



HAL
open science

Étude expérimentale de l'apport de la combinaison de mesures GNSS et topométriques

Sébastien Alliez-Dron

► **To cite this version:**

Sébastien Alliez-Dron. Étude expérimentale de l'apport de la combinaison de mesures GNSS et topométriques. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2016. dumas-01658208

HAL Id: dumas-01658208

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01658208>

Submitted on 7 Dec 2017

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

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

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS
ÉCOLE SUPÉRIEURE DES GÉOMÈTRES ET TOPOGRAPHES

MÉMOIRE

présenté en vue d'obtenir

le DIPLÔME D'INGÉNIEUR CNAM

Spécialité : Géomètre et Topographe

par

Sébastien ALLIEZ-DRON

Etude expérimentale de l'apport de la combinaison de mesures GNSS et
topométriques

Soutenu le 05 Juillet 2016

JURY

PRESIDENT :	M. Laurent MOREL	Président du jury
MEMBRES :	M. Stéphane DURAND Mme. Elisabeth SIMONETTO M. Philippe BATAILLE M. José CALI M. Daniel DAILLOUX M. Frédéric DURAND Mme. Joëlle DUROY M. Clément ROUSSEL M. Jérôme VERDUN	Maître de stage Professeur référent

Remerciements

Avant toute chose, je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont aidé à mener à terme ce travail.

Stéphane DURAND, mon maître de stage, a été présent du début à la fin. Ses conseils, pertinents et justes, m'ont aidé à trouver les réponses aux difficultés que j'ai rencontrées pendant ces 5 mois. Je le remercie très chaleureusement.

Je remercie également mon professeur référent, madame Elisabeth SIMONETTO, pour ses conseils et son avis éclairé sur le sujet.

Je tiens aussi à remercier l'équipe L2G et l'ensemble du personnel de l'ESGT. Les conditions dans lesquelles ce stage s'est réalisé étaient en effet idéales et propices à la réflexion.

Merci à Anthony, Maïté, Thomas, Ulrich et Vincent pour la bonne ambiance qui a régné dans la salle T0 tout au long de ce travail.

Finalement, j'ai une pensée toute particulière pour ma famille qui m'a apporté un soutien indéfectible tout au long de ce TFE mais aussi depuis le début de mes études.

Table des matières

Remerciements	2
Table des matières	3
Introduction.....	5
Partie I : Problématique du mémoire.....	6
Chapitre 1. Principe théorique de l'ajustement d'observations cumulées.....	6
1. Principe de la méthode des moindres carrés	6
2. Matrice de covariance	6
3. Résolution du problème	7
4. Indicateurs de qualité	7
5. Précisions et régions de confiance	8
6. Fiabilité des observations	8
7. Combinaison des observations.....	9
Chapitre 2. Présentation théorique de la VCE.....	9
1. Objectif de la VCE	9
2. Introduction à la VCE	10
3. Les différentes méthodes VCE.....	10
Chapitre 3. Mise en œuvre de la VCE	12
Chapitre 4. Objectifs de l'étude menée.....	13
Partie II : Chaîne de mesure et de traitement.....	14
Chapitre 1. Protocole de mesure.....	14
1. Contraintes d'installation	14
2. Pré-analyse du réseau	15
3. Mise en œuvre du réseau.....	19
Chapitre 2. Automatisation des mesures	22
1. Exécution des scripts sur le terrain.....	23
2. Pilotage des tachéomètres	23
Chapitre 3. Automatisation des traitements.....	25
1. Automatisation du traitement des mesures topométriques	25
2. Automatisation du traitement des mesures GNSS.....	28
Partie III : Mise en œuvre de l'estimation des composantes de la variance	32

Etude expérimentale de l'apport de la combinaison de mesures topométriques et GNSS

Sébastien Alliez-Dron

Chapitre 1. Ajustement classique d'un problème combinant des observations de nature différente.....	33
1. Ajustement des observations topométriques.....	33
2. Ajustement des observations GNSS	37
3. Ajustement global.....	40
Chapitre 2. Ajustement mettant en œuvre deux groupes VCE.....	45
1. Formation des groupes.....	45
2. Solutions de l'ajustement.....	45
3. Coefficients HVCE	50
Chapitre 3. Ajustement mettant en œuvre trois groupes VCE	51
1. Comparaison avec les solutions de l'ajustement mettant en œuvre 2 groupes VCE	51
2. Coefficients HVCE	54
Conclusion	55
Table des tableaux.....	57
Table des illustrations	57
Bibliographie	59

Introduction

Ce mémoire a été réalisé au sein de l'équipe L2G¹ du laboratoire GeF² en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur de l'Ecole Supérieure des Géomètres et Topographes.

Mon travail porte sur l'apport de la combinaison de mesures GNSS et topométriques pour l'analyse de déformations de faibles amplitudes, l'un des axes de recherche de l'équipe L2G. Cette étude fait suite à différents travaux menés par le laboratoire : la thèse conduite par Benoît Legru entre 2007 et 2011, les TFE (Travaux de Fin d'Etudes) d'Angélique Azzini (2010) et de Clément Guérin (2010), et surtout celui de Maylis Bucher (2015).

La combinaison de techniques ou de mesures de nature très différente, comme c'est le cas pour des mesures topométriques ou GNSS, soulève la question de la pondération relative des observations entre elles. F. R. Helmert a été le premier à répondre à cette question en 1907 en présentant le principe de l'Estimation des Composantes de la Variance (VCE-Variance Component Estimation). Il s'agit d'estimer pour chaque technique ou groupe d'observations un facteur de pondération particulier. L'évolution des outils de calcul aidant, ses travaux seront repris dans les années 70 et de nombreuses recherches sur la VCE sont parues. De nos jours, l'utilisation de la VCE est beaucoup plus courante, notamment dans les domaines de la géomatique et de la géodésie.

Dans sa recherche menée l'an dernier, Maylis Bucher a fait un important travail d'identification des méthodes VCE existantes. Elle a également montré que ces méthodes pouvaient s'appliquer à l'étude particulière de la combinaison des techniques topométriques et GNSS. Mon travail est de poursuivre cette étude de la pondération relative des observations en franchissant le pas entre la théorie et la pratique. Il s'agit donc de mettre l'accent sur la mise en œuvre de la VCE sur des séries temporelles de données préalablement acquises et d'en étudier le comportement.

Pour vous présenter ces travaux, nous procéderons en trois étapes.

D'abord, nous vous présenterons les outils théoriques nécessaires à la compréhension des travaux effectués ainsi que le fruit de notre travail bibliographique.

Une étude pratique nécessite des observations sur lesquelles travailler, aussi la seconde partie du mémoire s'attachera à vous présenter le réseau de mesures utilisé ainsi que la chaîne de mesure et de traitement des données.

Le dernier chapitre se concentrera sur l'expérimentation de la VCE. Nous présenterons les résultats d'un ajustement d'observations GNSS et topométriques combinées et repondérées manuellement. Ces résultats seront comparés avec ceux d'un ajustement mettant en œuvre deux groupes VCE (un pour chaque technique) puis avec ceux d'un ajustement mettant en œuvre trois groupes (un par nature d'observation – angles, distances, vecteurs GNSS).

¹ Equipe de Géodésie et Géomatique

² Laboratoire Géomatique et Foncier

Partie I : Problématique du mémoire

L'objectif de cette première partie est de vous exposer le contexte de notre travail. D'abord en présentant succinctement la méthode des moindres carrés, puis le principe de l'estimation des composantes de la variance et enfin les travaux existants sur son exploitation dans le traitement d'observations.

Chapitre 1. Principe théorique de l'ajustement d'observations cumulées

Dans les travaux sur la combinaison de techniques menés au sein du L2G, la méthode de combinaison employée est celle des moindres carrés. Nous allons, dans cette section, présenter quelques éléments de cette méthode nécessaires à la compréhension de notre travail. Plus de détails sont disponibles dans [Durand, 2015] pour le lecteur désirant approfondir le sujet.

1. Principe de la méthode des moindres carrés

La méthode des moindres carrés permet la résolution de problèmes inverses dans lesquels les observations sont surabondantes par rapport aux inconnues.

Le principe d'un ajustement par la méthode des moindres carrés est le suivant : chacune des n observations du problème est reliée aux m inconnues par une fonction f_i appelée équation d'observation pour l'observation i . En regroupant les inconnues dans un vecteur X , les observations dans un vecteur L et les équations d'observation dans une fonction vectorielle f , le principe revient alors à déterminer de manière optimale la valeur des inconnues contenues dans le vecteur X à partir des observations regroupées dans le vecteur L :

$$L = f(X) + V \quad (1)$$

Le vecteur V représente quant à lui l'erreur accidentelle sur la mesure.

2. Matrice de covariance

Dans la pratique, les observations traitées sont obtenues à l'aide d'instruments de mesures ayant des précisions d'acquisitions diverses dont il faut tenir compte lors du processus d'ajustement par moindres carrés.

Pour chacune des n observations on affecte une précision à priori σ_i à partir de laquelle est construite une matrice de covariance à priori associée au vecteur L :

$$\Sigma_L = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \cdots & \sigma_{1n}^2 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{1n}^2 & \cdots & \sigma_n^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Pour résoudre un problème d'ajustement par moindres carrés, il n'est pas primordial de connaître parfaitement la précision sur les observations. Il est important par contre de connaître les précisions relatives des mesures entre elles. C'est le facteur unitaire de variance, s_0^2 , qui relie la vraie matrice de covariance, Σ'_L , à la matrice de covariance à priori Σ_L pour le calcul :

$$\Sigma'_L = s_0^2 \cdot \Sigma_L \quad (3)$$

L'inverse de la matrice Σ_L , noté P , est la matrice de pondération. C'est elle qui permet d'affecter un poids à chaque observation, selon la précision de l'appareil de mesure.

3. Résolution du problème

La résolution d'un problème par moindres carrés commence par sa mise sous forme linéarisée :

$$B = A \cdot (X - X_0) + V \quad (4)$$

Dans cette équation, B est la matrice contenant les observations et les termes constants. A est la matrice des coefficients devant les inconnues. On linéarise l'équation d'observation autour d'une valeur approchée X_0 par un développement en série de Taylor à l'ordre 1. Le défaut de linéarité entre f et son approximation linéaire en X_0 est traité par itérations successives sur la solution ajustée. Le processus itératif est arrêté lorsque la différence entre deux solutions ajustées successives est inférieure à un critère de convergence choisi.

La solution des moindres carrés s'obtient en résolvant le système dit normal suivant :

$$N \cdot (X - X_0) = C \quad (5)$$

avec $N = A^T \cdot P \cdot A$, la matrice normale de dimension $m \times m$

et $C = A^T \cdot P \cdot B$, le vecteur second membre du système normal de taille m .

Et la solution est donnée par :

$$\hat{X} - X_0 = N^{-1} \cdot C = (A^T \cdot P \cdot A)^{-1} A^T \cdot P \cdot B \quad (6)$$

4. Indicateurs de qualité

À l'issue du traitement, après convergence, il est possible de calculer deux éléments :

- le vecteur des résidus qui correspond à une estimation des erreurs accidentelles sur chaque observation :

$$\hat{V} = B - A \cdot (\hat{X} - X_0) \quad (7)$$

- l'estimateur du facteur unitaire de variance \hat{s}_0^2 :

$$\hat{s}_0^2 = \frac{\hat{V}^T \cdot P \cdot \hat{V}}{n - m} \quad (8)$$

5. Précisions et régions de confiance

Les précisions des solutions estimées contenues dans le vecteur \hat{X} sont données par la racine carrée de la diagonale de la matrice de covariance :

$$\Sigma_{\hat{X}} = s_0^2 \cdot N^{-1} \quad (9)$$

Cette matrice permet de construire les régions de confiance, autrement dit les régions de l'espace dans lesquelles on a une probabilité $1 - \alpha$ de trouver la vraie solution des moindres carrés (celle que l'on aurait s'il n'y avait pas d'erreurs accidentelles). Généralement, et ce sera notre cas, ce seuil est fixé à 95 % (le risque de première espèce, α , étant alors de 5 %). Dans notre étude, on utilisera les régions de confiance 1D (intervalles) et 2D (ellipses), classiquement utilisées en topographie.

6. Fiabilité des observations

La méthode des moindres carrés s'applique en considérant que les seules erreurs possibles sont accidentelles et qu'elles suivent une loi normale centrée. C'est ce qui permet de vérifier la présence de fautes dans les mesures : globalement (c'est le test du chi deux) et sur chaque observation (validation individuelle des résidus).

Cependant, il est possible qu'une faute passe inaperçue, qu'elle dégrade la qualité des résultats et qu'elle conduise à rejeter de bonnes observations. L'étude de l'impact des fautes indétectables sur les résultats fait partie de la notion de fiabilité, telle que définie par [Baarda, 1964].

Le rapport :

$$z_i = \frac{\hat{\rho}_i^2}{\sigma_i^2} \quad (10)$$

est appelé fiabilité locale de l'observation i ou redondance partielle. Dans cette équation, σ_i est la précision à priori sur la mesure et $\hat{\rho}_i$ la précision sur le résidu. Il détermine la contrôlabilité d'une observation à l'intérieur du réseau.

La fiabilité locale correspond à un réel entre 0 et 100%, étant entendu qu'une observation n'est pas contrôlée pour une fiabilité nulle et est parfaitement contrôlée pour une fiabilité de 100%.

Etude expérimentale de l'apport de la combinaison de mesures topométriques et GNSS

Sébastien Alliez-Dron

La valeur de la fiabilité locale dépend de la géométrie du réseau et de la précision des observations. On considère que les observations sont suffisamment contrôlées dans un réseau pour une valeur de fiabilité locale supérieure à 25%.

Il est aussi possible d'évaluer l'influence des fautes non détectables sur les coordonnées d'un point 1D, 2D ou 3D. On parle de fiabilité externe et de régions de fiabilité : intervalle (1D), rectangle (2D) ou pavé (3D).

7. Combinaison des observations

Il existe différentes méthodes de combinaison entre deux techniques telles que la topométrie et le GNSS : cumul de systèmes normaux, moyenne des coordonnées, intégration de vecteurs GNSS comme observations, Le lecteur intéressé par ces différentes possibilités pourra se référer à [Legru, 2011].

Nous avons opté pour la dernière méthode citée à savoir l'intégration de vecteurs GNSS aux observations topométriques avant traitement par moindres carrés. Ceci nous permet d'utiliser un logiciel spécialisé dans le traitement de données GNSS que nous présenterons plus en avant dans ce rapport et de bénéficier d'une multitude d'options de traitement supplémentaires. En outre, le logiciel d'ajustement par moindres carrés que nous avons employé, CoMeT, et qui fera lui aussi l'objet d'une présentation dans la seconde partie du mémoire, permet l'intégration de vecteurs GNSS à des mesures topométriques. Enfin, dans son mémoire de TFE, Maylis Bucher a montré l'équivalence, dans le cadre de nos travaux, entre l'utilisation d'un vecteur GNSS et le cumul des équations normales associées (cf. [Bucher, 2015]).

Chapitre 2. Présentation théorique de la VCE

La question de la pondération relative d'observations obtenues à partir de techniques de nature très différente a fait l'objet de nombreux travaux par le passé. Ceux de F. R. Helmert au début du XX^{ème} siècle ont été les premiers à aborder la problématique d'estimation des composantes de la variance (VCE – Variance Component Estimation) comme solution du problème.

Cette section aura pour objet la présentation théorique de la VCE et donnera au lecteur les éléments nécessaires à la compréhension de nos travaux.

1. Objectif de la VCE

Lors de la mise en œuvre de la méthode des moindres carrés, il est important de connaître les précisions relatives entre les observations. Ces précisions relatives sont cependant souvent très difficiles à estimer lorsque l'on combine des observations issues de techniques de mesure de nature très différente. Les méthodes VCE doivent justement répondre à ce problème en estimant les pondérations relatives optimales entre les techniques.

2. Introduction à la VCE

Le principe de fonctionnement de la VCE, comme expliqué dans [Bucher, 2015], revient à complexifier la forme de la matrice de covariance sur les observations de l'équation (3) en constituant des groupes d'observations de mêmes spécificités et à estimer un facteur propre à la matrice de covariance de chaque groupe. Ces observations doivent être statistiquement homogènes.

Le principe de la VCE, exposé dans [Bähr *et al.*, 2007], consiste à décomposer la matrice de covariance vraie sous la forme :

$$\Sigma'_L = \Sigma_0 + \sum_{i=1}^k s_i^2 \cdot \Sigma_i \quad (11)$$

Dans cette expression, la matrice de covariance est décomposée comme la somme de k matrices de covariance à priori Σ_i , associées à k groupes d'observations. Devant chaque groupe apparaît un facteur unitaire de variance s_i^2 qu'il convient d'estimer. La matrice Σ_0 correspond à une partie supposée connue de la matrice de covariance pour laquelle il n'y a pas de facteur à estimer. Pour la plupart des applications, et c'est notre cas, cette partie est nulle.

Nous pouvons regrouper les facteurs unitaires des k groupes sous la forme d'un vecteur $s^2 = (s_1^2, s_2^2, \dots, s_k^2)^T$: le vecteur des composantes de la variance des k groupes.

Finalement, la forme développée de la matrice de covariance présentée ci-dessus est la suivante, avec Σ_0 considérée nulle :

$$\Sigma'_L = \begin{bmatrix} s_1^2 \cdot \Sigma_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & s_p^2 \cdot \Sigma_p \end{bmatrix} \quad (12)$$

3. Les différentes méthodes VCE

Depuis les travaux d'Helmert, différents estimateurs des composantes de la variance ont été développés (cf. [Bucher, 2015]). Ils sont divisés en deux groupes, ceux qui sont rigoureux, c'est-à-dire issus de raisonnements mathématiques et statistiques exacts et ceux qui sont approchés, pour lesquels des éléments les constituant ont été approximés ou négligés. Ces derniers ont l'avantage d'être plus simples à mettre en œuvre et de demander moins de calculs.

Si on s'intéresse uniquement aux estimateurs rigoureux, on peut citer :

- l'estimateur d'Helmert ;
- les estimateurs par maximum de vraisemblance : il s'agit de définir l'événement le plus probable en maximisant la densité de probabilité des variables aléatoires en présence.

Etude expérimentale de l'apport de la combinaison de mesures topométriques et GNSS

Sébastien Alliez-Dron

Ces méthodes sont appelées ML³ et REML⁴, plus de détails sont disponibles dans [Searle, 1994] pour la première et [van Loon, 2008] pour la seconde ;

- l'estimateur LSVCE⁵, qui s'appuie sur la théorie des moindres carrés et qui est développé en détails dans [Amiri-Simkooei, 2007]. Une mise en œuvre pratique de cet estimateur est faite dans [Bucher, 2015] ;
- les estimateurs BIQUÉ⁶ et MINQUE⁷ qui sont deux estimateurs quadratiques sans biais dont l'objectif est d'estimer une fonction linéaire des composantes de la variance (cf. [Caspary, 2000], [Bähr *et al.*, 2007], [Rao, 1971] et [Searle, 1994]) ;
- la méthode AUE (Almost Unbiased Estimation) décrite en détails dans [Horn *et al.*, 1975] et dans [Lucas, 1985] ;
- la méthode de Förstner (cf. [Bähr *et al.*, 2007]) ;

Pour notre étude, dans laquelle les erreurs de mesures sont considérées comme suivant une loi normale centrée, la plupart de ces estimateurs sont équivalents à celui proposé par Helmert, comme l'indique [Bucher, 2015]. Nous avons donc naturellement choisi d'utiliser pour notre travail la méthode d'Helmert (notée HVCE dans la suite, pour Helmert VCE), détaillée dans [Sahin *et al.*, 1992], [Welsch, 1978] et [Grafarend *et al.*, 1980].

Le processus d'un ajustement faisant intervenir la HVCE est le suivant :

- Choix des valeurs initiales des coefficients s_k^2 ;
- Choix de matrices de covariance à priori ;
- Formation des matrices N (matrice normale sur l'ensemble des mesures) et N_k (matrice normale pour le groupe k d'observations) ;
- Ajustement des mesures ;
- Calcul des facteurs \hat{s}_k^2 à partir de l'équation d'Helmert ci-dessous :

$$H \cdot s^2 = c \quad (13)$$

La forme développée de cette équation est :

$$\begin{bmatrix} h_{11} & \cdots & h_{1p} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{p1} & \cdots & h_{pp} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1^2 \\ \vdots \\ \sigma_p^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 \\ \vdots \\ c_2 \end{bmatrix}$$

avec :

$$\begin{aligned} c_k &= V_k^T \cdot P_k \cdot V_k \\ h_{kk} &= n_k - 2 \cdot \text{Tr}(N^{-1} \cdot N_k) + \text{Tr}(N^{-1} \cdot N_k \cdot N^{-1} \cdot N_k) \\ h_{kl} &= \text{Tr}(N^{-1} \cdot N_l \cdot N^{-1} \cdot N_k) \quad (\text{pour } k \neq l) \end{aligned}$$

- Calcul des nouveaux éléments de la matrice de pondération à partir des facteurs \hat{s}_k^2 :

$$P_k \leftarrow \frac{P_k}{\hat{s}_k^2} ;$$

³ Maximum Likelihood

⁴ REstricted Maximum Likelihood

⁵ Least-Square Variance Component Estimation

⁶ Best Invariant Quadratic Unbiased Estimator

⁷ Minimum Norm Quadratique Unbiased Estimator

- Ce processus est itératif, il se répète jusqu'à convergence des facteurs s_k^2 ;

Chapitre 3. Mise en œuvre de la VCE

Nous l'avons vu, il existe de nombreux travaux qui proposent de nouvelles méthodes d'estimation des composantes de la variance et qui expliquent leurs propriétés statistiques et pratiques. Dans ce travail, notre objectif est d'évaluer d'un point de vue méthodologique l'influence de l'utilisation des méthodes VCE sur des données réelles. Or il s'avère que les études mettant en œuvre la VCE sur des données réelles sont moins nombreuses.

Dans [Yavuz *et al.*, 2011] quatre méthodes d'estimation des composantes de la variance (HVCE, MINQUE, AUE, Förstner) sont comparées sur un jeu de données réelles. Entre autres, la rapidité de traitement et la capacité à détecter des erreurs grossières sont évaluées.

Pour réaliser cette étude, les expérimentations sont faites à partir de données issues du réseau de triangulation métropolitain d'Istanbul à une époque donnée. Sur ce réseau, des mesures d'angles horizontaux ont été faites dans 448 directions différentes. Quant aux mesures de distances, elles sont au nombre de 208.

L'étude conclut que les quatre méthodes sont équivalentes, bien que la rapidité de traitement de la méthode HVCE se détache des trois autres.

Dans [Sahin *et al.*, 1992], la HVCE est appliquée à des mesures SLR⁸ issues de deux systèmes d'observation différents. Le premier est basé sur la technique du laser à rubis, le second sur la technique du YAG⁹.

À partir des mesures laser sur satellites, les coordonnées des stations au sol sont déterminées tous les mois. Tout d'abord, les mesures sont divisées en deux groupes. D'un côté, les mesures issues des stations utilisant la technique du laser à rubis, que nous appellerons stations rubis, de l'autre, celles utilisant la technique du YAG, que nous appellerons stations YAG. Les auteurs montrent que les pondérations des deux groupes évoluent de mois en mois.

Dans le reste de l'étude, les mesures sont divisées en autant de groupes qu'il y a de stations, peu importe la technique d'observation. En étudiant l'évolution de la pondération, les auteurs constatent que celle-ci varie pour une même station d'un mois à l'autre mais que cette variation est faible par rapport aux différences entre les stations elles-mêmes. Les méthodes VCE sont alors capables de discriminer les stations selon leur précision.

⁸ Satellite Laser Ranging, Télémétrie Laser sur Satellites en français

⁹ Yttrium, Aluminium, Garnet

Etude expérimentale de l'apport de la combinaison de mesures topométriques et GNSS

Sébastien Alliez-Dron

Finalement, deux calculs pour déterminer les coordonnées des stations et les lignes de base sont effectués. L'un fait intervenir l'estimation des composantes de la variance, l'autre non. L'impact sur les solutions déterminées est significatif, principalement sur la composante verticale, d'où l'importance mise en évidence de la pondération des observations.

Dans [Bergkvist, 2015], l'objectif de l'étude menée est de comprendre l'influence de la géométrie d'un réseau, du nombre de stations, de cibles et de leur disposition sur l'estimation des composantes de la variance. L'auteur cherche à déterminer de quels éléments il faut principalement tenir compte pour améliorer la précision sur les coordonnées.

Plusieurs réseaux sont créés afin de mettre en œuvre des mesures topométriques (d'angles horizontaux, d'angles verticaux et de distances) selon des axes précis : avec une certaine géométrie, avec un certain nombre de stations, de cibles, ... À l'issue de chaque simulation, il estime, grâce au MINQUE¹⁰, les valeurs des précisions à posteriori pour chaque groupe de mesures : distances, angles horizontaux et angles verticaux.

À l'issue des tests, l'auteur fait la synthèse de ce qu'il faut éviter pour ne pas que la dégradation des précisions à posteriori soit trop importante. Entre autres, il précise qu'il est primordial d'éviter l'alignement des stations et cibles visées. Il ajoute que plus le nombre d'observations est important, meilleure sera la précision.

Chapitre 4. Objectifs de l'étude menée

Notre étude s'intéresse à la mise en œuvre de la VCE pour répondre au problème de pondération relative d'observations obtenues grâce à des techniques de mesure fondamentalement différentes.

Certains travaux, nous en avons présentés, sont réalisés dans ce sens mais nous souhaitons aborder d'autres aspects.

D'abord, à notre connaissance, l'utilisation de la VCE dans le cadre de la combinaison de mesures topométriques et GNSS n'a jamais été réalisée. Ces mesures sont acquises par nos soins et le fait que nous en assurions aussi le traitement nous permet le contrôle complet de la chaîne de mesure et de traitement jusqu'à l'application de la VCE. Ces données seront d'ailleurs traitées pour obtenir des séries temporelles qui nous permettront d'évaluer l'évolution des estimateurs VCE au cours du temps, un aspect peu abordé.

¹⁰ *Minimum Norm Quadratic Estimation, un estimateur de variance*

Partie II : Chaîne de mesure et de traitement

L'objectif de cette partie est de détailler le protocole expérimental mis en œuvre pour évaluer l'influence de l'utilisation de la VCE dans l'utilisation combinée des techniques topométriques et GNSS, dans le cadre d'un petit réseau d'auscultation en continu.

Tout d'abord, nous expliquerons le réseau de mesures mis en place, puis nous détaillerons la chaîne de mesure développée et la chaîne de traitement utilisée.

Chapitre 1. Protocole de mesure

1. Contraintes d'installation

L'étude que nous souhaitons mener et les différents tests à effectuer ont pour conséquence certaines contraintes dont il est impératif de tenir compte avant de réfléchir à la constitution du réseau. Nous allons vous les présenter.

D'abord, nous voulons étudier l'évolution des estimateurs des composantes de la variance au cours du temps. Cela signifie que les instruments d'observations doivent acquérir des données pendant un laps de temps suffisamment important. Cette notion apporte un premier lot de contraintes. Le premier aspect à envisager est celui de la sécurité. Le matériel doit pouvoir rester en place nuit et jour sans risque de dégradation et sans risque de perturbation pour les mesures. Aussi, il faut qu'à tout moment nous ayons facilement accès aux instruments pour vérifier le bon déroulement du processus d'acquisition. En outre, se pose le problème des batteries mises à notre disposition : elles ne permettent pas l'alimentation des appareils plusieurs jours de suite. Il faut donc pouvoir les brancher sur une alimentation externe et avoir, sur le lieu de mesures, des prises électriques à disposition.

Dans [Bergkvist, 2015], l'importance de la géométrie d'un réseau est mise en avant. Pour rappel, il faut éviter d'aligner cibles et stations et, dans la mesure du possible, augmenter le nombre d'observations. Cela implique que le lieu sur lequel les mesures sont réalisées soit suffisamment vaste et permette une géométrie suffisamment complexe.

Récemment, une extension a été ajoutée au bâtiment de l'ESGT qui héberge l'équipe L2G. Les terrasses, celle du nouveau bâtiment et celle de l'ancien offrent plusieurs possibilités et répondent à nos contraintes, d'où le choix d'y installer notre réseau. « L'ancienne » terrasse est en plus équipée de piliers en béton sur lesquels sont installées des platines qui permettent le centrage forcé de nos instruments, c'est un atout supplémentaire.

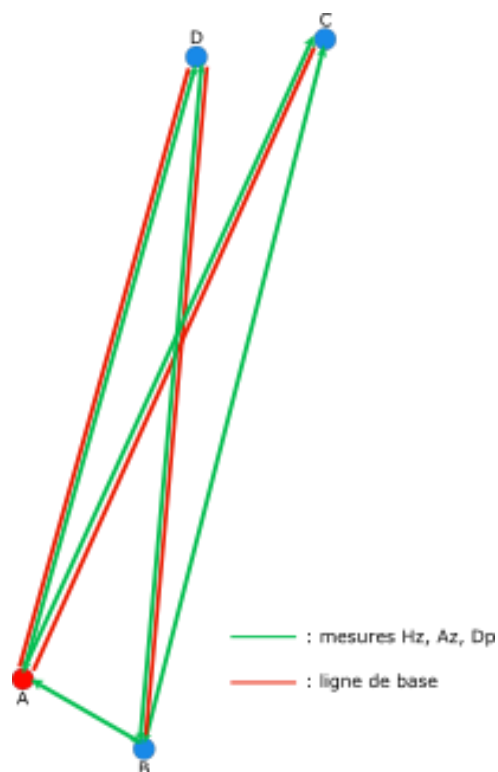
2. Pré-analyse du réseau

Avant toute réalisation de mesures, il est essentiel d'expérimenter plusieurs configurations de réseau afin de trouver le bon compromis entre une disposition des points réalisable, qui tienne compte des contraintes d'environnement, et qui permette aussi d'obtenir un réseau de qualité suffisante en terme de précision (cf. partie I.1.5) et de fiabilité (partie I.1.6).

Pour la pré-analyse des différents réseaux, nous utilisons le logiciel CoMeT¹¹. Ce logiciel de compensation de mesures topographiques et de pré-analyse de réseaux a été développé au sein du GeF. La validation de CoMeT par comparaison avec d'autres logiciels existants – Covadis ou Geolab, par exemple – a fait l'objet d'un article paru en 2012 dans la revue XYZ éditée par l'AFT¹² (cf. [Durand et Guérin, 2012]).

Comme l'indique la figure 1, nous proposons un réseau constitué de 4 points A, B, C et D. Tous les points sont équipés de récepteurs GNSS et de réflecteurs et les points A et B sont équipés en plus de stations totales.

- A → B (Hz, Az, Dp) ;
- A → C (Hz, Az, Dp) ;
- A → D (Hz, Az, Dp) ;
- B → A (Hz, Az, Dp) ;
- B → C (Hz, Az, Dp) ;
- B → D (Hz, Az, Dp) ;
- A → C ligne de base GNSS ;
- A → D ligne de base GNSS ;
- B → D ligne de base GNSS ;



La pré-analyse d'un réseau tient compte de la précision des appareils utilisés. Pour réaliser les mesures topométriques, nous avons considéré les précisions à priori suivantes (avec double retournement) :

¹¹ Compensation des Mesures Topographiques

¹² Association Française de Topographie

Etude expérimentale de l'apport de la combinaison de mesures topométriques et GNSS

Sébastien Alliez-Dron

- Station au point A :
 - précision de mesure des angles horizontaux : 0.15 mgon
 - précision de mesure des angles verticaux : 0.30 mgon
 - précision de mesure des distances : 1 mm +/- 1ppm
- Station au point B :
 - précision de mesure des angles horizontaux : 0.30 mgon
 - précision de mesure des angles verticaux : 0.30 mgon
 - précision de mesure des distances : 1.5 mm +/- 1ppm

Pour les différents instruments du réseau, il faut aussi tenir compte d'une précision de centrage sur chaque point. Nous avons considéré une valeur de 0.3 mm.

Pour inclure dans la pré-analyse des vecteurs GNSS, il faut préciser les origines et les arrivées du vecteur et surtout indiquer la matrice de covariance à priori à considérer. Dans notre cas, nous avons considéré une matrice diagonale avec pour les coordonnées horizontales une précision à priori de 3 mm et pour la coordonnée verticale une précision à priori de 5 mm. Ces variances sont calculées en considérant une précision relative de positionnement par GNSS de 3 mm + 0.5 ppm pour les composantes horizontales et à 5 mm + 0.5 ppm pour la verticale.

Le point A correspond au troisième pilier de la terrasse dont les coordonnées sont connues, nous les considérons comme fixes. Les coordonnées planimétriques du point B sont aussi fixées.

Dans le tableau ci-dessous, vous trouverez les valeurs relatives aux régions de confiance 2D pour un seuil de confiance fixé à 95 % (cf. partie I.1.5) :

Points	½ grand axe (mm)	½ petit axe (mm)	Orientation (AZ – deg)
C	3.3	1.8	113.6
D	2.9	1.8	105.4

Tableau 1 : Régions de confiance 2D

La valeur la plus importante est celle du demi-grand axe de l'ellipse du point C et elle n'excède pas les 3 millimètres, les valeurs des axes des ellipses obtenues sont alors acceptables. L'intervalle de confiance 1D sur le point C est de 1 millimètre, sur le point D elle est de 9 dixièmes de millimètre.

Nous nous sommes aussi intéressés à la fiabilité locale des observations du réseau dont les valeurs, pour un seuil de confiance de 95% et un risque de seconde espèce de 5%, sont regroupées dans le tableau 2 qui suit :

Etude expérimentale de l'apport de la combinaison de mesures topométriques et GNSS

Sébastien Alliez-Dron

Type de visée	Point stationné	Point Visé	Fiabilité locale (%)
Distance	A	B	100.0
Distance	A	C	52.6
Distance	A	D	55.4
Angle Horizontal	A	B	72.7
Angle Horizontal	A	C	24.4
Angle Horizontal	A	D	27.1
Angle Vertical	A	B	59.3
Angle Vertical	A	C	44.8
Angle Vertical	A	D	43.9
Distance	B	A	100.0
Distance	B	C	52.6
Distance	B	D	55.7
Angle Horizontal	B	A	75.9
Angle Horizontal	B	C	26.2
Angle Horizontal	B	D	28.8
Angle Vertical	B	A	59.3
Angle Vertical	B	C	47.5
Angle Vertical	B	D	47.9
Vecteur DX	A	C	94.8
Vecteur DY	A	C	81.6
Vecteur DZ	A	C	95.7
Vecteur DX	A	D	95.9
Vecteur DY	A	D	84.4
Vecteur DZ	A	D	96.6
Vecteur DX	B	D	95.9
Vecteur DY	B	D	84.4
Vecteur DZ	B	D	96.6

Tableau 2 : Fiabilités locales

D'après [Durand, 2015], l'indicateur de fiabilité locale s'interprète comme suit :

- de 0 à 25%, une observation n'est pas suffisamment contrôlée,

Etude expérimentale de l'apport de la combinaison de mesures topométriques et GNSS

Sébastien Alliez-Dron

- de 25 à 60% les observations sont bien contrôlées,
- au-delà c'est très bon.

Au vu des valeurs que nous avons, nous pouvons dire que les observations du réseau sont suffisamment contrôlées. En effet, cet indicateur est supérieur à 60 % pour 15 d'entre elles et supérieur à 25 % pour les 12 autres. Une seule observation passe alors sous le seuil des 25 %.

Ci-dessous, le tableau regroupant les valeurs des régions de fiabilité 2D à 95 % et 5% :

Points	½ longueur (mm)	½ largeur (mm)	Orientation (Az – deg)
C	2.8	2.6	106.37
D	2.4	2.3	114.37

Tableau 3 : Régions de fiabilité 2D

L'influence des fautes non détectables s'élève jusqu'à 1 cm sur les points C et D ce qui peut tout de même sembler important. La configuration des lieux ne nous permet cependant pas d'avoir une meilleure géométrie qui diminuerait ces valeurs.

Les figures 2 et 3 sont obtenues en sortie de traitement CoMeT, elles représentent respectivement les régions de confiance et les régions de fiabilité associées à nos mesures :

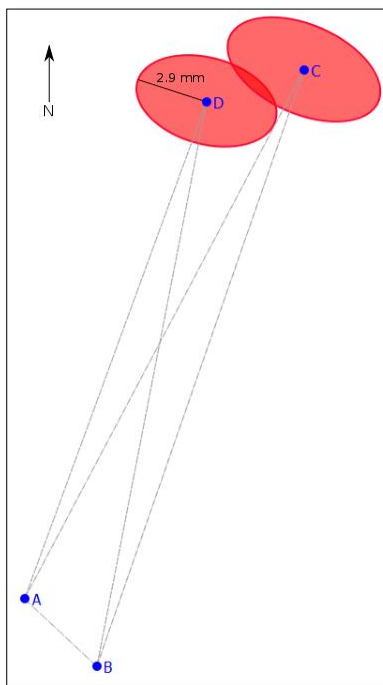


Figure 2 : Régions de confiance 2D du réseau

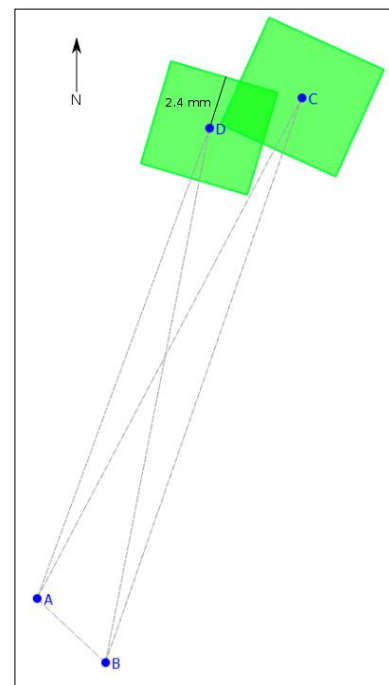


Figure 3: Régions de fiabilité 2D du réseau

La pré-analyse nous renseigne alors sur la capacité du réseau à détecter des déformations. Dans notre cas, sur les points C et D, une déformation de 3 millimètres selon

Etude expérimentale de l'apport de la combinaison de mesures topométriques et GNSS

Sébastien Alliez-Dron

la direction (AB) pourra être observée. Une déformation de 2 millimètres dans la direction (AC) pourra aussi être détectée.

La figure 4 est un plan de situation du réseau tel qu'il est envisagé :

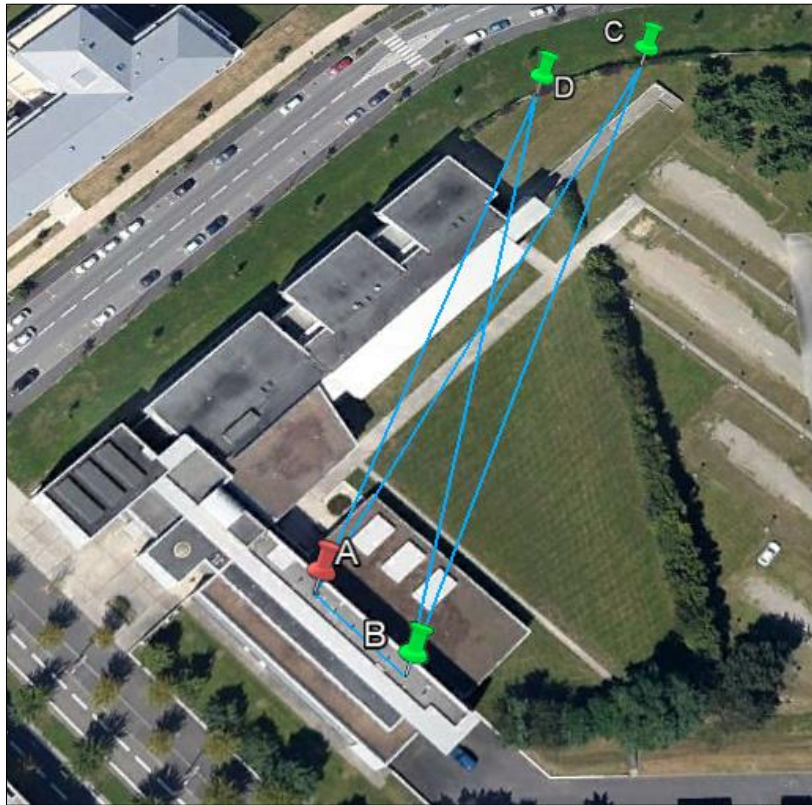


Figure 4 : Plan de situation du réseau

A et B seront donc stationnés respectivement sur le troisième et cinquième pilier de l'ancienne terrasse de l'ESGT. C et D seront installés sur la nouvelle terrasse, l'un sur une console Baechler l'autre sur une embase lourde.

3. Mise en œuvre du réseau

Une fois la phase de pré-analyse terminée, il faut mettre en œuvre le réseau.

Il est important de bien choisir le matériel utilisé pour mesurer. Celui-ci doit en effet respecter les critères définis dans la phase de pré-analyse.

Pour les mesures topométriques, nous utilisons une station totale *Leica TM30* au point A et une station totale *Leica TCRP 1201* au point B. D'après les caractéristiques techniques fournies par le constructeur, ces deux appareils assurent les précisions que nous cherchons à avoir. Pour le point A nous utilisons un prisme *Leica* de type *GRZ122* et pour le point B un prisme *MultiTrack* de marque *Trimble*, les précisions de centrage sont évaluées à 0.3 mm. Nous utilisons deux prismes de type *GPH1P* pour les points C et D, usinés très précisément,

Etude expérimentale de l'apport de la combinaison de mesures topométriques et GNSS

Sébastien Alliez-Dron

le constructeur avance là aussi une précision de centrage de 0.3 mm (cf. manuel *Leica Geosystems Accessoires d'origine*).

Concernant les mesures GNSS, nous utilisons quatre récepteurs GNSS (GPS/Glonass) de marque *Topcon* et de deux modèles différents. Le modèle *HiperPro*, utilisé pour les points A et B, en mode d'observation statique rapide, est précis à hauteur de 3 mm + 0.5 ppm pour les composantes horizontales et à 5 mm + 0.5 ppm pour la composante verticale d'après le constructeur (cf. site officiel *Topcon*). Pour le modèle *Hiper II*, utilisé aux points C et D, la précision constructeur est la même.

Les éléments du montage : stations totales, prismes et récepteurs GNSS pour les points A et B, uniquement prismes et récepteurs GNSS pour les points C et D, sont alignés grâce à un arceau métallique usiné par la Haute Ecole d'ingénierie et de gestion du canton de Vaud (Heig-VD). Il assure une précision de centrage meilleure que le dixième de millimètre.

Il faut aussi mesurer les hauteurs d'antenne des instruments avec précision. Nous avons procédé par nivellement direct en moyennant plusieurs mesures. Nous avons utilisé un niveau électronique de type *Trimble DiNi* dont la précision annoncée est de 0.3 mm sur un kilomètre de cheminement double et une mire de précision invar. Notre méthode de mesure nous permet de garantir une précision de détermination des hauteurs inférieure à 0.3 mm.

Les figures 5, 6, 7 et 8 ci-dessous sont des photographies détaillant les montages réalisés en chaque point :

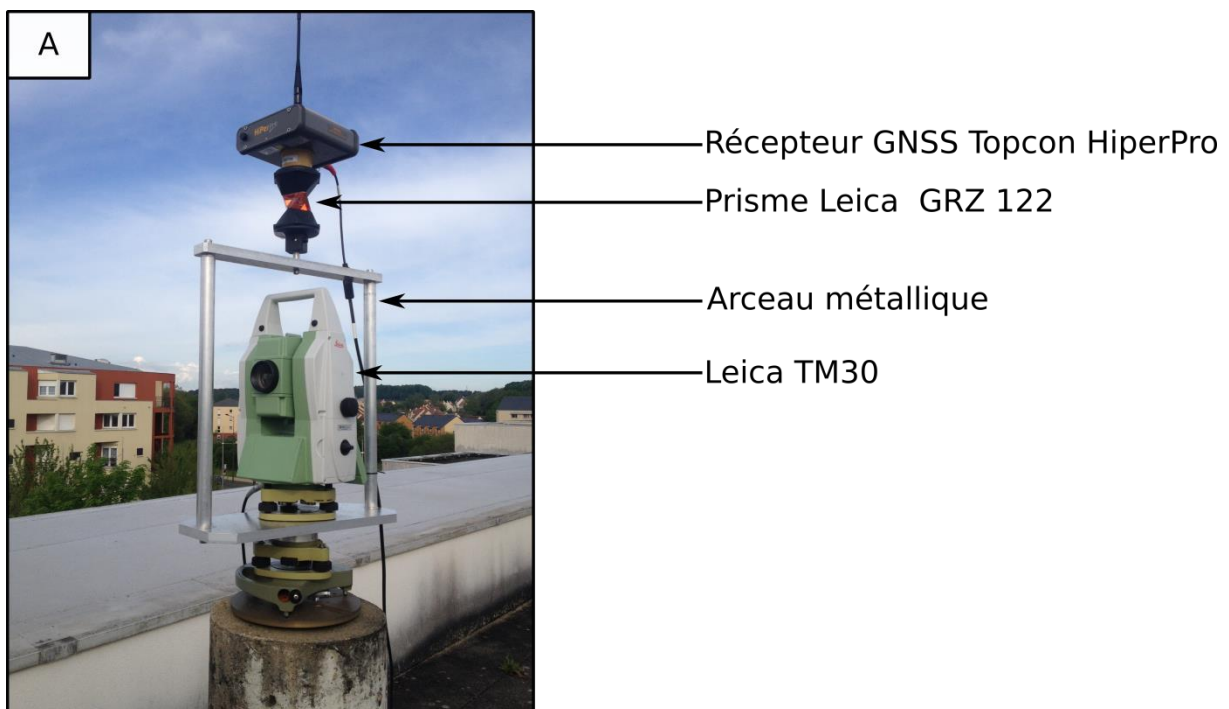


Figure 5 : Montage au point A

Etude expérimentale de l'apport de la combinaison de mesures topométriques et GNSS

Sébastien Alliez-Dron

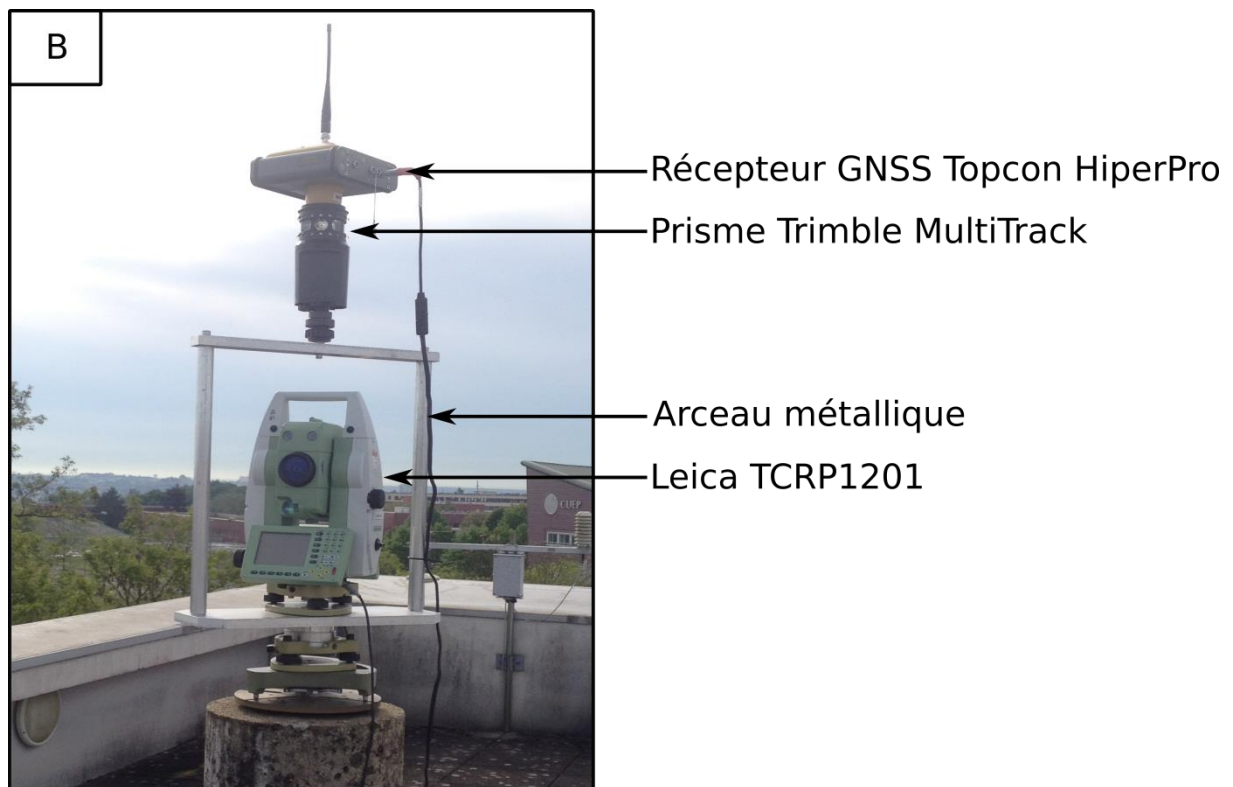


Figure 6 : Montage au point B

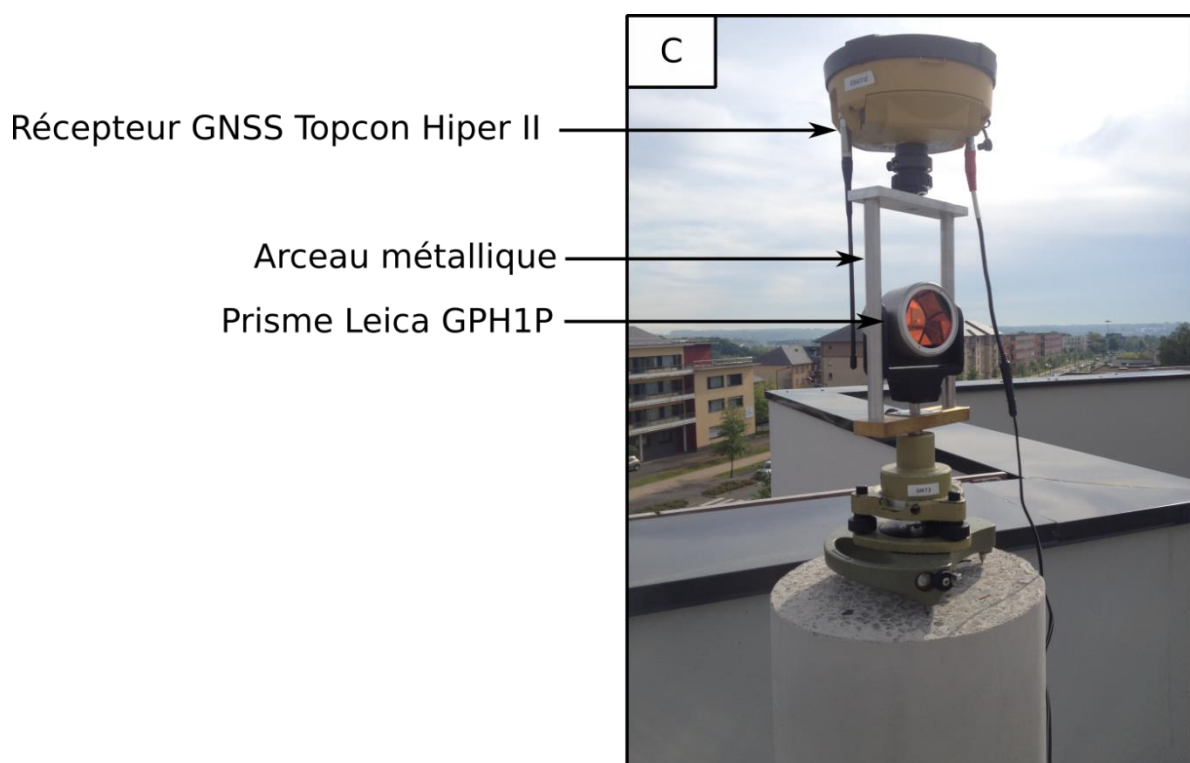


Figure 7 : Montage au point C

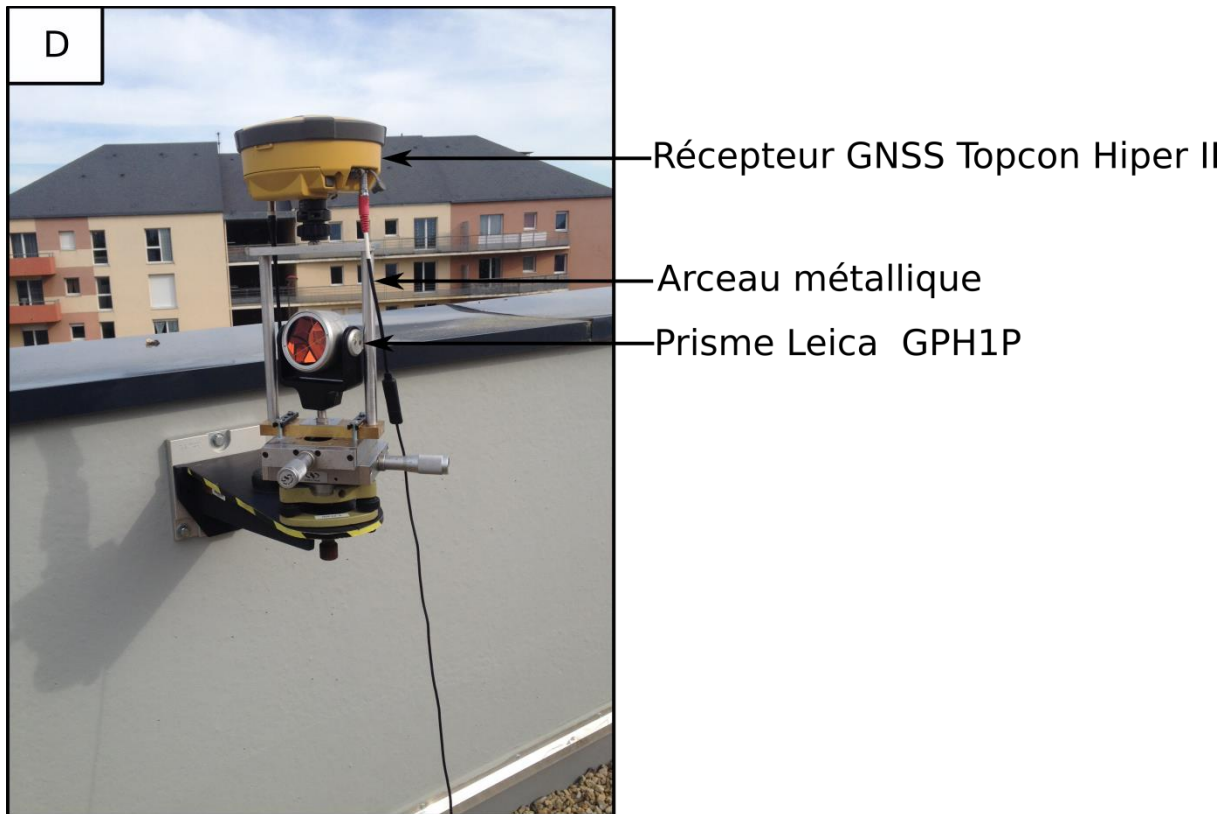


Figure 8 : Montage au point D

Finalement, le réseau mis en œuvre respecte en théorie les critères définis lors de la phase de pré-analyse et nous devrions être en mesure d'obtenir les résultats attendus.

Chapitre 2. Automatisation des mesures

Pour obtenir des séries temporelles de coordonnées des différents points du réseau, il est nécessaire de disposer d'instruments de mesures capables d'observer en continu sur un laps de temps important et de façon autonome. Notre objectif de combiner deux types d'observations – GNSS et topométriques – fait logiquement intervenir deux types d'instruments : des systèmes GNSS et des stations totales motorisées. S'il est facile d'utiliser en continu des récepteurs GNSS, ce n'est pas forcément le cas des stations totales qui nécessitent un traitement particulier.

Des solutions toutes faites existent sur le marché pour le pilotage des stations totales *Leica* comme le logiciel *Leica Geomos*. Il n'est cependant pas complètement adapté à notre besoin, car au-delà du coût d'un tel outil, il nécessite un matériel particulier (PC dédié, fonctionnant sous *Windows*, exports peu évidents des informations depuis une base de données, ...). La figure 9 présente le principe suivi pour piloter les instruments. Nous avons écrit un programme de pilotage en langage Python, fonctionnant sur micro-ordinateur, le Raspberry Pi et utilisant le protocole de communication GeoCOM disponible sur les instruments *Leica*.

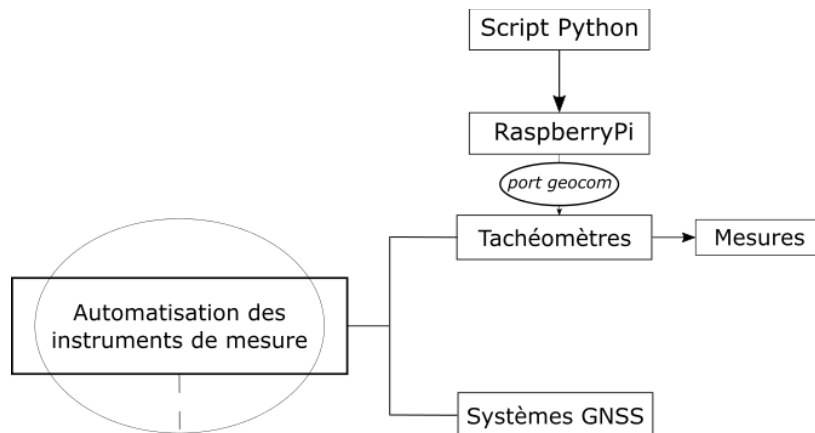


Figure 9 : Chaîne de traitement

1. Exécution des scripts sur le terrain

Avant de nous intéresser à l'écriture d'un script permettant le pilotage des instruments et l'automatisation des mesures nous avons réfléchi à la façon dont nous pouvions l'exécuter sur le terrain. Aussi, pour échanger avec l'appareil, il a fallu trouver une solution portable. Nous nous sommes tournés vers un ordinateur de petite taille (8,5 centimètres pour la grande diagonale, 2 centimètres d'épaisseur), léger (45 grammes) et peu coûteux (moins de 50 euros), appelé Raspberry Pi. Ce nano ordinateur est placé et fixé à proximité de chaque instrument à piloter.

Le programme « cron », exécutable sous Linux, permet quant à lui l'exécution de façon récurrente d'une tâche, c'est lui qui permet de lancer le script de pilotage des instruments à intervalle de temps régulier.

2. Pilotage des tachéomètres

Les deux appareils utilisés doivent être capables de réaliser de manière répétée des tours d'horizon en passant par chacun des points du réseau.

Pour répondre à ces besoins, nous avons choisi de piloter les instruments *Leica* en utilisant le protocole GeoCOM. Ce protocole de « communication » fonctionne sur la base d'un échange entre un client (PC) et un serveur (sur l'appareil) par l'intermédiaire d'un port série. Il s'agit d'envoyer une requête au serveur, d'attendre sa réponse et d'en extraire l'information utile comme le schématise la figure 10 :

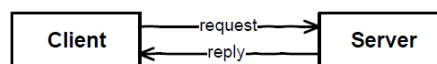


Figure 10 : Principe de communication, source : GeoCOM Reference Manual

Le protocole GeoCOM peut s'utiliser à partir de différents langages de programmation. Nous avons opté pour la syntaxe ASCII, facile à mettre en œuvre et utilisable sous environnement Python, le langage de programmation enseigné à l'ESGT.

Etude expérimentale de l'apport de la combinaison de mesures topométriques et GNSS

Sébastien Alliez-Dron

Les tâches à réaliser par les stations totales sont les suivantes, elles sont schématisées par la figure 11 :

- Récupérer les positions des points à lever ;
- Se déplacer sur la première d'entre elles ;
- Réaliser une mesure de l'angle horizontal, de l'angle vertical et de la distance selon la pente en cercle gauche puis enregistrer ces mesures;
- Faire un double retournement ;
- Répéter les mesures en cercle droit, les enregistrer ;
- Se déplacer sur le point suivant et répéter les tâches précédentes jusqu'au dernier point à lever ;
- Revenir à la position initiale ;

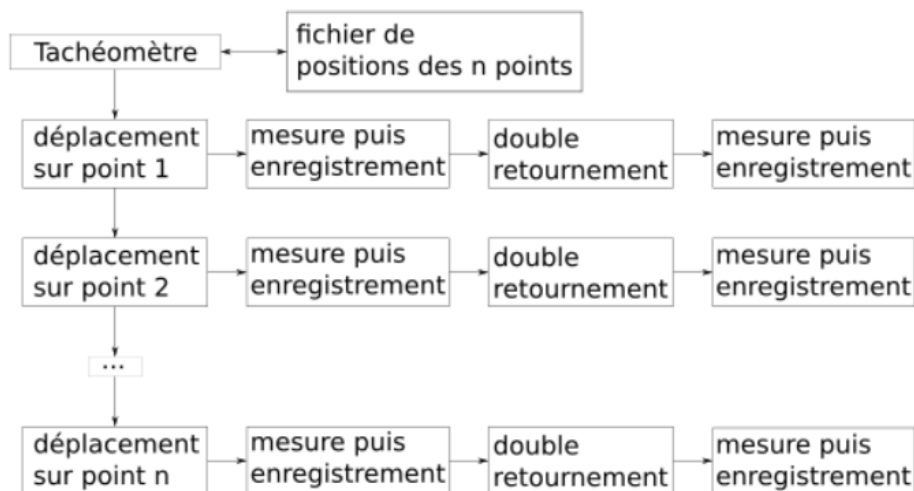
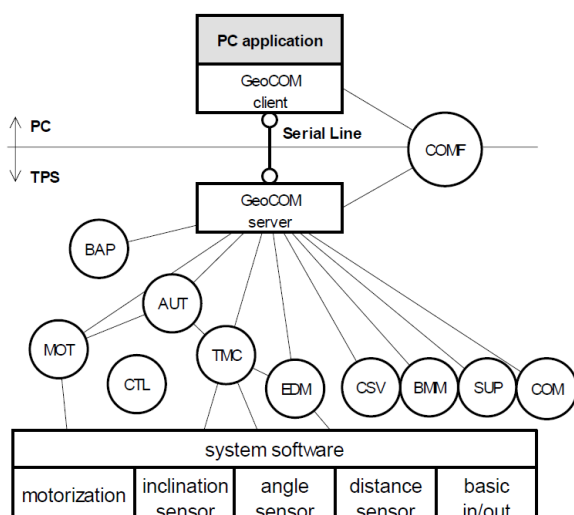


Figure 11 : Fonctionnement des tachéomètres

Le protocole GeoCOM comprend un ensemble de fonctions comprises par l'instrument. Elles permettent, entre autres, d'actionner les moteurs de l'instrument pour faire se déplacer le télescope, de prendre des mesures ou de configurer l'appareil. La figure 12 schématise le fonctionnement de ce protocole et l'ensemble des fonctions disponibles.



- **AUT : AUTOMATION**
- **BAP : BASIC APPLICATIONS**
- **BMM : BASIC MAN MACHINE INTERFACE**
- **COM : COMMUNICATIONS**
- **CSV : CENTRAL SERVICES**
- **EDM : ELECTRONIC DISTANCE MEASUREMENT**
- **MOT : MOTORISATION**
- **SUP : SUPERVISOR**
- **TMC : THEODOLITE MEASUREMENT AND CALCULATION**

Figure 12 : Vue d'ensemble du fonctionnement Client/Serveur, source : GeoCOM Reference Manual

Les fonctions les plus sophistiquées ne sont cependant accessibles que si l'utilisateur dispose de licences particulières notamment, par exemple, celles appartenant au module AUT. Les fonctions plus basiques sont en revanche disponibles sur tous les appareils sans contrainte. Nous avons fait le choix de nous tourner vers ces dernières pour pouvoir utiliser nos programmes sur l'ensemble des appareils de la gamme *Leica*, au prix d'une phase de développement plus longue et complexe.

Finalement, lorsque notre programme s'exécute, il faut trois minutes à l'instrument pour réaliser un tour d'horizon complet dans notre réseau. Nous avons alors, grâce à la commande Cron mentionnée précédemment, programmé une exécution du programme toutes les 5 minutes. De cette façon, nous disposons d'assez de données pour le traitement et nous sommes sûrs que deux exécutions successives ne vont pas interférer l'une avec l'autre.

Chapitre 3. Automatisation des traitements

Notre chaîne d'acquisition permet de mesurer en continu des données provenant de stations totales et de récepteurs GNSS. Afin d'obtenir des séries temporelles de positions pour les points du réseau, ces mesures doivent être extraites et traitées. Cette partie détaille la chaîne de traitement mise en œuvre.

1. Automatisation du traitement des mesures topométriques

La figure 13 synthétise les opérations réalisées pour traiter les données topométriques. Nous présenterons d'abord les corrections apportées aux observations puis nous poursuivrons avec le formatage des données.

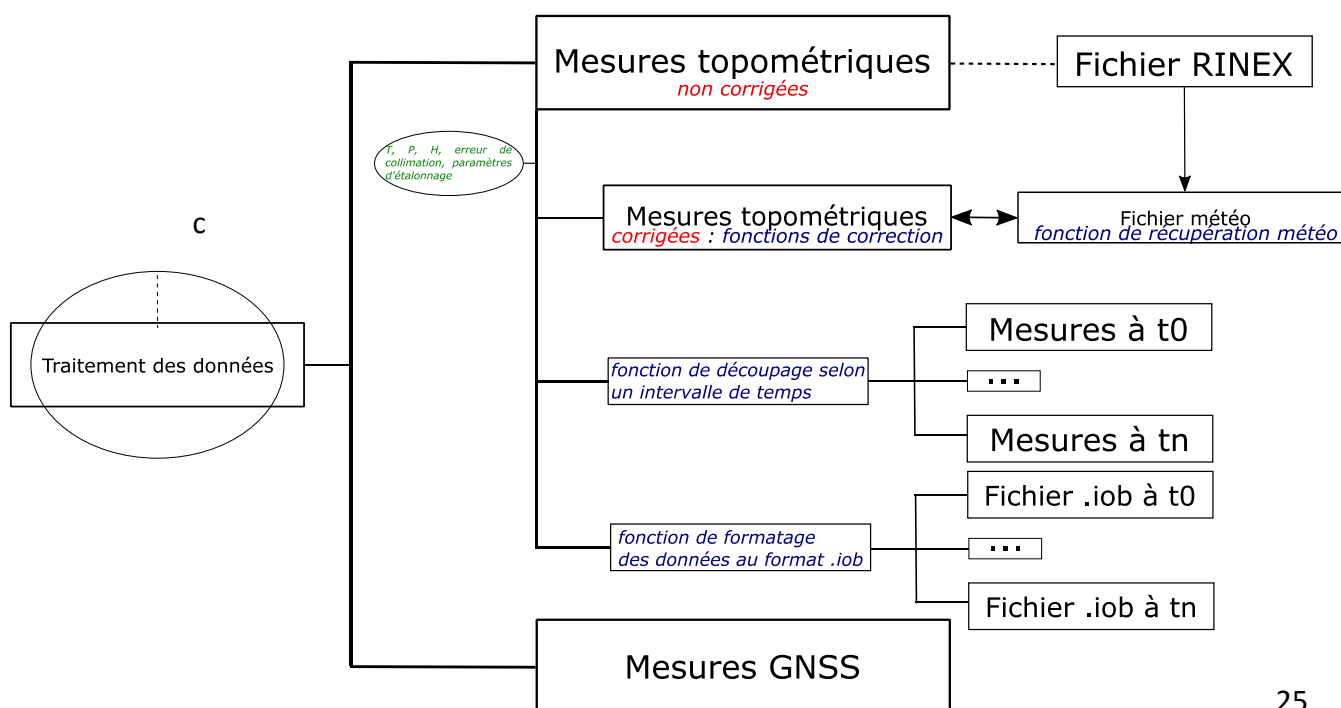


Figure 13 : Chaîne de traitement des données topométriques

Etude expérimentale de l'apport de la combinaison de mesures topométriques et GNSS

Sébastien Alliez-Dron

➤ Correction des observations

Dans [Durand, 2015], il est précisé que dans la méthode des moindres carrés, on considère qu'il n'y a aucune erreur systématique dans les observations, il faut alors les éliminer.

L'AFT définit une erreur systématique comme une « *erreur qui, lors de plusieurs mesurages effectués dans les mêmes conditions, de la même valeur d'une certaine grandeur, reste constante en valeur absolue et en signe ou qui varie selon une loi définie quand les conditions changent [...]. Une erreur systématique que l'on peut déterminer par le calcul ou par l'expérience doit être éliminée par une correction appropriée [...].* » Nous avons dénombré un certain nombre d'erreurs systématiques à corriger.

Une onde se propage en ligne droite et à vitesse constante dans un milieu d'indice de réfraction constant. Ce dernier étant dépendant des valeurs de température, de pression et d'humidité de l'environnement, il est nécessaire de corriger les mesures de distance de l'influence des paramètres atmosphériques. Plusieurs modèles de correction existent, nous nous sommes tournés vers celui de Barrel et Sears [Barrel and Sears, 1939], encore largement employé en topographie :

$$\Delta D = 281,8 - \left[\frac{0,29065 \cdot P}{(1 + \alpha \cdot T)} - \frac{4,12610^{-4} \cdot H}{(1 + \alpha \cdot T)} \cdot 10^x \right] \quad (14)$$

Avec $x = \frac{7,5 \cdot T}{237,3 + T} + 0,7857$, $\alpha = \frac{1}{273,16}$, P la pression en mbar, T la température en °C et H l'humidité relative en %.

On obtient alors la distance corrigée de la réfraction D_{corr} , à partir de la mesure brute D_{mes} par : $D_{corr} = D_{mes}(1 + \Delta D)$.

Les données météorologiques nécessaires à l'application du modèle : pression, température et humidité, proviennent de la station météorologique associée à la station permanente MAN2 située sur le toit de l'ESGT qui enregistre les données à chaque seconde. Il s'agit d'un capteur Vaisala PTU 200, dont les précisions d'acquisition des différentes composantes, sous nos conditions d'utilisation, sont regroupées dans le tableau suivant :

Grandeur mesurée	Précision
Pression	0.15 (hPa)
Humidité relative	+/- 2%RH
Température	+/- 0.2°C

Tableau 4 : Précisions d'acquisition du capteur Vaisala PTU 200, source : User Manual

Etude expérimentale de l'apport de la combinaison de mesures topométriques et GNSS

Sébastien Alliez-Dron

Afin d'éliminer les erreurs instrumentales, les mesures topographiques sont réalisées en double retournement. La réduction des tours d'horizon est réalisée par nos scripts Python.

Nous réalisons également la correction des erreurs systématiques liées aux couples appareil – prisme visé. La distance *Dvraie*, corrigée de ces erreurs et obtenue à partir de *Dcorr* définie précédemment, est modélisable sous la forme suivante :

$$D_{vraie} = D_{corr} + C + b \cdot D_{cor} + \sum_i e_i \cdot \cos\left(i \frac{4\pi}{\lambda_m} \cdot D_{cor} + \varphi_i\right) + \nu \quad (15)$$

Avec *C* la constante d'addition, c'est-à-dire la différence entre le centre de phase et le centre géométrique de l'appareil et *b* le facteur d'échelle, c'est-à-dire l'imprécision sur la vitesse de propagation de l'onde. ν correspond à l'erreur accidentelle. Le terme restant est la modélisation de l'erreur cyclique qui est la non linéarité spatiale de la phase de la diode émettrice.

Le réseau de points mis en place ne faisant pas intervenir de grandes distances, nous avons décidé de ne corriger nos mesures que de l'erreur liée à la constante d'addition qui englobe environ 90% de l'erreur systématique sur le couple.

Nous avons nous-mêmes déterminé les paramètres d'étalonnage pour nos couples à partir de la méthode des trois points alignés. Les valeurs des constantes d'addition que nous avons déterminées pour chaque couple sont regroupées dans le tableau 5 suivant :

	Prisme 360° Leica	Prisme MutliTrack	Prisme GPH1P1	Prisme GPH1P2
TM30	2,3 cm	/	-0,02 cm	-0,01 cm
TCRP1201	/	4,3 cm	-0,07 cm	-0,08 cm

Tableau 5 : Constantes d'addition

➤ Formatage des données

Puisque l'analyse de l'évolution des coefficients VCE au cours du temps fait partie de nos axes d'étude, il faut disposer de séries temporelles de données. Dans le fichier d'observations, nous enregistrons la date à laquelle chaque mesure est faite et à partir de cette date nous découpons le fichier d'observations en plusieurs sessions de 30 minutes. Un script Python a été réalisé pour automatiser cette opération.

Le format d'entrée pour un traitement CoMeT est le format IOB. Un script de traitement a été réalisé pour automatiser la formation de ces fichiers à partir des fichiers découpés en sessions de 30 minutes.

2. Automatisation du traitement des mesures GNSS

Comme pour les données topométriques, nous allons dans cette partie vous présenter en détails les traitements préalables à l'exploitation des données GNSS qui sont synthétisés par la figure 14 qui suit :

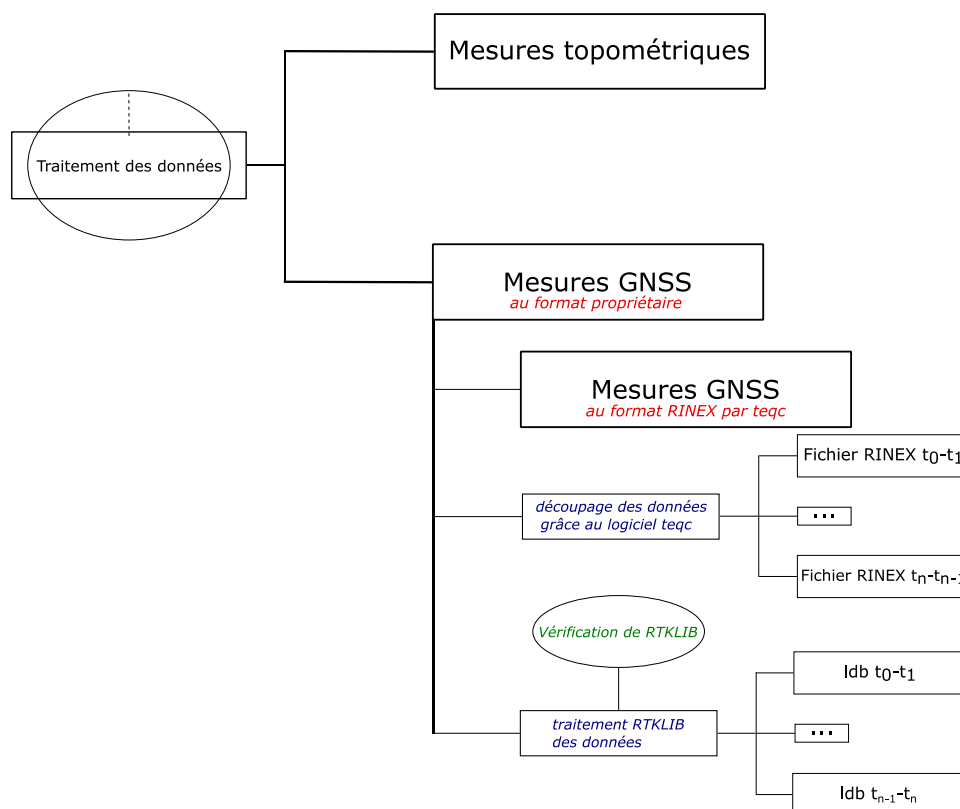


Figure 14 : Chaîne de traitement des données GNSS

Notre objectif est de calculer les vecteurs composant les lignes de base entre les points du réseau à partir des observations des antennes GPS.

Le logiciel de calcul que nous avons décidé d'utiliser est RTKLIB dans sa version 2.4.3b8. Nous l'avons privilégié par rapport à un logiciel scientifique comme *Bernese*¹³, car il est largement plus aisé à mettre en œuvre. En outre RTKLIB, pour l'utilisation que nous comptons en faire, apporte suffisamment de possibilités notamment de correction des paramètres atmosphériques (modélisation de l'ionosphère et de la troposphère, entre autres). Le calcul se fera avec le module *rtkpost*, intégré en ligne de commande à un script Python pour automatiser le traitement.

¹³ Logiciel de traitement GNSS développé par l'Institut Astronomique de l'Université de Berne

Etude expérimentale de l'apport de la combinaison de mesures topométriques et GNSS

Sébastien Alliez-Dron

➤ Formatage des données

Pour traiter des données avec RTKLIB, celles-ci doivent être au format RINEX¹⁴. Avant de pouvoir les exploiter, nous avons donc converti les observations depuis le format propriétaire *Topcon*. Cette opération a été réalisée à l'aide de *tps2rin*, un utilitaire *Topcon* exécutable en ligne de commande (il est aussi possible d'utiliser *teqc*, plus de détails sur ce logiciel sont donnés dans le paragraphe suivant).

Enfin, comme c'est le cas pour les mesures topométriques, il nous faut des séries temporelles et donc découper le fichier d'observations. Cette opération a été rendue possible grâce à l'utilisation du logiciel *teqc*¹⁵, développé par l'UNAVCO¹⁶, qui fait office de référence pour toutes les tâches qui concernent le prétraitement des données GNSS. Ce logiciel présente aussi l'avantage de s'exécuter en ligne de commande et donc, comme c'est le cas pour *RTKLIB*, de s'intégrer à un script Python pour automatiser les traitements. Pour les nôtres, nous avons découpé les fichiers RINEX en sessions de 30 minutes.

➤ Paramètres de traitement RTKLIB

Avant de pouvoir traiter les données, plusieurs paramètres sont à configurer. Les valeurs retenues pour nos traitements sont indiquées dans le tableau 6 qui suit :

Paramètres	
Fréquences utilisées	L1 + L2
Masque d'élévation	15°
Correction Ionosphérique	Aucune
Correction Troposphérique	Saastamoinen
Orbites	Radiodiffusées
PCV	Absolues, standard IGS
Ambiguïtés	Fixées
Constellation	GPS seul

Tableau 6 : Paramètres de traitement RTKLIB

Le fait que nous travaillons en différentiel sur de courtes lignes de bases nous permet d'utiliser les fréquences L1 et L2 séparément. Le masque d'élévation est fixé à la valeur standard de 15°. Il n'y aura pas de correction ionosphérique particulière, toujours compte tenu des courtes lignes de base. En revanche, pour la correction troposphérique, nous décidons d'utiliser le modèle de Saastamoinen (1972), c'est en effet celui qui est recommandé dans les conventions de l'IERS 2003 [Mc Carthy et Petit, 2004] (cf. [Fund *et al.*, 2010]).

¹⁴ Receiver Independent Exchange Format

¹⁵ *Translation, Editing and Quality Checking*

¹⁶ Consortium fondé par la National Science Foundation et la NASA

Etude expérimentale de l'apport de la combinaison de mesures topométriques et GNSS

Sébastien Alliez-Dron

Nous avons également tenu compte des variations de la position des centres de phase des antennes de nos récepteurs GNSS. Nous avons utilisé les calibrations d'antennes absolues, recommandées par l'IGS¹⁷, disponibles sur www.ngs.noaa.gov.

➤ Validation de RTKLIB

Par ailleurs, nous nous sommes assurés de la qualité des solutions fournies par RTKLIB en procédant à un test de validité sous nos conditions particulières d'utilisation, à savoir le calcul des composantes de ligne de base entre deux points sur des intervalles de temps relativement courts. Pour ces tests, nous avons comparé des sessions de 30 minutes, durée de session minimale lors de nos combinaisons.

Le logiciel utilisé comme moyen de comparaison est LGO¹⁸, un logiciel couramment utilisé dans le monde de la topographie et du génie civil paramétré de la même manière que RTKLIB. Nous avons observé une ligne de base entre MAN2 et un point situé à une distance de 30 mètres. Une fois par heure, pendant 24 heures, nous avons estimé les composantes de ce vecteur en utilisant des sessions de 30 minutes (sur la première demi-heure). Nous avons ensuite déterminé les écarts entre les résultats fournis par LGO et ceux fournis par RTKLIB sur les composantes Nord, Est et Verticale du vecteur 3D, comme indiqué dans le tableau 7 :

		Comparaison RTKLIB - LGO		
		E (mm)	N (mm)	H (mm)
26-mai-14	13h30-14h00	2	3	3
	14h00-14h30	1	2	0
	14h30-15h00	0	-2	2
	15h00-15h30	0	2	-4
	15h30-16h00	-4	-3	5
	16h00-16h30	-3	-1	4
	16h30-17h00	1	0	8
	17h00-17h30	-2	2	3
	17h30-18h00	-4	0	8
	18h00-18h30	-1	-1	5
	18h30-19h00	0	2	6
	19h00-19h30	0	0	6
	19h30-20h00	3	2	7
	20h00-20h30	1	1	8
	20h30-21h00	0	1	7
	21h00-21h30	1	-1	5
	21h30-22h00	2	-1	10
	22h00-22h30	1	0	12
	22h30-23h00	1	1	2
23h00-23h30	2	2	5	
23h30-00h00	2	0	-2	
27-mai-14	00h00-00h30	-1	-2	3

¹⁷ International GNSS Service

¹⁸ Leica Geo Office

Etude expérimentale de l'apport de la combinaison de mesures topométriques et GNSS

Sébastien Alliez-Dron

00h30-01h00	-1	3	-6
01h00-01h30	-1	0	9
01h30-02h00	-20	27	-56
02h00-02h30	2	1	7
02h30-03h00	0	3	10
03h00-03h30	0	-1	9
03h30-04h00	2	-3	1
04h00-04h30	2	-8	8
04h30-05h00			
05h00-05h30	-2	-2	-2
05h30-06h00	-1	0	2
06h00-06h30	0	2	9
06h30-07h00	2	-2	4
07h00-07h30	-2	2	3
07h30-08h00	-1	-1	2
08h00-08h30	0	-1	5
08h30-09h00	0	3	3
09h00-09h30	0	2	0
09h30-10h00	-2	3	6
10h00-10h30	0	1	5
10h30-11h00	-1	2	15
11h00-11h30	2	2	3
11h30-12h00	0	2	5
12h00-12h30	2	-3	0
12h30-13h00	3	4	3
13h00-13h30	2	2	7
13h30-14h00	-2	3	3
14h00-14h30	0	3	-2
14h30-15h00	0	-1	-4
15h00-15h30	-1	1	23
Moyenne	0	1	3
Ecart-type	3	4	10

Tableau 7 : Comparaison RTKLIB-LGO

Nous pouvons constater un écart moyen de 0 millimètre pour la détermination de la coordonnée Est et de 1 millimètre pour la coordonnée Nord. L'écart sur la détermination de l'altitude est plus important, il atteint en effet les 3 millimètres. De nombreux paramètres entrent en compte pour le traitement de données GNSS – calibration d'antennes, constellation de satellites, paramètres atmosphériques de troposphère et ionosphère, ... – aussi il est difficile d'expliquer précisément d'où viennent les différences effectivement constatées. Ceci étant, l'ordre de grandeur de ces dernières est suffisamment petit pour que nous puissions intégrer *RTKLIB* dans notre chaîne de traitement. Une validation plus poussée de *RTKLib* dans le cadre de notre étude serait nécessaire, par exemple par comparaison avec d'autres logiciels professionnels ou scientifiques. Cette validation de *RTKLib* sort néanmoins du cadre strict de ce TFE et nous a conduits à ne pas poursuivre plus avant.

Partie III : Mise en œuvre de l'estimation des composantes de la variance

Dans les deux parties précédentes, nous avons introduit les étapes préalables et nécessaires à la mise en œuvre de notre étude sur l'estimation des composantes de la variance. D'abord, nous avons présenté la VCE d'un point de vue théorique, indiqué son utilité, expliqué une mise en œuvre possible par la HVCE et précisé ce que l'on peut en attendre en termes de résultats. Nous avons poursuivi par la présentation de la chaîne de traitement et de mesure, c'est-à-dire par la phase d'acquisition et de préparation d'observations sur lesquelles mettre en œuvre l'estimation des composantes de la variance. Nous allons maintenant nous concentrer sur les résultats de la mise en œuvre de la VCE sur nos données. Plusieurs campagnes de mesures ont été réalisées entre fin avril et courant juin. Celle que nous avons choisie d'exploiter pour ce mémoire s'est déroulée du 9 au 11 juin 2016. C'est en effet cette campagne qui présente les résultats les plus exploitables et intéressants.

Notre objectif est d'étudier l'apport de la VCE dans le cadre de la combinaison de mesures topométriques et GNSS. Pour cela, nous mettons en œuvre trois ajustements différents :

- le premier sans faire intervenir l'estimation des composantes de la variance ;
- le second en constituant deux groupes VCE : l'un pour les observations topométriques, l'autre pour les mesures GNSS ;
- le troisième en proposant une configuration de groupes VCE différente : un groupe pour les observations angulaires, un pour les distances et un troisième pour les vecteurs GNSS ;

Au travers de ces trois ajustements, nous étudions et comparons l'évolution des coordonnées Nord, Est et Verticale du point C au cours du temps. Cette comparaison est faite au moyen de graphiques représentant la composante déterminée (Nord, Est ou verticale) à laquelle est soustraite la valeur théorique. Nous nous intéressons aussi à la précision de détermination des coordonnées en représentant les barres d'erreur à 2σ (qui correspondent à un seuil de confiance de 95%). L'unité de représentation choisie pour les différences de coordonnées et les barres d'erreur est le millimètre.

Nous avons choisi de ne présenter que les résultats du point C puisque ceux-ci sont caractéristiques des résultats sur l'ensemble du réseau.

Chapitre 1. Ajustement classique d'un problème combinant des observations de nature différente

La méthode classique d'ajustement par moindres carrés d'un problème combinant des observations topométriques et GNSS, telle qu'apprise lors de la formation d'ingénieur ESGT en cours de Géodésie IG4, est la suivante :

- ajustement des observations topométriques et GNSS de manière séparée ;
- pour chaque technique, calcul de l'estimateur du facteur unitaire de variance et pondération des mesures avec cette valeur ;
- ajustement combiné des mesures topométriques et GNSS ;
- calcul de l'estimateur du facteur unitaire de variance sur le calcul combiné ;

Dans la partie qui suit, nous allons présenter les résultats de cette méthodologie sur nos données.

1. Ajustement des observations topométriques

Dans un premier temps, nous allons vous présenter les résultats en termes de coordonnée verticale de l'ajustement des mesures topométriques seules. La figure 15 représente l'évolution au cours du temps de la coordonnée verticale du point C ainsi que les précisions à 2σ :

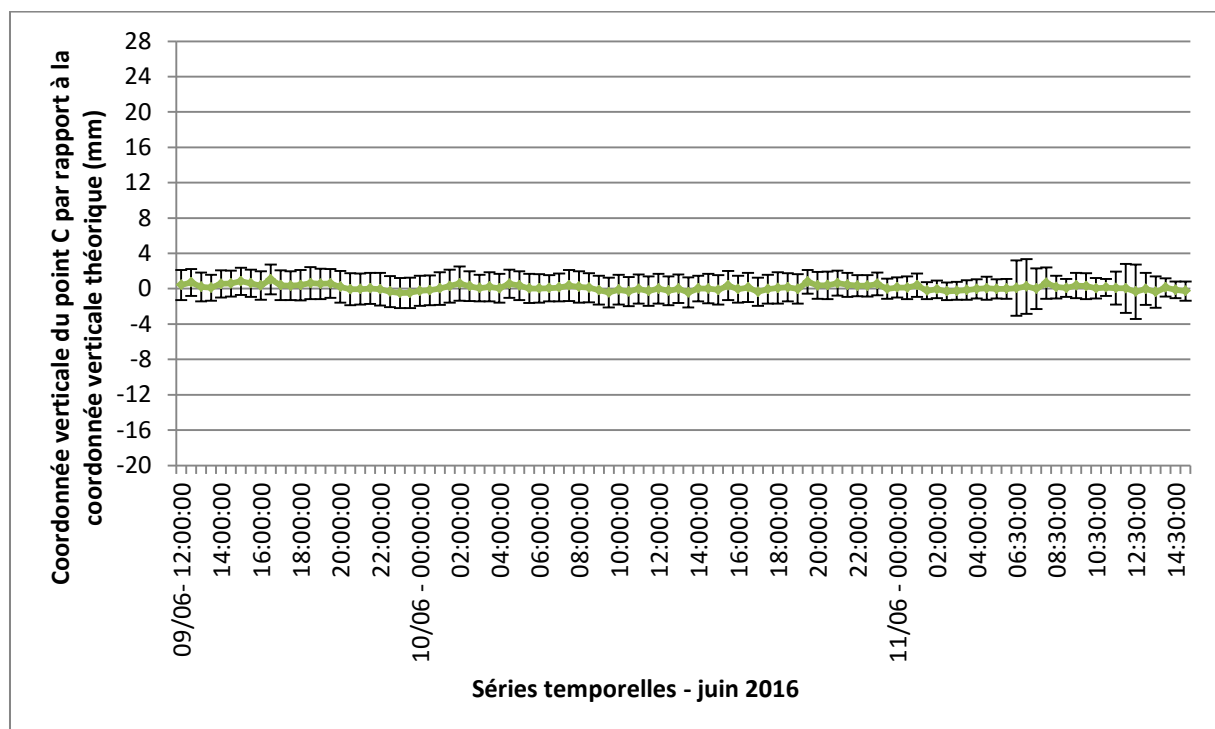


Figure 15 : Evolution de la coordonnée verticale du point C - cas de l'ajustement des données topométriques seules

Etude expérimentale de l'apport de la combinaison de mesures topométriques et GNSS

Sébastien Alliez-Dron

Sur cette figure, on constate des variations non significatives des coordonnées du point C au cours du temps, car inférieures à 1 millimètre crête à crête et bien inférieures à la précision de détermination au vu des barres d'erreur. On note également que les précisions de détermination de cette coordonnée verticale au cours du temps, qui varient de 1 à 3 millimètres, sont souvent supérieures à celles obtenues en pré-analyse (1 millimètre, cf. tableau 8, page 38). Cela est lié à l'influence de l'estimateur du facteur unitaire de variance dans le calcul dont l'évolution est représentée figure 16 :

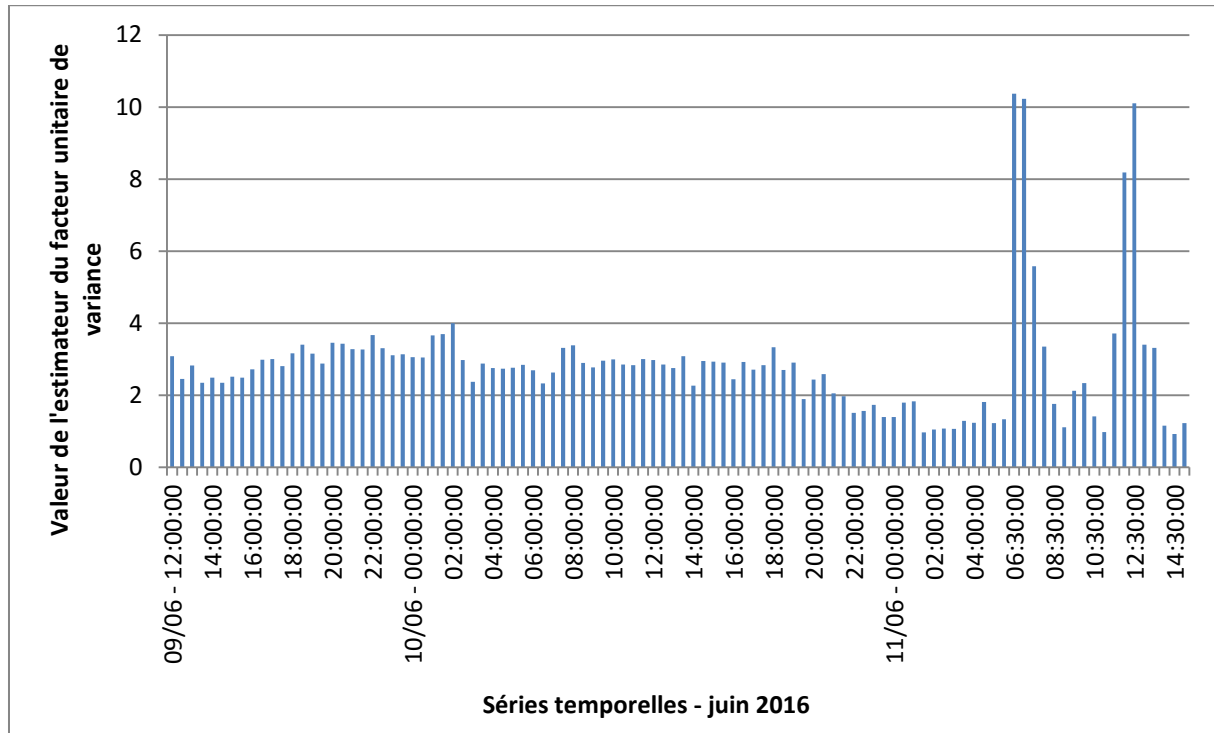


Figure 16 : Evolution de l'estimateur du facteur unitaire de variance au cours du temps – cas des observations topométriques seules

Comme le rappelle l'équation (9), l'estimateur du facteur unitaire de variance influe sur la précision de détermination d'une solution par moindres carrés. Si on observe l'évolution de ce dernier au cours du temps (cf. figure 16), nous comprenons l'évolution de la précision.

Ainsi, l'estimateur du facteur unitaire de variance connaît deux « pics » importants sur la période 6h30 – 12h30 le 11 juin, atteignant une valeur de 10 alors qu'il est en moyenne de 2.8 jusque-là. Ces deux « pics » entraînent une dégradation de la précision sur la détermination de la coordonnée verticale directement proportionnelle à la racine carrée de l'estimateur du facteur unitaire de variance. Ces dégradations sont aussi présentes lorsque l'on s'intéresse aux coordonnées horizontales dont l'évolution au cours du temps vous est présentée par les figures 17 et 18 suivantes :

Etude expérimentale de l'apport de la combinaison de mesures topométriques et GNSS

Sébastien Alliez-Dron

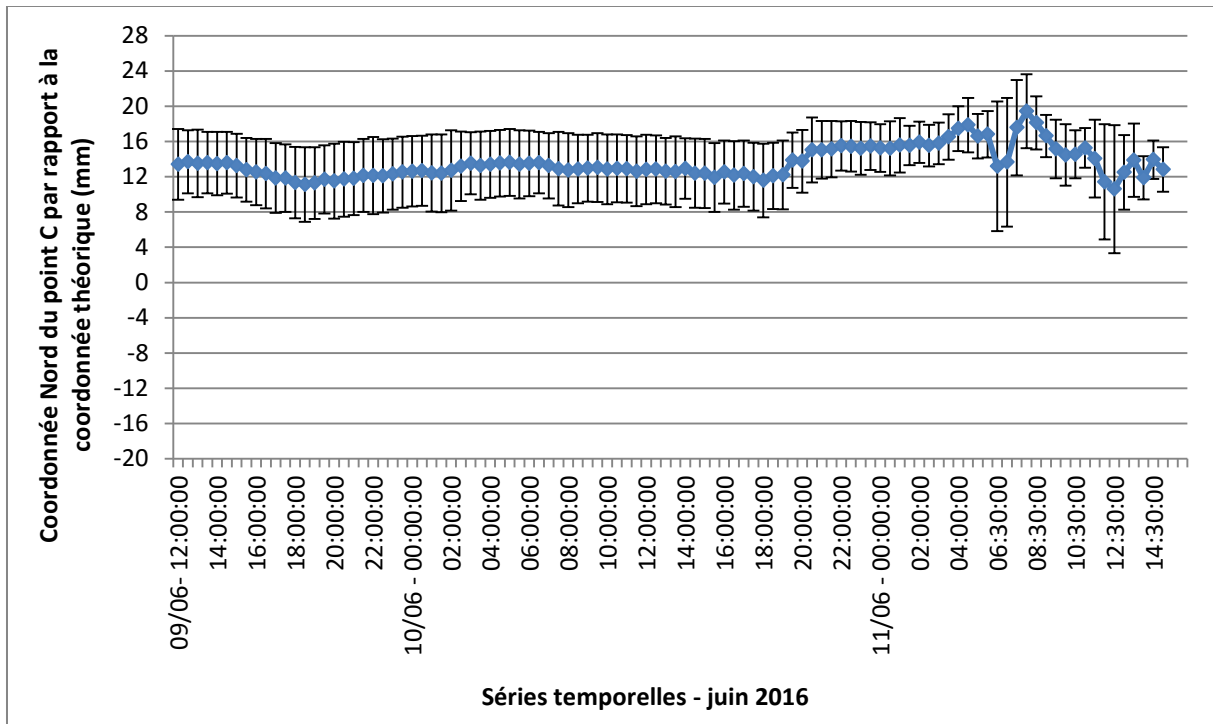


Figure 17 : Evolution de la coordonnée Nord du point C – cas de l'ajustement des observations topométriques seules

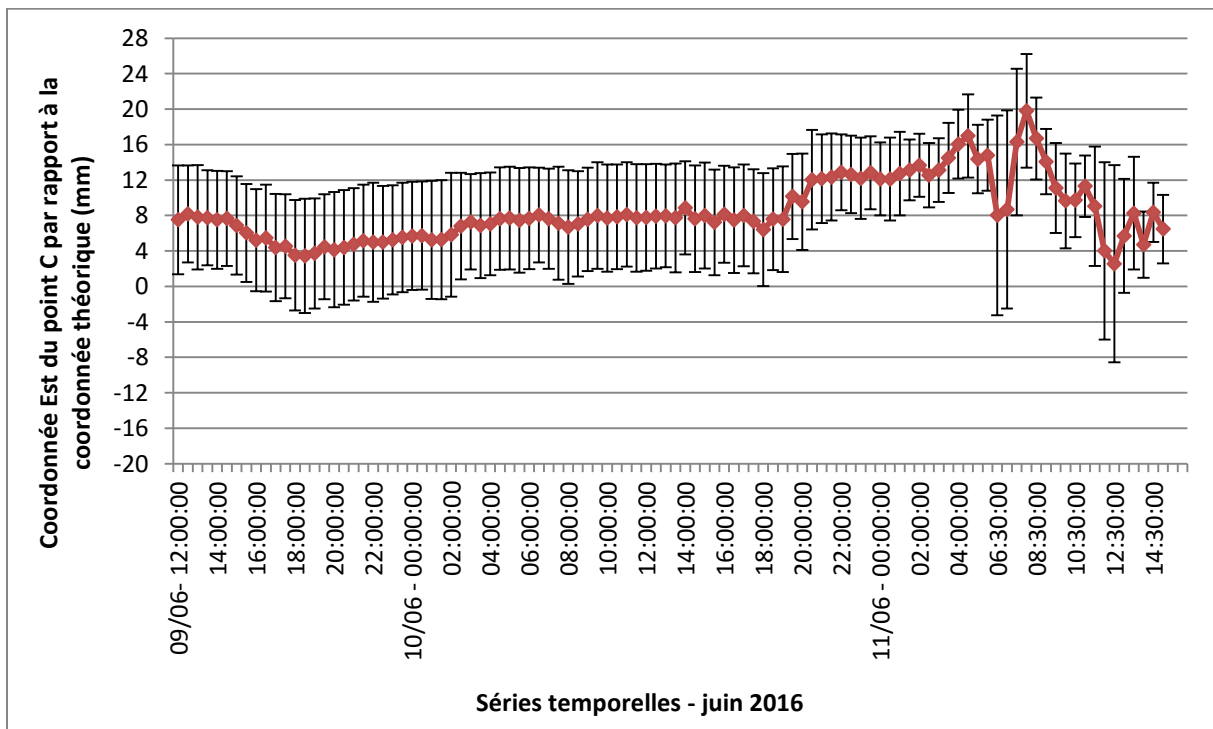


Figure 18 : Evolution de la coordonnée Est du point C – cas de l'ajustement des données topométriques seules

Etude expérimentale de l'apport de la combinaison de mesures topométriques et GNSS

Sébastien Alliez-Dron

L'évolution dans le temps des coordonnées horizontales peut être décomposée en trois phases :

- **phase 1** : du 09 juin à 12h au 10 juin à 00h : léger déplacement du point étant donné les variations de coordonnées observées au regard des précisions ;
- **phase 2** : du 10 juin de 02h à 18h : aucun mouvement significatif au vu des précisions ;
- **phase 3** : du 10 juin à 18h jusqu'à la fin de la session de mesure : déplacement significatif du point étant donné les variations de coordonnées observées au regard des précisions ;

Ces variations des coordonnées planes du point C peuvent s'expliquer de différentes manières. Il pourrait s'agir d'un mouvement effectif du point au cours du temps. Néanmoins, ce point n'est pas censé avoir bougé lors de cette campagne. Ce mouvement peut donc être lié aux conditions de mesures. Même si nous avons pris plusieurs précautions pour assurer la stabilité de l'instrumentation au cours du temps, certains paramètres n'ont pas pu être pris en compte :

- l'influence d'une exposition directe des instruments au soleil : la température des stations totales est alors plus élevée que celle de l'air ambiant ce qui cause une erreur sur la correction apportée aux mesures. La difficulté pour cette expérience était de protéger les stations totales du soleil sans gêner les observations GNSS ;
- les corrections météorologiques : les paramètres météorologiques ne sont levés que depuis une seule station (le capteur sur MAN2) et nous ne tenons alors pas compte de la présence éventuelle de gradients de températures entre les points ;
- les conditions météorologiques particulières pendant cette campagne : sur la période du 10 juin, de 18h jusqu'à la fin de la campagne, les précipitations étaient importantes sur le site. Cette situation est connue pour gêner la capacité des stations totales à centrer automatiquement les prismes. Cela peut également provoquer des vibrations liées au montage particulier utilisé (support métallique permettant l'alignement d'un GPS, d'un prisme et d'une station totale) ;

L'objectif de ce travail est d'étudier l'apport de la mise en œuvre de l'estimation des composantes de la variance et non d'étudier les déformations du point. Ces variations de la détermination des coordonnées du point ne sont pas gênantes pour la suite de notre étude.

Concernant les précisions obtenues sur les coordonnées horizontales du point C, elles sont moins bonnes que celles prévues en pré-analyse. Là encore, la raison en est l'évolution au cours du temps de l'estimateur du facteur unitaire de variance (cf. figure 16). Si on réalise une pré-analyse du réseau topométrique seul, les précisions attendues sur les coordonnées du point C sont indiquées dans le tableau 8 suivant :

	Point C
Intervalle de confiance 1D (mm)	1.0
½ gd axe ellipse de confiance (mm)	4.6

Etude expérimentale de l'apport de la combinaison de mesures topométriques et GNSS

Sébastien Alliez-Dron

½ pt axe ellipse de confiance (mm)	1.9
---	-----

Azimut (degrés)	113.6
------------------------	-------

Tableau 8 : Intervalle et ellipse de confiance de la pré-analyse - cas des observations topométriques seules (95% - 2.σ)

Sur la coordonnée Nord, la précision de détermination moyenne sur l'ensemble des sessions est de 3.7 millimètres, la plus grande est de 7.4 millimètres, la plus petite de 2.2 millimètres. Sur la coordonnée Est, les précisions sont moins bonnes. Nous avons ainsi une précision moyenne de 5.7 millimètres avec une valeur maximale de 11.3 millimètres et une valeur minimale de 3.3 millimètres.

Nous pouvons nous attendre à cette différence entre la précision de détermination des coordonnées Nord et Est. En effet, la direction de moins bonne détermination envisageable du point C est bien dans la direction Est (azimut de 113°, cf. tableau 8).

On remarque que les précisions sont clairement dégradées sur la période correspondant à la phase 3. Le tableau 9 qui suit regroupe d'ailleurs les précisions moyennes pour les coordonnées Nord, Est et Verticale avant et pendant cette période :

Périodes	Précision moyenne Nord (mm)	Précision moyenne Est (mm)	Précision moyenne Verticale (mm)
Du 09/06 à 12h00 au 10/06 à 18h00	3.9	5.9	1.7
Du 10/06 à 18h00 au 11/06 à 15h00	4.2	6.4	1.8

Tableau 9 : Précisions moyennes, comparatif le 11 juin - cas des observations topométriques seules

Pour la précision Nord, sur la période correspondant à la phase 3, la moyenne est de 4.2 millimètres alors qu'elle est de 3.9 le reste du temps. Pour la précision sur la coordonnée Est, la moyenne est de 6.4 millimètres contre 5.9 le reste du temps. Enfin, sur la Verticale, on passe de 1.7 millimètre sur les phases 1 et 2 à 1.8 millimètre sur la phase 3.

2. Ajustement des observations GNSS

Nous allons vous présenter maintenant les séries temporelles de coordonnées du point C obtenues en utilisant uniquement les données GNSS.

La figure 19 présente l'évolution de la composante verticale au cours du temps ainsi que les précisions à 2.σ :

Etude expérimentale de l'apport de la combinaison de mesures topométriques et GNSS

Sébastien Alliez-Dron

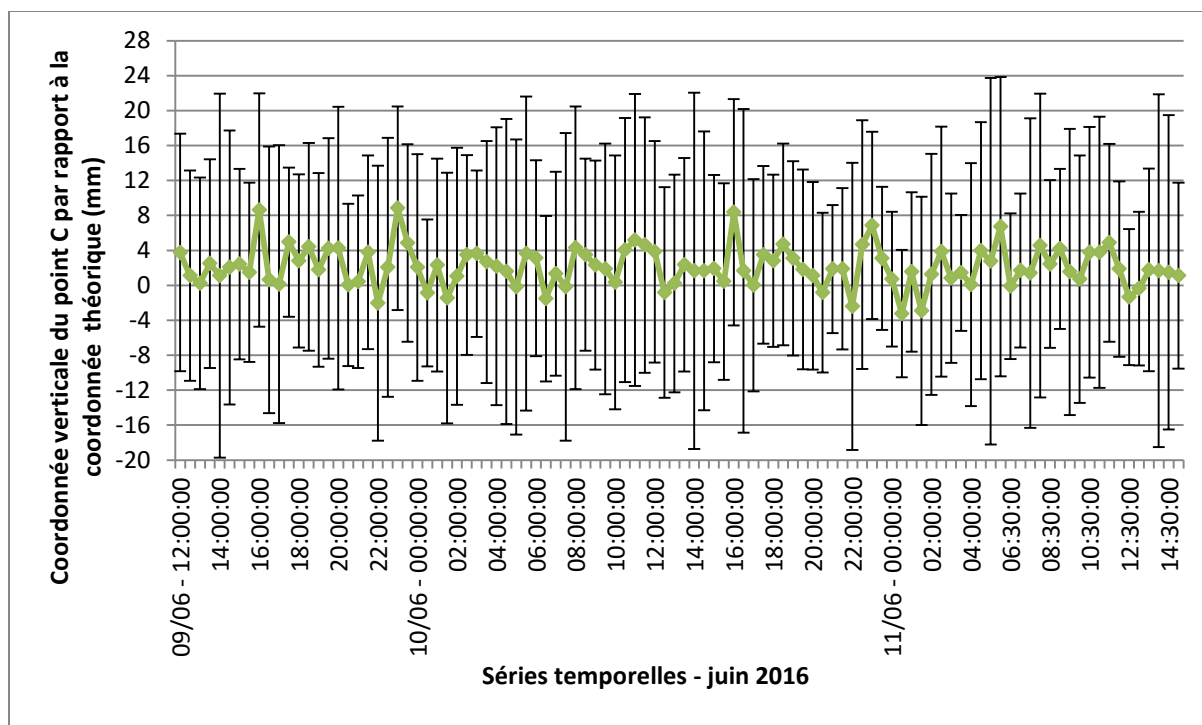


Figure 19 : Evolution de la coordonnée verticale du point C – cas de l'ajustement des observations GNSS seules

Nous pouvons observer plusieurs variations et une différence, crête à crête, maximale de 12 millimètres. Cependant, compte-tenu des précisions, ces variations ne sont pas significatives. En effet, contrairement aux données topométriques, les déterminations successives de la coordonnée verticale sont toujours contenues dans les barres d'erreur. La précision de détermination de la coordonnée verticale du point C, justement, varie entre 6 et 21 millimètres. Ces variations s'expliquent lorsque l'on s'intéresse à l'évolution de l'estimateur du facteur unitaire de variance, représentée figure 20 :

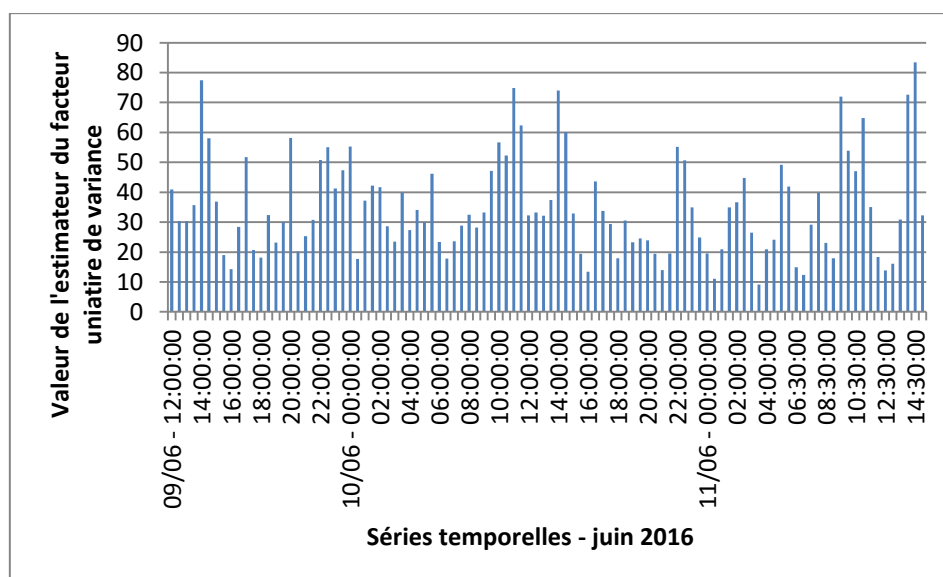


Figure 20 : Estimateur du facteur unitaire de variance au cours du temps – cas des observations GNSS seules

Etude expérimentale de l'apport de la combinaison de mesures topométriques et GNSS

Sébastien Alliez-Dron

Nous constatons ainsi que les variations de l'estimateur du facteur unitaire de variance de l'ajustement des données GNSS seules sont nombreuses par rapport à celles de l'ajustement des données topométriques seules. Sur l'ensemble des valeurs, l'écart-type est de 17. Outre les variations plus nombreuses et importantes, la valeur moyenne de l'estimateur du facteur unitaire de variance dans le cadre de l'ajustement des données GNSS est également plus importante que dans le cadre de l'ajustement présenté précédemment : 35 contre 2.8.

Les figures 21 et 22 présentent l'évolution des coordonnées Nord et Est du point C au cours du temps avec les précisions associées :

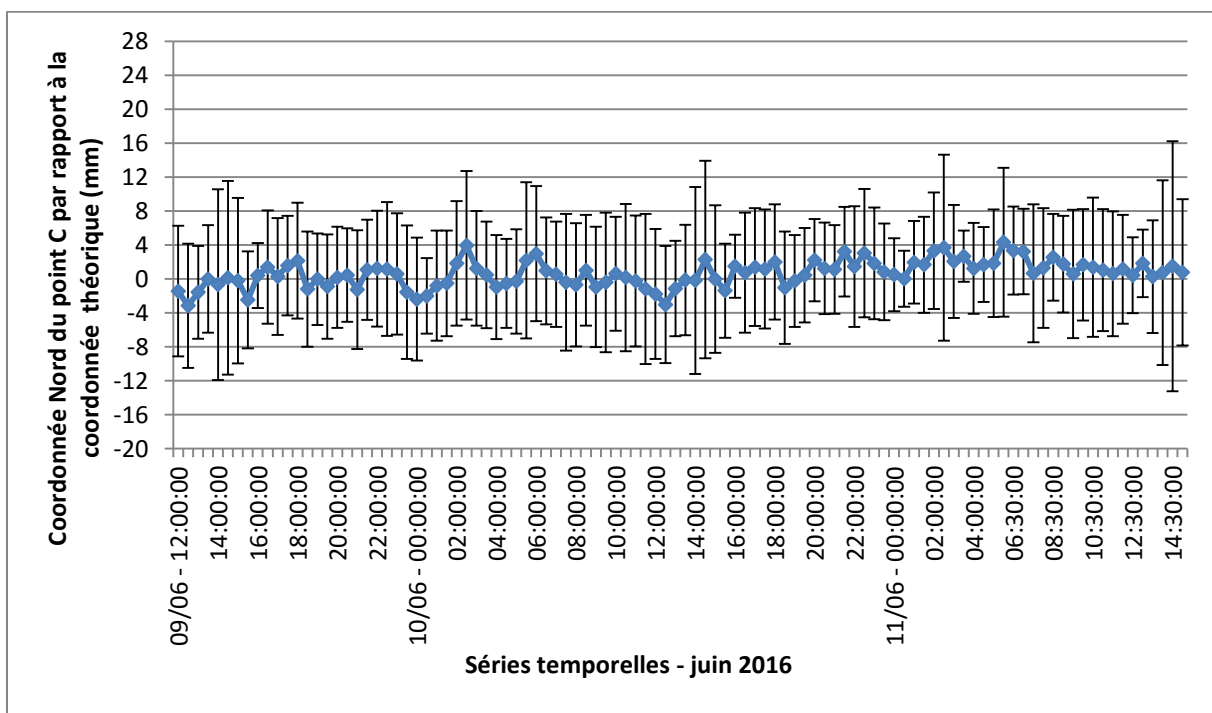


Figure 21 : Evolution de la coordonnée Nord du point C – cas de l'ajustement des observations GNSS seules

Etude expérimentale de l'apport de la combinaison de mesures topométriques et GNSS

Sébastien Alliez-Dron

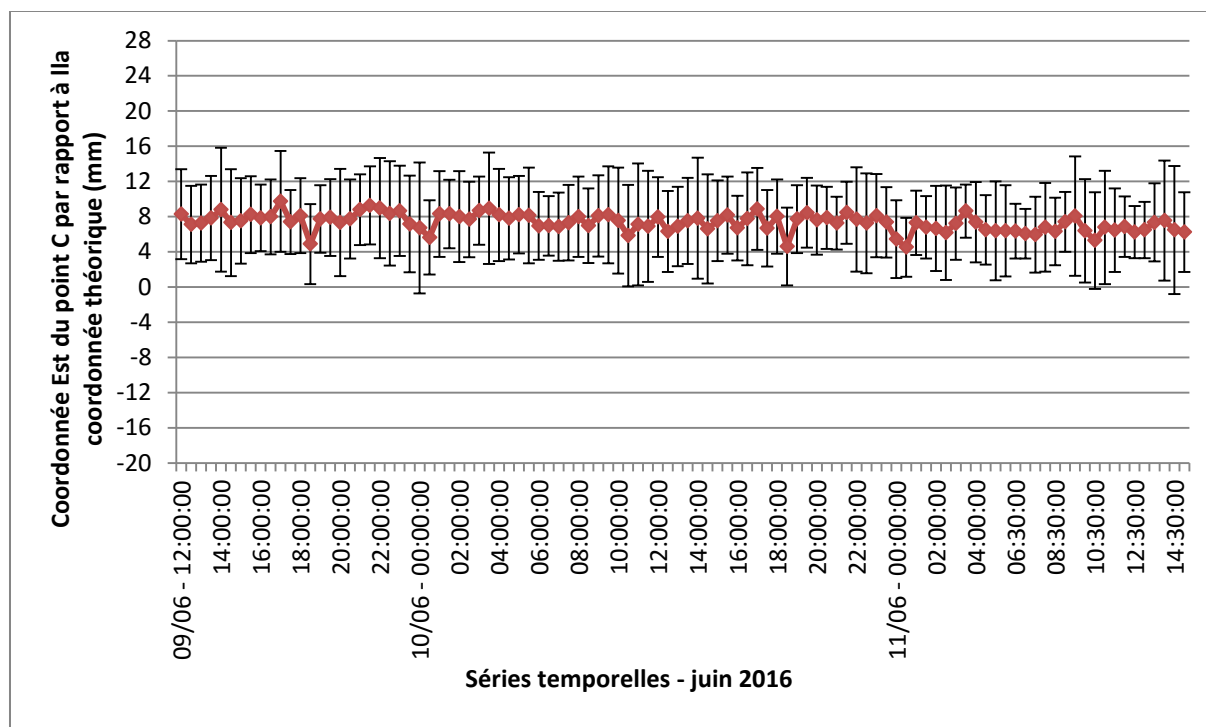


Figure 22 : Evolution de la coordonnée Est du point C – cas de l'ajustement des observations GNSS seules

Sur les composantes horizontales on constate un écart maximum, crête à crête, de 8 millimètres pour la coordonnée Nord et de 5 millimètres pour la coordonnée Est. Pour ces deux coordonnées, les variations sont plus nombreuses que celles observées dans le cas de l'ajustement des données topométriques seules. Ceci étant, elles restent non significatives par rapport aux précisions. Pour la coordonnée Nord, la précision varie entre 3 et 15 millimètres avec une valeur moyenne de 6.8 millimètres. Sur la coordonnée Est la précision varie entre 3 et 7 millimètres avec une valeur moyenne de 4.7 millimètres. Ces valeurs sont similaires à celles avancées par la pré-analyse du réseau dans le cas de l'ajustement de mesures GNSS uniquement et reportées tableau 10 :

	Point C
Intervalle de confiance 1D (mm)	9.8
½ gd axe ellipse de confiance (mm)	7.3
½ pt axe ellipse de confiance (mm)	7.3

Tableau 10 : Intervalle et ellipse de confiance de la pré-analyse - cas des observations GNSS seules

3. Ajustement global

Pour chaque session, les mesures topométriques et GNSS sont repondérées à l'aide de leurs estimateurs du facteur unitaire de variance respectifs. A l'issue de l'ajustement combiné des mesures topométriques et GNSS, nous obtenons de nouvelles coordonnées

Etude expérimentale de l'apport de la combinaison de mesures topométriques et GNSS

Sébastien Alliez-Dron

ajustées, ainsi que de nouvelles valeurs pour l'estimateur du facteur unitaire de variance. La figure 23 représente l'évolution de la coordonnée verticale du point C au cours du temps :

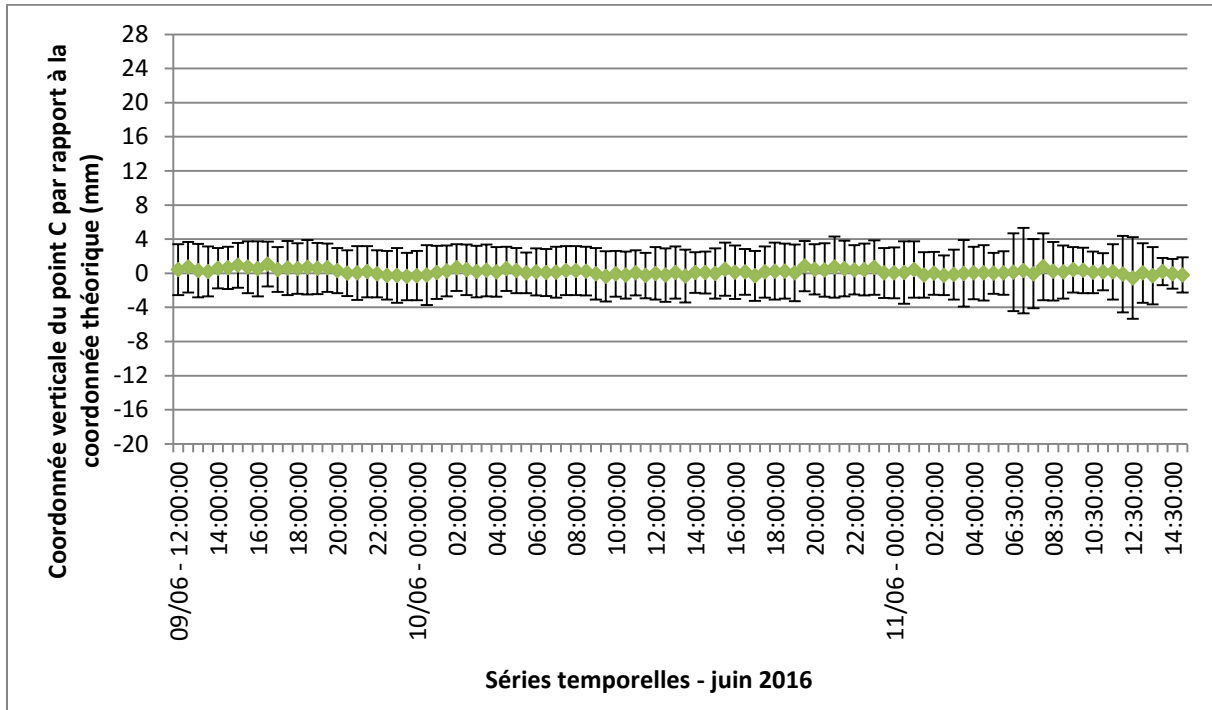


Figure 23 : Evolution de la coordonnée verticale du point C - cas de l'ajustement combiné des observations GNSS et topométriques

Les variations que l'on peut observer ne sont pas significatives car de l'ordre de 1 millimètre crête à crête ce qui est inférieur à la précision de détermination. Cette dernière varie légèrement jusqu'à 6h30 le 11 juin, date à laquelle nous pouvons observer des variations importantes de la valeur du facteur unitaire de variance dont l'évolution au cours du temps est représentée par la figure 24 :

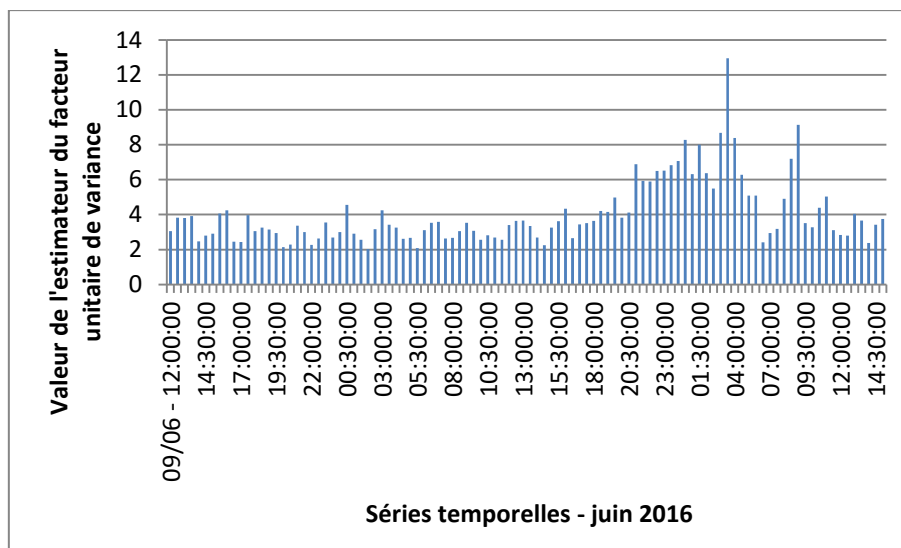


Figure 24 : Estimateur du facteur unitaire de variance au cours du temps – cas des observations GNSS et topométriques combinées

Etude expérimentale de l'apport de la combinaison de mesures topométriques et GNSS

Sébastien Alliez-Dron

Bien que les observations aient été repondérées par type d'instrument de mesures, on observe des valeurs de l'estimateur du facteur unitaire de variance fluctuantes au cours du temps. Ce dernier varie ainsi de 2 à 13.

Les figures 25 et 26 qui suivent représentent l'évolution des coordonnées Nord et Est du point C au cours du temps par rapport à des coordonnées théoriques :

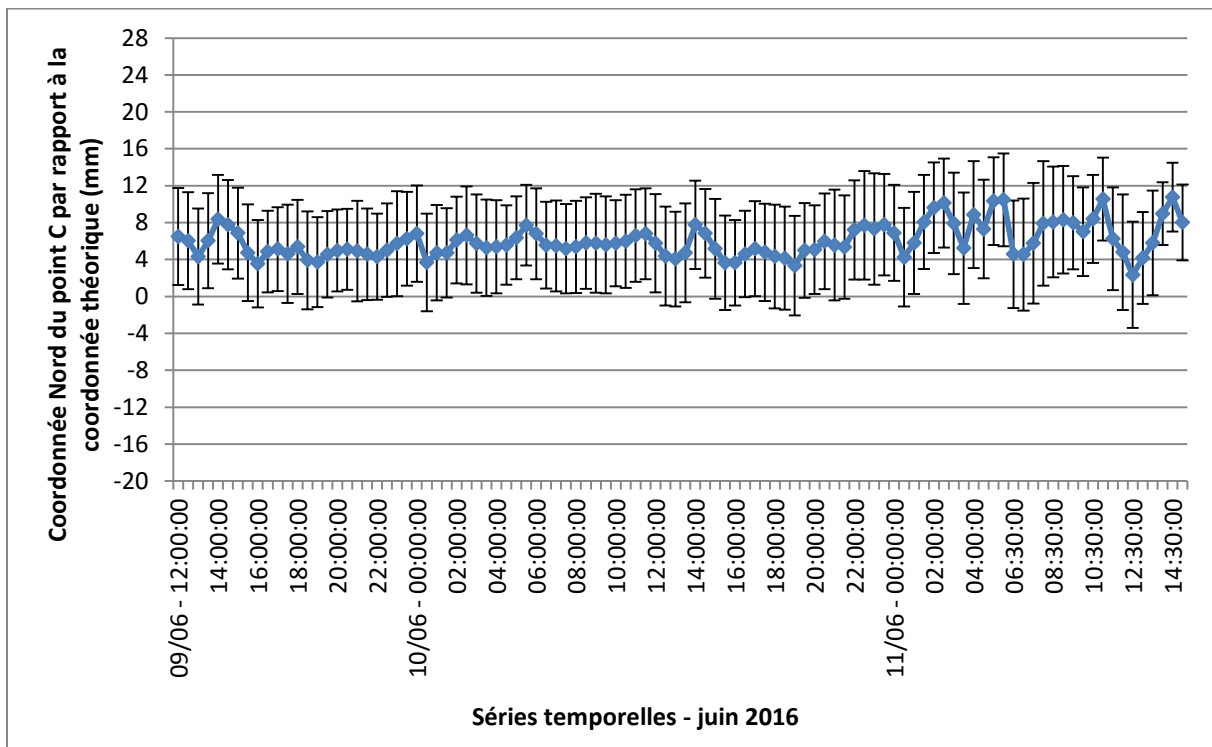


Figure 25 : Evolution de la coordonnée Nord du point C - cas de l'ajustement combiné des observations GNSS et topométriques

Etude expérimentale de l'apport de la combinaison de mesures topométriques et GNSS

Sébastien Alliez-Dron

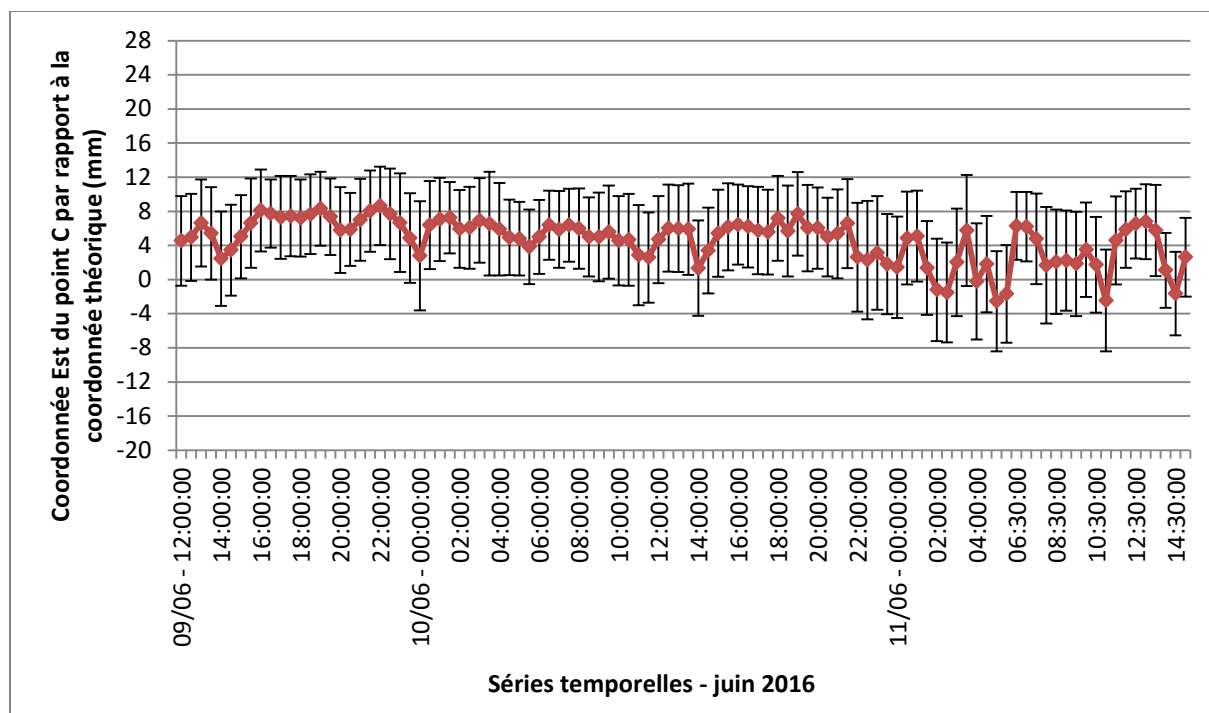


Figure 26 : Evolution de la coordonnée Est du point C - cas de l'ajustement combiné des observations GNSS et topométriques

Sur les composantes horizontales on constate un écart maximum, crête à crête, de 8 millimètres pour la coordonnée Nord et de 11 millimètres pour la coordonnée Est. Il y a plusieurs variations sur la détermination des deux coordonnées. Ceci dit, elles ne sont pas significatives au vu des précisions de détermination. Pour la coordonnée Nord, la précision varie entre 3 et 7 millimètres avec une valeur moyenne de 5 millimètres. Pour la coordonnée Est, les variations sont entre 4 et 7 millimètres avec une moyenne de 5 millimètres. La précision de détermination moyenne de la coordonnée verticale est de 3 millimètres. Ces valeurs sont supérieures à celles obtenues en pré-analyse qui s'avère être trop optimiste et dont les valeurs sont rappelées tableau 11 :

	Point C
Intervalle de confiance 1D (mm)	1.0
½ gd axe ellipse de confiance (mm)	3.3
½ pt axe ellipse de confiance (mm)	1.8

Tableau 11 : Intervalle et ellipse de confiance de la pré-analyse - cas de l'ajustement combiné des observations GNSS et topométriques

Il est intéressant de comparer l'évolution des coordonnées du point C entre les différents calculs. La figure 27 qui suit représente l'évolution de la différence entre la coordonnée théorique et la coordonnée Nord déterminée pour chaque session. Cette courbe est représentative des résultats obtenus sur l'ensemble des coordonnées :

Etude expérimentale de l'apport de la combinaison de mesures topométriques et GNSS

Sébastien Alliez-Dron

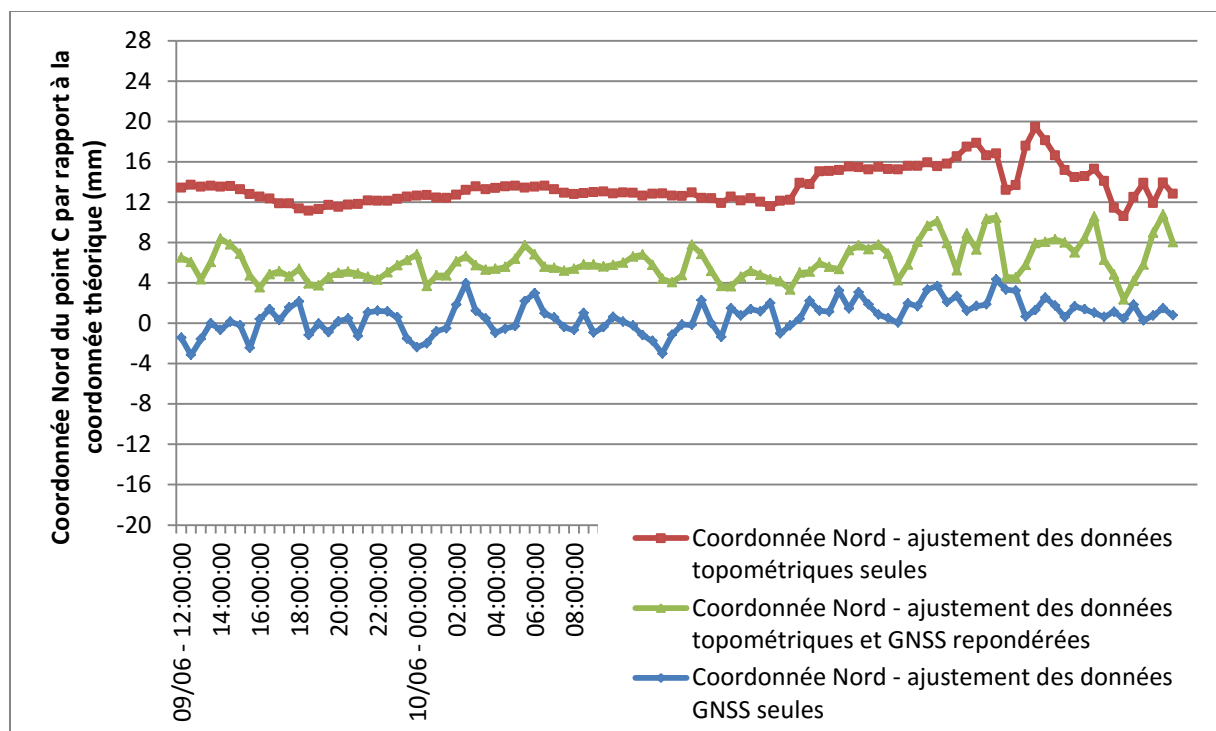


Figure 27 : Comparaison des solutions ajustées - coordonnée Nord du point C

Nous pouvons constater pour commencer que les coordonnées déterminées par les trois ajustements ne sont pas les mêmes. Le tableau 12 qui suit indique, pour chaque traitement, les valeurs moyennes d'écarts entre coordonnée et valeur théorique, ainsi que les valeurs moyennes sur les précisions obtenues (toujours à 2σ) :

	Coordonnées moyennes (mm)			Moyennes des précisions (mm)		
	Coordonnée Nord	Coordonnée Est	Coordonnée Verticale	Coordonnée Nord	Coordonnée Est	Coordonnée Verticale
Ajustement données topométriques seules	13.5	8.5	0.1	3.7	5.7	1.6
Ajustement données GNSS seules	0.6	7.3	2.1	6.8	4.7	12.8
Ajustement combiné	6.0	4.7	0.2	5.1	5.2	3.0

Tableau 12 : Comparaison sur les coordonnées et les précisions des ajustements des données topométriques seules, GNSS seules et combinées

La précision moyenne sur la coordonnée Nord de l'ajustement combiné est meilleure que celle de l'ajustement des données GNSS seules mais moins bonne que celle de l'ajustement des données topométriques seules. Il en est de même pour la coordonnée verticale. C'est l'inverse pour la coordonnée Est. Ainsi, la combinaison des techniques par cette méthode ne permet pas toujours d'améliorer la précision de détermination des coordonnées.

Chapitre 2. Ajustement mettant en œuvre deux groupes VCE

Le chapitre précédent présentait une méthode de combinaison des techniques topométriques et GNSS ne faisant pas appel à la VCE. Dans ce chapitre, nous étudions les résultats issus d'un ajustement dans lequel deux groupes d'estimation des composantes de la variance sont utilisés et les comparons à ceux issus du chapitre précédent.

1. Formation des groupes

Précédemment, nous avons expliqué que les groupes devaient être formés à partir d'observations présentant des propriétés équivalentes. Il n'y a cependant pas de règle stricte à suivre, aussi, de nombreuses configurations différentes sont possibles.

Nous avons créé deux groupes. Le premier correspond aux mesures topométriques, le second aux mesures GNSS. Il s'agit là d'utiliser la VCE pour pondérer relativement deux techniques différentes. De cette manière, nous sommes en mesure de comparer les résultats obtenus avec ceux issus d'une pondération manuelle.

2. Solutions de l'ajustement

La figure 28 représente l'évolution de la coordonnée verticale du point C au cours du temps par rapport à la coordonnée théorique pour un ajustement mettant en œuvre deux groupes d'estimation des composantes de la variance :

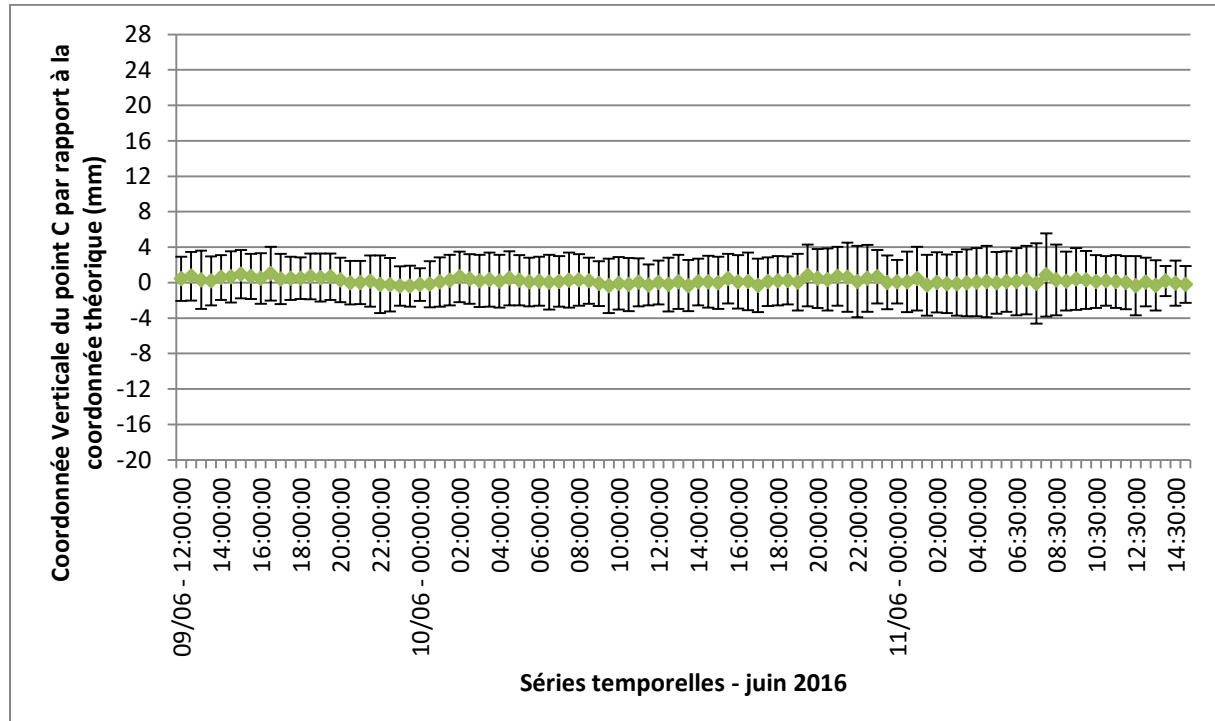


Figure 28 : Evolution de la coordonnée verticale du point C - cas de la mise en œuvre de 2 groupes VCE

Les variations ne dépassent pas les précisions, elles ne sont donc pas significatives. Ci-dessous, les figures 29 et 30 représentent l'évolution des coordonnées Nord et Est :

Etude expérimentale de l'apport de la combinaison de mesures topométriques et GNSS

Sébastien Alliez-Dron

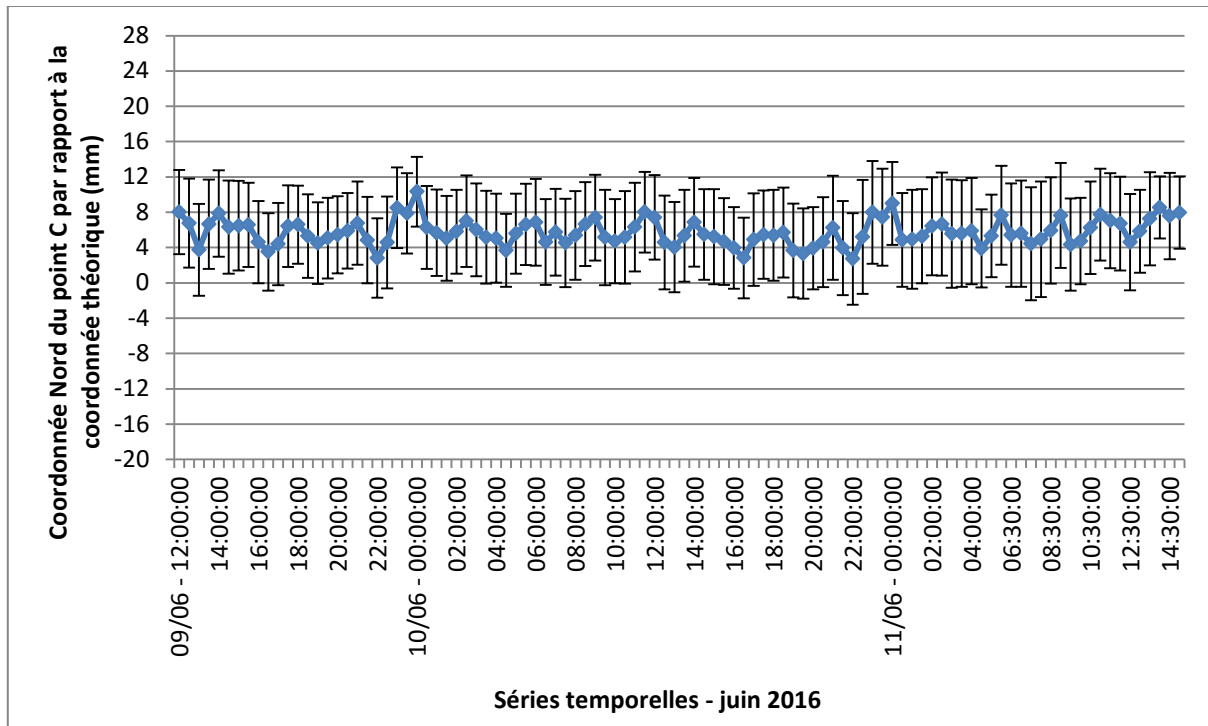


Figure 29 : Evolution de la coordonnée Nord du point C - cas de la mise en œuvre de 2 groupes VCE

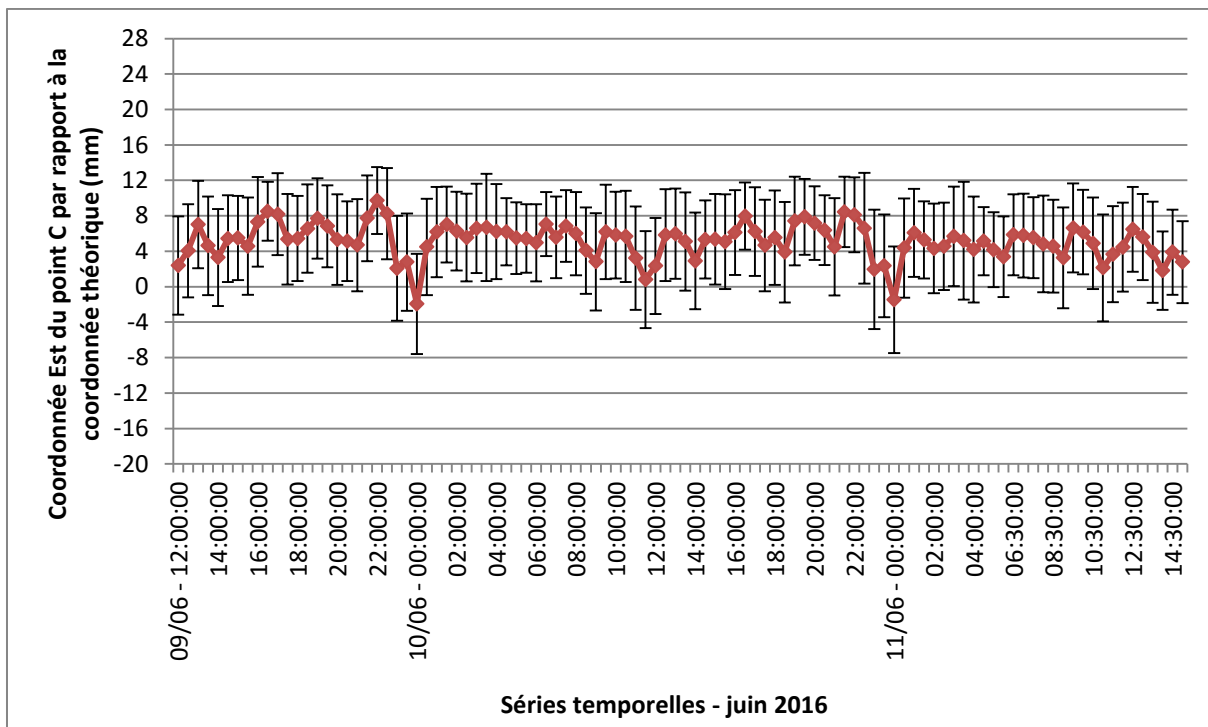


Figure 30 : Evolution de la coordonnée Est du point C - cas de la mise en œuvre de 2 groupes VCE

En ce qui concerne les précisions, que ce soit pour la coordonnée verticale ou les coordonnées horizontales, celles-ci sont toutes de tailles équivalentes. Le tableau 13 regroupe les écarts-types et les moyennes des précisions de détermination :

Etude expérimentale de l'apport de la combinaison de mesures topométriques et GNSS

Sébastien Alliez-Dron

	Coordonnée Nord	Coordonnée Est	Coordonnée Verticale
Moyenne sur la précision (mm)	5.0	5.0	3.0
Ecart-type sur la précision (mm)	0.5	0.7	0.5

Tableau 13 : Ecarts-types sur les barres d'erreur - cas de la mise en œuvre de 2 groupes VCE

L'écart-type moyen sur les précisions de chaque coordonnée est de l'ordre du dixième de millimètre. La précision de détermination est alors assez homogène entre les sessions. L'explication est à nouveau en lien avec l'équation (9) et avec l'estimateur du facteur unitaire de variance global. En effet, après un ajustement faisant intervenir l'estimation des composantes de la variance, le facteur unitaire de variance vaut forcément 1.

La précision moyenne de détermination de la coordonnée Nord est de 5 millimètres, tout comme la coordonnée Est. Celle de détermination de la coordonnée verticale est de 3 millimètres. Il n'y a donc pas d'amélioration notable avec les précisions moyennes de l'ajustement combinant des observations topométriques et GNSS repondérées manuellement (cf. tableau 12). En revanche, il n'y a plus de session particulièrement mauvaise en termes de précision.

Sur la coordonnée Nord, nous pouvons constater un écart maximal de 7 millimètres crête à crête. Cet écart est de 11 millimètres pour la coordonnée Est et de 1 millimètre pour la coordonnée verticale.

La figure 31 qui suit représente les différences entre les coordonnées verticales déterminées à partir de l'ajustement des mesures topométriques et GNSS combinées à celles issues de l'ajustement mettant en œuvre deux groupes d'estimation des composantes de la variance :

Etude expérimentale de l'apport de la combinaison de mesures topométriques et GNSS

Sébastien Alliez-Dron

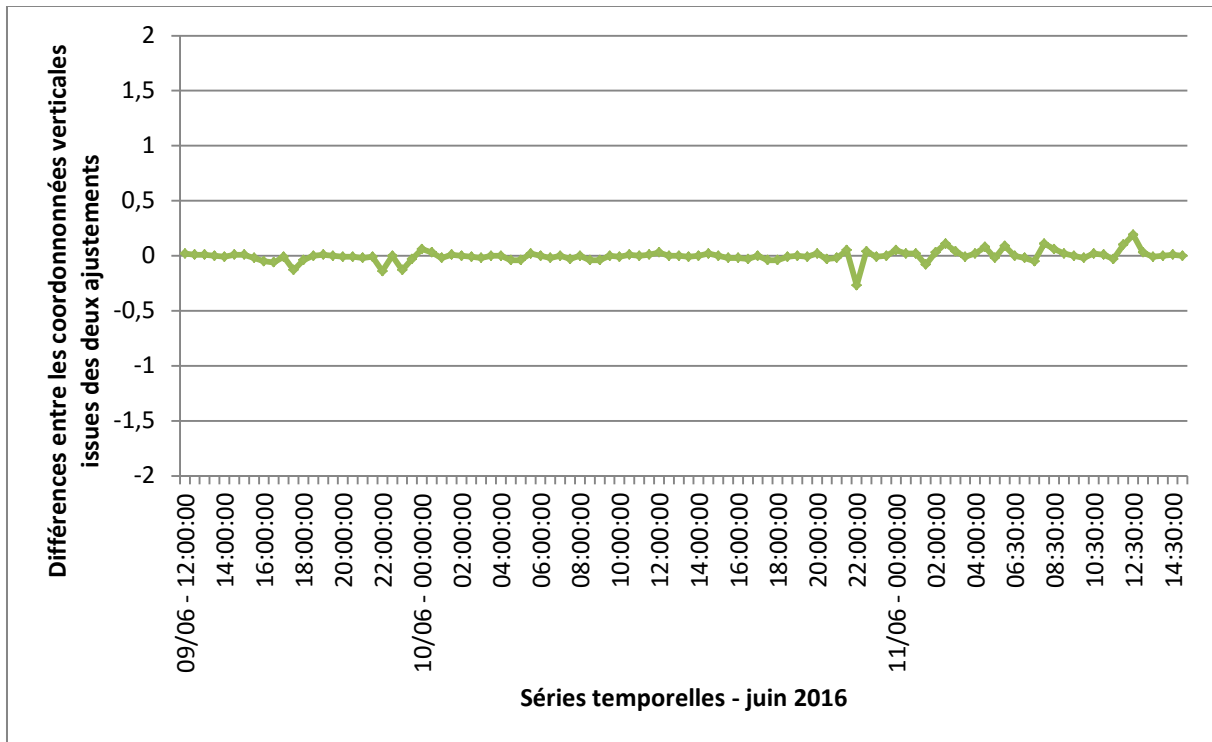


Figure 31 : Comparaison des solutions ajustées – composante verticale - repondération manuelle / 2 groupes VCE

Nous pouvons constater qu'il n'y a pas de différence notable entre les coordonnées issues des deux ajustements puisque la courbe est très proche de 0 à chaque session.

Les figures 32 et 33 qui suivent permettent la comparaison entre les deux ajustements sur les coordonnées horizontales :

Etude expérimentale de l'apport de la combinaison de mesures topométriques et GNSS

Sébastien Alliez-Dron

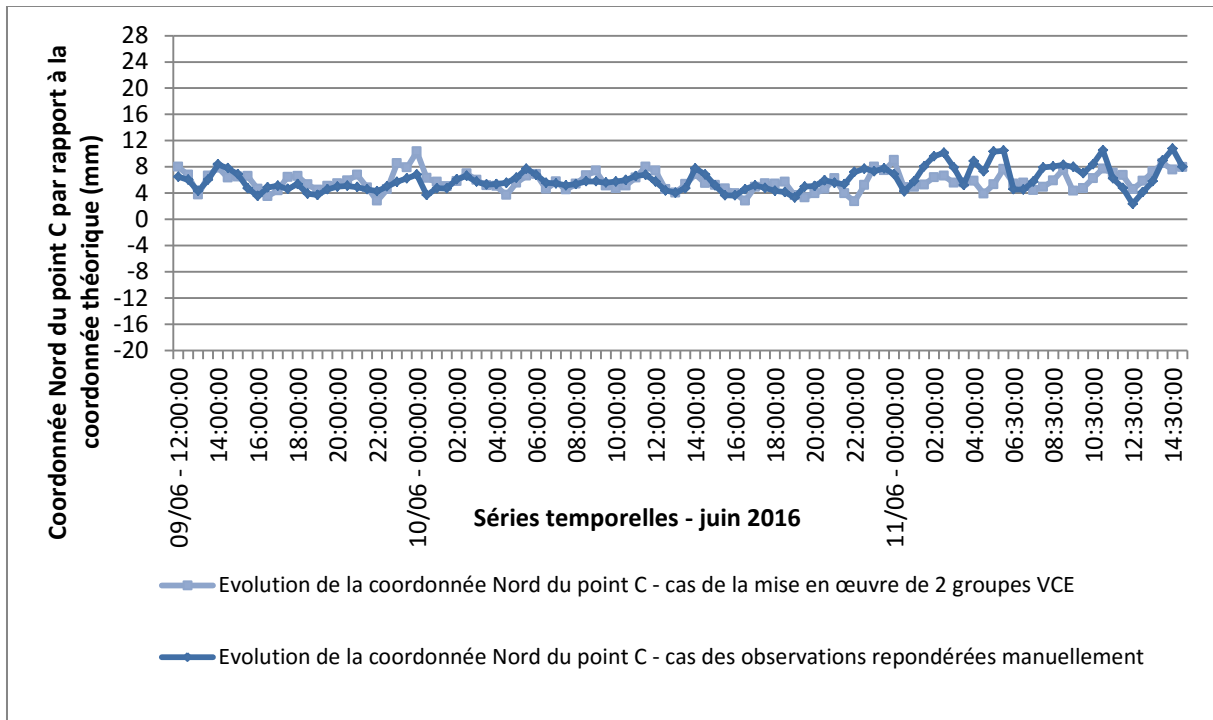


Figure 32 : Comparaison des solutions ajustées – coordonnée Nord - repondération manuelle / 2 groupes VCE

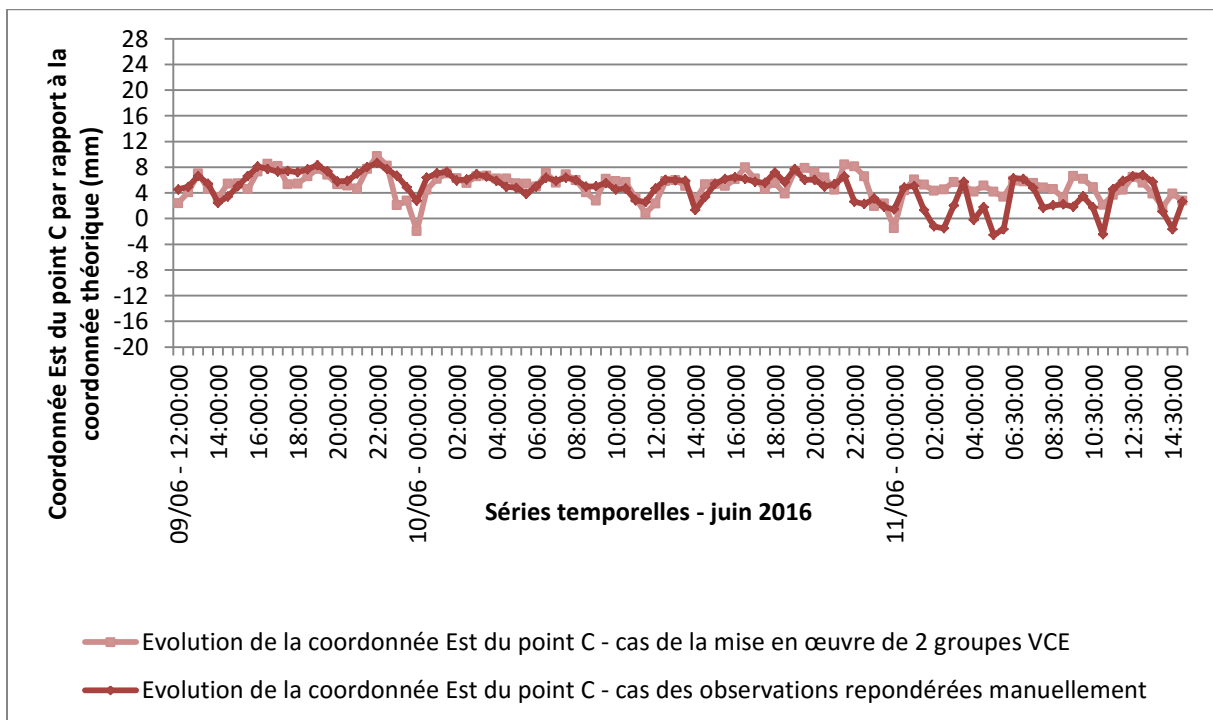


Figure 33 : Comparaison des solutions ajustées – coordonnée Est - repondération manuelle / 2 groupes VCE

Etude expérimentale de l'apport de la combinaison de mesures topométriques et GNSS

Sébastien Alliez-Dron

Que ce soit pour l'évolution de la coordonnée Nord ou de la coordonnée Est, on constate graphiquement que les variations sont moins nombreuses concernant l'ajustement mettant en œuvre deux groupes VCE. Ceci est confirmé par les écarts-types sur chaque coordonnée regroupés dans le tableau 14 :

	Ecart-type Nord (mm)	Ecart-type Est (mm)	Ecart-type Altitude (mm)
Repondération manuelle	1.7	2.5	0.3
2 groupes VCE	1.4	1.9	0.3

Tableau 14 : Ecart-types sur chaque coordonnée - repondération manuelle/HVCE

3. Coefficients HVCE

L'intérêt des méthodes d'estimation des composantes de la variance est la pondération relative des observations. La figure 34 retrace l'évolution des coefficients propres aux deux groupes au cours du temps :

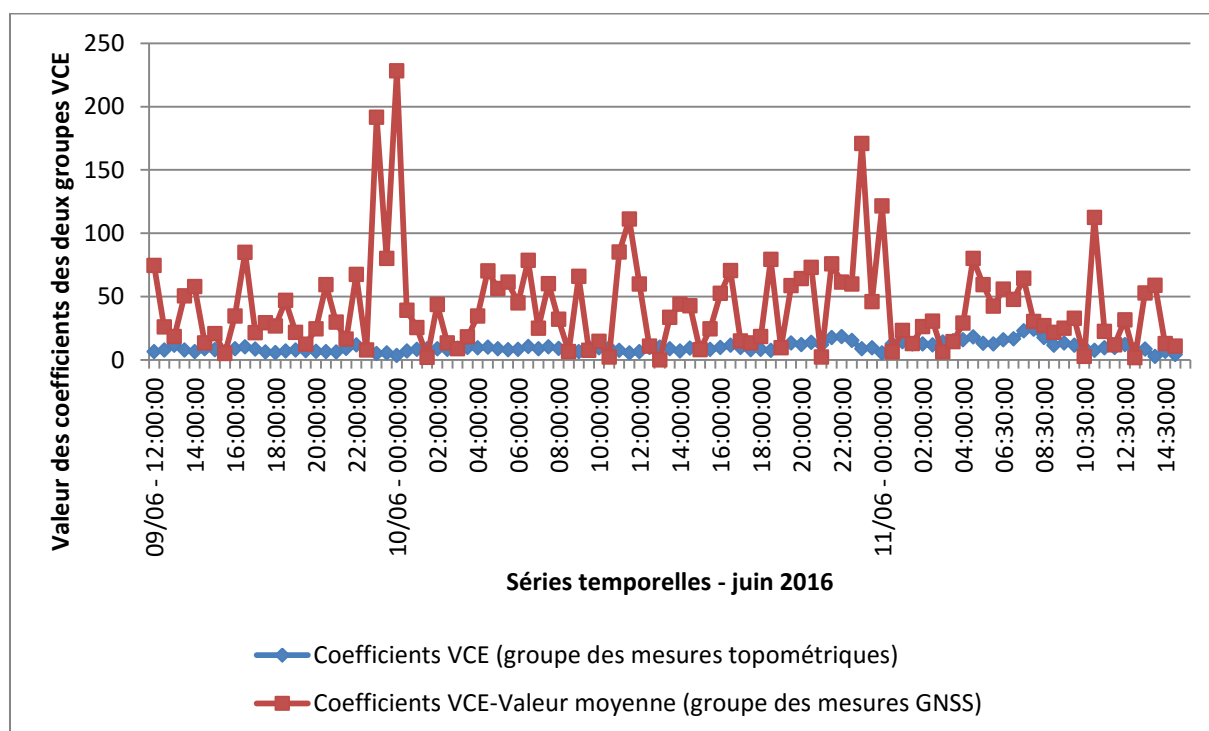


Figure 34 : Evolution des coefficients HVCE – 2 groupes VCE

Pour faciliter la représentation, la valeur moyenne des coefficients du groupe des mesures GNSS a été retirée aux coefficients du groupe des mesures GNSS à chaque session. Les coefficients propres au groupe des mesures topométriques sont représentés tels quels.

De cette figure nous pouvons retirer deux informations.

Etude expérimentale de l'apport de la combinaison de mesures topométriques et GNSS

Sébastien Alliez-Dron

D'abord, le coefficient affecté au groupe des mesures GNSS varie de manière beaucoup plus importante que celui affecté aux mesures topométriques. L'écart-type sur le coefficient affecté aux mesures GNSS est en effet de 57 alors qu'il est de 4 pour les mesures topométriques.

En outre, il apparaît que le coefficient VCE affecté aux observations GNSS à chaque session de mesures est plus important que celui affecté aux observations topométriques. Pour les mesures GNSS, le coefficient est en moyenne de 119 alors qu'il n'est que de 10 pour les mesures topométriques.

En se reportant à la partie 1.2.3, on se rappelle que la matrice P_k , propre au groupe d'observations k , est remplacée à chaque itération par $\frac{P_k}{s_k^2}$, avec s_k^2 le coefficient VCE du groupe k . Logiquement, plus le coefficient VCE est élevé, moins le poids accordé aux observations du groupe est important.

Conformément à ce que nous pouvions attendre, une importance plus grande est accordée aux observations topométriques. En revanche, il arrive parfois que cette importance soit moindre. Si nous nous rappelons des figures 17 et 18, retraçant respectivement l'évolution des coordonnées Nord et Est du point C obtenues après ajustement des observations topométriques seules, on peut faire une analogie entre les écarts constatés et l'évolution de la pondération relative des observations. Pour ces sessions de mesures, des écarts plus importants étant identifiables sur les mesures topométriques, la méthode VCE diminue l'importance qui leur est donnée. De la même façon, il arrive parfois que les observations topométriques prennent encore un peu plus le pas sur les observations GNSS.

Chapitre 3. Ajustement mettant en œuvre trois groupes VCE

Ici, nous mettons à nouveau en œuvre l'estimation des composantes de la variance en constituant trois groupes. Cette fois, il s'agit non pas de créer des groupes suivant les techniques utilisées, mais suivant la nature des mesures (angles, distances, GNSS).

Les groupes sont composés de cette manière :

- le 1^{er} correspond aux mesures de distances ;
- le 2nd correspond aux mesures angulaires ;
- le 3^{ème} et dernier correspond aux mesures GNSS ;

1. Comparaison avec les solutions de l'ajustement mettant en œuvre 2 groupes VCE

La figure 35 qui suit illustre l'évolution de la coordonnée Nord du point C, au cours du temps, dans le cadre d'un ajustement mettant en œuvre trois groupes d'estimation des composantes de la variance par rapport à l'ajustement précédent mettant en œuvre deux

Etude expérimentale de l'apport de la combinaison de mesures topométriques et GNSS

Sébastien Alliez-Dron

groupes. La coordonnée Nord est représentative de ce qui se passe pour les autres coordonnées.

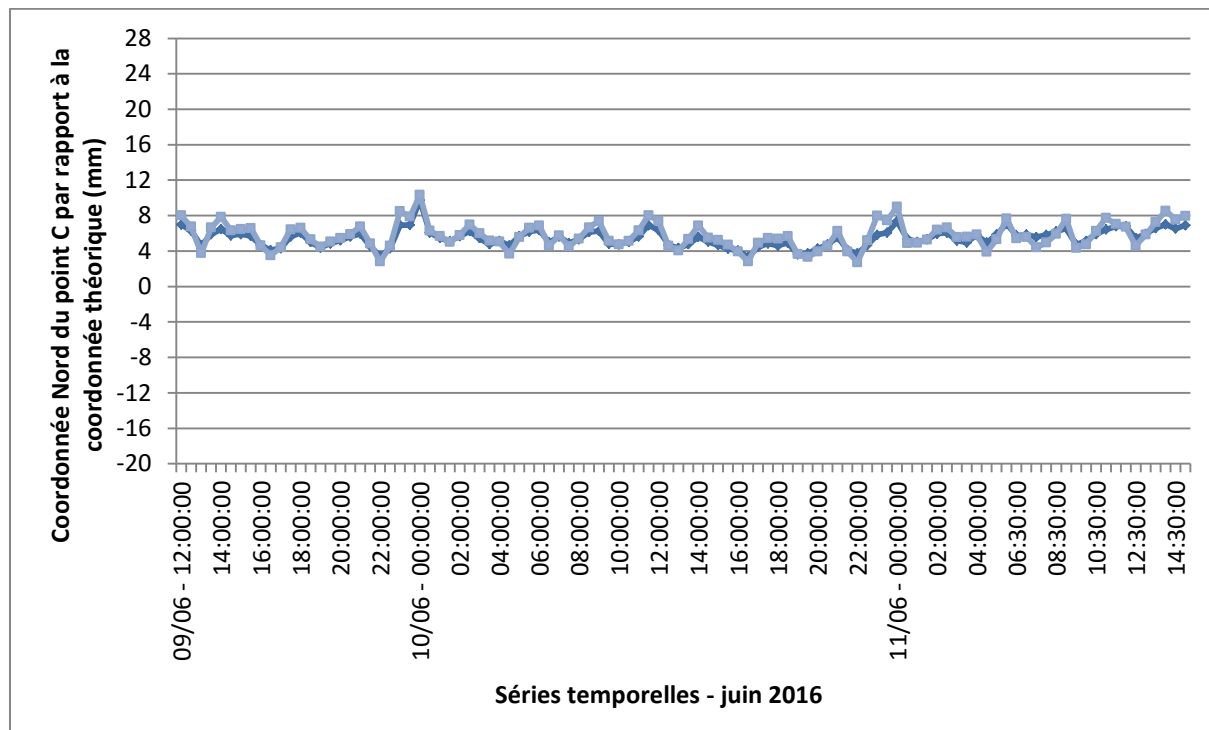


Figure 35 : Evolution de la coordonnée Nord du point C - cas de la mise en œuvre de 2 groupes VCE

Nous pouvons constater qu'il y a des variations entre les coordonnées déterminées par les deux types d'ajustement. Comme le montre le tableau 15 qui suit et qui regroupe les écarts-types des coordonnées Nord et Est et de l'altitude du point C pour les deux ajustements, la dispersion des données ajustées est moins importante dans le cadre de l'ajustement à 3 groupes :

	Ecart-type coordonnée Nord (mm)	Ecart-type coordonnée Est (mm)	Ecart-type coordonnée Verticale (mm)
Cas 2 groupes VCE	1.4	1.9	0.3
Cas 3 groupes VCE	0.9	1.5	0.3

Tableau 15 : Ecarts-types pour l'ajustement à 2 et 3 groupes VCE

Pour la coordonnée Nord, la différence entre les deux écarts types est de 0.5 millimètre. Cette différence est de 0.4 millimètre sur la coordonnée Est. Il n'y a pas de différence sur la verticale.

Etude expérimentale de l'apport de la combinaison de mesures topométriques et GNSS

Sébastien Alliez-Dron

Le tableau 16 qui suit apporte d'autres informations :

	Ecart moyen (coordonnées calculées – coordonnées théoriques) (mm)			Moyennes des précisions (mm)		
	Coordonnée Nord	Coordonnée Est	Coordonnée Verticale	Coordonnée Nord	Coordonnée Est	Coordonnée Verticale
Ajustement combiné	6.0	4.7	0.2	5.1	5.2	3.0
Ajustement mettant en œuvre 2 groupes VCE	5.8	5.2	0.2	5.1	5.0	3.0
Ajustement mettant en œuvre 3 groupes VCE	5.5	6.4	0.2	3.6	4.9	3.9

Tableau 16 : Comparaison sur les coordonnées et les précisions des ajustements des données combinées, 2 groupes VCE et 3 groupes VCE

Concernant la coordonnée verticale, les trois solutions moyennes déterminées sont identiques mais la précision de détermination lorsque 3 groupes VCE sont mis en œuvre est moins bonne. Sur la coordonnée Nord, nous constatons un écart de 0.5 millimètre entre l'ajustement combiné et l'ajustement mettant en œuvre trois groupes VCE. Cet écart est de 0.3 millimètre entre l'ajustement mettant en œuvre deux groupes et celui qui met en œuvre trois groupes. Cependant, au vu des précisions, ces écarts ne sont pas significatifs. Sur la coordonnée Est, il y a 1.2 millimètre entre l'ajustement mettant en œuvre trois groupes et celui qui en fait intervenir deux. Cet écart se porte à 1.7 millimètre par rapport à l'ajustement combiné.

Nous aurions pu nous attendre à ce que la précision s'améliore sur la détermination des trois composantes en augmentant le nombre de groupes. Cependant, si les coordonnées Nord et Est s'améliorent, ce n'est pas le cas de la coordonnée Verticale. Une étude plus approfondie, notamment sur le choix des groupes, sera nécessaire pour nous en apprendre plus à ce sujet.

2. Coefficients HVCE

Ici, nous nous intéressons aux évolutions des coefficients VCE affectés aux trois groupes au cours du temps. La figure 36 qui suit représente ces évolutions. L'axe vertical des coefficients des groupes des mesures de distances et des mesures angulaires est celui de droite. Ce choix a été fait pour plus de clarté.

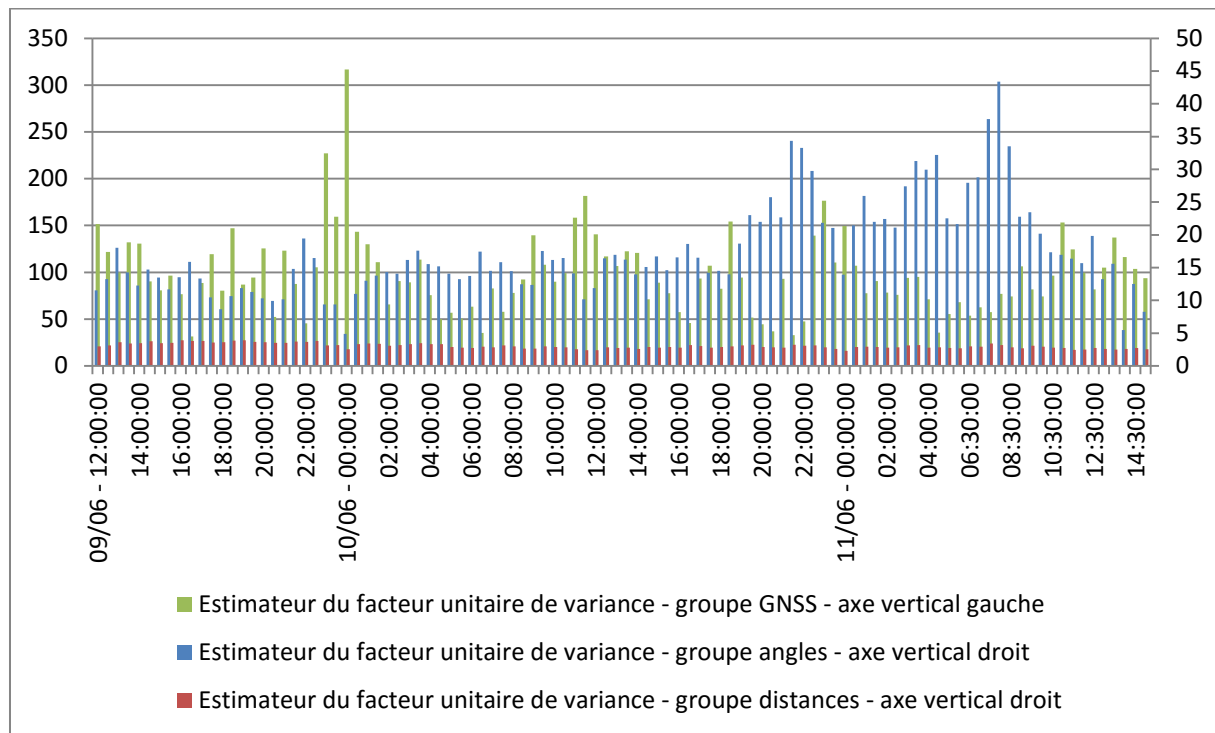


Figure 36 : Estimateurs du facteur unitaire de variance - 3 groupes VCE

Comme précédemment, l'importance accordée aux observations GNSS est moindre par rapport à celle accordée aux données topométriques. En revanche, ce qui est plus étonnant c'est que la HVCE semble privilégier les mesures de distances par rapport aux mesures angulaires alors qu'on considère souvent ces mesures comme étant plus précises. D'ailleurs, sur la phase 3, période à laquelle l'ajustement des mesures topométriques seules présentait des variations importantes, il semble que ce soient les mesures angulaires qui posent problème puisque le coefficient VCE affecté à ce groupe augmente.

Conclusion

L'un des axes de recherche de l'équipe L2G est l'analyse de déformations de faibles amplitudes. Ce Travail de Fin d'Etudes s'inscrit dans cette optique et étudie l'apport de la combinaison de mesures GNSS et topométriques. Il fait suite à plusieurs travaux menés au sein du laboratoire : la thèse conduite par Benoît Legru entre 2007 et 2011, les TFE d'Angélique Azzini (2010) et de Clément Guérin (2010), et surtout celui de Maylïs Bucher (2015).

La pondération relative des observations est la question principale soulevée lors de la combinaison de mesures dont la nature est différente. Pour répondre à cette interrogation, nous nous sommes tournés vers le principe de l'Estimation des Composantes de la Variance (VCE-Variance Component Estimation). Notre objectif était de mettre en œuvre la VCE sur des données acquises par nos soins et d'étudier son comportement.

Nous avons commencé par faire le point sur les travaux antérieurs mettant en œuvre la VCE dans le cadre de l'auscultation. Aucun ne semble traiter de son utilisation sur des séries temporelles de mesures GNSS et topométriques, ce qui justifie pleinement notre étude.

Nous avons ensuite mis en place un réseau grâce auquel nous avons pu obtenir des observations, sur une durée et une périodicité importante (plus de 48 heures, une position par demi-heure). L'acquisition de ces observations et leur traitement ont été automatisés grâce à la création d'une chaîne de mesure et de traitement.

Enfin, nous avons analysé les données. Dans cette étape, nous avons d'abord procédé à l'ajustement des observations GNSS et topométriques combinées et repondérées manuellement. Nous avons ensuite procédé à un ajustement mettant en œuvre deux groupes d'estimation des composantes de la variance. Ces derniers ont été créés selon les instruments depuis lesquels les mesures ont été prises. Un dernier ajustement à trois groupes VCE a été fait, selon la nature des mesures cette fois : observations angulaires, de distances et GNSS. Les résultats de ces trois ajustements ont été comparés. Ces différents traitements aboutissent à des coordonnées ajustées différentes pour les points du réseau et des écarts de l'ordre du millimètre peuvent être observés. En outre, alors que l'on pourrait logiquement penser que le fait d'augmenter le nombre de groupes VCE permettrait d'améliorer la précision, il semble que cela ne soit pas toujours le cas.

Si l'étude menée répond à certaines questions, elle en amène aussi d'autres. Ainsi, des variations constatées sur l'évolution des coordonnées laissent à penser que certains paramètres n'ont pas été pris en compte. Il serait intéressant d'étudier plus en détails l'influence de l'exposition directe des instruments au soleil, d'installer plusieurs capteurs pour une meilleure gestion des corrections météorologiques. Concernant la VCE, il existe plusieurs pistes d'expérimentation. Nous avons pensé, dans ce mémoire, à réaliser des mouvements contrôlés sur les points du réseau pour étudier le comportement de la HVCE dans ce cas. Cependant il ne nous a pas été possible, dans le temps imparti, d'obtenir des résultats exploitables. On peut également penser à ajouter volontairement une ou plusieurs

Etude expérimentale de l'apport de la combinaison de mesures topométriques et GNSS

Sébastien Alliez-Dron

fautes dans les observations pour étudier le comportement de la VCE et sa capacité à indiquer la présence de cette faute.

Ce sujet m'a permis de mobiliser des compétences variées. L'automatisation d'instruments, la mise en place d'une chaîne de traitement et de mesure, l'analyse des données qui en sont issues, l'utilisation de la VCE pour gagner en précision sont autant de notions qui me serviront dans le monde professionnel. Je souhaite en effet orienter ma vie active vers le domaine de la mesure de précision et ce Travail de Fin d'Etudes s'inscrit pleinement dans cet objectif.

Table des tableaux

Tableau 1 : Régions de confiance 2D	16
Tableau 2 : Fiabilités locales.....	17
Tableau 3 : Régions de fiabilité 2D.....	18
Tableau 4 : Précisions d'acquisition du capteur Vaisala PTU 200, source : User Manual	26
Tableau 5 : Constantes d'addition.....	27
Tableau 6 : Paramètres de traitement RTKLIB	29
Tableau 7 : Comparaison RTKLIB-LGO.....	31
Tableau 8 : Intervalle et ellipse de confiance de la pré-analyse - cas des observations topométriques seules (95% - 2σ).....	37
Tableau 9 : Précisions moyennes, comparatif le 11 juin - cas des observations topométriques seules.....	37
Tableau 10 : Intervalle et ellipse de confiance de la pré-analyse - cas des observations GNSS seules.....	40
Tableau 11 : Intervalle et ellipse de confiance de la pré-analyse - cas de l'ajustement combiné des observations GNSS et topométriques.....	43
Tableau 12 : Comparaison sur les coordonnées et les précisions des ajustements des données topométriques seules, GNSS seules et combinées	44
Tableau 13 : Ecarts-types sur les barres d'erreur - cas de la mise en œuvre de 2 groupes VCE	47
Tableau 14 : Ecarts-types sur chaque coordonnée - repondération manuelle/HVCE	50
Tableau 15 : Ecarts-types pour l'ajustement à 2 et 3 groupes VCE.....	52
Tableau 16 : Comparaison sur les coordonnées et les précisions des ajustements des données combinées, 2 groupes VCE et 3 groupes VCE.....	53

Table des illustrations

Figure 1 : Mesures réalisées.....	15
Figure 2 : Régions de confiance 2D du réseau	18
Figure 3: Régions de fiabilité 2D du réseau.....	18
Figure 4 : Plan de situation du réseau	19
Figure 5 : Montage au point A	20
Figure 6 : Montage au point B.....	21
Figure 7 : Montage au point C.....	21
Figure 8 : Montage au point D	22
Figure 9 : Chaîne de traitement	23
Figure 10 : Principe de communication, source : GeoCOM Reference Manual	23
Figure 11 : Fonctionnement des tachéomètres	24
Figure 12 : Vue d'ensemble du fonctionnement Client/Serveur, source : GeoCOM Reference Manual	24

Etude expérimentale de l'apport de la combinaison de mesures topométriques et GNSS

Sébastien Alliez-Dron

Figure 13 : Chaîne de traitement des données topométriques	25
Figure 14 : Chaîne de traitement des données GNSS	28
Figure 15 : Evolution de la coordonnée verticale du point C - cas de l'ajustement des données topométriques seules	33
Figure 16 : Evolution de l'estimateur du facteur unitaire de variance au cours du temps – cas des observations topométriques seules	34
Figure 17 : Evolution de la coordonnée Nord du point C – cas de l'ajustement des observations topométriques seules	35
Figure 18 : Evolution de la coordonnée Est du point C – cas de l'ajustement des données topométriques seules	35
Figure 19 : Evolution de la coordonnée verticale du point C – cas de l'ajustement des observations GNSS seules	38
Figure 20 : Estimateur du facteur unitaire de variance au cours du temps – cas des observations GNSS seules	38
Figure 21 : Evolution de la coordonnée Nord du point C – cas de l'ajustement des observations GNSS seules ..	39
Figure 22 : Evolution de la coordonnée Est du point C – cas de l'ajustement des observations GNSS seules	40
Figure 23 : Evolution de la coordonnée verticale du point C - cas de l'ajustement combiné des observations GNSS et topométriques.....	41
Figure 24 : Estimateur du facteur unitaire de variance au cours du temps – cas des observations GNSS et topométriques combinées.....	41
Figure 25 : Evolution de la coordonnée Nord du point C - cas de l'ajustement combiné des observations GNSS et topométriques	42
Figure 26 : Evolution de la coordonnée Est du point C - cas de l'ajustement combiné des observations GNSS et topométriques	43
Figure 27 : Comparaison des solutions ajustées - coordonnée Nord du point C.....	44
Figure 28 : Evolution de la coordonnée verticale du point C - cas de la mise en œuvre de 2 groupes VCE	45
Figure 29 : Evolution de la coordonnée Nord du point C - cas de la mise en œuvre de 2 groupes VCE	46
Figure 30 : Evolution de la coordonnée Est du point C - cas de la mise en œuvre de 2 groupes VCE	46
Figure 31 : Comparaison des solutions ajustées – composante verticale - repondération manuelle / 2 groupes VCE	48
Figure 32 : Comparaison des solutions ajustées – coordonnée Nord - repondération manuelle / 2 groupes VCE	49
Figure 33 : Comparaison des solutions ajustées – coordonnée Est - repondération manuelle / 2 groupes VCE ..	49
Figure 34 : Evolution des coefficients HVCE – 2 groupes VCE.....	50
Figure 35 : Evolution de la coordonnée Nord du point C - cas de la mise en œuvre de 2 groupes VCE	52
Figure 36 : Estimateurs du facteur unitaire de variance - 3 groupes VCE.....	54

Bibliographie

[Amiri-Simkooei, 2007], Amiri-Simkooei A. R., Teunissen P. J. G., 2007, Least-squares variance component estimation, Springer-Verlag, 18 pages.

[Bähr *et al.*, 2007], Bähr H., Altamimi Z. et Heck B., 2007, Variance Component Estimation for combination of terrestrial reference frame, Universitätsverlag Karlsruhe, Schriftenreihe des Studiengangs Geodäsie und Geoinformatik, 69 pages.

[Baarda, 1964], Baarda W., 1964, A Testing Procedure for use in Geodetic Networks, Delft, Computing Centre of the Delft Geodetic Institute, 97 pages.

[Barrel and Sears, 1939], Barrell H., Sears J.E., 1939, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences, Vol. 238, No. 786, pp. 1-64.

[Yavuz *et al.*, 2011], Baykal O., Ersoy N., Yavuz E., 2011, Comparison of variance component estimation methods for horizontal control networks, International Journal of the Physical Sciences Vol. 6(6), pp. 1317-1324.

[Bergkvist, 2015], Bergkvist J., Mai 2015, Optimal Design of Network for Control of Total Station Instruments, Master of Science Thesis in Geodesy No.3135 TRITA-GIT EX 15-004, 65 pages.

[Bucher, 2015], Bucher M., 2015, La combinaison des mesures topométriques et GNSS, Travail de Fin d'Etudes pour l'obtention du diplôme d'ingénieur ESGT, Conservatoire National des Arts et Métiers, Ecole Supérieure des Géomètres et Topographes, 67 pages.

[Casparly, 2000], Casparly W. F., 2000, Concepts of network and deformation analysis, Monograph 11, School of Geomatic Engineering, The University of New South Wales, 183 pages.

[Sahin *et al.*, 1992], Cross P. A., Sahin M., P.C. Sellers, 1992, Variance component estimation applied to satellite laser ranging, Bulletin Géodésique, Volume 66, Issue 3, pp.284-295.

[Durand, 2015], Durand S., 2015, Topométrie de précision, cours de l'Ecole Supérieure des Géomètres et Topographes, Le Mans.

[Durand et Guérin, 2012], Durand S., Guérin C., 3^{ème} trimestre 2012, Validation du logiciel CoMeT d'ajustement de mesures topographiques, Revue XYZ – N°132.

[Fund *et al.*, 2010], Fund F., Morel L., Mocquet A., 2010, Assessment of ECMWF derived tropospheric delay models within the EUREF Permanent Network. GPS Solutions, doi: 10.1007/s10291-010-0166-8.

[Grafarend *et al.*, 1980], Grafarend E.W., Kleusberg A. et Schaggrin B., 1980, Assessment of satellite based and terrestrial measurement techniques in monitoring vertical deformation, FIG Working Week 2004, 16 pages.

Groupe Leica Geosystems, Leica TPS1200 GeoCOM Reference Manual, 184 pages.

[Horn *et al.*, 1975], Horn S.D., Horn R.A., Duncan D.B., 1975, Estimating heteroscedastic variances in linear models, Journal of the American Statistical Association, Vol. 70, No. 350, pp. 380-385.

Etude expérimentale de l'apport de la combinaison de mesures topométriques et GNSS

Sébastien Alliez-Dron

[Legru, 2011], Legru B., 2011, Mesures de déformation par combinaison de techniques géodésiques : auscultation par GPS et topométrie, Thèse de doctorat, Ecole Doctorale du Conservatoire des Arts et Métiers, Laboratoire de Géodésie et de Géomatique (L2G), 155 pages.

[Lucas, 1985], Lucas J.R., 1985, A variance component estimation method for sparse matrix applications, NOAA Technical Report NOS 111 NGS 33, U.S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, 18 pages.

[McCarthy et Petit, 2004], McCarthy, D.D. and G. Petit (eds.) (2004), IERS Conventions (2003), IERS Technical Note No. 32, Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main, Germany.

[Rao, 1971], Rao C.R., 1971, Estimation of variance and covariance components – MINQUE theory, Journal of multivariate analysis I, pp. 257-275.

[Searle, 1994], Searle S. R., 1994, An overview of covariance component estimation, Biometrics Unit, Cornell University, Ithaca, N.Y., U.S.A., 18 pages.

[van Loon, 2008], van Loon J., 2008, *Functional and stochastic modelling of satellite gravity data*, PhD thesis, Delft University of Technology, 247 pages.

[Welsch, 1978], Welsch W., 1978, A postenon Varianzenschätzung nach HELMERT, AVN, Vol 85 : 55-63.

Etude expérimentale de l'apport de la combinaison de mesures GNSS et topométriques

Objectif de l'étude : Répondre au problème de la pondération relative des observations lors de la combinaison de techniques de mesure par la mise en œuvre de l'Estimation des Composantes de la Variance (Variance Component Estimation – VCE).

Présentation théorique de la VCE

- **Objectif de la méthode :** estimer les pondérations relatives optimales entre les techniques.
- **Principe de fonctionnement :** décomposer la matrice de covariance sous la forme : $\Sigma_L' = \Sigma_0 + \sum_{i=1}^k s_i^2 \cdot \Sigma_i$
- De nombreuses méthodes VCE existent, la plupart sont équivalentes et dérivées de celle établie par **Helmert, en 1907** dont le **fonctionnement** est le suivant : choix des groupes et des coefficients VCE initiaux et formation des matrices normales N et N_k , puis, ajustement des observations. À partir de ces observations, calcul des nouveaux coefficients VCE puis calcul des nouveaux éléments de la matrice de pondération. Ce processus itératif se répète jusqu'à convergence des coefficients VCE.

Chaîne de mesure et de traitement

- **Site expérimental :** un réseau à quatre points a été installé sur le toit de l'ESGT, ci-contre, un plan de situation. Depuis les points A et B, nous effectuons des mesures topométriques. Nous calculons également les lignes de base AC, AD et BD. Avant d'effectuer des mesures, nous avons procédé à une phase de pré-analyse du réseau afin de savoir ce que nous pouvions attendre de cette configuration. En termes de **régions de confiance**, la configuration établie permet d'obtenir des précisions (à 2σ) de l'ordre de 2 et 3 millimètres. En termes de **fiabilité**, l'influence des fautes non détectables est de 2 à 3 millimètres selon la direction.

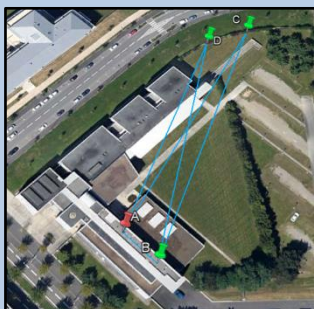


Figure 1 : Plan de situation



Figure 2 : Montage point A

- **Chaîne de mesure :** pour disposer d'observations en quantité suffisante sur une période de temps importante, nous avons automatisé les instruments de mesure. Pour cela, grâce au RaspberryPi, un micro-ordinateur (cf. figure 4), et au logiciel Cron, un code Python est exécuté à intervalle de temps régulier.



Figure 3 : Raspberry



Figure 4 : Port série



Figure 5 : Tachéomètre

- **Chaîne de traitement :** une fois les mesures acquises, plusieurs traitements sont appliqués. Les **données topométriques** sont corrigées des erreurs systématiques à savoir : corrections atmosphériques, corrections liées aux erreurs instrumentales, correction de la constante d'addition. Le fichier d'observations est ensuite découpé en plusieurs sessions de 30 minutes, les données sont moyennées et mises au format IOB. Les **données GNSS** brutes sont d'abord converties au format RINEX grâce à *teqc* qui permet aussi de les décomposer en sessions de 30 minutes. *RKTLIB*, logiciel libre intégré à nos scripts en ligne de commande permet ensuite le calcul des lignes de base qui sont finalement mises au format IOB.

Mise en œuvre de la VCE

3 ajustements sont réalisés. Le premier est fait sans VCE, les observations sont repondérées manuellement. Le second et le troisième font intervenir respectivement deux et trois groupes VCE selon la technique d'observation : mesures topométriques et GNSS et selon le type d'observation : distances, angles et observations GNSS. Ci-dessous, un comparatif entre les 3 ajustements sur la coordonnée Est du point C :

Comparaison des 3 ajustements – coordonnée Est du point C

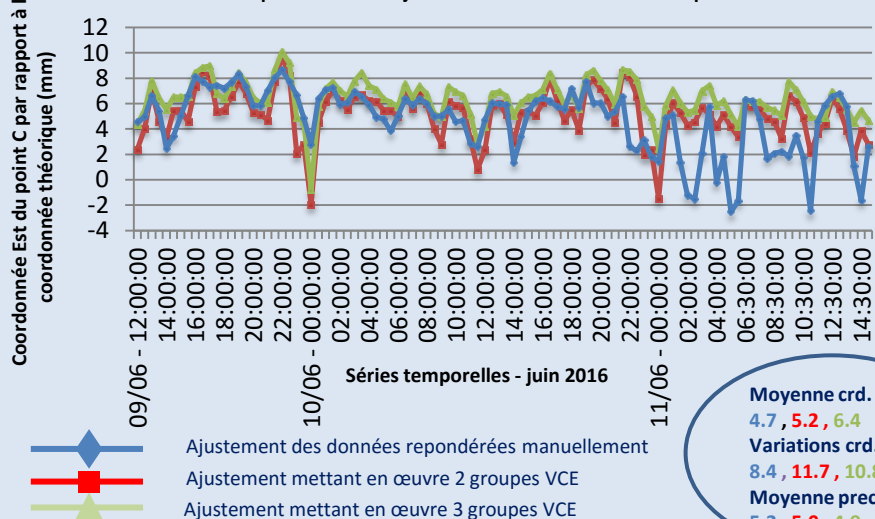


Figure 7 : Evolution de la coordonnée Nord au cours du temps – 3 ajustements

Ici, on constate que les coordonnées issues des trois ajustements ne sont pas les mêmes. Sur la coordonnée Est, on peut ainsi avoir un écart de 0.7 mm sur la moyenne des coordonnées entre l'ajustement sans VCE et celui avec 3 groupes. En outre, si l'on se fie aussi au tableau 1 ci-contre, le fait de créer plusieurs groupes VCE ne permet pas forcément d'améliorer la précision de détermination, cf. coordonnée verticale.

N	V
Prec. moyenne (mm)	Prec. moyenne (mm)
5.1	3.0
5.1	3.0
3.6	3.9

Tableau 1 : Précisions

Coefficients HVCE – 3 groupes

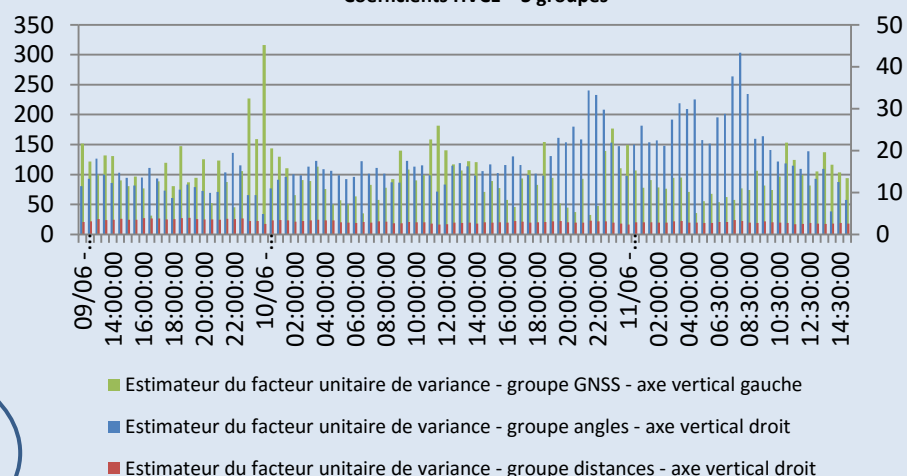


Figure 7 : Evolution des coefficients VCE au cours du temps

Ci-dessus la figure 7 retrace l'évolution des coefficients VCE des trois groupes au cours du temps. On constate que l'importance accordée aux observations GNSS est moindre par rapport à celle accordée aux observations topométriques. En revanche, le poids accordé aux observations angulaires est plus faible que celui accordé aux observations topométriques alors que l'on considère souvent ces dernières comme étant plus précises.

Ce travail a consisté en la mise en œuvre de l'estimation des composantes de la variance pour répondre au problème de pondération relative des observations lors de la combinaison d'observations de nature différente. Pour cela, il a fallu mettre en œuvre un réseau de mesure, automatiser une chaîne d'acquisition et une chaîne de traitement. Des recherches sont encore à effectuer comme l'étude de l'ajout d'un mouvement volontaire ou d'une erreur dans les mesures.

Etude expérimentale de l'apport de la combinaison de mesures GNSS et topométriques

Mémoire d'Ingénieur – spécialité Géomètre et Topographe – CNAM

RESUME

La combinaison de techniques ou de mesures de nature très différente, comme c'est le cas pour les mesures topométriques et GNSS, soulève la question de la pondération relative des observations. Une réponse à cette problématique est l'Estimation des Composantes de la Variance (VCE).

Dans ce rapport, nous proposons une étude pratique de l'Estimation des Composantes de la Variance. Pour cela, nous avons mis en place un réseau de mesures nous permettant d'effectuer des mesures GNSS et topométriques en continu. À partir de ces observations, nous avons réalisé plusieurs expérimentations : un ajustement pour lequel les observations ont été repondérées manuellement, un ajustement mettant en œuvre deux groupes VCE et enfin, un ajustement mettant en œuvre trois groupes VCE.

Mots clés : combinaison de techniques d'observation, topométrie, GNSS, Estimation des Composantes de la Variance, VCE, moindres carrés

SUMMARY

The combination of different techniques, as tachymetry and GNSS measures, raises the question of the relative weighting of these observations. An answer to this issue is the Variance Component Estimation (VCE).

In this dissertation, we suggest a practical study of the Variance Component Estimation. To do this, we have set up a network for GNSS and tachymetry measurements during several days. From these measures, we have made several experiments : a least-squares adjustment in which measures have been manually reweighted, an adjustment with two VCE groups and finally, an adjustment with three VCE groups.

Key words : measurement techniques combination, tachymetry, GNSS, Variance Component Estimation, VCE, least-squares