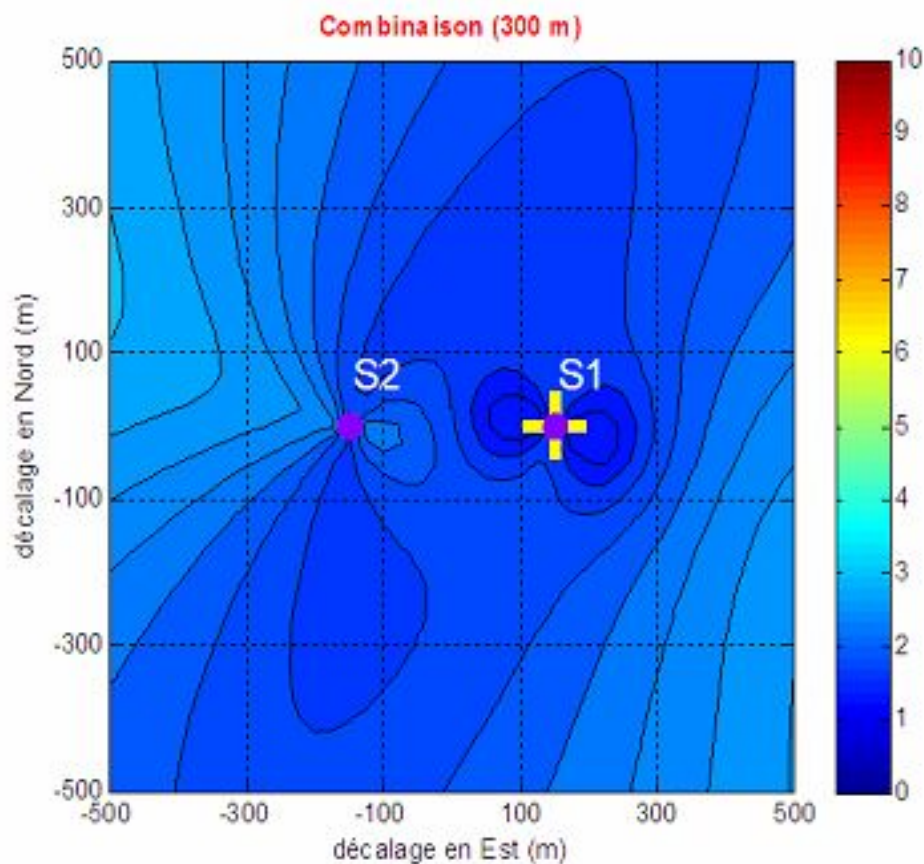


FIGURE 3.5 – Cartes représentant les demi-grands axes des ellipses de confiances sur une surface de 1 km^2 de la combinaison de deuxième niveau pour une ligne de base de 300 mètres et sur une session de 10 minutes

en général très aplaties (valeur > 0.5), conséquence directe de la géométrie du réseau à 3 points que nous avons utilisé.

Dans le cas de la technique GNSS seule, l'aplatissement des ellipses de confiance à 95% est quasi fixe avec une valeur de 0.4 (cf. figure 3.8). Cela confirme les résultats du chapitre précédent.

Si on s'intéresse maintenant aux résultats de la combinaison des deux techniques (figure 3.9), on remarque qu'autour du point S1, la combinaison des techniques n'a pas beaucoup diminué l'aplatissement des ellipses. En revanche, pour les autres localisations dans la zone d'étude, l'aplatissement de l'ellipse est fortement réduit, passant pour les points les plus éloignés de la zone de 0.8 à 0.55, soit un gain de 30 % sur l'aplatissement par rapport à la

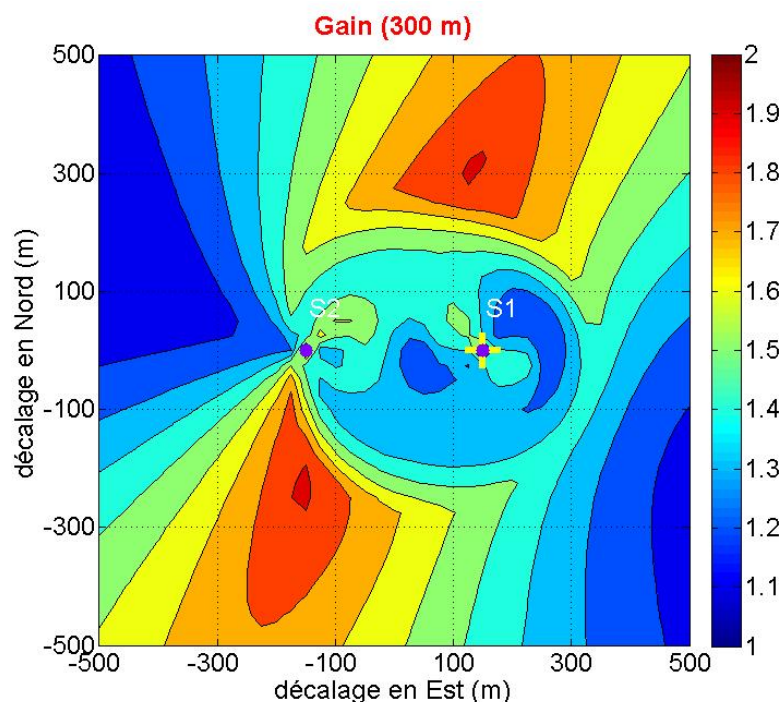


FIGURE 3.6 – Cartes représentant les gains des demi-grands axes des ellipses de confiances sur une surface de 1 km^2 de la combinaison de deuxième niveau pour une ligne de base de 300 mètres et sur une session de 10 minutes

technique topométrique seule et de 0.4 à 0.05 soit un gain pouvant aller jusqu'à 80 % sur la valeur de l'aplatissement par rapport à la technique GNSS seule.

Il apparaît donc que ces tendances semblent être en adéquation avec les conclusions du chapitre précédent sur un réseau linéaire à une seule station totale.

3.1.2 Ligne de base variable

Dans la partie précédente, nous avons considéré la distance entre les points stationnés 1 et 2 de 300 mètres. Nous allons maintenant étudier suivant le même principe l'influence de la longueur de cette ligne de base en la modifiant. La ligne de base topométrique est simulée pour une distance de départ de 50 mètres jusqu'à atteindre 800 mètres de longueur et augmentera également par pas de 50 mètres. Les résultats obtenus sont indiqués dans le tableau 3.2.

Le tableau 3.2 présente l'influence que l'on observe sur les demi-grands axes en faisant

3.1. SIMULATION

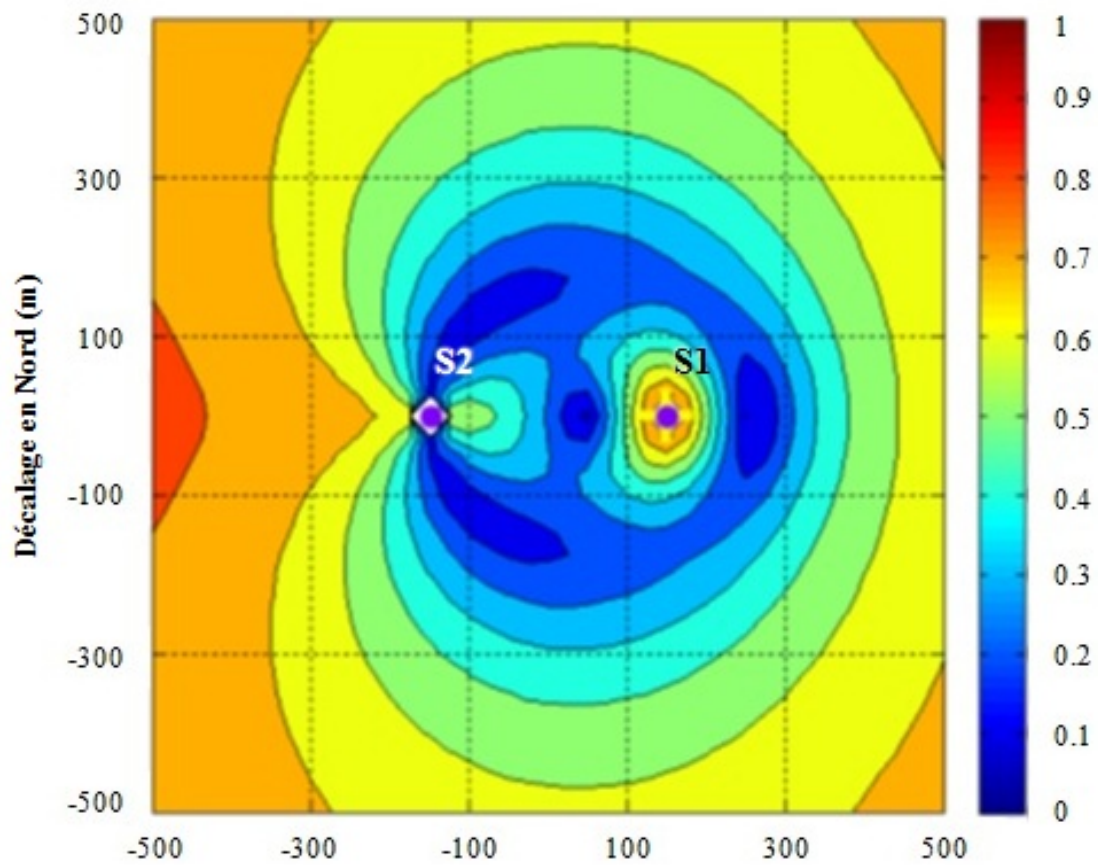


FIGURE 3.7 – Cartes représentant les aplatissements des ellipses de confiances sur une surface de 1 km² de la topométrie pour une ligne de base de 300 mètres et sur une session de 10 minutes

Coordonnées X (m), Y(m)	Demi grand axe (mm)			
	Topométrie	GPS	Combinaison	Gain
100,100	2.1 à 3.2	3.1	1.6 à 2.1	1.1 à 1.4
200,200	2.5 à 4.3	3.1	1.7 à 1.9	1.3 à 1.6
300,300	3.1 à 6.6	3.2	1.8 à 2.0	1.6 à 1.8
400,400	4.2 à 8.9	3.3	1.8 à 2.0	1.5 à 1.7
500,500	5.6 à 11.2	3.3	1.9 à 2.1	1.5 à 1.6

TABLE 3.2 – Tableau récapitulatif des intervalles des valeurs des demi-grands axes pour des distances entre 50 mètres et 800 mètres

varier uniquement la distance entre les deux stations totales. Considérant les valeurs issues des mesures GPS comme constantes, ce sont donc les données topométriques qui vont conditionner l'allure des graphiques concernant les données de la combinaison. Ces allures

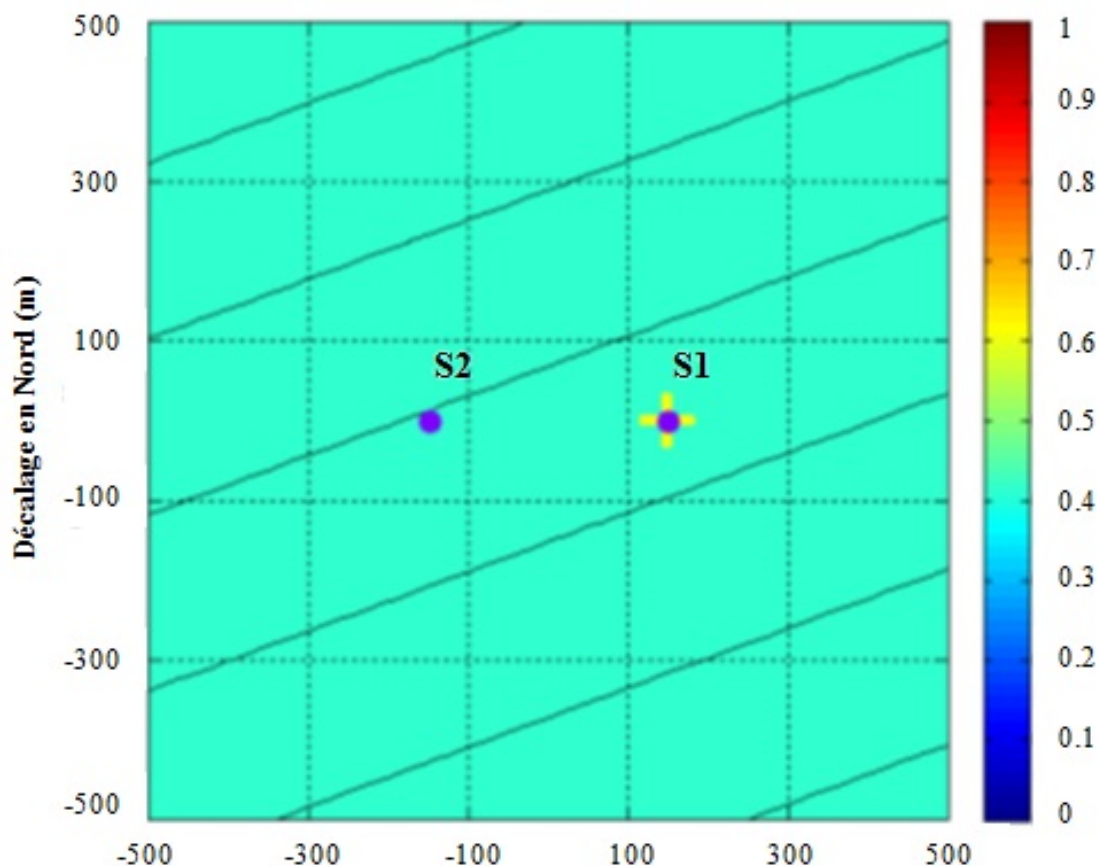


FIGURE 3.8 – Cartes représentant les aplatissements des ellipses de confiances sur une surface de 1 km^2 du GPS pour une ligne de base de 300 mètres et sur une session de 10 minutes

restent pourtant sur des résultats similaires.

En ce qui concerne les aplatissements, les résultats présentés dans les figures précédentes sont caractéristiques de ceux obtenus avec d'autres lignes de base.

3.2 Campagne de mesures

Pour pouvoir valider les simulations, il est indispensable de les confronter à de véritables valeurs dans notre cas d'une campagne de mesures. Contrairement aux simulations, la construction du réseau étudié ne pouvait pas être échantillonnée tous les 50 mètres. Malgré le matériel disponible, les instruments adaptés et les récepteurs GNSS sont limités. Les points ont été placés au plus proche des points simulés. La taille du réseau, et notamment

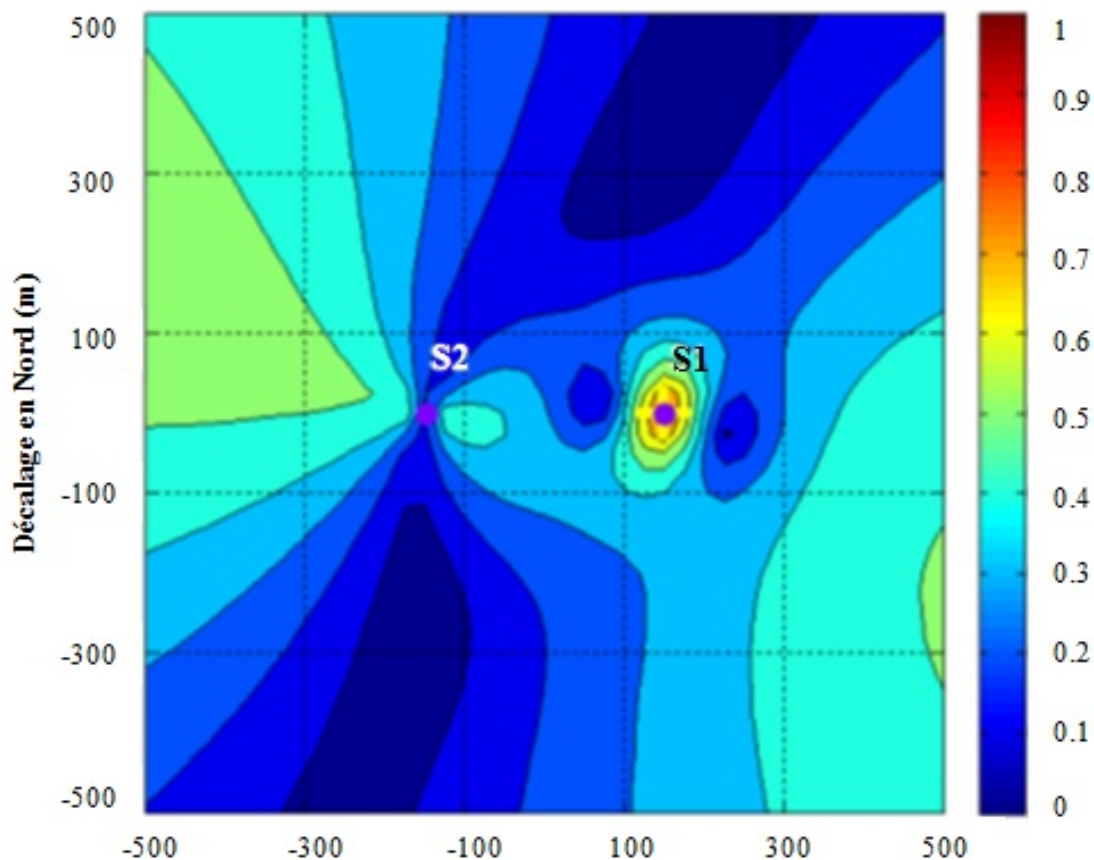


FIGURE 3.9 – Cartes représentant les aplatissements des ellipses de confiances sur une surface de 1 km^2 de la combinaison de deuxième niveau pour une ligne de base de 300 mètres et sur une session de 10 minutes

la visée sur un objet à plus de 500 mètres était un des critères que nous devions au mieux respecter.

3.2.1 Préparation de la campagne

Pour choisir le site de la campagne, plusieurs critères doivent être réalisés :

- Possibilité de se procurer des alimentations secteurs sur pratiquement tous les points auscultés.
- les mesures devant être réalisées sur des périodes considérées comme longues, il était plus raisonnable de positionner le réseau dans un lieu « surélevé » et donc loin de perturbations humaines.

3.2. CAMPAGNE DE MESURES

- Pour la topométrie, l'intervisibilité entre les stations et les points reste le critère le plus contraignant mais néanmoins primordial. Situé en élévation, aucun masque ne pourra obstruer le signal GNSS.

Tout ceci nous a décidé sans hésitation à réaliser cette mission sur le campus de l'Université.

D'après les résultats simulés, on se rend compte qu'il n'est pas nécessaire d'avoir des points dans toutes les directions (pour la topométrie, les résultats de la simulation (cf figures 3.3 et 3.7) sont symétriques par rapport aux deux stations tachéométriques). On peut donc limiter notre champ d'action. Ensuite, vus les sites sur lesquels nous avons accès, la configuration du réseau s'est basée au niveau des points les plus éloignés, en l'occurrence l'ESGT et le site de l'IAM (bâtiment acoustique de l'Université). De ce fait, la distance entre les deux stations tachéométriques ne devait pas être trop importante. C'est pourquoi nous nous sommes orientés sur le site de l'ESGT et le bâtiment ENS/LETTRE.

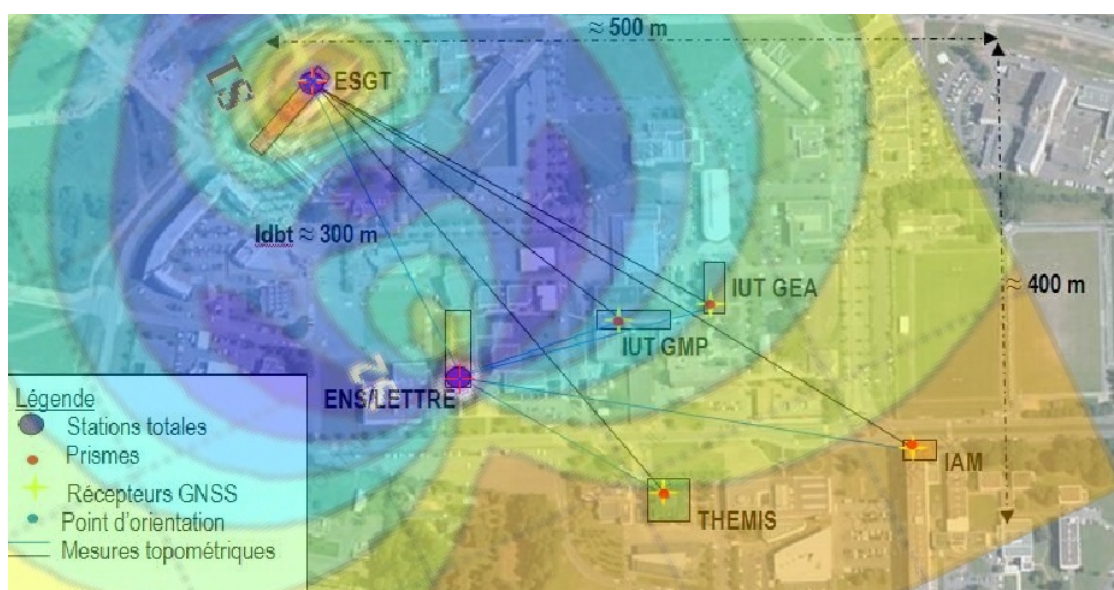


FIGURE 3.10 – Superposition du campus de l'Université et de la carte de précision 3.3

Pour pouvoir sélectionner les différents points de notre réseau, nous avons superposé une photo orthonormée du campus de l'université avec la carte de précision de la topométrie (figure 3.3) car la carte de précision du GPS varie très peu sur l'ensemble du réseau (voir figure 3.10). Nous avons sélectionné plusieurs points en concordance avec des zones de

3.2. CAMPAGNE DE MESURES

précision par rapport au campus universitaire. Après avoir étudié différentes possibilités, nous avons finalement mis en place le réseau présenté dans la figure 3.11.

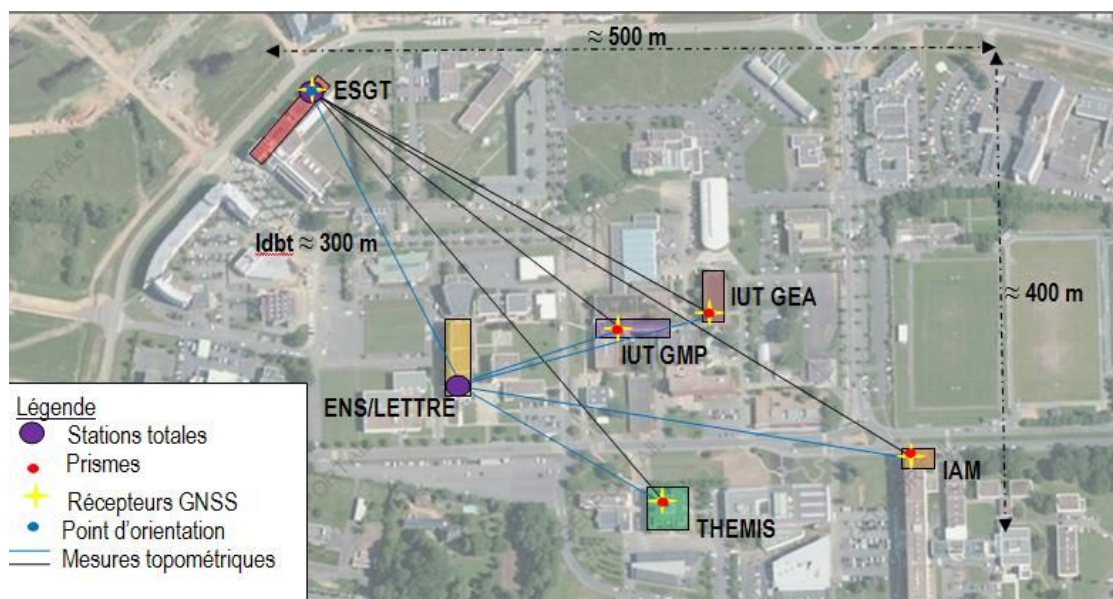


FIGURE 3.11 – Schéma du réseau de campagne

3.2.2 Données

Pour notre campagne de mesures (cf schéma 3.11), nous avons choisi d'utiliser une longueur de ligne de base de 300 mètres entre les points ESGT et ENS/LETTRE. Nous avons ensuite choisi 5 points auscultés sur la zone d'étude, à savoir THEMIS, IUT GEA, IUT GMP et IAM. Pour chaque point, des mesures topométriques et GNSS ont été acquises dans les mêmes conditions que pour nos simulations et une position a été calculée en utilisant des sessions de mesures de 10 minutes, espacées de 50 minutes (soit une position par heure avec 10 minutes d'observations, de l'heure ronde à 10 minutes plus tard) sur une période de 2 jours (27 et 28/05/2010).

Les mesures topométriques ont été réalisées par des stations totales motorisées : Leica TM 30 sur le point ESGT et Leica TCRP 1201 sur le point ENS/LETTRE. L'acquisition automatique et la gestion des instruments topographiques ont été confiées au logiciel commercial Geomos de la société Leica Geosystems. Fonctionnant sous un environnement Windows, il s'agit d'un logiciel d'auscultation destiné à la surveillance d'ouvrages, entière-

3.2. CAMPAGNE DE MESURES

ment piloté et qui permet de gérer les accidents de mesures. Durant chacune de ces périodes, les observations de distances et d'angles ont été acquises par des tours d'horizon successifs avec double retournement des stations totales afin de compenser les erreurs instrumentales des limbes. Le traitement des mesures topométriques a été réalisé par le logiciel CoMeT.

Pour l'acquisition des mesures GNSS, nous avons utilisé des récepteurs Leica GPS 520 et 530. Ces récepteurs ont été paramétrés pour enregistrer les données toutes les 30 secondes sans interruption pendant toute la durée de la campagne. Le choix d'un intervalle de mesure à 30 secondes permet d'éviter les problèmes de corrélation temporelles sur les mesures GNSS lors d'acquisition à des cadences plus élevées. Au vu du nombre important de sessions, nous avons utilisé le logiciel Leica Geo Office pour traiter les données. Cela a posé problème car en monofréquence le logiciel ne parvenait pas à résoudre les ambiguïtés. Il a fallu effectuer les calculs en bifréquence.

3.2.3 Résultats

La topométrie, le GNSS et leur combinaison sont analysés indépendamment. Les figures 3.12 représentent l'évolution du demi-grand axe simulé et mesuré sur l'intégralité des séries temporelles. Étant donné que les résultats pour IUT GMP, IUT GEA et IAM sont similaires à ceux de GMP, seuls les graphiques de ce dernier point seront représentés et analysés.

a (mm)	Campagne	Simulation
Topométrie	4.3 à 7.1	2.6
GPS	1.6 à 3.2	2.3 à 3.0
Combinaison	1.4 à 2.4	1.6 à 1.8

TABLE 3.3 – Demi-grands axe de l'ellipse du point GMP

Pour la topométrie, figure 3.12 du haut, nous remarquons que les valeurs simulées des demi-grands axes sont en deçà des valeurs mesurées. Pour le point GMP, les simulations sont estimées à 2.6 mm alors que les mesures fluctuent entre 3.2 mm et 3.5 mm. Cette différence vient de la compensation topométrique. Le traitement par les vraies mesures calcule un facteur unitaire de variance estimé ici à 2.41 alors qu'il est estimé à 1 lors des simulations. Et c'est la valeur de ce facteur qui influe sur les valeurs des précisions des points, mais aussi sur les paramètres de l'ellipse de confiance.

3.2. CAMPAGNE DE MESURES

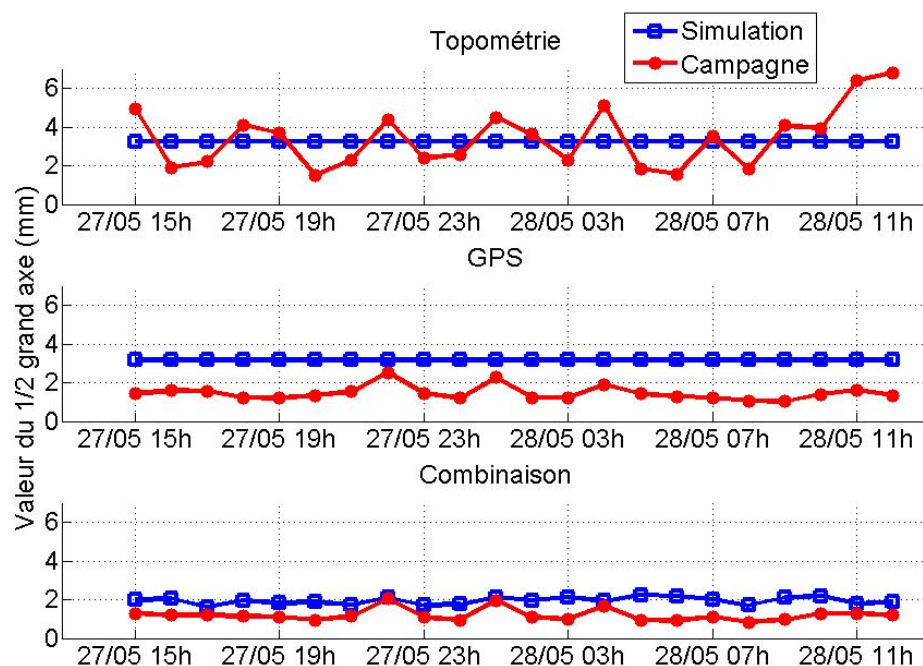


FIGURE 3.12 – Comparaison des séries temporelles simulées et réelles des demi-grands axes topométriques (en haut), GPS (milieu) et après combinaison (en bas) sur le point GMP sur une période de 22 heures

Concernant les valeurs des demi-grands axes observés par GPS, indiqués dans la figure 3.12 du milieu, on remarque que les données réelles sont plus précises que les simulations, ce qui est logique puisque la simulation a été réalisée en monofréquence et les données de campagne ont été calculées en bifrèquence.

Si on s'intéresse maintenant aux demi-grands axes sur les données combinées (figure 3.12 du bas), les valeurs moyennées sont de l'ordre de 1.9 mm pour les mesures et de 1.7 mm pour les simulations. L'amélioration est constatée par rapport à l'utilisation d'une seule technique (et ce malgré des résultats mesurés en topométrie qui sont moitié moins précis que les simulations).

La figure 3.13 montre les courbes des données réelles des 3 figures précédentes. Grâce à cette figure, on peut donc comparer directement la précision de la combinaison avec la précision des techniques prises séparément. On aperçoit tout de suite que le GPS est

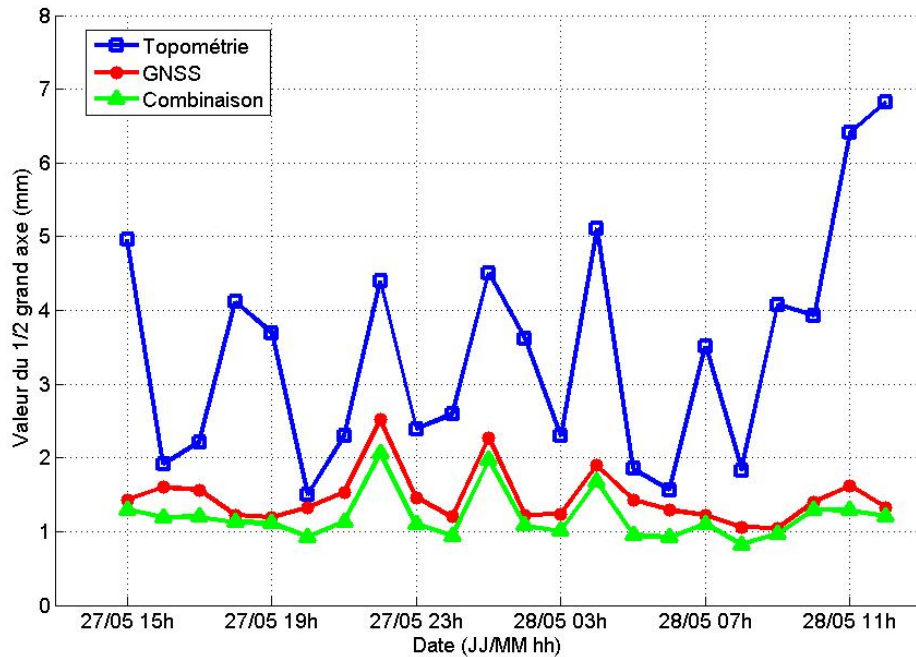


FIGURE 3.13 – Séries temporelles des données réelles des demi-grands axes topométriques, GPS et après combinaison sur le point GMP sur une période de 22 heures

toujours plus précis que la topométrie et que la combinaison est toujours au moins aussi précise que le GPS. Si l'on s'intéresse aux gains obtenus, le maximum est de 1.5 avec une moyenne de 1.3.

3.3 Bilan

La mise en place du premier réseau à trois points, avec l'utilisation des paramètres obtenus lors des simulations effectuées dans le chapitre précédent, fait ressortir une similitude entre ces résultats et ceux issus d'un réseau linéaire. La combinaison des mesures topométriques secondées par des mesures GPS, serait bénéfique sur l'influence des précisions des points auscultés (de l'ordre de quelques millimètres), notamment ceux situés aux extrémités du réseau.

Suite à cette étude, il devient possible de créer des réseaux bi-dimensionnels et d'ap-

3.3. BILAN

pliquer la combinaison par matrices normales. Cela permet également des applications supplémentaires pour les utilisateurs et les industriels. En effet, des outils ont été réalisés pour pouvoir effectuer des simulations des réseaux sur une surface donnée. A partir de ces simulations, il est possible de faire des tests pour connaître le nombre d'instruments nécessaire afin d'obtenir la précision minimum requise. De plus en utilisant la combinaison, il devient possible d'alterner entre un instrument de topométrie et une antenne GPS. Cela permettrait de modifier le nombre d'instruments requis et ainsi de gérer plus facilement le coût matériel d'une campagne d'étude.

Conclusion

Conclusion

Depuis quelques années, le laboratoire de Géodésie et de Géomatique de l'ESGT réalise des études de déformations à partir de différentes techniques géodésiques. Fort de ces études et de la diversité de techniques maîtrisées, le laboratoire s'est penché sur la comparaison de ces différentes techniques. Depuis peu, il s'intéresse à l'apport de l'utilisation simultanée de plusieurs techniques géodésiques dans un réseau d'auscultation en les combinant.

Inscrit dans ce cadre, l'objectif de cette thèse a été de s'interroger sur les différentes possibilités de combiner deux techniques de positionnement et de les appliquer sur le GNSS et la topométrie.

Nous avons listé les différentes combinaisons possibles entre les techniques géodésiques. Elles sont abordées de façon théorique et généralisée. Deux d'entre elles ont été sélectionnées pour cette étude : la première étant une combinaison après calcul telle que décrite dans la littérature, la seconde une combinaison se faisant lors du calcul. Cette dernière combinaison utilisée jusqu'alors pour de gros projets a nécessité ici un travail de reconception. Pour chacune d'entre elles, nous avons vérifié la viabilité après les avoir étudiées, simulées et testées sur des cas concrets basés sur des réseaux linéaires. Nous avons remarqué que les résultats obtenus varient selon la durée des sessions et le nombre d'observations GNSS.

La combinaison par coordonnées améliore l'exactitude plus que la précision. La combinaison par matrices normales améliore plus particulièrement la précision. En effet quelle que soit la durée de la session ou le type de précision, la combinaison par matrices normales est au moins aussi précise que la technique la plus précise, en planimétrie et en altimétrie. Sur des sessions de courte durée, l'amélioration est observée principalement sur la précision planimétrique alors que sur des sessions de durées plus longues, l'amélioration est observée principalement sur la précision altimétrique.

Suite à ces résultats, nous avons voulu poursuivre nos investigations sur la combinaison par matrices normales en complexifiant le réseau test par l'ajout d'un instrument topométrique supplémentaire. Les résultats obtenus sont similaires à ceux du réseau précédent. Cela permet également d'apprécier les bénéfices importantes de la simulation. En effet à partir de ces simulations, il est possible de faire des tests pour connaître le nombre d'ins-

truments nécessaire afin d'obtenir la précision requise. De plus en utilisant la combinaison, il devient possible d'alterner entre un instrument de topométrie et une antenne GPS. Cela permettrait de modifier le nombre d'instruments requis et ainsi de gérer plus facilement le coût matériel d'une campagne d'étude.

Nous pouvons donc conclure que la combinaison par matrices normales améliore la précision obtenue. Nous pouvons alors penser qu'elle permettrait la détection plus fine de déformations.

Perspectives

Jusqu'à présent, nous avons étudié la précision du positionnement. On pourrait voir quel apport la combinaison de matrices normales donnerait à l'estimation de paramètres communs entre le GNSS et la topométrie.

De plus, nous venons de démontrer au cours de cette étude qu'une combinaison effectuée plus en amont du processus de calcul permet d'obtenir des résultats plus précis. Il apparaîtrait donc intéressant de poursuivre cette démarche en étudiant une combinaison encore plus en amont du processus de calcul comme par exemple au niveau des observations brutes.

Par ailleurs, il serait également intéressant de combiner non pas deux techniques uniquement mais plusieurs techniques. Des études géophysiques sont réalisées à l'aide de multiples techniques dont les résultats viennent enrichir les conclusions des phénomènes. Par exemple lors d'études sur le volcanisme, pas moins de quatre techniques sont utilisées en simultané : la gravimétrie, la topométrie, l'InSAR et le GNSS. Il serait intéressant de ne pas les comparer comme à l'heure actuelle mais de les combiner.

Enfin, nous avons étudié avec succès la combinaison du GNSS et de la topométrie, deux techniques complémentaires. Il serait opportun d'étudier d'autres binômes de techniques géodésiques qui sont déjà utilisées en combinaison après calcul par exemple.

- le GNSS et l'InSAR sont tous deux des techniques spatiales. Néanmoins, l'un fait des mesures ponctuelles et en continu alors que l'autre fait des mesures par imagerie sur

CONCLUSION

une large zone et ce à intervalle régulier.

- la gravimétrie et le GNSS peuvent être combinés à l’occasion des études de gravimétrie. La gravimétrie mesure la gravité qui donne l’altitude, position la moins précise mesurée par le GNSS.

La recherche en géophysique pourrait tirer parti de ces combinaisons afin d’améliorer les résultats et les modélisations sur les phénomènes étudiés sans pour autant alourdir les campagnes d’études et les frais de mise en place.

Bibliographie

AFT. *Lexique Topographique*, 2000. 23

Z. Altamimi, X. Collilieux, and L. Métivier. ITRF2008 : An improved solution of the international terrestrial reference frame. *Journal of Geodesy*, 2011. 33

A. Azzini. Apport de la combinaison de mesures GNSS et topométriques dans un réseau d’auscultation. Master’s thesis, ESGT/L2G, 2010. 84

A. Azzini and S. Durand. Auscultation par combinaison de mesures topométriques et GNSS. In J. Cali, editor, *I2M - Métrologie en sciences de la terre*, pages 141–164. Lavoisier, 2010. 84

H. Barrell and J.E. Sears. The refraction and dispersion of air for the visible spectrum. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 238 :1–64, 1939. 40

Y. Bock, R. Nikolaidis, and P. de Jonge. Instantaneous geodetic positioning at medium distances with the Global Positioning System. *Journal of Geophysical Research*, 105 : 223–253, 2000. 52

J. Boehm and H. Schuh. Vienna mapping functions in VLBI analyses. *Geophysical Research Letter*, 31 :1–4, 2004. 43

P. Cervelli and P. Segall. The 12 september 1999 upper east rift zone dike intrusion at Kilauea volcano. *Journal of Geophysical Research*, 107, 2002. 76, 77

P. Ciddor and R. Hill. Refractive index of air : new equations for the visible and near infrared. *Applied Optics*, 38 :1663–1667, 1999. 40

BIBLIOGRAPHIE

- Columbus. *Columbus - User Manual*, 2009. 34, 58
- D. Desoeuvre. Etude des déformations des pyrénées par le traitement des données des campagnes gps respyr et potsis. Master's thesis, ESGT/L2G, 2010. 23
- J.F. Doré. Mise en place d'un réseau d'auscultation sur l'observatoire hydrologique du site de ploemeur. Master's thesis, ESGT/L2G, 2009. 25
- S. Durand. *Amélioration de la précision de la localisation différentielle temps réel par mesure de phase des systèmes GNSS*. PhD thesis, LCPC, 2003. 59
- P. Elósegui, J.L. Davis, R.T.K. Jaldehag, J.M. Johansson, A.E. Niell, and I.I. Shapiro. Geodesy using the global positioning system : The effects of signal scattering on estimates of site position. *Journal of Geophysical Research*, 100 :9921–9934, 1995. 19, 45
- F. Fund. *Observations GPS et retards troposphériques : modélisation et application aux effets de surcharge océanique dans l'Ouest de la France*. PhD thesis, Laboratoire de Géodésie et Géomatique, 2009. 43
- Geolab. *Geolab - User Manual*, 2009. 34, 58
- GPSP. Phase multipath estimation by PPP residulas, 2006. URL <http://gpspp.sakura.ne.jp/mpmap.htm>. 19, 55
- C. Guerin. Comparaison de logiciels d'ajustement de mesures topographiques. Master's thesis, ESGT/L2G, 2010. 58
- B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, and J. Collins. *GPS : Theory and Practice*. SpringerWienNewYork, 2001. 40, 43
- M. Kasser. Topographie : topométrie, géodésie. Technical report, Techniques de l'ingénieur, 1993. 40
- B. Legru. Test des capacités ppp du logiciel bernese 5.0. Master's thesis, ESGT/L2G, 2007. 23
- Leica. *Leica GPS1200 Series Technical Data*, 2006. 49

- Leica. *Leica TPS1200+ Series Technical Data*, 2009. 69
- H. Van Der Marel and B. Gündlich. Development of models for use of slant delays, slant delay retrieval and multipath mapping software. Technical report, Delft University of Technology, 2006. 54
- D. Martin and G. Gatta. Calibration of total stations instruments at the ESRF. In FIG, editor, *Shaping the Change, XIII FIG Congress*, 2006. 39
- J.-C. Marty. Le logiciel GINS. In *Ecole d'été du GRGS*, 2002. 33
- Matlab. *Matlab - User Manual*, 2009. 59
- E. Mikhail and F. Ackermann. *Observations and Least Squares*. IEP A Dun-Donneley Publisher, 1976. 29
- R. Mimouni. Mise en place d'une chaîne de traitement d'interférométrie des images radar. Master's thesis, ESGT/L2G, 2008. 23, 24
- J. Nicolas. *La Station Laser Ultra Mobile : de l'obtention d'une exactitude centimétrique des mesures à des applications en géodésie et océanographie spatiales*. PhD thesis, Université de Nice Sophia-Antipolis, 2000. 25
- T. Nishimura, T. Imakiire, H. Yarai, T. Ozawa, M. Murakami, and M. Kaidzu. A preliminary fault model of the 2003 july 26, M6.4 northern Miyagi earthquake, northeastern Japan, estimated from joint inversion of GPS, leveling and InSAR data. *Earth Planets Space*, 55 :751–757, 2003. 33, 76
- J. Saastamoinen. Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites. In S.W. Henriksen, A. Mancini, and B.H. Chovitz, editors, *The use of artificial satellites for geodesy*, pages 245–251. American Geophysical Union, 1972. 43
- R.R. Steeves. Mathematical models for use in the readjustment of the north american geodetic networks. Technical report, Geodetic Survey of Canada, 1984. 58
- D.W. Vasco, C.M. Puskas, and R.B. SMith. Crustal deformation and source models of the Yellowstone volcanic field from geodetic data. *Journal of Geophysical Research*, 112, 2007. 34, 76

BIBLIOGRAPHIE

- M. Vergnolle, M.-N. Bouin, L. Morel, F. Masson, S. Durand, J. Nicolas, and S. A. Melachroinos. GPS estimates of ocean tide loading in nw-france : Determination of ocean tide loading constituents and comparison with a recent ocean tide model. *Geophysical Journal International*, 173 :444–458, 2008. 24
- G. Wübbena, A. Bagge, G. Boettcher, and M. Schmitz. Permanent object monitoring with GPS with 1 millimeter accuracy. In ION, editor, *ION GPS-01*, 2001. 53
- G. Wübbena, M. Schmitz, G. Mader, and F. Czopek. Gps block II/IIA satellite antenna testing using the automated absolute field calibration with robot. In *ION GNSS 2007*, 2007. 42

Annexes

Annexe A

Construction des ellipses de confiance

On recherche à analyser et interpréter géométriquement les précisions des résultats obtenus après le processus des moindres carrés. Lorsqu'il s'agit d'une seule variable comme l'altimétrie, on utilise les intervalles de confiance. Mais lorsqu'il s'agit de deux variables interdépendantes comme les coordonnées planimétrique, on utilise des ellipses de confiance.

La majorité des tests statistiques concernant la théorie d'ajustement par les moindres carrés suivent une loi normale. Ainsi pour une seule variable, la distribution de la loi normale ressemble à une cloche et pour deux variables, la distribution de la loi normale ressemble à une cloche en 3D à base elliptique. Pour déterminer les régions de confiance, cette cloche 3D est coupée par un plan horizontal dont la hauteur est régie par le paramètre k . La vue en coupe de cette cloche est donc une ellipse. Il s'agit de l'ellipse de confiance pour une probabilité donnée. La valeur de cette probabilité dépend de la valeur sélectionnée de k .

La loi normale est caractérisée par la moyenne μ pour l'exactitude et par la variance σ pour la précision. Seule la précision entre en compte dans le calcul d'une ellipse. Pour une loi normale à deux variables i et j , on prend en compte les deux variances σ_i^2 et σ_j^2 ainsi que la covariance σ_{ij} . Toutes ces informations sont inscrites dans la matrice de variance/covariance Q_{ij} de ces deux variables obtenue à la fin des calculs.

$$Q = \begin{bmatrix} \sigma_i^2 & \sigma_{ij} \\ \sigma_{ij} & \sigma_j^2 \end{bmatrix} \quad (\text{A.1})$$

Une ellipse est composée de trois paramètres : le demi grand axe a , le demi petit axe b

et son inclinaison ψ .

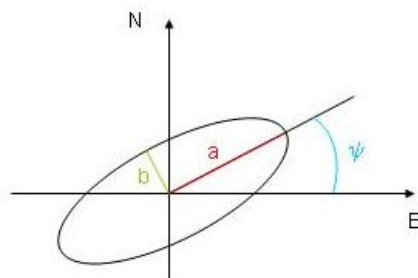


FIGURE A.1 – Schéma des paramètres géométriques d'une ellipse

Ces paramètres sont représentés dans la figure A.1. Il est possible de les calculer à partir de la matrice de variance/covariance Q_{ij} . En effet, les axes de l'ellipse sont les racines carrées des valeurs propres de Q , a étant toujours plus grand que b . En pratique, les trois paramètres sont calculés à partir des équations A.2.

$$\begin{aligned} a &= k \sqrt{\frac{1}{2} \left(\sigma_i^2 + \sigma_j^2 + \sqrt{(\sigma_i^2 - \sigma_j^2) + 4\sigma_{ij}^2} \right)} \\ b &= k \sqrt{\frac{1}{2} \left(\sigma_i^2 + \sigma_j^2 - \sqrt{(\sigma_i^2 - \sigma_j^2) + 4\sigma_{ij}^2} \right)} \\ \psi &= \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{2\sigma_{ij}}{\sigma_i^2 - \sigma_j^2} \right) \end{aligned} \quad (\text{A.2})$$

On peut voir que la taille de l'ellipse dépend de la valeur de k , c'est-à-dire du seuil de confiance. Le tableau A.1 donne les différentes valeurs de k en fonction de la probabilité. Cela suit la loi du χ^2 à 2 degrés de liberté (χ_2^2).

Probabilité	1σ (0.39)	0.5	2σ (0.)	0.90	0.95	3σ (0.98)	0.99
valeur de k	1.000	1.177	2.000	2.146	2.448	3.000	3.035

TABLE A.1 – Valeurs de k en fonction de la probabilité

Annexe B

Simulation de réseau linéaire : autres sessions

Les résultats présentés dans ce chapitre sont des simulations réalisées sous les mêmes conditions que pour les autres sessions de 2.1.3.3.

Session de 1 minute

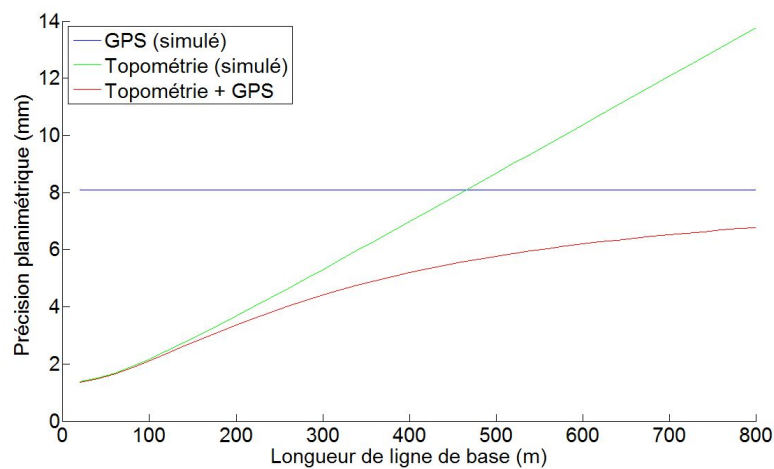


FIGURE B.1 – Précision planimétrique à 95% de simulation de GPS et topométrie, comparées avec la précision de la combinaison de techniques sur une session de 1 minute

La figure B.1 montre comment les précisions planimétriques des techniques GPS et topométriques varient en fonction de la distance lorsqu'on les compare aux résultats obtenus après avoir appliqué la combinaison des matrices normales sur une session de 1 minute.

Contrairement à la session de 30s, les courbes de précision de la topométrie et du GPS se croisent aux alentours d'une ligne de base de 450 mètres. Cela s'explique par l'amélioration de la précision GPS qui coupe la courbe de la topométrie plus tôt. La figure montre que les effets montrés dans la session 30 secondes de la section 2.1.3.3 sont les mêmes hormis sur une distance plus proche. La combinaison des deux techniques n'améliore pas vraiment la précision planimétrique pour les distances inférieures à 100 mètres lorsqu'elle est comparée à la topométrie. Pour des distances supérieures à 150 mètres, la combinaison améliore sensiblement la précision planimétrique par un facteur 1.5 par rapport aux techniques prises séparément. L'amélioration maximale est atteinte pour des distances supérieures à 450 mètres (le point de croisement entre les deux courbes).

Longueur de la ligne de base (m)	Demi grand axe (mm)		
	Topométrie	GPS	Combinaison
100	1.76	6.38	1.71
200	3.42	6.38	3.09
300	5.10	6.38	4.17
400	6.79	6.38	4.96
500	8.49	6.38	5.51
600	10.18	6.38	5.91
700	11.88	6.38	6.15
800	13.572	6.38	6.27

Longueur de la ligne de base (m)	aplatissement		
	Topométrie	GPS	Combinaison
100	0.29	0.22	0.28
200	0.62	0.22	0.42
300	0.73	0.22	0.45
400	0.78	0.22	0.44
500	0.80	0.22	0.42
600	0.82	0.22	0.39
700	0.83	0.22	0.36
800	0.84	0.22	0.34

TABLE B.1 – Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétrique des techniques topométrique, GPS et combinés simulées sur une session de 1 minute

Le tableau B.1 résume, pour un échantillon de distance, les paramètres des ellipses de confiance à 95% (demi grand axe et aplatissement) et ce pour les trois techniques. On observe les mêmes progressions que précédemment mais avec un décalage.

Dans le cas du GPS, le demi grand axe et l'aplatissement sont quasiment constants.

Chaque ellipse d'erreur est presque circulaire (aplatissement est aux alentours de 0.22) montrant ainsi que la précision est la même quelque soit la direction. De plus, on peut noter que l'azimut de la direction du demi grand axe est de 9° , ce qui est plus décalé que la session

L'ellipse de la combinaison de technique est presque circulaire (aplatissement de 0.5) et sa taille est quasiment aussi petite que celle du GPS. On peut remarquer que le rapprochement avec le GPS se fait plus rapidement que la session précédente.

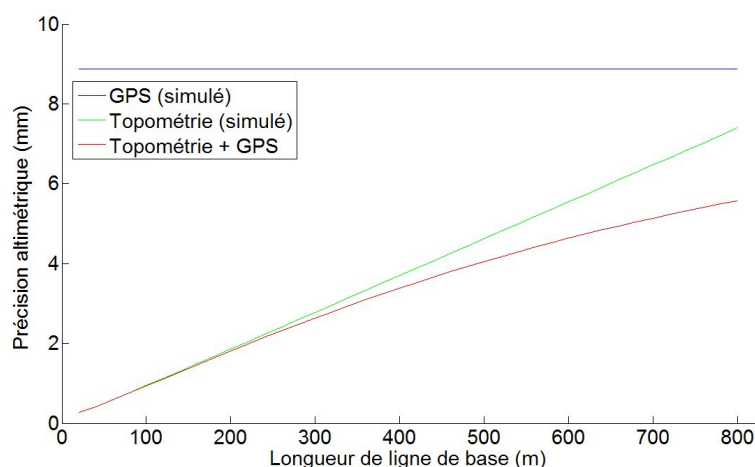


FIGURE B.2 – Précision altimétrique à 95% de simulation de GPS et topométrie, comparées avec la précision de la combinaison de techniques sur une session de 1 minute

En ce qui concerne l'altimétrie, la figure B.2 montre que la combinaison de la topométrie avec le GPS améliore uniquement après 300 m. L'amélioration grandit en fonction de la distance. On peut supposer que sur une distance plus élevée, les courbes GPS et topométrie vont se croiser et la combinaison suivra la même logique qu'en planimétrie.

Session de 2 minutes

La figure B.3 montre comment les précisions planimétriques des techniques GPS et topométriques varient en fonction de la distance lorsqu'on les compare aux résultats obtenus après avoir appliqué la combinaison des matrices normales sur une session de 2 minutes. Contrairement à la session précédente, les courbes de précision de la topométrie et du GPS se croisent aux alentours d'une ligne de base de 320 mètres. La figure montre que

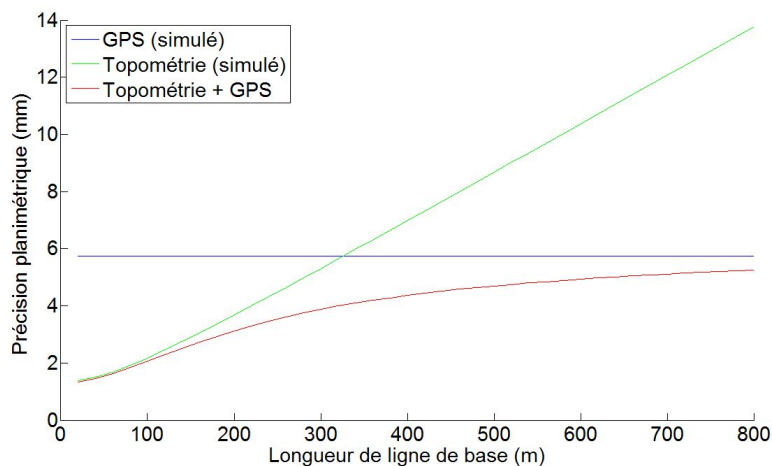


FIGURE B.3 – Précision planimétrique à 95% de simulation de GPS et topométrie, comparées avec la précision de la combinaison de techniques sur une session de 2 minutes

les effets montrés précédemment sont les mêmes hormis sur une distance plus proche. La combinaison des deux techniques n'améliore pas vraiment la précision planimétrique pour les distances inférieures à 100 mètres lorsqu'elle est comparée à la topométrie. Pour des distances supérieures à 150 mètres, la combinaison améliore sensiblement la précision planimétrique par un facteur 1.5 voire plus par rapport aux techniques prises séparément. L'amélioration maximale est atteinte pour des distances supérieures à 320 mètres (le point de croisement entre les deux courbes).

Le tableau B.2 résume, pour un échantillon de distance, les paramètres des ellipses de confiance à 95% (demi grand axe et aplatissement) et ce pour les trois techniques. On observe les mêmes progressions que précédemment mais avec un décalage.

Dans le cas du GPS, le demi grand axe et l'aplatissement sont quasiment constants. Aucun changement n'est à noter sauf la taille de l'ellipse qui a réduit.

L'ellipse de la combinaison de technique est presque circulaire (aplatissement de 0.5) et sa taille est quasiment aussi petite que celle du GPS. On peut remarquer que le rapprochement avec le GPS se fait plus rapidement que la session précédente.

En ce qui concerne l'altimétrie, la figure B.4 montre que la combinaison de la topométrie avec le GPS améliore la précision. Comme prévu, les courbes GPS et topométrie se croisent vers 650m et l'allure de la courbe de combinaison suit la même logique qu'en planimétrie.

B. SIMULATION DE RÉSEAU LINÉAIRE : AUTRES SESSIONS

Longueur de la ligne de base (m)	Demi grand axe (mm)		
	Topométrie	GPS	Combinaison
100	1.76	4.92	1.67
200	3.42	4.92	2.84
300	5.10	4.92	3.62
400	6.79	4.92	4.10
500	8.49	4.92	4.40
600	10.18	4.92	4.60
700	11.88	4.92	4.73
800	13.572	4.92	4.83

Longueur de la ligne de base (m)	aplatissement		
	Topométrie	GPS	Combinaison
100	0.29	0.22	0.28
200	0.62	0.22	0.44
300	0.73	0.22	0.51
400	0.78	0.22	0.53
500	0.80	0.22	0.53
600	0.82	0.22	0.53
700	0.83	0.22	0.49
800	0.84	0.22	0.47

TABLE B.2 – Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétrique des techniques topométrique, GPS et combinés simulées sur une session de 2 minutes

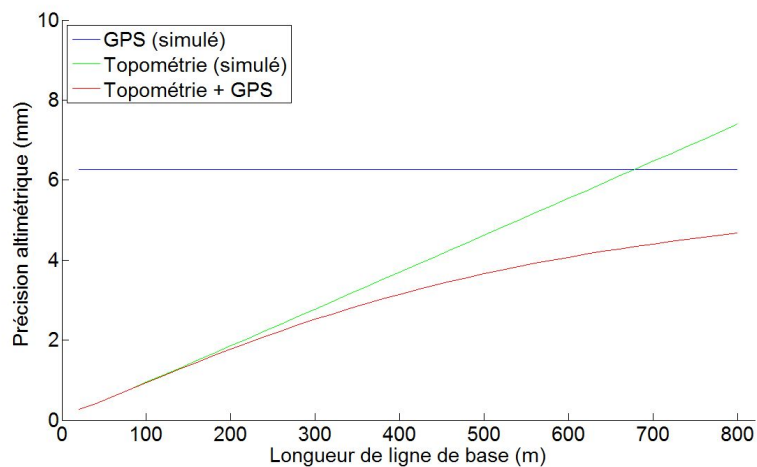


FIGURE B.4 – Précision altimétrique à 95% de simulation de GPS et topométrie, comparées avec la précision de la combinaison de techniques sur une session de 2 minutes

L'amélioration maximale est atteinte à 650m avec un facteur de 1.38.

Session de 3 minutes

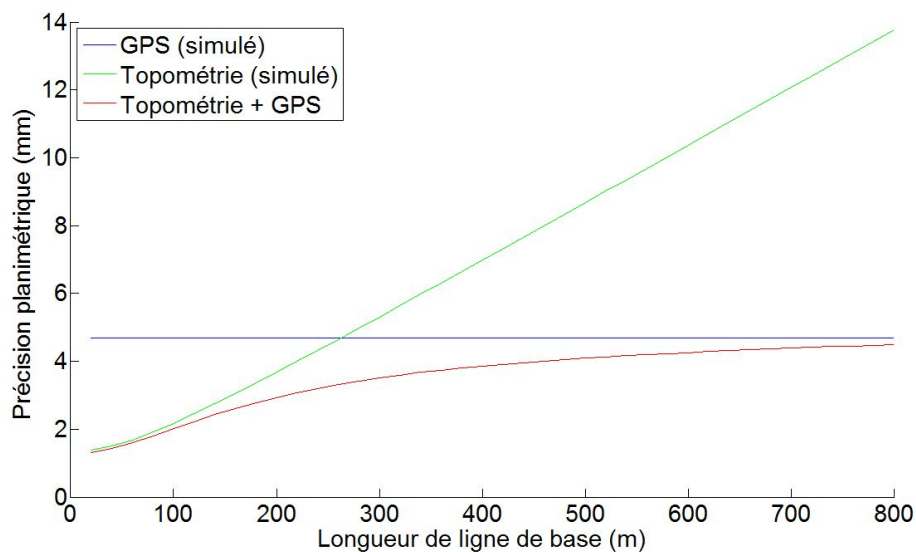


FIGURE B.5 – Précision planimétrique à 95% de simulation de GPS et topométrie, comparées avec la précision de la combinaison de techniques sur une session de 3 minutes

La figure B.5 montre comment les précisions planimétriques des techniques GPS et topométriques varient en fonction de la distance lorsqu'on les compare aux résultats obtenus après avoir appliqué la combinaison des matrices normales sur une session de 3 minutes. Contrairement à la session précédente, les courbes de précision de la topométrie et du GPS se croisent aux alentours d'une ligne de base de 250 mètres. La figure montre que les effets montrés précédemment sont les mêmes hormis sur une distance plus proche. La combinaison améliore sensiblement la précision planimétrique par un facteur 1.5 par rapport aux techniques prises séparément jusqu'à une distance de 600 mètres où la courbe de la combinaison se superpose à celle du GPS. L'amélioration maximale est atteinte pour des distances supérieures à 250 mètres (le point de croisement entre les deux courbes).

Le tableau B.3 résume, pour un échantillon de distance, les paramètres des ellipses de confiance à 95% (demi grand axe et aplatissement) et ce pour les trois techniques. On observe les mêmes progressions que précédemment mais avec un décalage.

Dans le cas du GPS, le demi grand axe et l'aplatissement sont quasiment constants. Aucun changement n'est à noter sauf la taille de l'ellipse qui a réduit.

Longueur de la ligne de base (m)	Demi grand axe (mm)		
	Topométrie	GPS	Combinaison
100	1.76	3.70	1.63
200	3.42	3.70	2.65
300	5.10	3.70	3.14
400	6.79	3.70	3.32
500	8.49	3.70	3.46
600	10.18	3.70	3.59
700	11.88	3.70	3.62
800	13.572	3.70	3.69

Longueur de la ligne de base (m)	aplatissement		
	Topométrie	GPS	Combinaison
100	0.29	0.22	0.28
200	0.62	0.22	0.52
300	0.73	0.22	0.58
400	0.78	0.22	0.58
500	0.80	0.22	0.58
600	0.82	0.22	0.56
700	0.83	0.22	0.53
800	0.84	0.22	0.51

TABLE B.3 – Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétrique des techniques topométrique, GPS et combinés simulées sur une session de 3 minutes

L'ellipse de la combinaison de technique est presque circulaire (aplatissement de 0.5) et sa taille est quasiment aussi petite que celle du GPS. On peut remarquer que le rapprochement avec le GPS se fait plus rapidement que la session précédente. L'azimut reste constant sur une valeur de -4° .

En ce qui concerne la composante verticale, la figure B.6 montre que la combinaison de la topométrie avec le GPS se croisent aux alentours de 550 mètres. La courbe de la combinaison suit la même logique que lors de la planimétrie. L'amélioration maximale atteint un facteur de 1.5.

Session de 5 minutes

La figure B.7 montre comment les précisions planimétriques des techniques GPS et topométriques varient en fonction de la distance lorsqu'on les compare aux résultats obtenus après avoir appliqué la combinaison des matrices normales sur une session de 5 minutes.

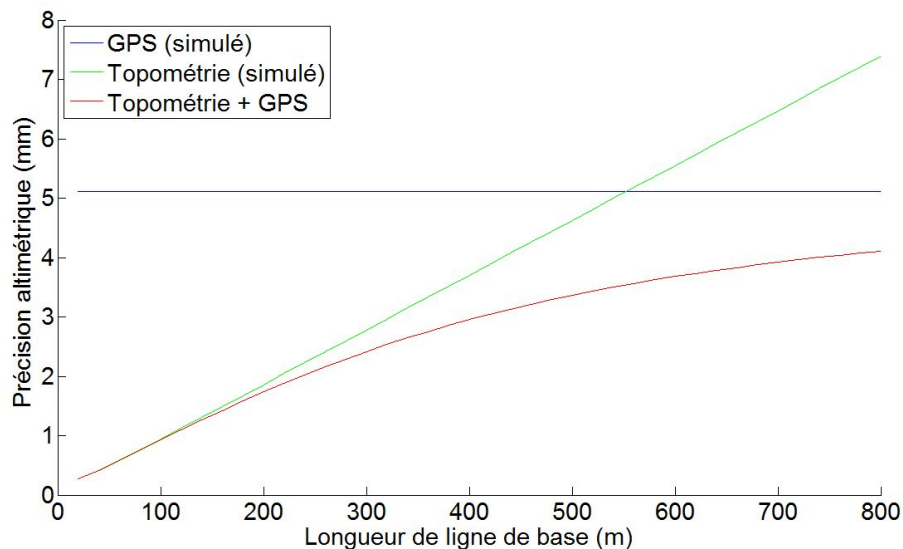


FIGURE B.6 – Précision altimétrique à 95% de simulation de GPS et topométrie, comparées avec la précision de la combinaison de techniques sur une session de 3 minutes

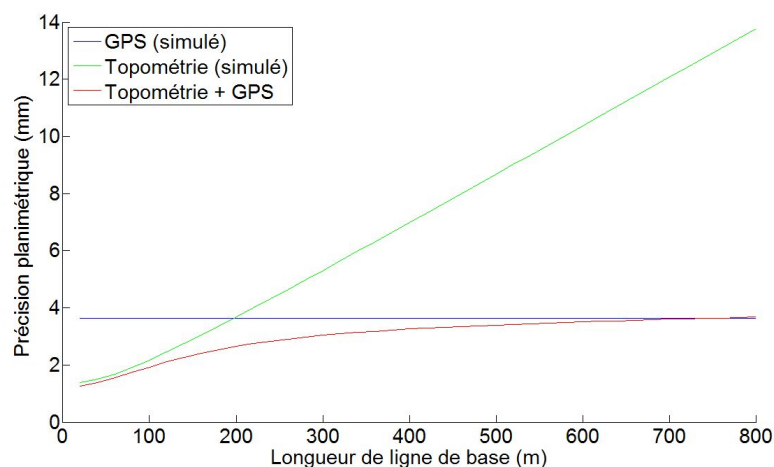


FIGURE B.7 – Précision planimétrique à 95% de simulation de GPS et topométrie, comparées avec la précision de la combinaison de techniques sur une session de 5 minutes

Contrairement à la session précédente, les courbes de précision de la topométrie et du GPS se croisent aux alentours d'une ligne de base de 200 mètres. La figure montre que les effets décrits précédemment sont les mêmes hormis sur une distance plus proche. La combinaison améliore sensiblement la précision planimétrique par un facteur 1.5 voire plus par rapport aux techniques prises séparément jusqu'à une distance de 500m où la courbe

de la combinaison se superpose à celle du GPS. L'amélioration maximale est atteinte pour des distances supérieures à 200 mètres (le point de croisement entre les deux courbes).

Longueur de la ligne de base (m)	Demi grand axe (mm)		
	Topométrie	GPS	Combinaison
100	1.76	3.27	1.56
200	3.42	3.27	2.36
300	5.10	3.27	2.75
400	6.79	3.27	2.95
500	8.49	3.27	3.06
600	10.18	3.27	3.12
700	11.88	3.27	3.17
800	13.572	3.27	3.20

Longueur de la ligne de base (m)	aplatissement		
	Topométrie	GPS	Combinaison
100	0.29	0.22	0.28
200	0.62	0.22	0.49
300	0.73	0.22	0.53
400	0.78	0.22	0.53
500	0.80	0.22	0.51
600	0.82	0.22	0.48
700	0.83	0.22	0.46
800	0.84	0.22	0.43

TABLE B.4 – Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétrique des techniques topométrique, GPS et combinés simulées sur une session de 5 minutes

Le tableau B.4 résume, pour un échantillon de distance, les paramètres des ellipses de confiance à 95% (demi grand axe et aplatissement) et ce pour les trois techniques. On observe les mêmes progressions que précédemment mais avec un décalage.

Dans le cas du GPS, le demi grand axe et l'aplatissement sont quasiment constants. Aucun changement n'est à noter sauf la taille de l'ellipse qui a réduit.

L'ellipse de la combinaison de technique est presque circulaire (aplatissement de 0.4 à 0.5) et se rapproche de celui du GPS et sa taille est quasiment aussi petite que celle du GPS. On peut remarquer que le rapprochement avec le GPS se fait plus rapidement que la session précédente. L'azimut reste constant sur une valeur de -1° .

En ce qui concerne l'altimétrie, la figure B.8 montre que la combinaison de la topométrie avec le GPS améliore la précision. Le croisement se fait plus rapidement que précédem-

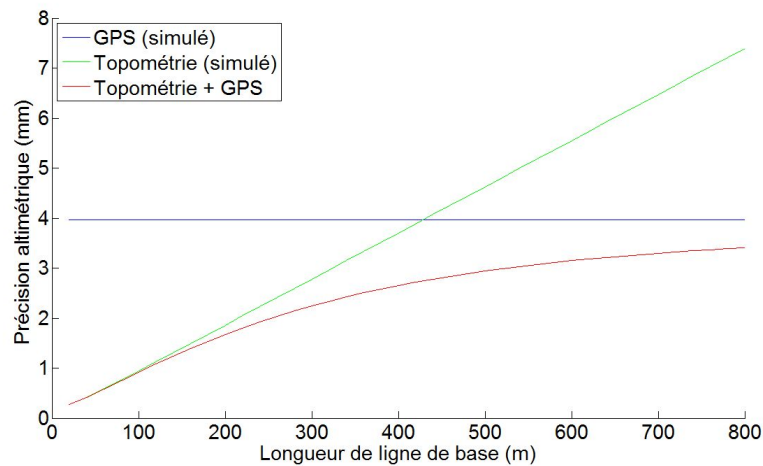


FIGURE B.8 – Précision altimétrique à 95% de simulation de GPS et topométrie, comparées avec la précision de la combinaison de techniques sur une session de 5 minutes

ment aux alentours de 420m, là où l'amélioration de la combinaison atteint son maximum (amélioration d'un facteur 1.65).

Session de 7 minutes

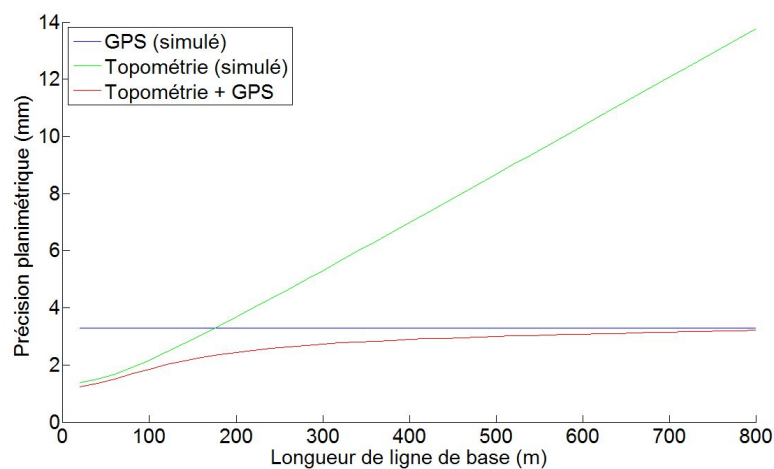


FIGURE B.9 – Précision planimétrique à 95% de simulation de GPS et topométrie, comparées avec la précision de la combinaison de techniques sur une session de 7 minutes

La figure B.9 montre comment les précisions planimétriques des techniques GPS et topométriques varient en fonction de la distance lorsqu'on les compare aux résultats obtenus

après avoir appliqué la combinaison des matrices normales sur une session de 7 minutes. Contrairement à la session précédente, les courbes de précision de la topométrie et du GPS se croisent aux alentours d'une ligne de base de 180 mètres. La figure montre que les effets montrés précédemment sont les mêmes hormis sur une distance plus proche. La combinaison améliore sensiblement la précision planimétrique par un facteur 1.5 voire plus par rapport aux techniques prises séparément jusqu'à une distance de 500m où la courbe de la combinaison se superpose à celle du GPS. L'amélioration maximale est atteinte pour des distances supérieures à 180 mètres (le point de croisement entre les deux courbes).

Longueur de la ligne de base (m)	Demi grand axe (mm)		
	Topométrie	GPS	Combinaison
100	1.76	2.97	1.49
200	3.42	2.97	2.15
300	5.10	2.97	2.43
400	6.79	2.97	2.56
500	8.49	2.97	2.63
600	10.18	2.97	2.68
700	11.88	2.97	2.71
800	13.572	2.97	2.73

Longueur de la ligne de base (m)	aplatissement		
	Topométrie	GPS	Combinaison
100	0.29	0.22	0.28
200	0.62	0.22	0.45
300	0.73	0.22	0.49
400	0.78	0.22	0.48
500	0.80	0.22	0.46
600	0.82	0.22	0.43
700	0.83	0.22	0.41
800	0.84	0.22	0.38

TABLE B.5 – Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétrique des techniques topométrique, GPS et combinés simulées sur une session de 7 minutes

Le tableau B.5 résume, pour un échantillon de distance, les paramètres des ellipses de confiance à 95% (demi grand axe et aplatissement) et ce pour les trois techniques. On observe les mêmes progressions que précédemment mais avec un décalage.

Dans le cas du GPS, le demi grand axe et l'aplatissement sont quasiment constants. Aucun changement n'est à noter sauf la taille de l'ellipse qui a réduit.

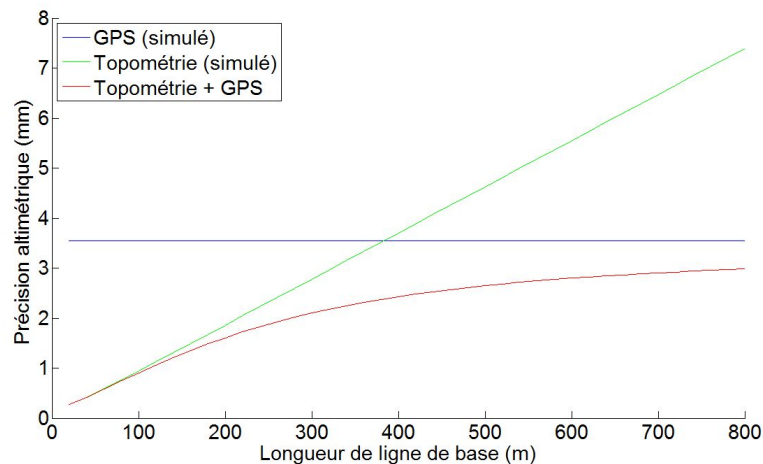


FIGURE B.10 – Précision altimétrique à 95% de simulation de GPS et topométrie, comparées avec la précision de la combinaison de techniques sur une session de 7 minutes

L'ellipse de la combinaison de technique est presque circulaire (aplatissement de 0.4) et sa taille est aussi petite que celle du GPS. On peut remarquer que le rapprochement avec le GPS se fait plus rapidement que la session précédente. L'azimut reste constant sur une valeur de 0.5° .

En ce qui concerne l'altimétrie, la figure B.10 montre que la combinaison de la topométrie avec le GPS améliore la précision. Le croisement se fait plus rapidement que précédemment aux alentours de 380m, là où l'amélioration de la combinaison atteint son maximum (amélioration d'un facteur 1.7).

Annexe C

Résultats des 12 sessions de la campagne sur 30 secondes de données

Cette annexe donne les résultats des sessions de 30 secondes calculées lors de la campagne du réseau à 2 points. Dans le documents, seuls la moyenne et l'intervalle étaient représentés.

Session 1 : 22 mai 2009 à 10h

Longueur de la ligne de base (m)		100	300	500	700
Topométrie	a (mm)	2.28	4.08	6.42	8.35
	f	0.37	0.74	0.80	0.82
	azim (deg)	7.00	4.72	4.33	3.24
GPS	a (mm)	8.44	8.13	8.32	11.11
	f	0.34	0.27	0.28	0.32
	azim (deg)	358.32	344.56	356.24	4.55
Combinaison	a (mm)	2.23	3.53	4.53	5.22
	f	0.32	0.35	0.43	0.43
	azim (deg)	1.12	359.52	355.66	356.29

TABLE C.1 – Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétriques des techniques topométrique, GPS et combinées sur 30 secondes pour la session 1 de la campagne

C. RÉSULTATS DES 12 SESSIONS DE LA CAMPAGNE SUR 30 SECONDES DE DONNÉES

Session 2 : 22 mai 2009 à 10h10

Longueur de la ligne de base (m)		100	300	500	700
Topométrie	a (mm)	2.31	4.10	6.34	7.98
	f	0.36	0.73	0.77	0.80
	azim (deg)	6.87	4.66	4.30	3.72
GPS	a (mm)	10.43	9.23	10.09	11.34
	f	0.31	0.25	0.28	0.33
	azim (deg)	353.44	346.46	353.56	0.34
Combinaison	a (mm)	2.23	3.65	4.33	5.59
	f	0.38	0.35	0.43	0.42
	azim (deg)	359.03	354.64	352.34	350.54

TABLE C.2 – Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétriques des techniques topométrique, GPS et combinées sur 30 secondes pour la session 2 de la campagne

Session 3 : 22 mai 2009 à 10h20

Longueur de la ligne de base (m)		100	300	500	700
Topométrie	a (mm)	2.26	4.08	5.29	7.04
	f	0.40	0.81	0.82	0.86
	azim (deg)	6.25	4.22	4.03	3.54
GPS	a (mm)	8.68	8.00	8.08	10.88
	f	0.31	0.25	0.24	0.22
	azim (deg)	354.44	344.75	354.45	2.54
Combinaison	a (mm)	2.17	3.63	4.26	5.22
	f	0.25	0.32	0.39	0.39
	azim (deg)	357.33	347.56	357.78	359.95

TABLE C.3 – Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétriques des techniques topométrique, GPS et combinées sur 30 secondes pour la session 3 de la campagne

C. RÉSULTATS DES 12 SESSIONS DE LA CAMPAGNE SUR 30 SECONDES DE DONNÉES

Session 4 : 22 mai 2009 à 14h

Longueur de la ligne de base (m)		100	300	500	700
Topométrie	a (mm)	2.30	4.43	6.34	7.98
	f	0.34	0.73	0.74	0.86
	azim (deg)	6.64	4.77	4.56	3.46
GPS	a (mm)	8.83	8.06	8.07	10.79
	f	0.37	0.35	0.26	0.36
	azim (deg)	352.95	353.78	2.45	359.66
Combinaison	a (mm)	2.17	3.35	4.47	5.97
	f	0.37	0.39	0.45	0.41
	azim (deg)	357.18	348.76	359.54	3.99

TABLE C.4 – Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétriques des techniques topométrique, GPS et combinées sur 30 secondes pour la session 4 de la campagne

Session 5 : 22 mai 2009 à 14h10

Longueur de la ligne de base (m)		100	300	500	700
Topométrie	a (mm)	2.31	4.19	6.35	7.85
	f	0.35	0.75	0.79	0.87
	azim (deg)	6.97	4.75	4.78	3.45
GPS	a (mm)	10.09	8.83	8.52	11.16
	f	0.34	0.32	0.28	0.30
	azim (deg)	359.33	4.77	3.85	354.83
Combinaison	a (mm)	2.15	3.38	4.33	5.29
	f	0.34	0.37	0.38	0.43
	azim (deg)	2.56	349.75	350.68	5.87

TABLE C.5 – Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétriques des techniques topométrique, GPS et combinées sur 30 secondes pour la session 5 de la campagne

C. RÉSULTATS DES 12 SESSIONS DE LA CAMPAGNE SUR 30 SECONDES DE DONNÉES

Session 6 : 29 mai 2009 à 14h20

Longueur de la ligne de base (m)		100	300	500	700
Topométrie	a (mm)	2.34	4.43	6.71	8.96
	f	0.41	0.77	0.81	0.85
	azim (deg)	7.01	4.88	4.63	4.44
GPS	a (mm)	11.23	9.84	10.05	11.86
	f	0.32	0.24	0.25	0.33
	azim (deg)	355.55	343.55	353.24	2.57
Combinaison	a (mm)	2.18	3.48	2.08	3.81
	f	0.31	0.33	0.34	0.34
	azim (deg)	359.44	359.44	354.82	351.44

TABLE C.6 – Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétriques des techniques topométrique, GPS et combinées sur 30 secondes pour la session 6 de la campagne

Session 7 : 29 mai 2009 à 10h

Longueur de la ligne de base (m)		100	300	500	700
Topométrie	a (mm)	2.23	3.99	2.18	4.02
	f	0.38	0.75	0.79	0.84
	azim (deg)	6.98	4.71	4.36	3.74
GPS	a (mm)	10.48	9.43	8.33	10.43
	f	0.31	0.35	0.33	0.33
	azim (deg)	353.45	343.53	355.23	1.87
Combinaison	a (mm)	2.22	3.77	5.01	6.18
	f	0.32	0.31	0.33	0.33
	azim (deg)	2.71	349.62	354.84	358.28

TABLE C.7 – Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétriques des techniques topométrique, GPS et combinées sur 30 secondes pour la session 7 de la campagne

C. RÉSULTATS DES 12 SESSIONS DE LA CAMPAGNE SUR 30 SECONDES DE DONNÉES

Session 8 : 29 mai 2009 à 10h10

Longueur de la ligne de base (m)		100	300	500	700
Topométrie	a (mm)	2.30	4.18	6.36	8.55
	f	0.38	0.75	0.79	0.84
	azim (deg)	6.98	4.71	4.36	3.74
GPS	a (mm)	9.48	8.23	8.22	11.26
	f	0.31	0.25	0.28	0.33
	azim (deg)	352.95	346.57	357.24	4.87
Combinaison	a (mm)	2.21	3.63	4.23	5.29
	f	0.34	0.32	0.43	0.43
	azim (deg)	0.01	349.62	352.68	350.29

TABLE C.8 – Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétriques des techniques topométrique, GPS et combinées sur 30 secondes pour la session 8 de la campagne

Session 9 : 29 mai 2009 à 10h20

Longueur de la ligne de base (m)		100	300	500	700
Topométrie	a (mm)	2.32	4.23	6.44	8.33
	f	0.33	0.73	0.75	0.84
	azim (deg)	6.95	4.23	4.53	3.22
GPS	a (mm)	8.87	8.77	8.26	10.26
	f	0.31	0.27	0.28	0.33
	azim (deg)	352.95	354.77	349.48	354.76
Combinaison	a (mm)	2.28	3.72	4.39	5.47
	f	0.29	0.36	0.43	0.38
	azim (deg)	354.98	1.28	2.96	0.76

TABLE C.9 – Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétriques des techniques topométrique, GPS et combinées sur 30 secondes pour la session 9 de la campagne

C. RÉSULTATS DES 12 SESSIONS DE LA CAMPAGNE SUR 30 SECONDES DE DONNÉES

Session 10 : 29 mai 2009 à 14h

Longueur de la ligne de base (m)		100	300	500	700
Topométrie	a (mm)	2.28	4.08	6.33	8.44
	f	0.35	0.78	0.77	0.83
	azim (deg)	6.95	4.71	4.36	3.74
GPS	a (mm)	9.47	8.29	8.12	10.99
	f	0.35	0.25	0.29	0.33
	azim (deg)	347.59	357.46	349.84	354.33
Combinaison	a (mm)	2.20	3.61	4.22	5.66
	f	0.32	0.32	0.41	0.43
	azim (deg)	2.22	346.98	352.68	358.66

TABLE C.10 – Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétriques des techniques topométrique, GPS et combinées sur 30 secondes pour la session 10 de la campagne

Session 11 : 29 mai 2009 à 14h10

Longueur de la ligne de base (m)		100	300	500	700
Topométrie	a (mm)	2.31	4.22	6.23	8.11
	f	0.32	0.73	0.72	0.81
	azim (deg)	6.98	4.72	4.32	3.71
GPS	a (mm)	8.98	8.19	7.99	10.66
	f	0.30	0.24	0.27	0.30
	azim (deg)	359.90	354.70	352.48	1.44
Combinaison	a (mm)	2.29	3.67	4.24	5.29
	f	0.33	0.39	0.39	0.44
	azim (deg)	349.09	1.75	356.24	351.88

TABLE C.11 – Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétriques des techniques topométrique, GPS et combinées sur 30 secondes pour la session 11 de la campagne

C. RÉSULTATS DES 12 SESSIONS DE LA CAMPAGNE SUR 30 SECONDES DE DONNÉES

Session 12 : 29 mai 2009 à 14h20

Longueur de la ligne de base (m)		100	300	500	700
Topométrie	a (mm)	2.30	4.18	6.36	8.57
	f	0.38	0.75	0.79	0.84
	azim (deg)	6.98	4.71	4.36	3.74
GPS	a (mm)	9.77	8.96	8.59	11.33
	f	0.31	0.32	0.29	0.33
	azim (deg)	5.43	349.33	353.54	356.25
Combinaison	a (mm)	2.27	3.57	4.34	5.43
	f	0.37	0.37	0.45	0.43
	azim (deg)	351.66	346.62	353.64	353.57

TABLE C.12 – Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétriques des techniques topométrique, GPS et combinées sur 30 secondes pour la session 12 de la campagne

Annexe D

Résultats des 12 sessions de la campagne sur 10 minutes de données

Cette annexe donne les résultats des sessions de 10 minutes calculées lors de la campagne du réseau à 2 points. Dans le documents, seuls la moyenne et l'intervalle étaient représentés.

Session 1 : 22 mai 2009 à 10h

Longueur de la ligne de base (m)		100	300	500	700
Topométrie	a (mm)	2.28	4.08	6.42	8.35
	f	0.37	0.74	0.80	0.82
	azim (deg)	7.00	4.72	4.33	3.24
GPS	a (mm)	3.48	3.70	3.30	3.41
	f	0.22	0.23	0.23	0.24
	azim (deg)	9.96	9.94	9.95	9.89
Combinaison	a (mm)	2.19	3.06	3.03	3.22
	f	0.29	0.35	0.33	0.34
	azim (deg)	5.12	28.85	27.12	23.53

TABLE D.1 – Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétriques des techniques topométrique, GPS et combinées sur 10 minutes pour la session 1 de la campagne

D. RÉSULTATS DES 12 SESSIONS DE LA CAMPAGNE SUR 10 MINUTES DE DONNÉES

Session 2 : 22 mai 2009 à 10h10

Longueur de la ligne de base (m)		100	300	500	700
Topométrie	a (mm)	2.31	4.10	6.34	7.98
	f	0.36	0.73	0.77	0.80
	azim (deg)	6.87	4.66	4.30	3.72
GPS	a (mm)	3.49	3.69	3.19	3.38
	f	0.22	0.25	0.23	0.23
	azim (deg)	9.96	9.97	9.93	9.94
Combinaison	a (mm)	2.21	3.06	3.07	3.27
	f	0.27	0.35	0.35	0.35
	azim (deg)	5.76	29.43	28.12	23.01

TABLE D.2 – Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétriques des techniques topométrique, GPS et combinées sur 10 minutes pour la session 2 de la campagne

Session 3 : 22 mai 2009 à 10h20

Longueur de la ligne de base (m)		100	300	500	700
Topométrie	a (mm)	2.26	4.08	5.29	7.04
	f	0.40	0.81	0.82	0.86
	azim (deg)	6.25	4.22	4.03	3.54
GPS	a (mm)	3.50	3.55	3.43	3.43
	f	0.23	0.23	0.24	0.23
	azim (deg)	9.96	9.96	9.91	9.96
Combinaison	a (mm)	2.20	3.04	3.05	3.24
	f	0.27	0.35	0.35	0.35
	azim (deg)	5.44	29.81	27.33	22.43

TABLE D.3 – Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétriques des techniques topométrique, GPS et combinées sur 10 minutes pour la session 3 de la campagne

D. RÉSULTATS DES 12 SESSIONS DE LA CAMPAGNE SUR 10 MINUTES DE DONNÉES

Session 4 : 22 mai 2009 à 14h

Longueur de la ligne de base (m)		100	300	500	700
Topométrie	a (mm)	2.30	4.43	6.34	7.98
	f	0.34	0.73	0.74	0.86
	azim (deg)	6.64	4.77	4.56	3.46
GPS	a (mm)	3.48	3.65	3.27	3.49
	f	0.26	0.23	0.26	0.23
	azim (deg)	9.96	9.96	9.96	9.93
Combinaison	a (mm)	2.21	3.04	3.05	3.23
	f	0.29	0.34	0.35	0.35
	azim (deg)	6.34	29.08	27.44	23.02

TABLE D.4 – Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétriques des techniques topométrique, GPS et combinées sur 10 minutes pour la session 4 de la campagne

Session 5 : 22 mai 2009 à 14h10

Longueur de la ligne de base (m)		100	300	500	700
Topométrie	a (mm)	2.31	4.19	6.35	7.85
	f	0.35	0.75	0.79	0.87
	azim (deg)	6.97	4.75	4.78	3.45
GPS	a (mm)	3.48	3.63	3.28	3.46
	f	0.23	0.23	0.26	0.23
	azim (deg)	9.96	9.96	9.98	9.96
Combinaison	a (mm)	2.23	3.05	3.07	3.28
	f	0.27	0.37	0.35	0.34
	azim (deg)	5.34	29.08	27.46	23.02

TABLE D.5 – Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétriques des techniques topométrique, GPS et combinées sur 10 minutes pour la session 5 de la campagne

D. RÉSULTATS DES 12 SESSIONS DE LA CAMPAGNE SUR 10 MINUTES DE DONNÉES

Session 6 : 22 mai 2009 à 14h20

Longueur de la ligne de base (m)		100	300	500	700
Topométrie	a (mm)	2.34	4.43	6.71	8.96
	f	0.41	0.77	0.81	0.85
	azim (deg)	7.01	4.88	4.63	4.44
GPS	a (mm)	3.67	3.99	3.77	4.56
	f	0.25	0.25	0.25	0.25
	azim (deg)	9.86	9.86	9.86	9.86
Combinaison	a (mm)	2.32	3.23	3.62	3.88
	f	0.29	0.37	0.37	0.37
	azim (deg)	6.33	29.10	27.14	23.23

TABLE D.6 – Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétriques des techniques topométrique, GPS et combinées sur 10 minutes pour la session 6 de la campagne

Session 7 : 29 mai 2009 à 10h

Longueur de la ligne de base (m)		100	300	500	700
Topométrie	a (mm)	2.23	3.99	2.18	4.02
	f	0.38	0.75	0.79	0.84
	azim (deg)	6.98	4.71	4.36	3.74
GPS	a (mm)	3.15	3.09	3.00	3.27
	f	0.22	0.22	0.22	0.22
	azim (deg)	9.94	9.94	9.98	9.96
Combinaison	a (mm)	2.18	2.08	2.48	3.13
	f	0.26	0.34	0.34	0.34
	azim (deg)	5.21	29.00	27.31	22.98

TABLE D.7 – Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétriques des techniques topométrique, GPS et combinées sur 10 minutes pour la session 7 de la campagne

D. RÉSULTATS DES 12 SESSIONS DE LA CAMPAGNE SUR 10 MINUTES DE DONNÉES

Session 8 : 29 mai 2009 à 10h10

Longueur de la ligne de base (m)		100	300	500	700
Topométrie	a (mm)	2.30	4.18	6.36	8.55
	f	0.38	0.75	0.79	0.84
	azim (deg)	6.98	4.71	4.36	3.74
GPS	a (mm)	3.46	3.66	3.27	3.44
	f	0.23	0.23	0.23	0.23
	azim (deg)	9.96	9.96	9.96	9.96
Combinaison	a (mm)	2.20	3.04	3.05	3.24
	f	0.27	0.35	0.35	0.35
	azim (deg)	5.34	29.08	27.41	23.02

TABLE D.8 – Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétriques des techniques topométrique, GPS et combinées sur 10 minutes pour la session 8 de la campagne

Session 9 : 29 mai 2009 à 10h20

Longueur de la ligne de base (m)		100	300	500	700
Topométrie	a (mm)	2.32	4.23	6.44	8.33
	f	0.33	0.73	0.75	0.84
	azim (deg)	6.95	4.23	4.53	3.22
GPS	a (mm)	3.41	3.62	3.24	3.42
	f	0.24	0.23	0.24	0.23
	azim (deg)	9.95	9.96	9.94	9.96
Combinaison	a (mm)	2.19	3.01	3.03	3.18
	f	0.29	0.35	0.35	0.33
	azim (deg)	5.34	29.08	27.41	23.02

TABLE D.9 – Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétriques des techniques topométrique, GPS et combinées sur 10 minutes pour la session 9 de la campagne

D. RÉSULTATS DES 12 SESSIONS DE LA CAMPAGNE SUR 10 MINUTES DE DONNÉES

Session 10 : 29 mai 2009 à 14h

Longueur de la ligne de base (m)		100	300	500	700
Topométrie	a (mm)	2.28	4.08	6.33	8.44
	f	0.35	0.78	0.77	0.83
	azim (deg)	6.95	4.71	4.36	3.74
GPS	a (mm)	3.45	3.59	3.25	3.39
	f	0.23	0.23	0.22	0.23
	azim (deg)	9.93	9.93	9.96	9.96
Combinaison	a (mm)	2.21	3.04	3.05	3.23
	f	0.24	0.35	0.35	0.34
	azim (deg)	5.34	29.08	27.41	23.02

TABLE D.10 – Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétriques des techniques topométrique, GPS et combinées sur 10 minutes pour la session 10 de la campagne

Session 11 : 29 mai 2009 à 14h10

Longueur de la ligne de base (m)		100	300	500	700
Topométrie	a (mm)	2.31	4.22	6.23	8.11
	f	0.32	0.73	0.72	0.81
	azim (deg)	6.98	4.72	4.32	3.71
GPS	a (mm)	3.41	3.63	3.23	3.41
	f	0.23	0.23	0.21	0.23
	azim (deg)	9.96	9.93	9.96	9.96
Combinaison	a (mm)	2.21	3.04	3.06	3.14
	f	0.27	0.35	0.33	0.35
	azim (deg)	5.34	29.08	27.41	23.02

TABLE D.11 – Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétriques des techniques topométrique, GPS et combinées sur 10 minutes pour la session 11 de la campagne

D. RÉSULTATS DES 12 SESSIONS DE LA CAMPAGNE SUR 10 MINUTES DE DONNÉES

Session 12 : 29 mai 2009 à 14h20

Longueur de la ligne de base (m)		100	300	500	700
Topométrie	a (mm)	2.30	4.18	6.36	8.57
	f	0.38	0.75	0.79	0.84
	azim (deg)	6.98	4.71	4.36	3.74
GPS	a (mm)	3.46	3.65	3.28	3.39
	f	0.23	0.23	0.28	0.23
	azim (deg)	9.96	9.96	9.98	9.90
Combinaison	a (mm)	2.20	3.02	3.03	3.22
	f	0.27	0.33	0.35	0.35
	azim (deg)	5.34	29.05	27.42	23.02

TABLE D.12 – Paramètres des ellipses de confiance à 95% planimétriques des techniques topométrique, GPS et combinées sur 10 minutes pour la session 12 de la campagne

Glossaire

- *BRGM* : Bureau de Recherches Géologiques et Minières
- *CERN* : Centre Européen pour la Recherche Nucléaire
- *CNAM* : Conservatoire National des Arts et Métiers
- *CNES* : Centre National des Études Spatiales
- *CoMeT* : Compensation des Mesures Topométriques
- *DoD* : Department of Defense
- *DORIS* : Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite
- *ESGT* : École Supérieure des Géomètres Topographes
- *ESRF* : European Synchrotron Radiation Facility
- *GDRG2* : Groupe de Recherche de Géodésie et Géophysique
- *GINS* : Géodésie par Intégrations Numériques Simultanées
- *GLONASS* : GLObal'naya NAvigatsionnaya Sputnikovaya Sistema
- *GNSS* : Global Navigation Satellite System
- *GPS* : Global Positioning System
- *GRS80* : Geodetic Reference System 1980
- *ICRS* : International Celestial Reference Frame
- *IERS* : International Earth Rotation and Reference Systems Service
- *IGN* : Institut Géographique National
- *IGS* : International GPS System
- *InSAR* : Interferometric Synthetic Aperture Radar
- *ITRF* : International Terrestrial Reference Frame
- *L2G* : Laboratoire de Géodésie et Géomatique
- *MATLAB* : Mathematical Laboratory

- *PCV* : Phase Center Variation
- *PS* : Permanent Scatterer
- *RAF* : Référence d'Altitude Française
- *RGP* : Réseau GNSS Permanent
- *RINEX* : Receiver INdependent EXchange
- *SA* : Selective Availability
- *SAR* : Synthetic Aperture Radar
- *SINEX* : Solution INdependent EXchange
- *SLR* : Satellite LASER Range
- *VLBI* : Very Long Baseline Interferometry
- *VMF1* : Vienna Mapping Function

Résumé :

La Terre est une planète en constante évolution et sa surface ne cesse de se transformer. Ses déformations soulèvent des questionnements. Depuis plusieurs années, le L2G de l'ESGT s'intéresse à l'étude des déformations par inter comparaison de techniques. Il dispose en cela de différents procédés de mesure. Puis au fil du temps, le laboratoire s'interroge sur l'intérêt de réaliser une combinaison entre différentes techniques de mesure afin d'observer des déformations fines et précises (quelques millimètres).

L'objectif de cette thèse est de démontrer l'intérêt de combiner des mesures GNSS et des mesures topométriques, celles-ci semblant être les plus utilisées, et de les concrétiser. Les résultats présentés sont basés sur des simulations et sur des campagnes de mesures combinées des techniques de GNSS et de topométrie effectuée sur un réseau test d'une étendue locale. Les calculs évoluent en fonction de la distance de la ligne de base et en modifiant les durées de sessions de mesures.

Nous montrons qu'une combinaison par cumul des équations normales améliore la précision du positionnement non seulement par rapport à l'utilisation de chaque technique séparée, mais également par rapport aux méthodes classiques basées sur la combinaison des coordonnées issues des techniques de GNSS et de topométrie.

Mots clés :

Géodésie, GNSS, topométrie, déformation, précision, combinaison, matrices normales

Abstract :

The Earth is a constantly evolving planet and its surface keeps transforming. Its deformations raise questions. For several years, the L2G at ESGT has been interested in the study of deformations through inter comparison of techniques. For this, it has various measurement processes. Then, with time, the laboratory is now pondering about the interest of combining various techniques of measurement in order to observe fine and precise deformations (a few millimeters).

The aim of this PhD thesis is to demonstrate the interest of combining GNSS and topometric measurements, the latter being apparently the most commonly used. The presented results are based on simulations and campaigns of combined measurement through the use of GNSS and topometric techniques made on a model network of a local area. The calculations made are dependent both on the distance of the baseline and the alteration of the session length.

We show that a combination through the accumulation of the normal equations improves the localisation accuracy regarding not only the use of every separate technique but also the more classic methods based on the coordinates combination provided by GNSS and topometric techniques.

Keywords :

Geodesy, GNSS, topometry, deformation, accuracy, combination, normal matrices