



HAL
open science

Optimisation de la compensation de réseaux d'auscultation temps réel

Gabriel Grillet

► **To cite this version:**

Gabriel Grillet. Optimisation de la compensation de réseaux d'auscultation temps réel. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2019. dumas-02959891

HAL Id: dumas-02959891

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02959891>

Submitted on 7 Oct 2020

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

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

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS
ECOLE SUPERIEURE DES GEOMETRES ET TOPOGRAPHES

MEMOIRE

présenté en vue d'obtenir

le DIPLOME D'INGENIEUR CNAM

SPECIALITE : Géomètre et Topographe

par

Gabriel GRILLET

Optimisation de la compensation de réseaux d'auscultation temps réel

Soutenu le 04 septembre 2019

JURY

Monsieur Stéphane DURAND
Monsieur Baptiste MARTEAU
Monsieur Stéphane DURAND

Président du jury
Maître de stage
Enseignant référent

Remerciements

Pour commencer je tiens à remercier mon entreprise d'accueil, Gexpertise Monitoring devenue DELTA Auscultation en janvier 2019, dirigée par Matthieu BOURDON, pour l'accueil qui m'a été réservé et les moyens mis à ma disposition malgré une période difficile pour l'entreprise.

Pour m'avoir accompagné pendant ces six mois, mon maître de stage, Baptiste MARTEAU, Ingénieur Géomètre Topographe - Data Manager, qui a proposé ce sujet de fin d'études avec Matthieu BOURDON. Ils m'ont accordé leurs confiances afin d'effectuer ce stage, et leurs disponibilités m'ont permis de le réaliser dans de bonnes conditions.

Je tiens à remercier également mon professeur référent, Stéphane DURAND, maître de conférences à l'ESGT. Pour nos échanges, pour ses conseils et pour ses réponses face à mes interrogations, qui m'ont permis d'avancer tout au long de ce stage.

Pour ces six mois passés à leur côté, pour leurs discussions variées ou pour l'aide qu'ils m'ont consacrée, je souhaite remercier l'ensemble du personnel de Montrouge, ainsi que ceux de Sèvres ou Boulogne-Billancourt que j'ai pu rencontrer. En particulier Ludovic BOCQUET, Amzal BENKHEMOU, Ulrich MAMBOU, Ismail MESKINI, Eric PERSON, ainsi que les chefs de projet Emeric SDEI, Raphaël LAURENT et Ilyass MOKHTARI. Merci aussi à Olivier, Ignace, Kawtar, Khawla, Sofia, Boualem, Anne-Sophie, Amina, Cheik, Christian, Lassana, Fayçal, Dumitru, Vera, Djamal, Samir, Guellor...

Pour finir je tiens à remercier ma famille, plus particulièrement mes parents qui m'ont permis de réaliser ces études et qui m'ont soutenu tout au long, ainsi que toutes les personnes avec qui j'ai passé ces trois dernières années d'études.

Liste des abréviations

ASCII : American Standard Code for Information Interchange

ATR : Automatic Target Recognition.

CCTP : Cahier des Clauses Techniques Particulières

CNAM : Conservatoire National des Arts et Métiers

EOLE : Est Ouest Liaison Express

ESGT : Ecole Supérieure des Géomètres et Topographes

FIVC : Fort d'Issy - Vanves - Clamart

gdtest : geodesign and testing

GDTMS : Geodesign and Testing Monitoring System

GeoMoS : Geodetic Monitoring System

mra : module de réfraction atmosphérique

SIM : Subscriber Identity Module

SGBD : Système de Gestion de Base de Données

SGP : Société du Grand Paris

SQL : Structured Query Language

TFE : Travail de Fin d'Etudes

VBA : Visual Basic for Applications

ZIG : Zone d'Influence Géotechnique

Table des matières

REMERCIEMENTS.....	2
LISTE DES ABREVIATIONS.....	3
TABLE DES MATIERES.....	4
INTRODUCTION	6
I PRESENTATION GENERALE	8
I.1 PRESENTATION DE LA CHAINE DE TRAITEMENT ACTUELLE DE DELTA AUSCULTATION.....	8
I.2 ETUDE DES BESOINS ET ENJEUX DE DELTA AUSCULTATION.....	9
I.3 EVOLUTIONS ENVISAGEABLES	10
I.3.1 Pilotage des stations totales	10
I.3.2 Calculs en réseaux	10
I.3.3 Stabilité des références	11
I.3.4 Réfraction atmosphérique.....	11
I.4 RESUME DES PROBLEMATIQUES	12
II PILOTAGE DES STATIONS TOTALES.....	12
II.1 ETABLISSEMENT DU CAHIER DES CHARGES	12
II.2 DEVELOPPEMENT DU LOGICIEL DELTA CONTROL	16
II.2.1 Structure des bases de données	16
II.2.2 Développement de l'interface en « PyQt5 »	18
II.2.3 Association des commandes GeoCOM.....	20
II.3 COMPTE RENDU QUALITE	22
III SOLUTION D'AJUSTEMENT EN RESEAU	23
III.1 PRESENTATION DU RESEAU ETUDIE	23
III.2 AUTOMATISATION DE L'AJUSTEMENT ET PREANALYSE	25
III.2.1 Automatisation.....	25
III.2.2 Préanalyse	27
III.3 OPTIMISATION DE L'AJUSTEMENT	29
III.3.1 Prise en compte des points doubles.....	29
III.3.1.1 Etude	29
III.3.1.2 Résultats	31
III.3.2 Correction des distances des paramètres météorologiques.....	33
III.3.2.1 Etude	33
III.3.2.2 Résultats	34
III.3.3 Etude des ellipses de confiance.....	36
IV ETUDE DE LA REFRACTION ATMOSPHERIQUE	37
IV.1 ETAT DE L'ART.....	37
IV.1.1 Utilisation des capteurs météorologiques.....	38
IV.1.2 Application du « fast-marching ».....	39
IV.1.3 Méthode des visées réciproques simultanées	40
IV.2 MODELISATION DU PHENOMENE ET DETERMINATION DES VALEURS DE <i>MRA</i>	41
IV.2.1 Etude des séries temporelles « brutes ».....	41
IV.2.2 Méthode des visées réciproques simultanées	43
IV.2.3 Etude des gradients de température horizontaux.....	47
Conclusion.....	49

Bibliographie	52
Annexe 1 DELTA Control Présentation Générale	55
Annexe 2	56
Carnets de terrains	56
Liste des figures.....	57
Liste des tableaux	58

Introduction

Considéré comme étant actuellement le plus grand projet urbain européen, le Grand Paris Express est un vaste projet de réseau de transport public. Visant à limiter l'usage de la voiture dans Paris, à faciliter les déplacements entre les banlieues et le cœur de la métropole, ce projet améliorera aussi le développement économique en reliant différents pôles d'activités en facilitant l'accès à l'emploi.

Le nouveau réseau, ayant pour horizon les années 2030, se composera de plus de deux-cents kilomètres de lignes automatiques, soit autant que le métro actuel. Deux lignes de métro, la ligne 11 et la ligne 14, ainsi que le RER¹ E seront prolongées et quatre nouvelles lignes, les lignes 15 à 18, seront créées. De nombreux quartiers se voient redessiner et de plus en plus de projets urbains émergent avec la création des soixante-huit nouvelles gares.



Figure n°1 : Carte schématique du réseau à l'horizon 2030².

Ce projet, dont le maître d'ouvrage est la Société du Grand Paris, a été découpé, dans l'espace et dans le temps, en différents lots de travaux qui sont ensuite attribués aux

¹ Réseau Express Régional d'Ile-de-France

² Source : Société du Grand Paris. <https://mediatheque.societedugrandparis.fr>

entreprises telles qu'Eiffage, Bouygues, Vinci, ou des groupements d'entreprises de génie civil. De nombreuses prestations sont ensuite sous-traitées par ces dernières, comme les études structurelles et plus particulièrement l'auscultation. C'est dans ce contexte qu'intervient DELTA Auscultation afin de surveiller les déplacements des bâtiments à l'intérieur, ou proches, des Zones d'Influence Géotechnique (ZIG) liées aux travaux en cours. L'enjeu est majeur puisqu'il s'agit de la sécurité des biens et des personnes, la demande est donc forte mais le marché très concurrentiel.

DELTA Auscultation, BU³ du groupe Gexpertise, s'est spécialisée dans l'auscultation topographique en continu lors des débuts du Grand Paris, mais intervient aussi sur d'autres ouvrages d'art. Afin de rester à la pointe du marché, l'entreprise améliore continuellement les services proposés afin de transmettre des données toujours plus justes et précises. Avec l'expérience que l'entreprise a acquise durant ces premières années du Grand Paris, diverses problématiques ont été relevées que ce soit au niveau de l'acquisition des données, des configurations terrains, ou du traitement des données.

Quels sont les améliorations d'acquisition, de mise en œuvre et de traitement, économiquement viables, envisageables pour optimiser la compensation des réseaux d'auscultation temps réel ?

Pour commencer nous réaliserons une présentation générale de l'entreprise, de ses besoins et de ses enjeux puis des évolutions qui ont été envisagées. Dans un deuxième temps nous présenterons le logiciel de pilotage qui a été développé afin d'optimiser l'acquisition des données. Dans un troisième temps nous étudierons l'impact que peut causer l'hypothèse de la stabilité des références hors ZIG⁴ sur les résultats obtenus et nous présenterons le travail réalisé pour des traitements de stations en réseau. Pour terminer nous étudierons l'influence de la météo, et plus particulièrement des gradients de température sur les mesures effectuées, et donc indirectement sur les séries temporelles des points auscultés.

³ Business Unit

⁴ Zone d'Influence Géotechnique

I Présentation générale

Ce premier chapitre vise à mettre en avant les différentes problématiques rencontrées par DELTA Auscultation lors de leurs compensations de réseaux d'auscultation temps réel. Nous présenterons la chaîne de traitement de l'entreprise ainsi que ses besoins et enjeux dans le marché actuel. Nous en déduirons différentes solutions d'optimisation dont nous développerons ici, brièvement, les pistes de réflexion qui ont été envisagées.

I.1 Présentation de la chaîne de traitement actuelle de DELTA Auscultation

Actuellement, la même chaîne de traitement est mise en place sur tous les chantiers où l'entreprise réalise de l'auscultation en continu, une partie logistique diffère légèrement selon la marque des stations totales utilisées. En effet le pilotage à distance des stations est effectué soit par le logiciel Leica GeoMoS⁵ (stations Leica) soit par le logiciel Trimble 4D Control (stations Trimble). Dans les deux cas le logiciel commande les stations qui lui transmettent ensuite leurs observations afin de calculer les paramètres des stations (positions et orientations) ainsi que les coordonnées des prismes auscultés.

Les données sont ensuite transmises à un partenaire italien, gctest⁶, qui va permettre à travers son portail web GDTMS⁷ la visualisation, pour l'entreprise et pour le client, de l'ensemble des données collectées, sous différentes formes. Il peut s'agir simplement de séries temporelles de déplacements de points mais aussi de tassements différentiels, de dévers, de cordes, de gauches : dans ces derniers cas, les courbes sont obtenues à partir d'équations faisant intervenir les coordonnées de plusieurs points auscultés.

Depuis juin 2019 l'entreprise tend à l'utilisation d'un nouveau portail de visualisation des données, plus personnalisable, Mission OS de Maxwell. Il sera par

⁵ GeoMoS : Geodetic Monitoring System.

⁶ geodesign and testing.

⁷ Geodesign and Testing Monitoring System.

exemple possible de définir directement par l'entreprise les équations souhaitées pour les différents graphiques que l'on souhaite afficher sans en faire la demande à Maxwell (actuellement pour une modification il faut en faire la demande au partenaire italien qui lui seul peut la réaliser). Le schéma ci-dessous récapitule la chaîne de traitement :

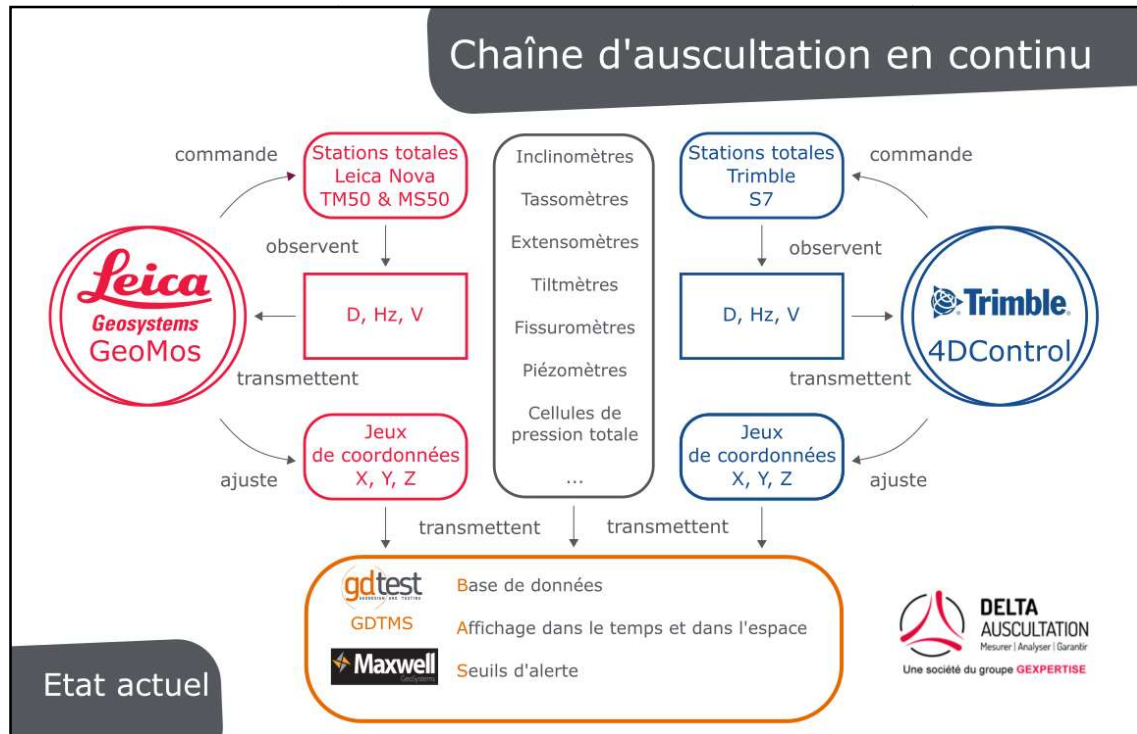


Figure n°2 : Chaîne de traitement actuelle de l'entreprise DELTA Auscultation⁸

I.2 Etude des besoins et enjeux de DELTA Auscultation

Dans le marché actuel du Grand Paris, mais aussi de l'auscultation en général, la course est à l'entreprise qui proposera la meilleure prestation, au coût le plus bas. Sachant que les CCTP⁹ ne sont que plus exigeants avec le temps (on demande par exemple dans les CCTP du Grand Paris une précision sur les déplacements des coordonnées des prismes en

⁸ Source : [MARBa18], adapté aux évolutions de l'entreprise.

⁹ Cahier des Clauses Techniques Particulières.

X, Y et Z de +/- 0.3mm¹⁰, sans préciser cependant le seuil de confiance) l'enjeu principal de DELTA Auscultation est d'améliorer sa chaîne de traitement tout en gardant à l'esprit la notion de rentabilité, liée aux entreprises. Les trois points majeurs que l'entreprise souhaite mettre en œuvre sont le pilotage des stations totales, la mise en production des calculs en réseaux et la prise en compte des paramètres météorologiques dans ces calculs.

I.3 Evolutions envisageables

I.3.1 Pilotage des stations totales

Le parc de stations totales dédiées à l'auscultation se constitue essentiellement des modèles Leica TM50 et de quelques Trimble S7. Le pilotage de ces stations est réalisé réciproquement par les logiciels Leica GeoMos et Trimble 4D Control. D'une part, l'utilisation de ces logiciels restreint l'obtention des données topographiques, principalement à cause de la lourdeur des programmes qui ralentissent les mesures (on parle d'une acquisition d'une soixantaine de points par heure en double retournement, quand certains concurrents sont à plus d'une centaine). D'autre part, les calculs réalisés ensuite par les logiciels (mise en station, compensation) ne nous sont pas accessibles, il est donc très difficile d'expliquer certaines observations sur les séries temporelles des positions d'une station ou d'un prisme par la suite. DELTA Auscultation a donc décidé de développer en interne un logiciel de pilotage des stations totales qui permettra d'avoir le contrôle sur les méthodes d'acquisition des données topographiques, mais aussi de développer de nouvelles fonctionnalités.

I.3.2 Calculs en réseaux

Actuellement, tout est pensé individuellement, c'est-à-dire qu'une station vise ses références et ses prismes d'auscultation, il n'y a donc pas de calcul en réseau de stations. Sur ce point, des scripts de calculs par moindres carrés ont été réalisés par B. MARTEAU lors de son TFE [MARBa18]. Le but sera donc de les adapter pour un calcul temps réel et

¹⁰ CCTP de la Société du Grand Paris concernant la ligne rouge 15 Sud de la gare Fort d'Issy – Vanves - Clamart à la gare Villejuif Louis Aragon – Livret 9 (Auscultations) consulté le 27/05/2019.

de les appliquer à un réseau d'auscultation existant, présenté ultérieurement. Nous rappellerons succinctement les différents avantages d'un tel calcul, mais l'intérêt de cette partie résidera surtout dans la génération des données (séries temporelles de coordonnées) que nous utiliserons pour appréhender les notions de stabilités des références, et de réfraction atmosphérique. En gardant à l'esprit la volonté d'optimiser la compensation de réseaux en temps réel, nous nous intéresserons aux calculs rejetés par le test statistique du Chi-deux et nous développerons, en complément des scripts de calculs, une méthodologie de retraitement afin d'écarter les observations présentant des fautes.

I.3.3 Stabilité des références

Les calculs des coordonnées et des orientations des stations sont toujours réalisés en supposant les références comme stables, l'impact de cette hypothèse est donc à quantifier puisque selon la configuration il n'est pas forcément possible de placer les références hors ZIG, et même lorsque c'est le cas, rien ne nous assure leur stabilité. Cette partie sera réalisée en effectuant des batteries de tests selon différentes configurations afin de déterminer des solutions précises à appliquer lors des calculs de compensation. Nous nous intéresserons particulièrement aux tests de congruence [SEal01] afin de déterminer les cas où il est nécessaire de redéterminer les coordonnées de certaines références pour ne pas dégrader la précision de notre ajustement.

I.3.4 Réfraction atmosphérique

Ce dernier point s'intéresse aux impacts liés à la météo sur les séries temporelles des mesures et plus particulièrement aux effets de la réfraction atmosphérique. Nous étudierons d'abord la prise en compte des paramètres météorologiques pour la correction des distances puis nous déterminerons à travers différentes simulations la solution de correction de la réfraction atmosphérique la plus adéquate à un réseau d'auscultation temps réel. Trois aspects seront abordés, la méthode des visées réciproques [Hlal10], [TSal07], la

méthode dite du « Fast Marching » [GOBKe17] et l'estimation du MRA¹¹ à partir des paramètres météorologiques [Hlal10].

I.4 Résumé des problématiques

L'enjeu de ce mémoire sera donc de répondre de la manière la plus avancée possible aux différents points présentés précédemment. L'aboutissement du logiciel de pilotage n'étant pas une fin en soi, nous expliquerons plus particulièrement les optimisations qu'il permettra dans un contexte d'acquisition de données en réseau de stations, le logiciel sera présenté dans une optique « notice utilisateur » en annexe¹². Pour le calcul en réseau et la stabilité des références, nous présenterons les travaux effectués pour aboutir aux données à exploiter, que nous détaillerons, ainsi que les développements réalisés qui nous permettront une analyse des résultats. En ce qui concerne la réfraction atmosphérique, nous essaierons d'aborder la question le plus largement possible et de quantifier le phénomène dans différentes situations afin de déterminer si une solution de correction peut être viable en entreprise dans le contexte du marché actuel.

II Pilotage des stations totales

Ce deuxième chapitre va d'abord présenter le cahier des charges qui a été établi autour des besoins de l'entreprise en termes de pilotage des stations, mise en œuvre terrain et architecture réseau. Nous aborderons ensuite plus précisément le développement global réalisé au niveau de l'interface graphique, ainsi que la structure des bases de données.

II.1 Etablissement du cahier des charges

Dans un premier temps, nous devons faire un choix au niveau de l'architecture du système, c'est-à-dire de quelle façon, physiquement, nous le mettrons en place. Dès cette

¹¹ MRA : Module de Réfraction Atmosphérique

¹² Voir Annexe n°1

étape se posent plusieurs questions, actuellement les stations sont installées sur site en étant alimentées électriquement sur secteur. Elles sont ensuite reliées à une Combox¹³ qui va permettre les interactions entre la station et le logiciel (Leica GeoMoS ou Trimble 4D Control) installé lui sur serveur. Un modem lié à la Combox permet donc cette communication par réseau 3G ou 4G à l'aide d'une carte SIM¹⁴. L'inconvénient principal de cette méthode est donc le mode de communication, qui entraîne une perte de données en cas de coupure réseau. Pour une station située dans une zone ayant un réseau instable, une perte de données fréquente ne peut être acceptable.

Une première solution consiste à installer, avec la Combox, un ordinateur qui permettra de stocker les données en cas de coupure de la transmission et qui, lors du rétablissement de la communication, pourra transmettre les données acquises pendant cet intervalle de temps. Le logiciel de pilotage, lui, est installé sur un serveur, voire traduit en interface web pour plus de souplesse. Le schéma ci-dessous récapitule l'architecture envisagée :

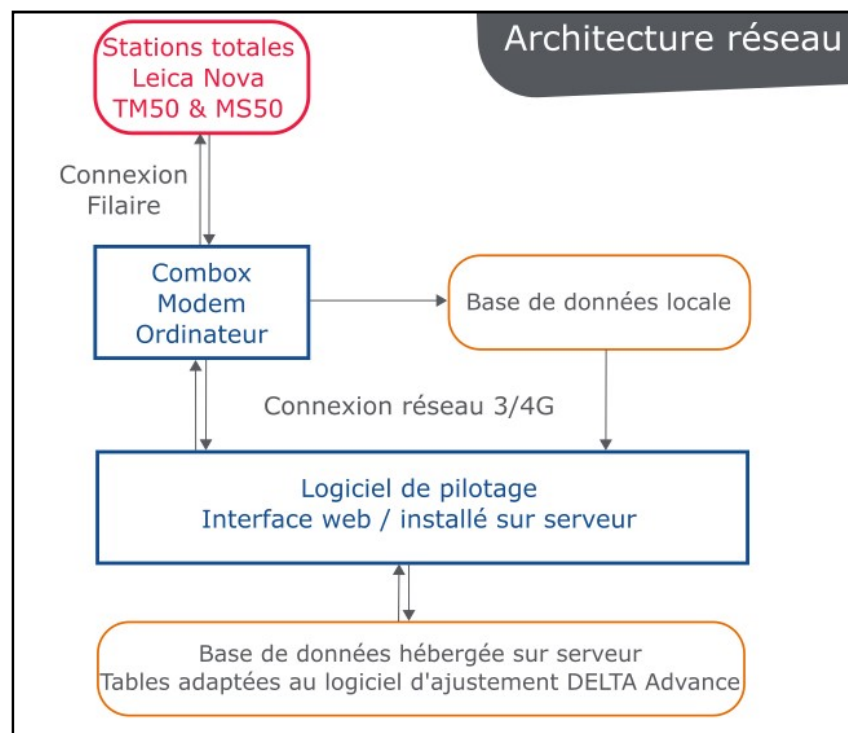


Figure n°3 : Présentation de l'architecture réseau du logiciel.

¹³ Combox : Boîte de communication où sont reliés électroniquement les principaux composants du système, à savoir la station, le modem et l'alimentation au secteur (ou sur batterie).

¹⁴ SIM : Subscriber Identity Module

Une fois l'architecture fixée, il convient de définir l'ensemble des tâches que doit couvrir le logiciel. Pour cela trois phases distinctes ont été nommées avant l'établissement du cahier des charges, il s'agit de l'installation, du pilotage en continu et de l'intervention.

En ce qui concerne la première phase, le logiciel doit permettre aux techniciens qui installent les stations sur le terrain de définir une nouvelle station, de la référencer, donc de calculer ses paramètres (positions et orientation) en fonction des références qui ont été fixées et de réaliser le levé initial des points qui seront auscultés (donc d'obtenir leurs coordonnées à l'époque zéro). Il s'agit d'une phase manuelle, l'objectif de cette partie est d'aller au plus vite à l'essentiel afin de diminuer au maximum le temps d'intervention terrain, et donc de faciliter le travail des techniciens.

La deuxième phase, dite de « pilotage », est une phase purement technique où le logiciel communique avec les stations afin d'envoyer les commandes à effectuer et de récupérer les données acquises pour les stocker par la suite dans une base de données. Les échanges entre le logiciel et les stations sont réalisés à partir des commandes LEICA GeoCOM [LEflex] dont l'entreprise a fait l'acquisition d'une licence courant juin 2019. Nous avons donc choisis dans un premier temps de simuler les réponses transmises par l'instrument, puisque l'ensemble du travail réalisé au niveau du pilotage s'est déroulé en début de stage.

Pour la troisième et dernière phase, il s'agit de prévoir la possibilité d'une intervention sur une station en cours de pilotage, donc de la mettre en pause et de pouvoir refaire les étapes de la première phase. Il peut aussi s'agir seulement d'un redémarrage, d'un changement de batterie, d'un levé initial de nouveaux points...

La suite du cahier des charges regroupe l'ensemble des fonctionnalités que devra proposer le logiciel, récapitulées dans la présentation générale du logiciel¹⁵. Il est intéressant de revenir sur deux fonctionnalités qui concernent particulièrement notre sujet, la définition des cycles de mesure et la définition des points doubles.

Dans le premier cas il s'agit d'une volonté de l'entreprise d'optimiser l'acquisition des mesures, pour cela deux méthodes ont été envisagées. Une première approche a été d'établir un type de levé dit « cycle temporel », dans ce cas l'utilisateur définit une heure

¹⁵ Voir Annexe n°1

de début du premier cycle, une heure de début du dernier cycle et un intervalle de temps pour chaque cycle, à adapter en fonction du groupe de mesures pour que tous les points puissent être levés dans cet intervalle de temps. Une deuxième approche, plus personnalisable, a été pensée en « cycle topographique », dans ce cas l'utilisateur définit le premier prisme levé, puis l'appareil rayonne les prismes suivants dans l'ordre d'orientation. Une fois revenu au premier prisme le cycle est terminé et l'appareil recommence directement. De plus, il est possible de paramétrer des fréquences d'acquisition pour chaque prisme ; si l'on souhaite par exemple mettre à jour l'orientation moins fréquemment, il suffit de renseigner que ces prismes sont levés « n » tour sur « m ».

La deuxième fonctionnalité est en lien avec le travail de fin d'étude réalisé l'année précédente dans l'entreprise [MARBa18] qui avait mis en évidence la viabilité de l'utilisation des points doubles afin de relier des stations entre elles. Nous verrons par la suite que cette méthode de calcul sera appliquée sur les données avec lesquelles nous travaillerons. Il s'agit donc ici du développement d'une interface permettant de définir les points doubles en reliant deux points par un vecteur (défini par une distance pente, un azimut et un angle vertical) supposé invariant.

Définition des cycles

Cycle temporel :

Heure de début : [] h [] min

Heure de fin : [] h [] min

Intervalle : [] h [] min

Enregistrer

Cycle topographique :

Début du tour d'horizon : []

Lever tous les groupes définis à chaque tour

Lever les prismes suivants, n tour sur m

Prismes

m : [] tour sur n : []

Enregistrer

Figure n°4 : Capture d'écran du logiciel DELTA Control.

II.2 Développement du logiciel DELTA Control

II.2.1 Structure des bases de données

Afin de stocker les données identifiant les nouvelles stations installées, et surtout les données issues des mesures réalisées, différentes bases de données ont été créées, ces dernières étant hébergées sur un serveur physique. Une base de données correspond à une affaire et peut donc concerner seulement une ou plusieurs dizaines de stations, et chaque base de données comporte cinq tables : « Stations », « Points », « Cycles », « Groupes » et « Observations », qui permettent les interactions entre le logiciel de pilotage et les stations, ainsi que la sauvegarde des mesures. La table n°1 (tableau n°1), « Stations », présente la structure suivante :

Id	Nom	N° de série	Communication	Projection	X	Y	Z	G0
Integer	Text	Text	Text	Text	Real	Real	Real	Real

Tableau n°1 : Table « Stations ».

L'identifiant et le type sont des paramètres propres au langage SQL¹⁶ qui nous serviront pour les interactions avec les tables. Les paramètres suivants définissent la station, que ce soit son nom, son numéro de série, ses paramètres de communication, le système de projection dans lequel ses coordonnées sont définies ainsi que ses paramètres de position et d'orientation. Ces derniers sont fixés lors de la mise en station initiale et seront utilisés pour la programmation des cycles de mesure. Viennent ensuite les tables n°2 et n°3 (tableau n°2), « Points » et « Groupes » :

Id	Nom	Id_station	Id_groupe	Code	X	Y	Z	Constante
Integer	Text	Integer	Integer	Integer	Real	Real	Real	Real

Id	Nom	Type
Integer	Text	Text

Tableau n°2 : Tables « Points » et « Groupes ».

¹⁶ SQL : Structured Query Language

La table « Groupes » comporte toujours trois lignes, elle permet de différencier les groupes de points qui sont des références, ceux qui sont des prismes auscultés, et les points mesurés sans prismes (appelés par la suite Reflectorless). La table « Points » comporte les noms et coordonnées de tous les points (obtenues lors du premier lever topographique ou levé initialement ensuite par un opérateur depuis la station concernée) et permet de les relier à leur(s) station(s) correspondante(s) ainsi qu'au type de groupe auquel ils appartiennent. Le code permet de préciser si le point est une inconnue ou une référence, il vaut donc respectivement « 0 » ou « 1 ». Le dernier paramètre, « constante », correspond à la valeur de constante d'addition du prisme visé. Vient ensuite la table n°4 (tableau n°3), « Cycles », dont nous ne développerons pas les paramètres puisqu'ils ont été présentés dans la partie II.1, nous rappelons cependant la structure de cette table qui sera utilisée en entrée du programme de pilotage :

Id	Type	Id_station	H_deb	H_fin	Intervalle	Début	Pr	M	N
Integer	Text	Integer	Text	Text	Text	Text	Text	Integer	Integer

Tableau n°3 : Table « Cycles ».

Pour finir vient l'une des tables les plus importantes puisqu'elle correspond aux données obtenues par les stations, la structure générale de cette table est imposée puisqu'elle doit comporter a minima les données qui étaient utilisées précédemment en entrée dans la chaîne de traitement de l'entreprise. Elle se constitue donc :

- d'un identifiant d'observation
- de l'identifiant de la station qui mesure
- de l'identifiant du point mesuré
- de l'heure de mesure
- des coordonnées rayonnées X, Y et Z
- des observations d'angles horizontaux, zénithaux et de distances
- des données de température et de pression (pour les stations Trimble)
- des données concernant la tension d'alimentation
- des données de nivelle longitudinale et transversale (verticalité de la station).

Id	Id_station	Id_point	Time	X	Y	Z	Hz	V	D
Integer	Integer	Integer	Text	Real	Real	Real	Real	Real	Real
Température		Pression		Tension		Longitudinale		Transversale	
Real		Real		Real		Real		Real	

Tableau n°4 : Table « Observations ».

II.2.2 Développement de l'interface en « PyQt5 »

Afin de maîtriser en profondeur l'ensemble du logiciel, il a été privilégié de coder l'interface graphique sans passer par un constructeur graphique, afin d'avoir une structure claire, expliquée, et facilement partageable entre les différents collaborateurs. Le langage de programmation retenu a été Python notamment pour l'utilisation de la bibliothèque graphique « PyQt5 », très complète et bien documentée sur le web. Une deuxième bibliothèque importante est « psycopg2 » qui permet les différentes interactions avec les bases de données gérées par le SGBD¹⁷ « PostgreSQL ». A partir de cette dernière, deux bibliothèques personnelles ont été créées, *create_BDD.py* et *liaison_BDD.py* qui permettent de créer les différentes tables présentées précédemment, puis de lire et/ou d'écrire dans ces tables.

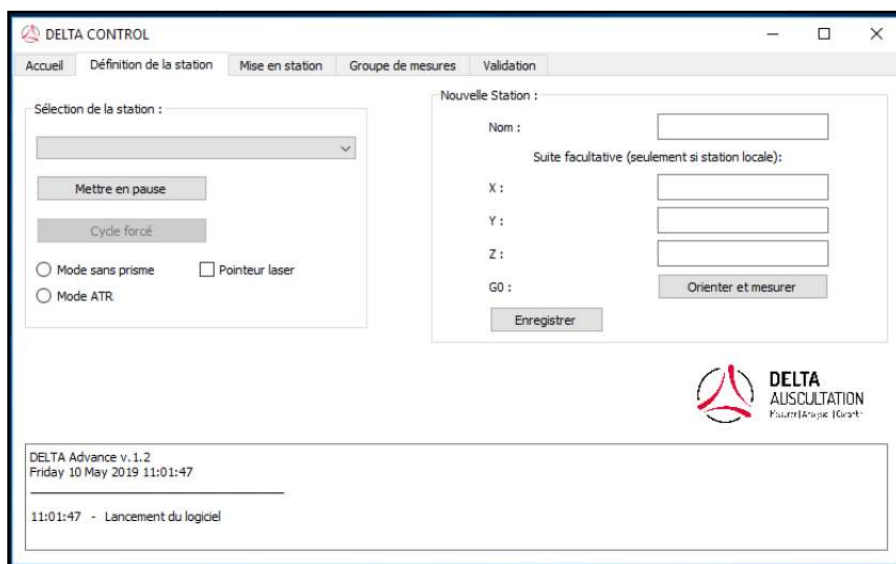


Figure n°5 : Capture d'écran du logiciel DELTA Control.

¹⁷ SGBD : Système de Gestion de Bases de Données.

En ce qui concerne le programme principal, illustré par la figure n°5, il s'agit pour la suite d'une interprétation graphique du cahier des charges, programmé majoritairement à l'aide des outils de la bibliothèque « PyQt5 ». Chaque élément graphique a ensuite été lié à une fonction, que ce soit de simples interactions avec la base de données (lecture / écriture dans les tables), des calculs tels que la mise en station ou encore le calcul des paramètres à fixer pour les points doubles. Pour ces derniers, le vecteur de liaison est défini selon trois paramètres, la distance-pente, l'azimut et l'angle zénithal entre les deux points (1 : $(x_1; y_1; z_1)$, 2 : $(x_2; y_2; z_2)$), calculés à partir des coordonnées obtenues lors du calcul d'initialisation. Les trois équations utilisées sont les suivantes :

$$Distance_pente = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \quad (1)$$

$$Azimut = \text{atan} \left(\frac{(x_2 - x_1)}{(y_2 - y_1)} \right) \quad (2)$$

$$Angle \text{ zénithal} = \text{atan} \left(\frac{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}}{z_2 - z_1} \right) \quad \text{si } z_2 > z_1 \quad (3)$$

En ce qui concerne la mise en station, les paramètres de position (X, Y, Z) et d'orientation (G0) sont déterminés par moindres carrés en utilisant les observations sur les références. Les valeurs approchées des coordonnées de la station sont déterminées en moyennant les coordonnées des références, le vecteur des observations est obtenu à partir des mesures acquises, la matrice de pondération (P) est établie à partir des données de précision du constructeur de la station concernée. Rappelons l'équation du système linéarisé, où B correspond à la matrice des observations et termes constants, A à la matrice des coefficients devant les inconnues, X à la matrice des inconnues, X_0 à la matrice des valeurs approchées et V à la matrice des erreurs accidentelles :

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

Le calcul de la solution intermédiaire est déterminé à partir de l'équation (6), le système est ensuite itératif de (4) à (6) tant que la condition de convergence (7) n'est pas satisfaite, dans ce cas, la solution intermédiaire est affinée par les nouvelles valeurs approchées. L'ensemble de la résolution a été développé d'après [DSt18a].

$$N = A^T P A, C = A^T P B \quad (5)$$

$$\hat{X} - X_0 = N^{-1} C \quad (6)$$

$$|\hat{X} - X_0| \leq \theta ? \quad (7)$$

Le reste des fonctions qui ont ensuite été développées en lien avec l'interface graphique correspondent aux commandes GeoCOM¹⁸, et donc aux interactions avec la station, présentées dans la partie suivante.

II.2.3 Association des commandes GeoCOM

L'ensemble des commandes liées à la licence GeoCOM est récapitulé dans le manuel utilisateur [LEflex]. La communication avec la station est basée sur un principe de question / réponse, on envoie une requête à la station qui retourne alors un code. Il n'est pas possible de combiner des requêtes entre-elles, il faut les exécuter les unes après les autres. Il existe trois possibilités pour formuler les requêtes, soit au format ASCII¹⁹, soit au format C/C++²⁰, soit au format VBA²¹. Afin de faciliter la liaison entre les requêtes et le logiciel programmé en Python, il a été retenu d'utiliser les requêtes au format ASCII. Ci-dessous un exemple de résultat d'une requête (appelée RPC), issu du manuel utilisateur [LEflex] :

```

The following example shows the reply to the RPC 5008 - CSV_GetDateTime.
%RIP,0,0:0,1996,'07','19','10','13','2f'^m
-----
| | | | | The values for month, day, hour,
| | | | | +--- minute and second are replied in the byte-
| | | | | format (see table communication parameter
| | | | | for further information)
| | | +----- Return code from the RPC: 0 means no error
| | | (see RPC return codes for further information)
| | +----- The Transaction ID of the request. If there was no ID
| | the value returned is 0.
+----- Return code from GeoCOM: 0 means no error (see
GeoCOM return codes for further information)

```

Figure n°6 : Requête GeoCOM.

¹⁸ GeoCOM : Nom de la licence Leica utilisée pour l'accès au pilotage des stations.

¹⁹ ASCII : American Standard Code for Information Interchange.

²⁰ C/C++ : Langages de programmation.

²¹ VBA : Visual Basic for Applications.

De très nombreuses requêtes sont possibles, ci-dessous un récapitulatif des requêtes les plus importantes à l'égard du logiciel de pilotage DELTA Control :

- CSV.CheckPower : permet de récupérer les données concernant l'alimentation de l'appareil à n'importe quel moment.
- CSV.GetDateTime : permet de récupérer les informations de date (année, mois, jour, heure, minute et seconde) à n'importe quel moment.
- CSV.GetIntTemp : permet de récupérer les données de température interne des stations.
- EDM_Laserpointer : permet d'activer ou de désactiver le pointeur laser.
- TMC_SetOrientation : permet d'orienter la station angulairement.
- TMC_GetPrismCorr : permet de choisir la constante de prisme correspondante.
- TMC_GetSimpleMea : retourne les valeurs de lectures angulaires (Hz et V) en double retournement, ainsi que la distance pente en double retournement.
- TMC_GetCoordinate : retourne les coordonnées rayonnées d'un point à partir des paramètres de stations qui ont été fixés dans la table « Stations ».

A l'aide de ces différentes requêtes nous pouvons ensuite définir le programme de pilotage en lui-même, dont nous synthétisons le fonctionnement ci-dessous :

Entrées du programme :

- Position et orientation de la station, récupérées dans la table « Stations ».
- Positions des points mesurés (prismes et reflectorless), récupérés dans la table « Points ».
- Paramètres du type de cycle choisis, récupérés dans la table « Cycles ».
- Type de double retournement choisi.

Déroulement du programme :

- Etablissement de la connexion avec la station.
- Lecture du type de cycle et du type de double retournement.
- Levé des points.
- Emission du signal de fin de cycle.

- Si mise en pause puis relance de la station, ou mise en pause puis cycle forcé, reprise du programme à partir de la section « *Entrées du programme* ».

Sorties du programme :

- Incrémentation de la table « Observations » en fonction des mesures effectuées.

II.3 Compte rendu qualité

Pour conclure cette partie, nous pouvons revenir sur les améliorations apportées. Même si au moment de l'écriture de ce mémoire, l'ensemble du programme de pilotage n'est pas encore fonctionnel, trois points restent essentiels à l'optimisation de l'acquisition des données. Au niveau du gain de levé estimé, on peut s'attendre à passer d'une soixantaine de prismes par heure²² à cent voir cent-vingt prismes par heure, soit quasiment le double, ce qui offre deux opportunités : soit les prismes pourront être levés deux fois plus souvent, donc avec un échantillonnage temporel plus fin, soit une station pourra lever deux fois plus de prismes, ce qui conduit à un fort gain économique.

Un autre atout majeur concerne la mise en pause des stations, actuellement si une intervention quelconque doit être réalisée sur une station, c'est le projet GeoMoS²³ qui la contrôle que l'on doit mettre en pause, ce qui arrête aussi toutes les autres stations sur le serveur, sachant qu'il peut facilement y en avoir plusieurs dizaines par projet. La mise en pause par station permettra donc d'éviter une perte de données sur d'autres stations lors des interventions.

Dernier point important, la possibilité de définir des réseaux de stations, que ce soit à travers des références communes, des points doubles, ou des deux, afin d'appliquer ensuite lors du traitement les scripts de calculs développés lors du précédent travail de fin d'études [MARBa18].

²² Statistique obtenue sur une moyenne de cinq stations en continu pendant une semaine.

²³ GeoMoS : Geodetic Monitoring System

III Solution d'ajustement en réseau

Dans cette partie nous nous intéresserons à un réseau de stations réel afin d'étudier l'impact des déplacements des références sur les points auscultés. Actuellement, ces stations sont calculées indépendamment. Nous présenterons donc les modifications qui ont été réalisées afin de calculer ces stations en réseau. Nous présenterons aussi les apports d'une correction des distances des paramètres météorologiques sur les séries temporelles de déplacement des points mesurés. Pour finir nous étudierons l'automatisation des tests de congruence afin de les prendre en compte dans la chaîne de traitement actuelle.

III.1 Présentation du réseau étudié

Le réseau étudié se compose des cinq stations installées sur le chantier de la gare de FIVC²⁴ située à l'intersection des communes de Clamart, Issy-les-Moulineaux, Vanves et Malakoff. Il s'agit d'un projet complexe puisque quatre niveaux de plancher doivent être construits sous les voies actuelles du Transilien afin d'accueillir le passage de la future ligne 15 Sud. L'auscultation réalisée est donc orientée principalement sur les voies qui traversent la ZIG²⁵ ainsi que sur les façades des bâtiments avoisinants. La figure n°7 représente le réseau actuellement en place, ses principaux éléments sont énumérés dans le tableau n°5. Nous pouvons analyser une première fois la disposition géométrique du réseau et des références des stations.

Les cinq stations se situent dans la ZIG, leurs références en sont assez proches mais en dehors avec une répartition plutôt bonne géométriquement, on remarque toutefois une tendance Est-Ouest. Un premier levé a été réalisé afin de fixer les coordonnées des références qui sont toutes référencées dans le système de référence RGF93 – CC49²⁶. La précision du premier levé ne nous importe pas spécialement. En effet, nous recalculerons l'état zéro à partir du premier cycle de mesures des stations réalisé lors de la marche à blanc, afin d'obtenir des coordonnées approchées plus cohérentes entre-elles. Cela nous

²⁴ Fort d'Issy – Vanves – Clamart.

²⁵ Zone d'Influence Géotechnique

²⁶ Projection Conique Conforme, zone 8.

permet aussi de recalculer les coordonnées des références en fixant seulement une station maîtresse, puisque le premier levé des références est réalisé à partir d'une polygonale, donc de plusieurs stations, qui ne nous permet pas d'obtenir une précision sur les coordonnées suffisantes entre-elles (le calcul en réseau serait toujours affecté par les erreurs commises sur la détermination des coordonnées des références). La marche à blanc correspond à une période précédant le début des travaux, typiquement d'une à deux semaines. Au niveau des points permettant la mise en réseau, la majorité des références sont communes à deux ou trois stations, et une mission d'installation a été réalisée afin d'installer trois triplets de prismes permettant de relier à chaque fois trois stations par la méthode des « points doubles ».

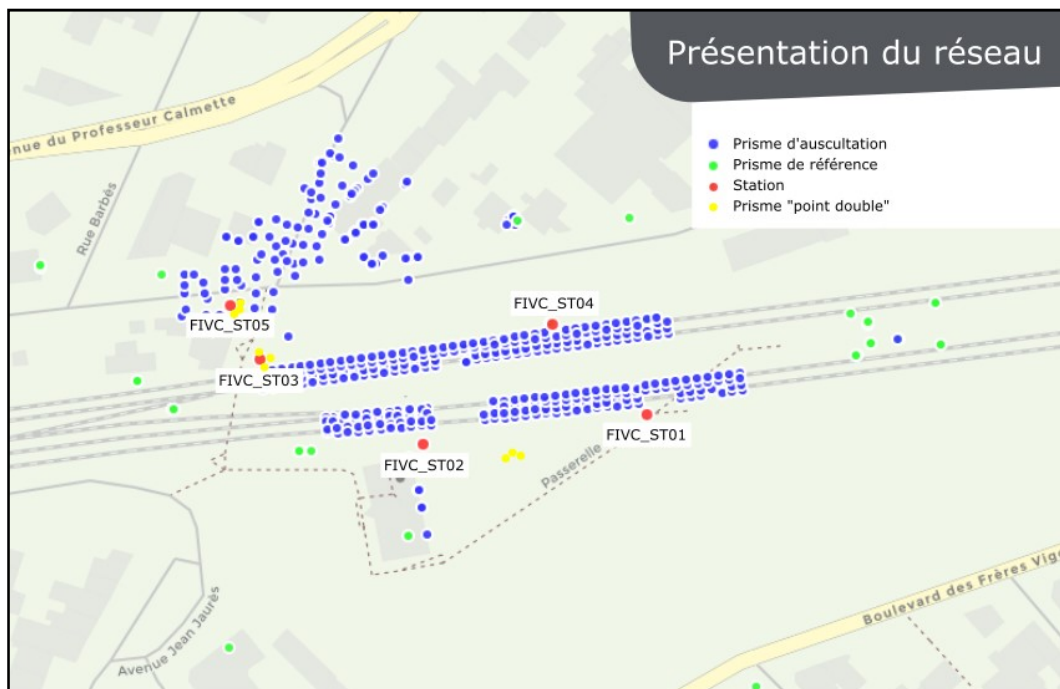


Figure n°7 : Schéma de présentation du réseau de stations étudié.

Stations	Prismes auscultés	Points auscultés sans réflecteurs	Références simples	Références communes	Points doubles
5	354	61	26	10	10

Tableau n°5 : Chiffres clés du réseau présenté.

III.2 Automatisation de l'ajustement et préanalyse

Nous présenterons dans cette partie les différents programmes qui ont été créés pour permettre l'utilisation en réseau des scripts de calculs développés par B. MARTEAU lors de son travail de fin d'étude [MARBa18]. Puis nous présenterons les résultats d'une première préanalyse, ainsi que les précisions attendues.

III.2.1 Automatisation

Les données d'observations des stations sont récupérées sur la base de données générée par le logiciel Leica GeoMos, il suffit d'écrire une requête SQL²⁷ ayant pour paramètres le nom de la station qui mesure, les dates entre lesquelles on souhaite télécharger les données et le type de groupe de points (références, prismes, ou reflectorless). Pour une station on obtient donc trois fichiers, *station_PR*, *station_REF* et *station_RL* qui présentent tous le même format : un identifiant d'observation, l'identifiant du point mesuré, l'heure de début du cycle, l'heure de la mesure, la coordonnée X, la coordonnée Y, la coordonnée Z, la distance pente, l'angle horizontal et l'angle zénithal. Il est important de comprendre cette structure puisque c'est à partir de ces fichiers que nous allons établir les différents cycles du réseau à calculer.

Ensuite pour chaque station, ces fichiers sont découpés en « paquets » selon le paramètre « heure de début du cycle ». C'est-à-dire que toutes les observations appartenant à un même cycle sont stockées à chaque fois dans un nouveau fichier texte. Les trois fichiers ne peuvent pas être traités comme un fichier unique puisque l'heure de début du cycle est propre au type de groupe de points levés (prismes, références, reflectorless). De plus, l'enchaînement des trois différents cycles n'est pas régulier : c'est-à-dire que l'on peut avoir quatre cycles de références qui s'intercalent pendant un cycle de prismes. D'où la condition de mise en relation suivante, schématisée dans la figure n°8 :

- Le premier cycle de références correspond à l'époque « 0 ».
 - L'heure de début du cycle du deuxième cycle de références correspond au temps « 1 ».
-

²⁷ SQL : Structured Query Language

- Tant que l'heure de cycle des observations (sur prismes ou reflectorless) est supérieure au temps « 0 » et inférieure au temps « 1 », on copie les observations dans le cycle de références « 0 ».
- Sinon, le deuxième cycle correspond à l'époque « 0 », le troisième cycle à l'époque « 1 » et on reprend la condition.

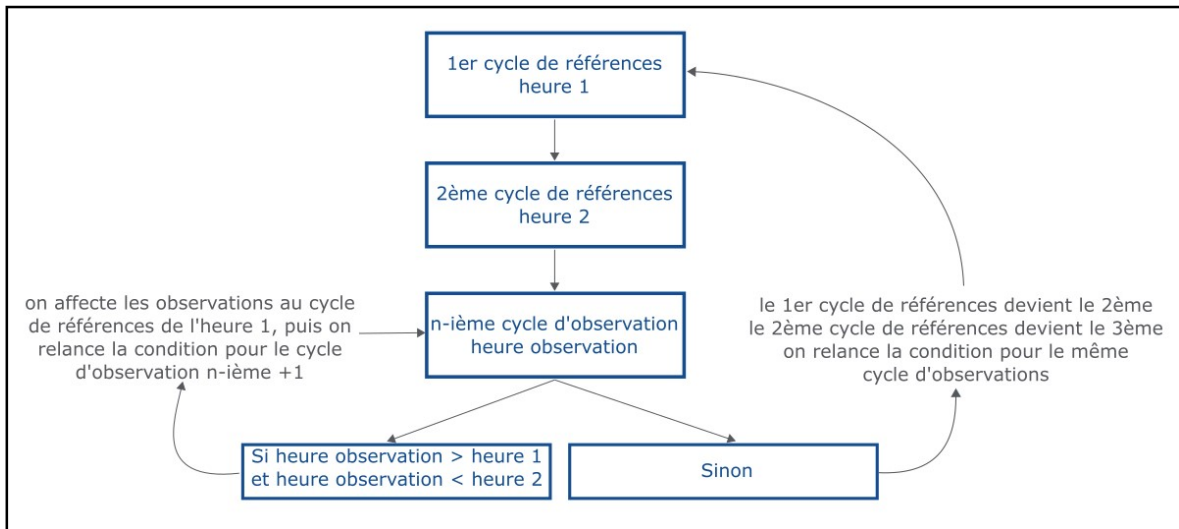


Figure n°8 : Schéma de la condition de mise en relation.

En parcourant l'ensemble des fichiers de cette façon, on obtient un fichier texte par cycle regroupant l'ensemble des observations correspondantes, pour une station. Une deuxième mise en relation est ensuite à prévoir. En effet, chaque station du réseau n'effectue pas le même nombre de cycle durant la période sélectionnée, par exemple pour le réseau présenté, sur une semaine de données la station FIVC_ST05 effectue 1344 cycles, lorsque la station FIVC_ST03 en effectue 254, ceci étant lié au nombre de points mesurés. La deuxième condition de mise en relation se présente donc comme ceci :

- La station du réseau ayant le plus de cycles sur la période sélectionnée est considérée comme station maîtresse, elle sera donc présente dans chaque cycle.
- Soit le cycle « 0 » et le cycle « 1 » de la station maîtresse, correspondant aux deux premiers cycles.
- Pour chacune des autres stations, si l'heure de début de cycle est comprise entre l'heure de début du cycle « 0 » et celle du cycle « 1 », alors les observations sont copiées dans le cycle « 0 ».

- Sinon, le deuxième cycle devient le cycle « 0 », le troisième cycle le cycle « 1 » et on reprend la condition.

De cette façon, l'ensemble des données acquises par les stations du réseau sont réparties dans les différents cycles, certains cycles se composant seulement des observations d'une ou deux stations, et d'autre se composant des observations de toutes les stations. Une fois les différents fichiers textes créés, correspondant aux différents cycles, une mise en forme des observations est réalisée afin de respecter le format d'entrée du logiciel de calcul DELTA Advance :

- Un code (permet de différencier les mesures de distances, d'angles horizontaux et d'angles verticaux).
- Le nom de la station qui vise le point.
- Le nom du point visé.
- L'observation (distance, angle horizontal ou angle zénithal).
- Les précisions absolue et relative (partie fixe plus partie variable) du constructeur sur le type d'observation.
- La hauteur de station et la hauteur du voyant.

Au niveau du paramétrage du calcul, les données compensées seront transmises avec cinq chiffres significatifs, et le critère de convergence de la solution sera fixé à 0,1mm.

III.2.2 Préanalyse

Afin de déterminer les précisions que nous pourrions atteindre à l'intérieur du réseau d'auscultation, nous avons effectué deux premières préanalyses différentes. Dans le premier cas, nous avons fixé toutes les références, ce qui reviendrait à calculer chaque station indépendamment. Dans le deuxième cas, nous avons laissé les références se trouvant communes entre les stations en inconnues, afin de consolider le réseau. Dans le tableau n°6 les résultats des deux préanalyses pour les précisions attendues sur les positions des stations. Etant donné qu'il n'y a pas de redondance sur les points auscultés, les précisions attendues sur leurs coordonnées ne dépendent ensuite que des distances et des positions des points par rapport aux stations, ainsi que du type de points.

Station	σX (mm)	σY (mm)	σZ (mm)	Calcul
FIVC_ST01	0,44	0,40	0,35	6 réf
FIVC_ST02	0,40	0,33	0,29	7 réf
FIVC_ST03	0,36	0,40	0,28	6 réf
FIVC_ST04	0,39	0,38	0,33	7 réf
FIVC_ST05	0,42	0,49	0,31	5 réf
Prisme	σX (mm)	σY (mm)	σZ (mm)	Distance
PR_V2Bis_P28_D	0,72	0,38	0,34	10m
PR_V2Bis_P18_D	0,74	0,46	0,37	50m
PR_V2Bis_P03_D	0,78	0,54	0,50	80m

Tableau n°6 : Résultats de la préanalyse avec références fixes.

Nous obtenons des précisions satisfaisantes puisque les valeurs des intervalles de confiances au seuil de 99% sur les paramètres de position des stations (X, Y et Z) sont toutes inférieures au demi-millimètre. En ce qui concerne les intervalles de confiance sur les coordonnées des points auscultés, les précisions varient en fonction de la distance en restant toutefois inférieures au millimètre sur chaque paramètre jusqu'à 100m.

Station	σX (mm)	σY (mm)	σZ (mm)	Calcul
FIVC_ST01	0.48	0.46	0.39	4 réf + 2 communes
FIVC_ST02	0.45	0.40	0.34	3 réf + 4 communes
FIVC_ST03	0.42	0.49	0.33	3 réf + 3 communes
FIVC_ST04	0.41	0.40	0.35	5 réf + 3 communes
FIVC_ST05	0.46	0.58	0.36	3 réf + 2 communes
Prisme	σX (mm)	σY (mm)	σZ (mm)	Distance
PR_V2Bis_P28_D	0.73	0.40	0.37	10m
PR_V2Bis_P18_D	0.77	0.51	0.42	50m
PR_V2Bis_P03_D	0.78	0.59	0.52	80m

Tableau n°7 : Résultats de la préanalyse avec références fixes et références communes.

Afin de rendre le réseau robuste, une deuxième préanalyse a été réalisée en fixant au minimum trois références pour chaque station puis, en laissant en inconnues les références communes à plusieurs stations. Nous nous attendons forcément à une dégradation des précisions obtenues, mais nous voulons montrer qu'elles restent convenables, même en restreignant au maximum les références fixes pour favoriser la mise en réseau. Les précisions obtenues en sortie de calcul, voir tableau n°7, restent très similaires : les valeurs sont légèrement supérieures puisque nous avons moins de références fixes par station. Cependant, l'intérêt d'un tel calcul réside dans son comportement face à d'éventuelles fautes. Les stations ne sont plus isolées donc chacune d'entre elle apporte sa force ou sa faiblesse (en matière de géométrie et de précision des paramètres de positions et d'orientation) au reste du réseau.

III.3 Optimisation de l'ajustement

III.3.1 Prise en compte des points doubles

III.3.1.1 Etude

Les références communes utilisées dans la préanalyse précédente correspondaient à des prismes circulaires éloignés qui étaient, au mieux, visibles par trois stations. L'utilisation de tels prismes en tant que références communes restreint très vite leur positionnement puisqu'ils ne sont orientables que dans une seule direction. Il serait possible d'utiliser des prismes 360° pour les références communes mais leur coût est élevé.



Figure n°9 : Photographie de l'installation d'un triplet de prismes.

Une solution économiquement viable est la mise en place de points doubles (voire triples) permettant plusieurs orientations possibles, il suffit ensuite de fixer un vecteur entre ces points défini par une distance, un angle horizontal et un angle zénithal afin de les relier. Ce vecteur est déterminé lors d'un levé initial, il est ensuite supposé constant puisque la proximité des prismes nous permet d'établir l'hypothèse qu'ils se déplacent uniformément. L'ensemble n'est cependant pas robuste aux rotations, il faut donc veiller au positionnement choisi afin d'éviter ce problème.

Station	σ_X (mm)	σ_Y (mm)	σ_Z (mm)	Calcul
FIVC_ST01	0,32	0,33	0,27	6 REF + 4 points doubles
FIVC_ST02	0,30	0,30	0,26	7 REF + 3 points doubles
FIVC_ST03	0,32	0,36	0,27	6 REF + 2 points doubles
FIVC_ST04	0,31	0,32	0,27	7 REF + 4 points doubles
FIVC_ST05	0,38	0,43	0,29	5 REF + 1 point doubles
Prisme	σ_X (mm)	σ_Y (mm)	σ_Z (mm)	Distance
PR_V2Bis_P28_D	0,42	0,58	0,37	10m
PR_V2Bis_P18_D	0,72	0,42	0,36	50m
PR_V2Bis_P03_D	0,73	0,53	0,47	80m

Tableau n°8 : Résultats de la préanalyse avec références fixes et points doubles.

Dans le tableau n°8 se trouvent les résultats de la préanalyse réalisée en prenant en compte les références disponibles actuellement sur le chantier pour chaque station et les points doubles que nous avons installés. On se retrouve finalement dans la même configuration que la préanalyse avec des références fixes ainsi que des références communes, avec cependant un plus grand nombre de références fixes ici, d'où le gain en précision sur les coordonnées des stations et des prismes auscultés. L'intérêt de l'utilisation des points doubles réside dans le cas suivant : certaines stations sont isolées dans la ZIG²⁸ et ne peuvent pas viser des références considérées comme stables, hors ZIG, on parle alors de stations « aveugles ». Afin de simuler cette situation, nous avons fixé les références de deux stations (la station la plus à l'Est du chantier et celle la plus à l'Ouest) et nous avons retiré toutes les références fixes des autres stations, seuls les points doubles sont utilisés pour calculer leurs paramètres de positions et d'orientations. Dans le tableau n°9 les résultats de la préanalyse.

Station	σX (mm)	σY (mm)	σZ (mm)	Calcul
FIVC_ST01	0,43	0,42	0,31	6 REF
FIVC_ST02	0,48	0,50	0,32	6 Points doubles
FIVC_ST03	0,65	0,83	0,31	2 Points doubles
FIVC_ST04	0,61	0,61	0,33	6 Points doubles
FIVC_ST05	0,45	0,56	0,32	5 REF
Prisme	σX (mm)	σY (mm)	σZ (mm)	Distance
PR_V2Bis_P28_D	0,64	0,76	0,42	10m
PR_V2Bis_P18_D	0,92	0,66	0,39	50m
PR_V2Bis_P03_D	0,86	0,81	0,51	80m

Tableau n°9 : Résultats de la préanalyse avec trois stations « aveugles ».

Pour des raisons d'autorisations, les points doubles prévus initialement n'ont pas encore été tous installés, on remarque donc une légère dégradation des précisions attendues par rapport aux autres méthodes, notamment pour la station FIVC_ST03 puisqu'elle ne vise seulement que deux points doubles, les valeurs des intervalles de confiance sur les coordonnées restent cependant toutes inférieures au millimètre. On peut noter que la question de la stabilité des références ne se pose plus pour trois des cinq stations puisque la position des points doubles est mise à jour à chaque nouveau cycle à l'aide des stations aux

²⁸ ZIG : Zone d'Influence Géotechnique.

extrémités du réseau, qui elles mesurent encore des références où l'on suppose l'hypothèse de stabilité vraie.

III.3.1.2 Résultats

Une fois les points doubles installés sur le terrain, nous avons relevé leurs coordonnées à l'aide d'une station et des références déjà présentes afin de les ajouter dans les cycles d'observations des cinq stations du chantier. Nous avons remarqué lors du premier jour d'acquisition que des confusions pouvaient avoir lieu entre différents prismes.

En effet de part leur proximité et leur orientation, certains point doubles étaient confondus, notamment parce que la fenêtre de recherche de l'ATR²⁹ était trop grande. Le logiciel Leica GeoMoS permet toutefois de réduire la taille de recherche de l'ATR indépendamment pour chaque visée, ce que nous avons réalisé pour les points en question.

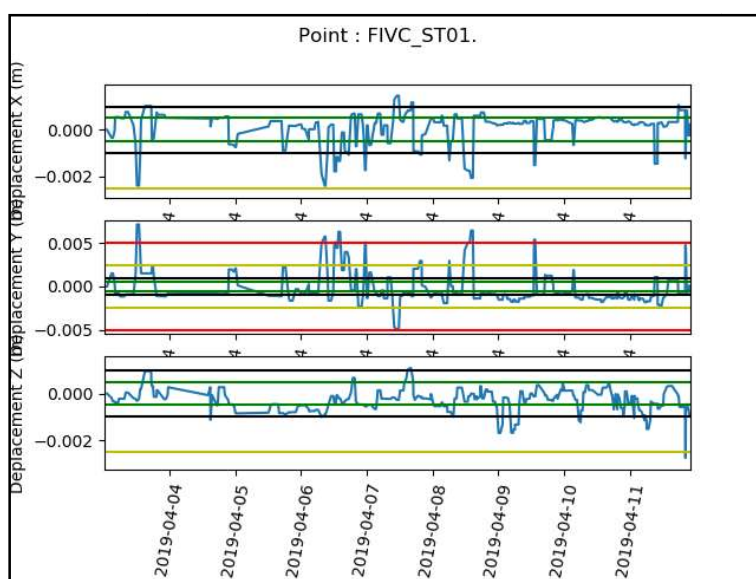


Figure n°10 : Série temporelle de position de la station FIVC_ST01 avec références fixes.

Nous avons ensuite réalisé les calculs de compensation en réseau sur une semaine d'observations, avec deux des méthodes présentées dans la partie précédente. Tout d'abord nous avons calculé l'ensemble du réseau en prenant en compte seulement les références simple. La figure n°10 présente les résultats des coordonnées calculées pour la station

²⁹ ATR : Automatic Target Recognition.

FIVC_ST01. On remarque que les séries temporelles montrent des déplacements de l'ordre de plusieurs millimètres sur les coordonnées de la station, ces déplacements ne font toutefois pas l'objet de notre étude ici. Nous cherchons à comparer ces résultats avec la deuxième méthode.

Nous avons réalisé le même calcul en utilisant les observations sur les points doubles, et en retirant toutes les références de la station FIVC_ST01, afin de simuler le cas de station « aveugle » présenté précédemment. La figure n°11 reprend les résultats de ce calcul, toujours pour les coordonnées de la station FIVC_ST01. Nous remarquons une nette diminution des amplitudes de déplacements sur les séries temporelles en X et Y. Au niveau du Z, nous obtenons globalement les mêmes résultats.

Plusieurs explications sont possibles, la première serait de dire que la géométrie des références simples de la station est moins bonne que la géométrie des points doubles. Or il s'agit ici de deux symétries typiquement similaires. La deuxième explication, qui est donc celle qui nous intéresse, est que l'hypothèse de stabilité des références sur la station FIVC_ST01 dans le calcul avec « références simples » s'avère inexacte, et fausse donc le calcul, d'où la dégradation des résultats.

Nous pouvons donc dire que cette méthode de calcul est une solution viable pour relier les stations qui ne peuvent avoir de références fixes, hors ZIG. Cependant il y aura toujours besoin de références à fixer pour les stations aux extrémités, sur lesquelles d'autres tests devront être réalisés pour vérifier leur stabilité.

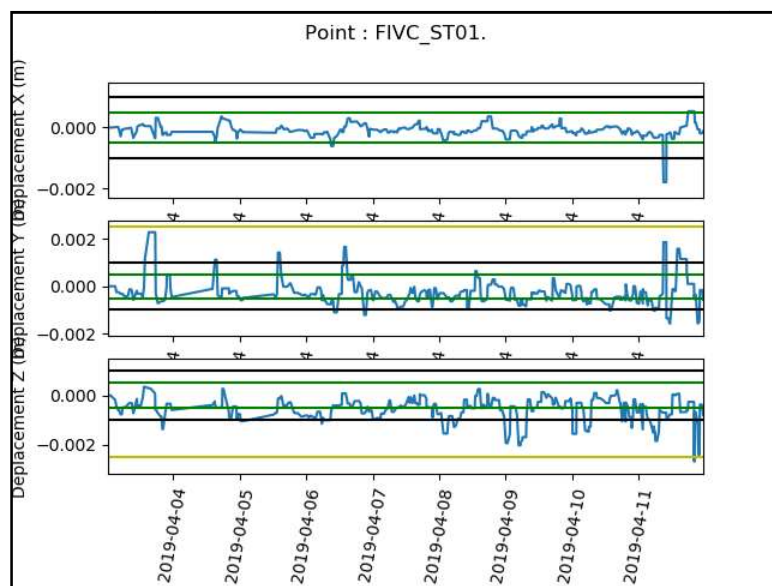


Figure n°11 : Série temporelle de position de la station FIVC_ST01 en « station aveugle ».

III.3.2 Correction des distances des paramètres météorologiques

III.3.2.1 Etude

Dans la chaîne de traitement actuelle, à travers le logiciel GeoMoS, l'influence des paramètres météorologiques sur les mesures de distance n'est pas prise en compte. En effet, les séries temporelles de déplacement convenaient aux différents clients, cela évitait donc un coût supplémentaire. Or, la question s'est posée lors du suivi d'une tour de logements sous laquelle se creusait un parking souterrain. Cette tour était très impactée par la température extérieure, on observait des déplacements cycliques de 1 à 2 cm d'amplitude sur les prismes auscultés. Lorsque l'on étudie les séries temporelles des distances entre la station et les points mesurés (figure n°12), on remarque un mouvement cyclique journalier similaire aux variations de températures.

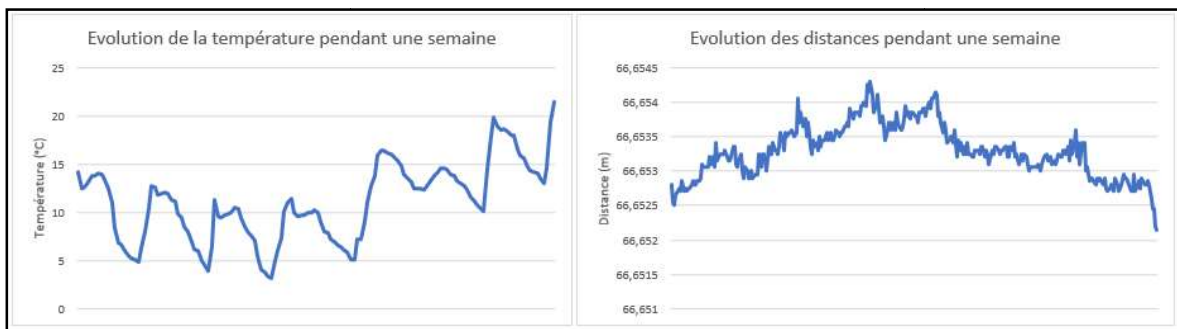


Figure n°12 : Evolutions des températures et des distances.

Nous avons donc cherché à corriger cette variation des mesures de distance à l'aide de modèles mathématiques les reliant aux paramètres météorologiques. Dans les notices constructeurs des appareils, Leica TM50 / MS50 ou Trimble S7, des modèles de correction des distances en fonction de la température, de la pression et de l'humidité sont proposés, d'après le modèle de Barrel et Sears. Dans les deux cas les équations sont similaires, la seule différence réside dans les valeurs des constantes qui changent légèrement. Nous pouvons supposer que ces différences sont liées aux longueurs d'ondes utilisées par les appareils, cependant nous n'avons pu le vérifier. Nous retiendrons le modèle de correction proposé par Leica (équations 8 et 9) puisque nous l'appliquerons à des stations totales TM50.

T : Température (°C), P : Pression (hPa), H : Humidité (%)

$$\alpha = \frac{1}{273,15} \quad \kappa = 7,5 \times \frac{T}{237,3+T} \quad (8)$$

$$\Delta d = 286,34 - \left[\left(\frac{0,29525 \times P}{1 + \alpha \times T} \right) - \left(\frac{4,126 \times 10^{-4} \times H}{1 + \alpha \times T} \right) \times 10^\kappa \right]$$

$$Distance_{correctée} = Distance \times (1 + \Delta d \times 10^{-6}) \quad (9)$$

DELTA Auscultation possède plusieurs sondes météorologiques sur chantier, qui communiquent en temps réel, mais ces capteurs ne mesurent que la température (+/- 0,05 °C) et la pression (+/- 0,5 hPa), l'humidité a donc été fixée à 50% dans les calculs. En effet l'impact de l'humidité dans le modèle de correction est quasiment nul (modification de l'ordre de 10^{-6} m, quelle que soit la valeur de ce paramètre), comme le montre la figure n°13 pour une distance de 150 m corrigée des paramètres météorologiques avec une température de 20 °C et une pression de 940 hPa en fonction de l'humidité. A noter que les précisions sur la température et la pression nous permettent d'obtenir une précision de +/- 0,022 mm à 150 m sur la distance corrigée, ce qui nous suffit vis-à-vis de notre besoin en correction, qui est de l'ordre de quelques millimètres.

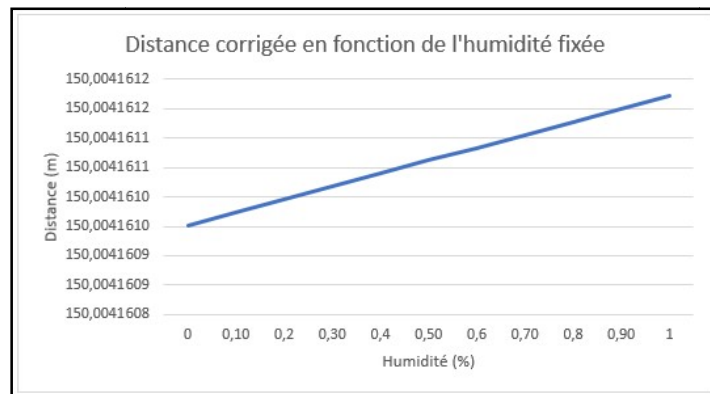


Figure n°13 : Distance corrigée en fonction de l'humidité fixée.

III.3.2.2 Résultats

Pour les distances qui nous concernent, entre 20 et 100 m, la correction des paramètres météorologiques s'avère peu efficace. En effet, comme le montre la figure n°14 ci-dessous, les effets journaliers sont légèrement atténués, mais une tendance globale persiste. A noter que les valeurs de distance oscillent dans un intervalle de 2 mm, sachant

que la précision constructeur pour les mesures de distance sur prisme est ici de 1 mm + 1 ppm³⁰.



Figure n°14 : Evolution des distances corrigées.

La correction directe sur les distances ne semble pas concluante à première vue. Cependant, lorsque l'on réalise ensuite l'ajustement du réseau avec les distances brutes puis avec les distances corrigées, on remarque une amélioration des séries temporelles de position des points au niveau des mouvements oscillatoires, comme nous pouvons le voir sur la figure n°15. En effet, selon la position du point par rapport à la station, on observe une réduction des amplitudes des mouvements journaliers en X, en Y, ou les deux, d'environ 15% (moyenne établie sur les séries temporelles de 44 prismes pendant une semaine).

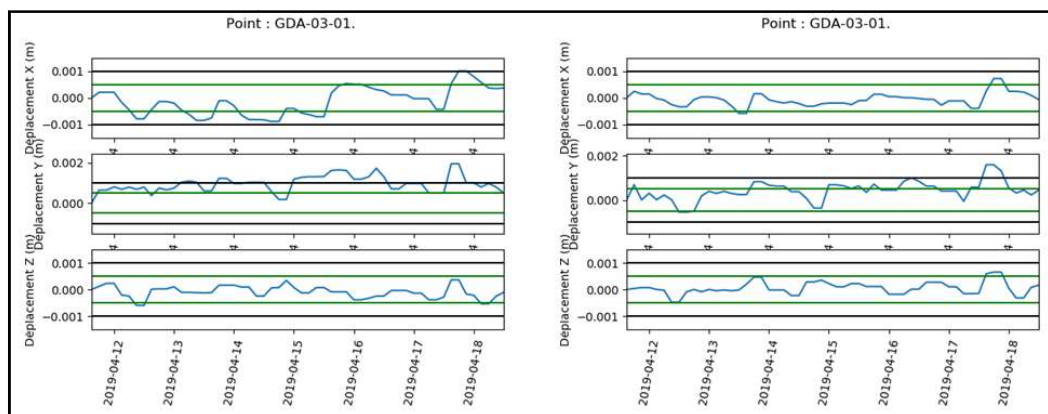


Figure n°15 : Séries temporelles avec distances brutes et distances corrigées.

³⁰ ppm : parties par millions.

Etant donné qu'on ne corrige ici que les variations de distances, la correction dépendra des angles horizontaux et zénithaux sur chaque point. Plus l'angle zénithal s'écarte des 100 gon, plus la correction en Z est importante. Au niveau de l'angle horizontal la correction s'observera plus en Y si l'angle est compris entre 0 et 50 gon, puis plus en X si l'angle est compris entre 50 et 150 gon et ainsi de suite.

III.3.3 Etude des ellipses de confiance

Les résultats obtenus en fin de traitement nous donnent les positions recalculées des références fixées dans le calcul. Les observations sur les références sont doublées dans le fichier d'entrée, ce qui permet de les fixer mais aussi d'obtenir leurs coordonnées calculées.

Afin de déterminer si une référence est toujours stable, une première solution est d'afficher pour chaque cycle les ellipses de confiance. En effet, si entre deux cycles les deux ellipses pour une même référence sont disjointes, nous pouvons supposer que la référence a subi un déplacement. A contrario, si les ellipses de cette même référence se chevauchent sur une partie nous pouvons considérer que le déplacement de cette référence n'est pas significatif, et donc que nous pouvons la considérer comme stable.

Cette étude a été menée en post-traitement pour expliquer certains sauts dans les séries temporelles de déplacements, afin de déterminer la ou les références qui faisaient échouer le test du chi-deux. Une poursuite de ce travail serait d'automatiser la détection des intersections entre les ellipses, afin de retirer automatiquement une référence qui se serait déplacée pour calculer de nouveau le cycle concerné, mais il a été choisi par DELTA Auscultation de garder la main et de le faire en post-traitement si nécessaire.

IV Etude de la réfraction atmosphérique

Ce dernier chapitre vise à mettre en évidence les différents impacts sur les mesures liés aux variations de température. Trois variations distinctes seront étudiées, les variations de température ambiantes au cours du temps, les variations verticales de température le long du trajet optique, et enfin les variations horizontales de température le long du trajet optique. Dans un premier temps nous étudierons les différentes approches de modélisation existantes, dans l'objectif de définir une méthode adaptable en entreprise. Nous observerons ensuite les différents impacts de ces phénomènes que nous modéliserons afin d'appliquer par la suite des modèles de corrections, que nous évaluerons.

IV.1 Etat de l'art

La réfraction atmosphérique est un phénomène qui induit une courbure du rayon, donc une erreur sur les mesures angulaires, un allongement du trajet optique qui fausse les mesures de distance, et une modification des longueurs d'ondes utilisées par les instruments pour les mesures de distance. Ces erreurs sont liées aux variations des indices de réfraction le long de la visée, qui dépendent des propriétés physiques de l'air traversé. Une première modélisation de la courbure des rayons repose sur l'hypothèse d'une troposphère³¹ parfaitement stratifiée en différentes couches homogènes. C'est dans cette hypothèse qu'a été déterminée expérimentalement par Carl Friedrich Gauss la valeur moyenne du coefficient de réfraction, $k = 0,13$, encore souvent utilisée comme valeur par défaut. Ce coefficient de réfraction (appelé k ou mra ³² par la suite) peut directement être utilisé pour déterminer l'erreur angulaire commise sur l'angle vertical :

$$\delta = k \times \frac{D_n^2}{2 \times R_T} \quad (10)$$

L'hypothèse réalisée sur la constitution de la troposphère se révèle de plus en plus inexacte lorsque l'on se rapproche de la surface terrestre, là où sont effectuées les mesures topographiques, puisque les différents milieux rencontrés le long du trajet optique (béton,

³¹ Troposphère : couche la plus basse de l'atmosphère, en contact avec la surface de la Terre.

³² mra : module de réfraction atmosphérique.

champs, rivières...) vont interagir avec l'air environnant. Des études expérimentales [Hla10] ont montré que lors d'une journée d'été nuageuse, pour des mesures effectuées à deux mètres au-dessus du sol, des valeurs de k pouvant varier entre -2 et +5, et entre -4 et +16 pour une journée ensoleillée.

Le problème qui se pose donc est la détermination de cette valeur du coefficient de réfraction atmosphérique afin d'appliquer une correction des mesures adéquate. En effet l'application d'une correction fixe avec une valeur de k à 0,13 s'avère insuffisante, voire même absurde puisque, quand le coefficient est négatif, on observe des courbures du rayon optique dans le sens inverse (orienté vers le bas). Pour la suite, il est important de noter que ce phénomène se traduit aussi horizontalement, typiquement pour des visées rasantes (tunnels, le long de façades de bâtiments...).

IV.1.1 Utilisation des capteurs météorologiques

Une première méthode pour déterminer la valeur du mra repose sur la relation entre gradients de température et coefficient de réfraction. En effet, il est possible de déterminer un mra local (noté χ) à partir de la formule (11), et nous pouvons donc ensuite déterminer le mra moyen le long de la visée en réalisant la moyenne des mra locaux.

$$\chi = 503 \times \frac{P}{T^2} \left(0.0343 + \frac{\delta T}{\delta Z} \right) \quad (11)$$

La précision de cette méthode va reposer sur la détermination des gradients locaux de température, plus les milieux rencontrés le long du trajet optique seront différents, plus le nombre de déterminations des gradients de température locaux devra l'être si l'on souhaite approximer au mieux le mra moyen. Cette méthode nécessite donc l'utilisation de capteurs météorologiques afin de déterminer la température et la pression localement le long de la visée. Plus le milieu sera hétérogène, plus le nombre de capteurs nécessaires pour une bonne détermination du mra moyen sera grand. De plus, la détermination du mra moyen sera propre à chaque visée, il faut donc penser que dans un cas réel chaque visée entre la station et un point mesuré devra comporter des capteurs météorologiques. Cette méthode ne sera pas retenue pour effectuer une modélisation des variations du mra en vue d'une correction, de part son coût en production (nécessite de nombreux capteurs météorologiques), mais aussi pour son inexactitude dans le sens où, en milieu urbain, le maillage de détermination des températures / pressions devrait être très fin (milieu très

hétérogène) si l'on souhaite une détermination précise du *mra* moyen. En outre, cette méthode de correction ne peut être appliquée que pour les angles verticaux.

IV.1.2 Application du « fast-marching »

Le principe du « fast-marching » repose sur le principe physique qu'une onde électromagnétique va emprunter le chemin le plus rapide pour aller d'un point A vers un point B. Afin de déterminer ce chemin une carte des vitesses est utilisée en entrée de traitement, obtenue à partir d'un maillage de capteurs météorologiques, qui permet d'avoir une représentation spatiale des gradients de température. Plusieurs méthodes mathématiques, reposant sur le calcul de géodésiques, permettent ensuite d'étudier le trajet optique parcouru [GOBKe17]. Le « fast-marching » présente donc plusieurs avantages, il permet d'étudier les courbures du rayon optique que ce soit dans le plan vertical ou dans le plan horizontal, et permet une modélisation très précise du chemin parcouru par le rayon optique.

Cependant, chacun de ces avantages dépend des cartes des vitesses utilisées en entrées, plus la résolution d'une carte sera fine, plus le calcul du trajet optique correspondra au trajet réel. La complexité de cette méthode repose donc dans la création des cartes des vitesses. La première méthode consiste à réaliser un maillage de capteurs météorologiques sur le terrain utilisés ensuite pour déterminer les cartes de vitesses en tout point à l'aide de méthodes mathématiques telles que l'interpolation linéaire ou le krigeage.

Cette solution montre cependant très vite ses limites, puisqu'il serait très coûteux de couvrir l'ensemble d'un chantier d'auscultation à l'aide d'un maillage de capteurs météorologiques. Une deuxième solution, que nous n'étudierons pas ici, consisterait à utiliser une caméra thermique afin de produire des orthophotos de cartes de chaleurs, puis d'appliquer une segmentation des images afin d'obtenir des cartes de vitesses facilement exploitables.

Cette méthode semble donc être la plus adaptée à une modélisation précise des impacts de la réfraction atmosphérique sur les mesures en topographie. Toutefois sa mise en œuvre et son coût en fait une méthode non utilisable en production à l'heure actuelle.

IV.1.3 Méthode des visées réciproques simultanées

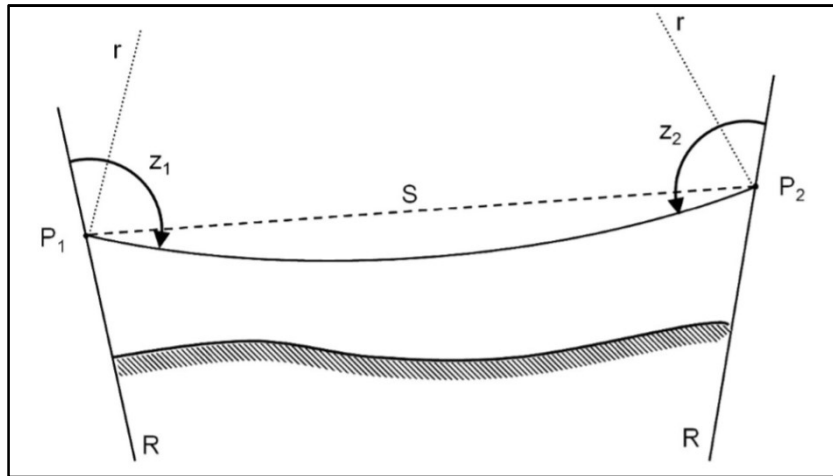


Figure n°16 : Schéma représentant la méthode des visées réciproques simultanées.

La méthode des visées réciproques simultanées (figure n°16) nécessite deux stations puisqu'il s'agit d'observer la même visée dans les deux sens, en visant l'oculaire de la station en face. En supposant l'erreur d'index supprimée à l'aide du double retournement, les angles zénithaux z_1 et z_2 (théoriquement complémentaires) et la distance horizontale entre les stations permettent de déterminer à l'aide de l'équation (12) une approximation du *mra*.

R_T : Rayon terrestre, D_h : Distance horizontale,
 V_A : Angle zénithal A, V_B : Angle zénithal B

$$mra = 1 + \frac{2R_T}{D_h} \left[\frac{1}{\text{tg}(V_A)} - \text{tg} \left(\frac{V_B - V_A}{2} \right) \right] \quad (12)$$

Cette méthode ne permet de corriger que les angles verticaux, mais sa mise en œuvre est simple. On ne peut pas l'appliquer sur un chantier puisqu'il faudrait, dans l'absolu, installer pour chaque point mesuré un couple station/prisme. Elle permet néanmoins de déterminer des valeurs de *mra* facilement dans des situations caractéristiques.

Une première approche de l'utilisation de cette méthode a été de construire des abaques à plusieurs paramètres, notamment dans des situations caractéristiques, permettant d'obtenir dans des situations semblables la valeur du *mra* au cours du temps en fonction de l'évolution de la température. Plus les paramètres d'entrées de l'abaque seront complets,

plus le modèle de correction sera précis. L'objectif étant de relier chaque visée, entre la station et un point, à un abaque correspondant en fonction de l'environnement traversé par le rayon optique. Les valeurs de mra ne dépendront ensuite que de la température ambiante au moment de la visée. Pour finir, une correction dans la chaîne de traitement peut être appliquée à l'aide de la formule (10). Afin d'obtenir ces abaques, la solution qui nous semblait la plus simple était de réaliser une étude des variations des valeurs de mra lors d'une marche à blanc. Dans ce cas seules certaines visées susceptibles d'être fortement impactées par les variations de température ambiante seront étudiées, puisqu'il n'est pas possible, matériellement, de mettre en œuvre la méthode des visées réciproques simultanées sur l'ensemble d'un chantier.

IV.2 Modélisation du phénomène et détermination des valeurs de mra

Dans cette partie, nous allons chercher à mettre en avant les problèmes rencontrés sur les résultats obtenus après ajustement, notamment sur les séries temporelles de déplacement des points. Nous essaierons ensuite de modéliser le phénomène selon différentes approches.

IV.2.1 Etude des séries temporelles « brutes »

Dans un premier temps, nous avons cherché à corrélérer les déplacements observés, que ce soit en X, en Y ou en Z sur les points avec les variations de température extérieure (Figure n°17). On remarque que les déplacements en X et en Y dépendent de la position du point mesuré par rapport à la station : on utilise alors les deux coefficients pour ensuite réaliser la moyenne des coefficients de corrélation qui est de 68% dans notre exemple (données de 44 prismes pendant 9 jours).

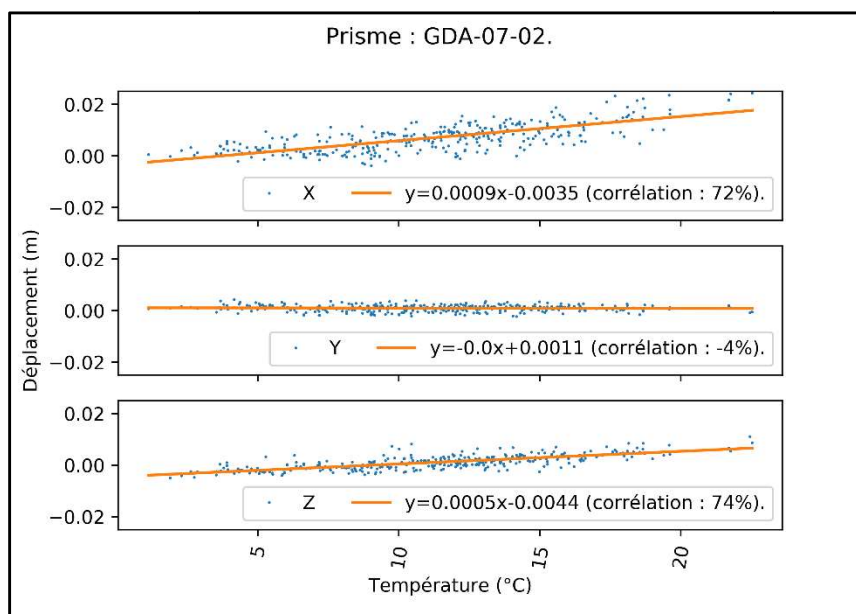


Figure n°17 : Corrélation entre déplacements et variations de température.

Nous pouvons aussi déduire des déplacements en X et en Y observés une variation cyclique des angles horizontaux et/ou du G0³³ de la station. Comme nous pouvons l'observer sur la figure n°18, la variation d'amplitude maximale observée est de 0,008 gon, ce qui représente 13 mm à 100 m. Or, la variation d'amplitude maximale observée sur les séries temporelles de déplacement d'un prisme à cette même distance est de 2 mm. Il y a donc un réel mouvement du G0 de la station que l'on peut expliquer par un phénomène de dilatation du support selon son orientation vis-à-vis de l'ensoleillement.

Cet effet est aussi visible sur les valeurs de nivelles longitudinales et transversales des stations au cours du temps : il engendre donc un défaut de verticalité de la station. Cependant la variation d'amplitude maximale des valeurs de nivelles est de 0,035 gon sur la période observée. Or, le compensateur des TM50 est annoncé fonctionnel par Leica jusqu'à 0,070 gon. C'est pourquoi nous ne retrouvons pas ce mouvement sur les coordonnées altimétriques des points mesurés. Ces derniers présentent toutefois des variations cycliques plus fines liées à la réfraction atmosphérique, comme nous le verrons par la suite.

³³ G0 : Graduation zéro du limbe de la station.

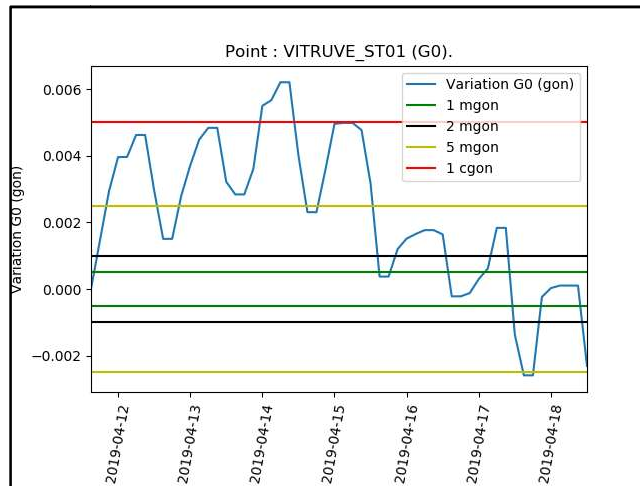


Figure n°18 : Evolution du G0 de la station.

IV.2.2 Méthode des visées réciproques simultanées

La méthode étant simple à mettre en place, nous avons décidé de réaliser des abaques dans des situations caractéristiques permettant de corriger ensuite les mesures d'angles zénithaux. A chaque situation nouvelle rencontrée la mise en place de cette méthode sera alors réalisée pour déterminer le *mra* en fonction de la température. Les abaques s'enrichiront alors au fur et à mesure, l'objectif final étant d'obtenir un abaque avec les 6 paramètres suivants :

- la température ambiante,
- le type de milieu rencontré supposé impacter la visée ou le type de matériau rencontré supposé impacter la visée,
- la longueur du milieu ou de l'objet rencontré,
- la distance entre la station et le point visé,
- la distance entre la station et le début du milieu ou de l'objet rencontré,
- la distance perpendiculaire entre le trajet optique et le milieu traversé ou l'objet rencontré.

Une première expérience terrain a été réalisée au-dessus de la Seine (Figure n°19) afin de mettre en évidence les variations du *mra* en fonction de la température ambiante, de la largeur de la Seine (qui ici sera fixe), de la distance entre la station et le prisme et de la

distance entre la station et la Seine. Cette situation caractéristique a été choisie pour ses fortes variations des gradients de température le long de la visée, puisque la chaleur au-dessus des quais est beaucoup plus forte que la chaleur au-dessus de la Seine, nous nous attendons donc à obtenir des valeurs de mra assez élevées.



Figure n°19 : Schéma de l'expérience réalisée.

L'expérience a été réalisée en fin de matinée, lors d'une journée très ensoleillée. L'ensemble des mesures sont récapitulées en annexe (voir Annexe n°2), nous allons détailler ici plus précisément le protocole mis en place. Nous avons tout d'abord installé une station de chaque côté de la Seine au plus proche des berges en restant dans une zone de sécurité. Nous avons ensuite réalisé des séries de dix mesures simultanées dans chaque configuration, puis nous avons déplacé successivement les stations du côté quai et du côté de l'île afin de s'écarter des berges.

Les mesures ont été réalisées à un intervalle régulier de 15 secondes, la température ambiante a été relevée en récupérant par la suite les données libres de la sonde météo la plus proche. Il s'agit donc seulement d'une estimation peu précise de la température au niveau des stations. La variation de température sur la durée de l'expérience ne pouvait pas être assez significative pour réaliser directement la corrélation entre la variation de température et la variation du mra.

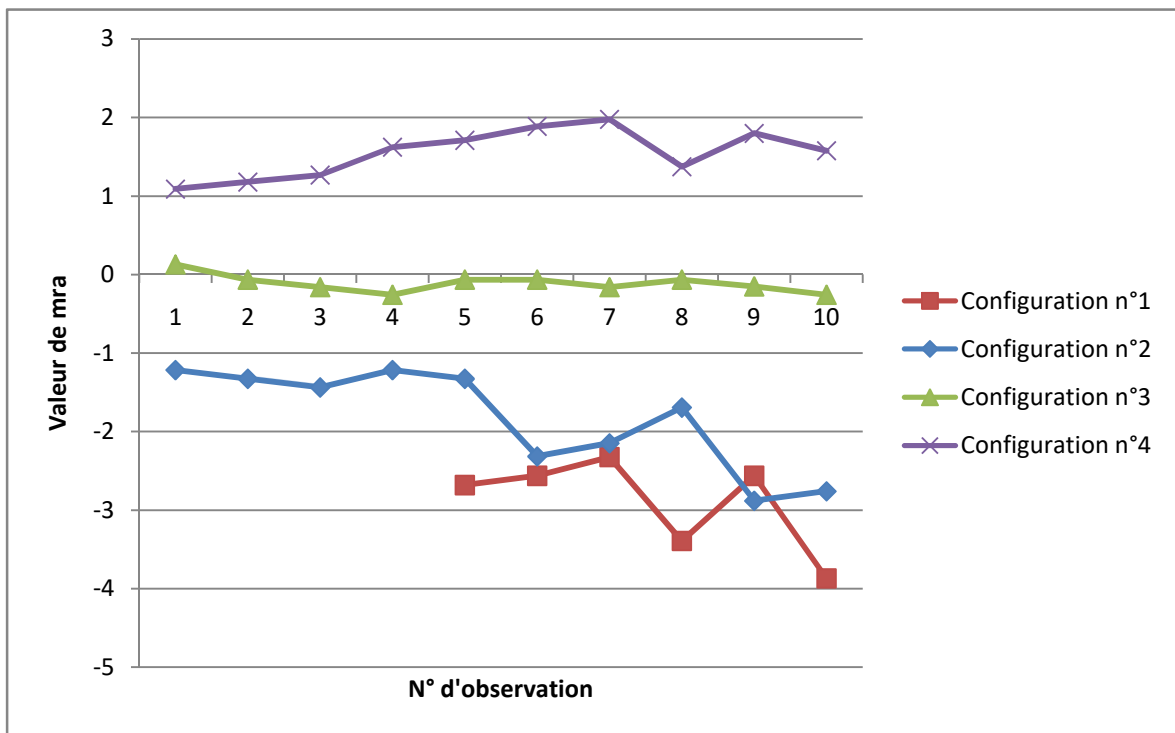


Figure n°20 : Courbes des valeurs de *mra* obtenues lors de l'expérience.

Une fois les observations réalisées, nous pouvons calculer les différentes valeurs de *mra* à l'aide de la formule (12). La figure 20 récapitule les résultats obtenus selon les différentes configurations, que nous allons détailler. La première configuration correspond aux deux stations face à face, à 2,30 m et 3,20 m des berges, avec une largeur de Seine de 79 m. Les quatre premières mesures se sont avérées inexploitables, les résultats obtenus étaient aberrants.

Par la suite nous obtenons, pour ce cas, un *mra* moyen de -2,9 (avec un écart-type de 0,6) qui nous indique donc une courbure du rayon opposée à la courbure terrestre. Si nous nous remettons dans le contexte physique, le rayon optique va emprunter le chemin le plus rapide entre la station et le point visé. D'après le modèle de Barrel et Sears, l'indice de réfraction de l'air diminue lorsque la température augmente, nous pouvons donc distinguer trois zones principales : la partie de la visée au-dessus de la Seine, où la température est censée être plus faible et les deux parties de la visée au-dessus des berges, où la température est beaucoup plus importante.

Nous pouvons donc synthétiser le parcours du rayon optique comme celui d'un rayon partant d'une zone à indice de réfraction faible, puis de plus en plus important et pour finir qui traverse à nouveau une zone à faible indice de réfraction. Or en appliquant la

loi de Snell-Descartes (13) illustrée par la figure 21, on observe que la courbure du rayon dans cette situation devrait suivre celle de la courbure terrestre, nous devrions donc obtenir théoriquement une valeur de *mra* positive.

$$n_1 \cdot \sin i_1 = n_2 \cdot \sin i_2 = \text{constante} \quad (13)$$

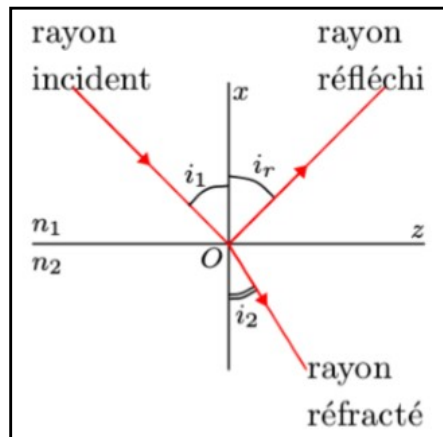


Figure n°21 : Illustration du phénomène de réfraction. [GOBKe17]

En étudiant ensuite les autres configurations, nos résultats se confirment, en effet pour la configuration n°2 (largeur de Seine de 79 m, distance des stations aux berges de 3,20 m et 8,48 m) nous obtenons une valeur moyenne de *mra* de -1,8 (écart-type de 0,6). Puis en s'écartant encore nous obtenons des valeurs de *mra* moyennes de -0,1 (écart-type de 0,1) pour la configuration n°3, et enfin de 1,5 (écart-type de 0,3) pour la dernière configuration. L'évolution de ces valeurs semble en cohérence avec l'évolution des configurations, mais les signes devant les valeurs sont en désaccord avec la théorie.

Nous pouvons cependant émettre différentes hypothèses afin de les expliquer. Premièrement les parties bétonnées des quais se situaient à l'ombre durant la matinée, les températures attendues au-dessus de ces derniers n'étaient donc pas aussi importantes que prévu. Deuxièmement, le rayon optique entre les deux stations se situait à une hauteur d'environ 2,5 à 3 m, nous pouvons donc supposer que l'impact attendu par la température de la Seine ne soit finalement pas assez perceptible à cette distance. Pour finir nous pouvons aussi émettre une hypothèse sur les mouvements d'air liés au vent qui auraient pu fausser l'ensemble de nos résultats en changeant la répartition des différents indices de réfraction, mais dans ce cas nous nous attendrions à des écarts types important sur les valeurs de *mra* calculées, ce qui ne nous semble pas assez être le cas ici.

A partir de ces résultats nous pouvons créer un premier abaque illustré par la figure 22, qui nous permet d'obtenir la valeur de mra à appliquer pour corriger les observations d'angles zénithaux, en fonction des distances entre la station / le point visé par rapport aux berges. Cette expérience est à répéter plusieurs fois lors de la marche à blanc afin de faire varier le paramètre température, pour pouvoir corriger continuellement les observations, à l'aide de la formule (14). Avec « delta » l'erreur angulaire commise, « Dh » la distance horizontale entre la station et le point et « R_T » le rayon terrestre.

$$\partial = mra \times \frac{Dh^2}{2 \cdot R_T} \quad (14)$$

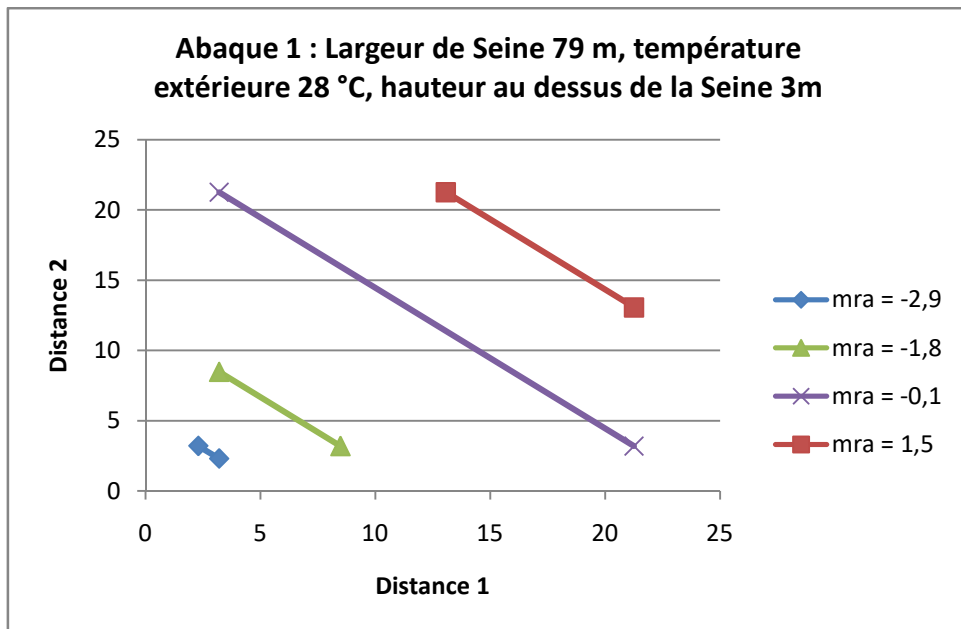


Figure n°22 : Abaque n°1.

IV.2.3 Etude des gradients de température horizontaux

Plusieurs études ont montré que le phénomène de réfraction atmosphérique ne s'observait pas seulement sur les observations d'angles zénithaux. En effet le même phénomène se produit sur les observations d'angles horizontaux, notamment pour des visées rasantes comme en tunnel par exemple, ou le long d'une façade d'un bâtiment exposé au soleil.

La grande difficulté qui se pose ici est au niveau de la méthode de détermination d'un coefficient de réfraction horizontale. Il n'est plus possible de mettre en œuvre la méthode des visées réciproques, qui ne permet pas sa détermination. Les méthodes qui utilisent des capteurs météorologiques telles que le Fast-Marching restent applicables, or nous avons vu que leur mise en œuvre ne peut être réalisée en entreprise, car trop coûteuse.

Une approche envisageable consiste, toujours lors de la marche à blanc, à relever les variations observées sur les angles horizontaux et ainsi les corrélérer aux variations de température. Cette méthode pose néanmoins un inconvénient majeur, puisque les variations angulaires peuvent provenir d'autres phénomènes, tels qu'un réel mouvement ou encore une dilatation du support de la station en fonction de l'ensoleillement.

Cette dernière approche est une piste de réflexion qui n'a pu être menée jusqu'au bout lors du TFE, mais son étude s'avère intéressante puisque la modélisation ne repose que sur une étude des observations lors de la marche à blanc, la difficulté serait de bien décorréler la réfraction des autres phénomènes impactant les observations.

Conclusion

Afin de rester compétitif, sur un marché très exigeant, DELTA Auscultation essaie de renouveler et d'améliorer continuellement ses prestations. C'est dans ce cadre que s'est inscrit le sujet de ce TFE, afin de proposer de nouvelles solutions en vue d'optimiser la compensation des réseaux d'auscultation temps réel.

Dans un premier temps, l'ensemble du travail s'est orienté sur le pilotage des stations totales, afin d'avoir une maîtrise sur la chaîne de traitement dès l'acquisition des observations. En effet, comme nous avons pu le montrer ni le logiciel Leica GeoMoS, ni Trimble 4D Control Server ne convenaient. D'une part puisqu'ils ne permettaient pas d'appliquer directement les scripts développés lors du TFE de B. MARTEAU pour des calculs de compensation en réseau en continu. D'autre part, la personnalisation du type d'acquisition, notamment au niveau des cycles de mesure, s'est avérée très limitée sur ces logiciels, avec pour principale conséquence une limitation du nombre de points auscultables par heure, bien inférieur à la concurrence.

Cette partie avait pour deuxième objectif de réduire le temps que peuvent passer les opérateurs sur le terrain lors d'une installation de station, du premier learn, ou lors d'une intervention sur une station déjà installée. Le cahier des charges a donc été établi principalement en concertation avec les collaborateurs, que ce soit les techniciens ou les chefs de chantier.

L'ensemble de la réflexion s'est ensuite orientée sur la mise en correspondance des différents retours terrain et bureau, avec la mise en place d'une architecture réseau permettant de relier la chaîne d'acquisition à la chaîne de traitement. Ceci s'est traduit principalement par la création d'une base de données permettant de recueillir l'ensemble des observations et indicateurs des stations, sous forme de tables directement exploitables par la chaîne de traitement.

Pour finir cette partie, le logiciel DELTA Control a été développé afin de traduire graphiquement, dans un premier temps, l'ensemble du travail mené. Par la suite les différentes fonctions ont été développées, le logiciel a été relié à la base de données hébergée sur serveur, et lorsque nous avons reçu la licence GeoCOM les premières interactions avec les stations ont été incrémentées. Par la suite, l'objectif de DELTA Auscultation sera de continuer la mise en relation entre les fonctions pensées dans le

logiciel, avec les commandes de la licence, il ne s'agira en soit plus que d'une mise en correspondance, puisque l'ensemble des commandes nécessaires sont développées dans la licence GeoCOM.

Dans un second temps, nous nous sommes intéressés à la mise en réseau des stations afin d'appliquer les scripts de compensation par moindres carrés développés par B. MARTEAU. Le premier travail consistait en une gestion des données transmises par le logiciel Leica GeoMoS afin de construire les différents cycles à ajuster, tout en faisant correspondre chaque cycle d'observations de chaque station avec son bon cycle de références.

Une fois la compensation en réseau en continu effective, nous avons cherché à optimiser les résultats en sortie. Pour cela deux approches principales ont été réalisées. Tout d'abord nous avons cherché à corriger les distances mesurées de l'influence des paramètres météorologiques. En effet comme cela a été présenté précédemment, cette correction n'était pas réalisée jusqu'à lors mais a commencé à poser problème sur l'un des chantiers de DELTA Auscultation.

Ensuite nous nous sommes intéressés à la mise en place des points doubles, voir triplets de points, sur un réseau d'auscultation réel, dans la continuité de ce qui a été présenté dans le TFE de B. MARTEAU. Plusieurs préanalyses dans différentes situations ont été réalisées afin de mettre en avant la pertinence de cette méthode de traitement. Nous avons pu valider théoriquement puis expérimentalement la solution des stations dites aveugles, qui nous permet de nous dissocier de l'hypothèse de stabilité des références, notamment pour les stations qui ne peuvent pas avoir de références hors ZIG.

Pour finir cette partie nous avons prévu d'aborder la notion des tests de congruence, qui s'avère intéressante pour étudier le comportement des références supposées fixes hors ZIG. Cependant cette notion n'a pu être développée dans la chaîne de traitement en continu, puisqu'il nous fallait revoir tout le traitement de la compensation par moindres carrés afin de reconstruire les matrices utiles.

La dernière partie de ce mémoire a ensuite été consacrée à l'étude de l'impact de la réfraction atmosphérique sur les observations angulaires des stations totales. Après une étude bibliographique approfondie nous permettant de mettre en avant la problématique posée et les solutions de traitements existantes, nous avons essayé d'aborder le problème d'un point de vue « entreprise ». Dans cette optique plusieurs solutions se sont avérées tout

de suite comme non envisageables, de part leurs coûts de mise en œuvre. Nous avons donc proposé une méthode d'étude des variations du *mra* à partir de la méthode des visées réciproques afin d'obtenir des tables de correspondances entre température, configuration terrain et *mra*.

Une expérience terrain a été menée dans l'objectif de créer un premier abaque illustrant ce protocole, les résultats n'ont toutefois pas été conformes à la théorie, ce que nous avons essayé d'expliquer par la suite. La situation retenue ne semble pas assez caractéristique pour évaluer notre protocole, mais dans la suite de ce travail DELTA Auscultation pourra remettre en place cette expérience dans d'autres situations.

Dans l'ensemble, ce travail de fin d'études m'a permis d'aborder le travail de recherche que ce soit à travers les différentes études bibliographiques ou l'établissement de protocoles expérimentaux. La formation qui nous a été enseignée à l'ESGT m'a permis de prendre du recul devant les différents problèmes rencontrés, et d'aborder des aspects qui ne sont pas forcément liés au métier de Géomètre.

Bibliographie

Ouvrages imprimés

[CHa106] CHRZANOWSKI Adam, WILKINS Rick. Accuracy evaluation of geodetic monitoring of deformations in large open pit mines. 12th FIG Symposium on Deformation Measurements, 2006, 11p.

[DSt18a] DURAND Stéphane. Cours de Topométrie de Précision IG4. ESGT, 2018, 165p.

[DSt18b] DURAND Stéphane. Cours de Topométrie de Précision IG5. ESGT, 2018, 73p.

[DSt18c] DURAND Stéphane. Cours de Topométrie de Précision 2 IG5. ESGT, 2018, 86p.

[GHa106] GHILANI Charles D., WOLF Paul R. Adjustment Computations: Spatial Data Analysis, Fourth Edition. John Wiley & Sons, 2006, 632p.

[Hla110] HIRT Christian, GUILLAUME Sébastien, WISBAR Annemarie, BÜRKI Beat, and STERNBERG Harald. Monitoring of the réfraction coefficient in the lower atmosphere using a controlled setup of simultaneous reciprocal vertical angle measurements. Journal of Geophysical research, vol 115, 2010.

[LEgeo1] LEICA Geosystems. Caractéristiques techniques de la station totale Leica Nova MS50.

[LEgeo2] LEICA Geosystems. Caractéristiques techniques de la station totale Leica Nova TM50.

[LEflex] LEICA FlexLine. GeoCOM Reference Manual. Version 1.30, 131p.

[Mla108] MILLES Serge, LAGOFUN Jean. Topographie et topométrie moderne, volume 1 : Techniques de mesure et de représentation. Eyrolles, 2008.

[MUA118] MULLER Jean-Michael, BOUQUET Paul. Comp3D – Logiciel de compensation microgéodésique version 5.16. Documentation. 2018.

[SEa101] SETAN Halim, SINGH Ranjit. Deformation analysis of a geodetic monitoring network. Geomatica, vol 55, 2001, 16p.

[TRtech] TRIMBLE. Fiche technique de la station totale Trimble S7.

[TRme16] TRIMBLE. Measurement Corrections Improvements. Support Bulletin, 2016.

[TSal07] TSOULIS Dimitrios, PETROVIC Svetozar, KILIAN Nicole. Theoretical and numerical aspects of the geodetic method for determining the atmospheric refraction coefficient using simultaneous and mutual zenith observations. *Journal of Surveying Engineering*, 2007, 29p.

Travaux universitaires

[ASSJu15] ASSEMAT Julien. Évaluation des performances de capteurs topographiques pour la mesure de déformation. Mémoire de fin d'études, INSA Strasbourg, 2015, 63p.

[GOBKe17] GOBRON Kévin. Etude de la correction des effets de la réfraction atmosphérique sur les mesures tachéométriques. Mémoire de fin d'études, ENSG/ESGT, 2017, 70p.

[GUECI10] GUERIN Clément. Comparaison de logiciels d'ajustement de mesures topographiques [en ligne]. Mémoire de fin d'études, ESGT, 2010, 58 p. Disponible sur : http://geomatique.esgt.cnam.fr/ig4/td/documents/covadis/10_Guerin.pdf

[MARBa18] MARTEAU Baptiste. Optimisation de la compensation de réseaux d'auscultation temps réel par prise en compte de groupes de stations totales. Mémoire de fin d'études, ESGT, 2018, 53p.

Sites web

[SGP019] Société du Grand Paris. Grand Paris Express : transformer la mobilité au quotidien des Franciliens, [en ligne]. Disponible sur : <http://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/grandparis-express-transformer-mobilite-au-quotidien-des-franciliens>

(consulté le 08 juin 2019).

Table des annexes

Annexe 1 DELTA Control Présentation Générale	55
Annexe 2 Carnets de terrains	56

Annexe 1
DELTA Control Présentation Générale



10/05/2019

DELTA CONTROL PRESENTATION GENERALE



DELTA
AUSCULTATION
Mesurer | Analyser | Garantir

Informations qualité du document

Période concernée par le rapport	
Date du document	10/05/2019

Indice	Date	Rédigé par	Vérifié par	Validé par
A	10/05/2019	G. GRILLET	B. MARTEAU	M. BOURDON

SOMMAIRE

PARTIE 1 PRESENTATION DE L'INTERFACE	4
1.1. Lancement de l'interface	4
1.2. Définition de la station	4
1.3. Mise en station	6
1.4. Groupe de mesures	8
1.5. Validation	10
1.6. Interface Data Manager	10
PARTIE 2 BASE DE DONNEES	15
2.1. Présentation de la structure des tables	15
PARTIE 3 PROGRAMME A DEVELOPPER	16
3.1. Paramètres à récupérer en entrées	16
3.2. Schéma de fonctionnement du programme	16

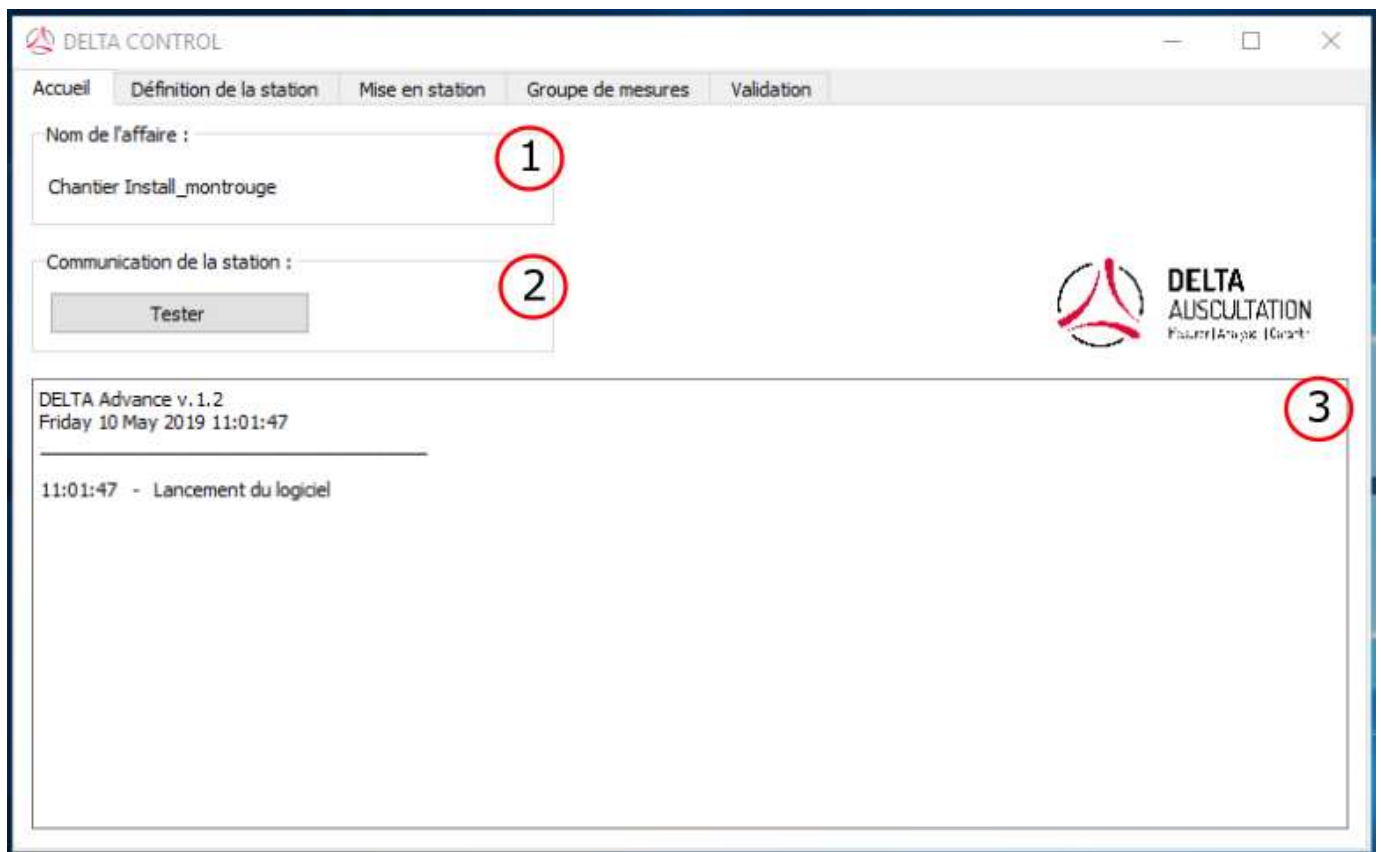


PARTIE 1

PRESENTATION DE L'INTERFACE

1.1. Lancement de l'interface

L'application est préinstallée sur la Combox à l'aide d'un PC local auquel un accès est possible en connexion filaire ou à l'aide d'une connexion internet pour une prise en mains à distance.



1 : Nom de l'affaire dans laquelle est installée la station.

2 : Permet de tester la communication entre le logiciel et la station. Implémenter la fonction GeoCOM correspondante, liée au bouton défini ligne 103 : `self.verif_comm_button`.

3 : Zone d'affichage « log files », permet de résumer les actions réalisées par l'utilisateur pour un meilleur suivi lors de l'intervention.

1.2. Définition de la station



Dans ce deuxième onglet l'ordre d'exécution diffère selon le type d'intervention.

- En cas de première installation il faudra commencer par définir la station (5). Dans ce cas deux choix sont possibles, définir seulement le nom de la station si les coordonnées et l'orientation seront calculées plus tard à l'aide des références ou alors définir directement la position et l'orientation pour une station en coordonnées locales. On peut ensuite sélectionner la station dans le menu déroulant (4).
- En cas d'intervention simple sur la station pour un « learn » de nouveaux points par exemple on ne réalise pas l'étape (5) et on sélectionne directement la station.

Ensuite il est possible de mettre en pause la station et de lancer un cycle forcé, dans le cas où un cycle à déjà été défini pour la station.

Les différentes cases en (6) permettent d'activer ou non le pointeur laser, et d'intervertir le type de mesure des distances (laser/ATR). Le pointeur laser pourra être utilisé par la suite pour vérifier la bonne orientation de la station sur un prisme par exemple, le type de mesure permettra de changer le mode d'acquisition avant de mesurer un nouveau point (Prisme ou ReflectorLess).

5 : Les différentes informations sont stockées directement dans la base de données locale dans la table « stations », la base de données sera présentée plus loin dans ce rapport.

Le bouton « Orienter et mesurer » est à lier aux commandes GeoCOM, il est défini ligne 225.

4 : Le menu déroulant est connecté à la table correspondante dans la base de données, les boutons « Mettre en pause » et « Cycle forcé » sont à lier aux commandes GeoCom, leurs fonctions sont définies respectivement aux lignes 635 (clic_stop_button) et 644 (clic_forced_button).



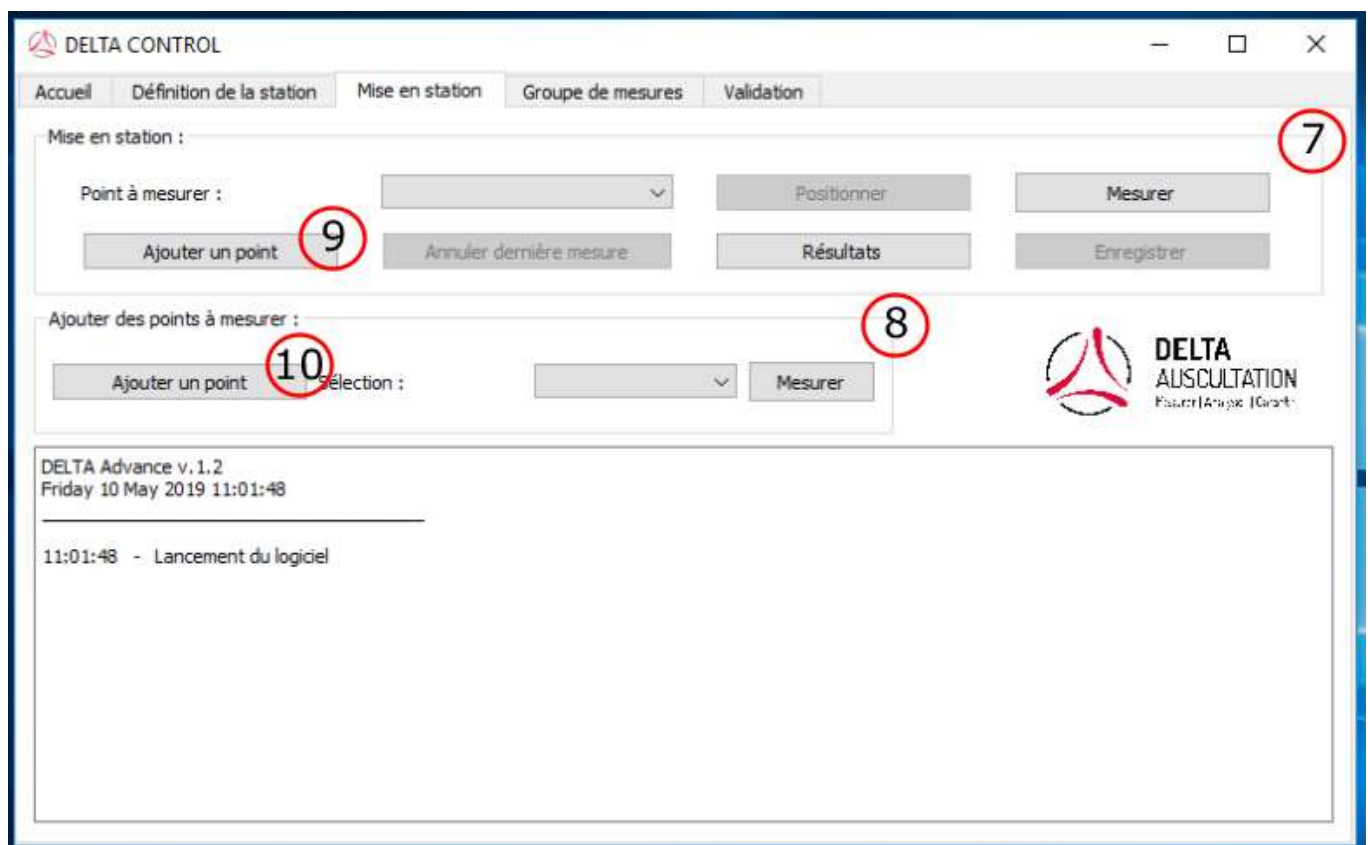
6 : Les boutons sélectionnables sont à lier aux commandes GeoCom, ils sont définis ligne 182, 183 et 185.

1.3. Mise en station

L'onglet « Mise en station » permet de calculer la position et l'orientation de la station à partir des mesures effectuées sur des prismes connus en coordonnées. Les points sont rentrés en amont dans la base de données, et sont donc directement disponibles dans le menu déroulant (7).

Pour effectuer les mesures il suffit de choisir un point, d'orienter la station puis de cliquer sur « Mesurer », après deux points ou plus mesurés le bouton « Positionner » permet d'orienter automatiquement la station sur le prisme avant la mesure.

Le bouton « Annuler dernière mesure » permet d'annuler la dernière mesure, le bouton « Enregistrer » permet de stocker dans la base de données les paramètres de la station.



Le bouton « Ajouter un point » (9) permet de rentrer les coordonnées d'un point qui n'est pas dans la base de données afin d'effectuer une mesure dessus pour le calcul de la mise en station.



Le bouton « Résultats » permet de visualiser le résultat de la mise en station avant de l'enregistrer, la liste des points mesurés s'affiche et l'on peut ensuite décocher certains points pour gagner en précision sur les différents sigmas. Si les écarts sont supérieurs à un seuil qu'il faudra définir, ils s'afficheront en rouge. Lorsque trop de points ont été décochés, le calcul ne se réalisant plus, aucun résultats ne sera affiché.

Le bouton « Ajouter un point » (10) permet d'ajouter des points à « learner », il suffit de rentrer le nom du point puis de l'enregistrer, il devient disponible dans le menu déroulant afin d'être mesuré. Si un grand nombre de noms de points est à rentrer il est possible de charger un fichier texte directement.

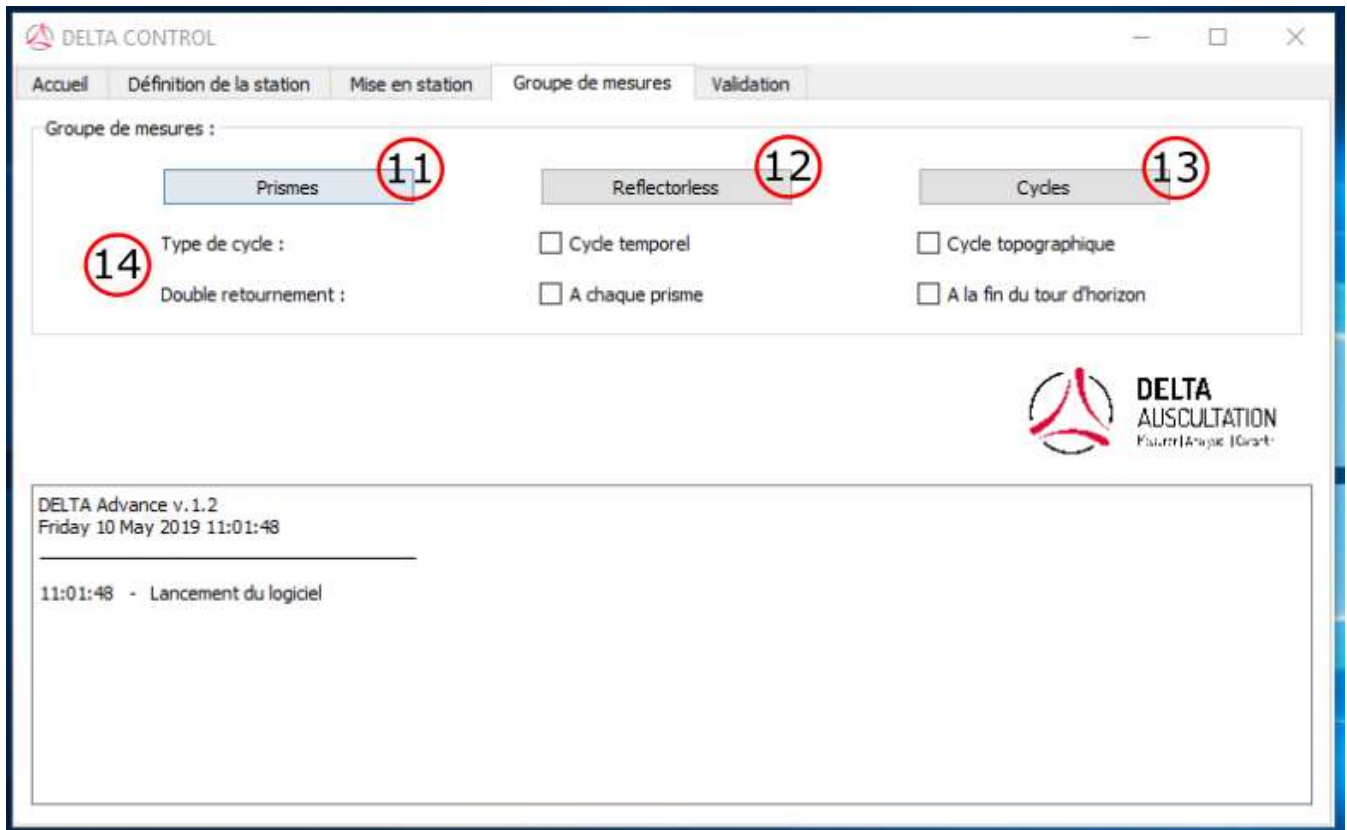
7 : Bouton « Positionner » et « Mesurer » à lier aux commandes GeoCOM, définis aux lignes 331 et 336. Bouton « Résultats » choisir une méthode de calcul à affecter (Moindres carrés => trop lourd ? ; similitude à 6 paramètres => dépend fortement de la géométrie ?).



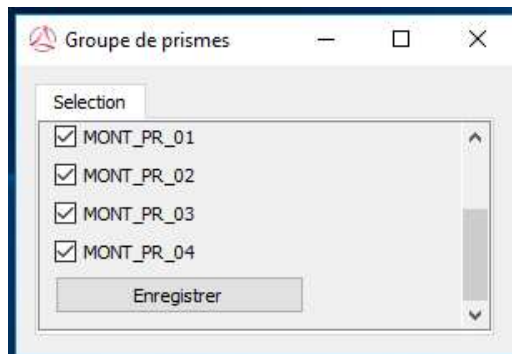
8 : Bouton « Mesurer » à lier aux commandes GeoCOM, définis à la ligne 400.

1.4. Groupe de mesures

Cet onglet permet de définir les prismes qui seront à lever. Il permet aussi de paramétrer de différentes façons les cycles qui seront effectués afin d'optimiser l'acquisition des données.



11 : « Prismes », liste de tous les prismes disponibles dans la base de données pour cette station, tous les prismes sont sélectionnés de base mais il est possible d'en supprimer du groupe de mesures en décochant le prisme puis en enregistrant.



12 : « Reflectorless », même principe que pour les prismes, il reste à prévoir leur définition.

13 : « Cycles », fenêtre qui permet une personnalisation des types de cycles.



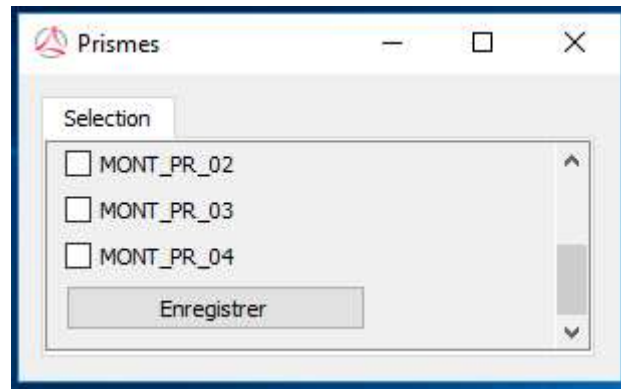
14 : Sélection du type de cycle et du type de double retournement qui seront appliqués à la station après validation finale.

Pour la définition des cycles, deux axes différents ont été pensés.

- Un cycle dit « temporel » que l'on paramètre avec une heure de début du premier cycle, une heure de fin du dernier cycle et un intervalle entre cycles.
- Un cycle dit « topographique » qui mesure les prismes au fur et à mesure du tour d'horizon de la station, commençant par le prisme sélectionné dans le menu déroulant. Dans ce cycle il est aussi possible de sélectionner des prismes que l'on souhaite lever avec une plus grande fréquence (15). Ce type de cycle à l'avantage de tourner en continu, et permet donc une plus grande acquisition de données (en nombre de points et/ou fréquence).

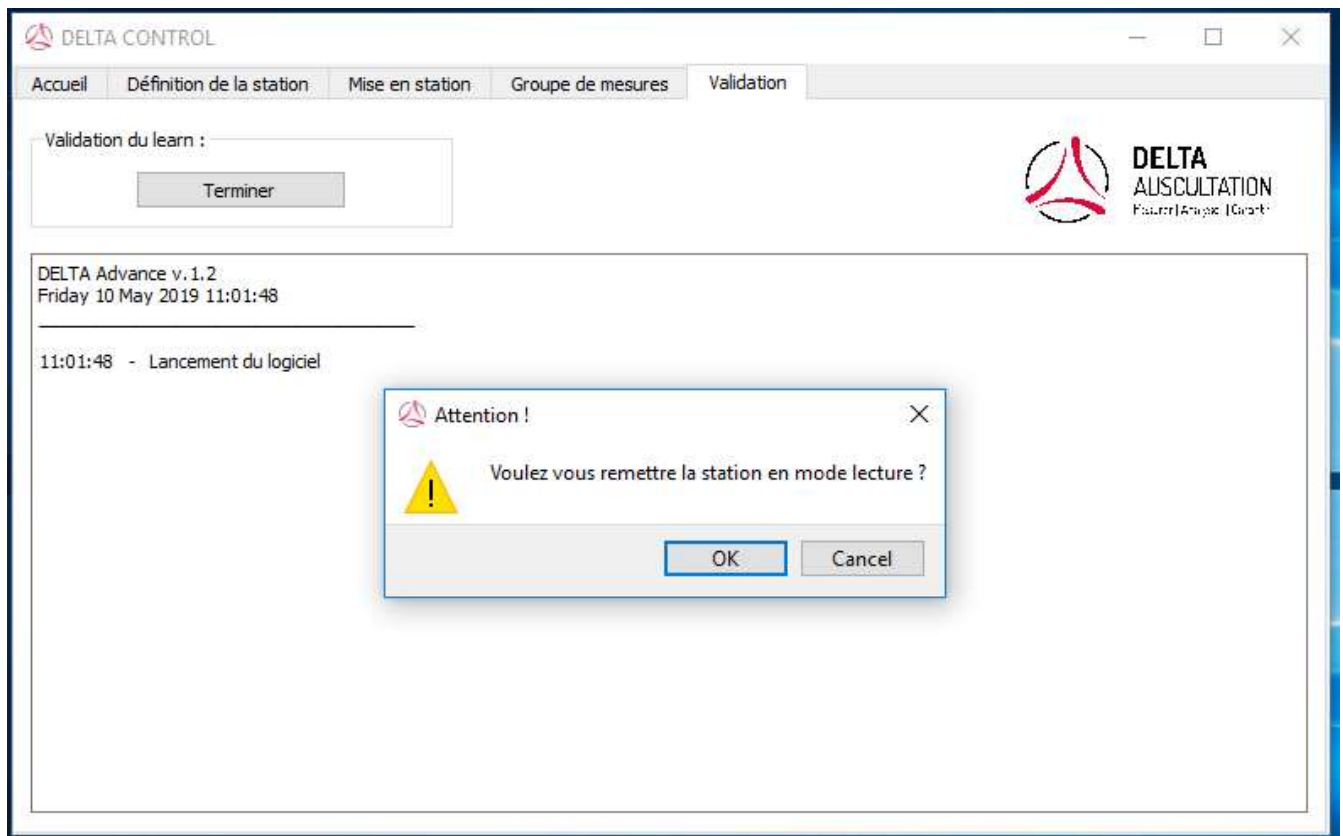
Les paramètres des cycles sont eux aussi enregistrés dans la base de données, dans la table « cycles ».

15 : Fenêtre de sélection des prismes concernés par l'acquisition « m tour sur n ».



1.5. Validation

Le dernier onglet permet de valider l'intervention, il nous propose de remettre la station en mode lecture, dans ce cas une liaison des commandes GeoCOM est à prévoir afin de remettre l'écran en veille et pour éteindre le pointeur laser. Une fois tout valider, le programme de pilotage devra se lancer et fonctionner en continu, il prendra en entrées les différents paramètres qui ont été acquis dans la base de données pendant l'intervention.



1.6. Interface Data Manager



Afin d'avoir un contrôle à distance de chaque station et de façon plus avancé, le logiciel dispose dans une version d'une interface « Data Manager ». Ce dernier permet une interaction simple avec les bases de données mais aussi de définir des réseaux.

Il permet tout d'abord d'interagir avec les différentes tables présentées précédemment, « stations », « points » et « groupes ». Plusieurs choix sont possibles entre la suppression, la modification et la création.

Nous ne reviendrons pas plus en détails sur leurs fonctionnalités, il ne s'agit que d'interactions avec les bases de données existantes donc le format de ces onglets est amené à s'adapter aux bases de données.

Station :

Data Manager

Général Station Point Groupe Réseaux

Sélection de la station :

Modification :

Renommer Supprimer la station

Créer une station

Modification de la table :

Numéro de série : Communication : Projection : GO :

X : Y : Z : Enregistrer

Point :



Data Manager

Général Station Point Groupe Réseaux

Sélection du point :

Modification :

Renommer Supprimer le point

Créer un nouveau point

Modification de la table :

ID Station : ID Groupe : Code :

X : Y : Z :

Dh : Hz : V : Enregistrer

Groupe :

Data Manager

Général Station Point Groupe Réseaux

Sélection du groupe :

Modification :

Renommer Supprimer le groupe

Créer un nouveau groupe

Modification de la table :

Type :

Enregistrer

Le dernier onglet permet de définir des réseaux de stations afin de stocker certaines données dans la base de données générale sur le serveur. On commence par définir les stations qui composent le réseau puis l'on définit les différentes liaisons entre les stations, que ce soit à travers des références simples visées par plusieurs stations sous un même nom ou non, ou alors des points doubles reliant deux stations par un vecteur que l'on fixera (D, Hz et V) qui est calculé automatiquement à partir des coordonnées des points récupérées dans les bases de données.

Interface Réseaux :



Data Manager

Général Station Point Groupe Réseaux

Définir un groupe de station à calculer en réseau :

Nom du réseau : Selection des stations Points simples Points doubles

Enregistrer le réseau

Modifier un réseau existant :

Sélection du réseau : Stations Références communes Points doubles

Enregistrer les modifications

Définition des « points simples » :

Selection des points simples

Référence commune :

Enregistrer


<= Correspondance =>

Enregistrer

Charger un fichier txt de références communes

Définition des « points doubles » :



 Définition des points doubles

MONT_REF_01 <=> Correspondance => MONT_REF_03

Vecteur de 1 vers 2:

Distance pente :	<input type="text" value="10.80569"/>
Angle vertical :	<input type="text" value="1.54994"/>
Azimut :	<input type="text" value="3.11424"/>



PARTIE 2

BASEDE DONNEES

2.1. Présentation de la structure des tables

Table « stations » :

id	Nom	n°serie	Communication	Projection	X	Y	Z	G0
text	text	text	text	text	real	real	real	real

Table « points » :

id	Nom	Id_station	Id_group	code	X	Y	Z	Dh	Hz	V
text	text	text	text	text	text	text	text	real	real	real

Table « cycles » :

id	type	heure_d	heure_f	intervalle	debut	II	Pr	M	N
text	text	text	text	text	text	text	text	text	text

Table « groups » :

id	name	type
integer	text	integer



PARTIE 3

PROGRAMME A DEVELOPPER

3.1. Paramètres à récupérer en entrées

- N° de série, paramètre de communication et projection de la station.
- Position et orientation de la stations.
- Noms et positions des prismes.
- Noms et positions des reflectorless.
- Paramètres du cycle choisis.
- Type de double retournement choisis.

Ces différents paramètres seront utilisés en entrées de programme afin de communiquer avec la station et de définir les différentes actions à réaliser.

3.2. Schéma de fonctionnement du programme

- 1 : Etablissement de la connexion avec la station, premier lancement lors de la validation du premier learn.
- 2 : Lecture du type de cycle et du type de double retournement.
- 3 : Levé des prismes / reflectorless en fonction de « 2 ». Récupération des angles, distances et coordonnées rayonnées, incrémentation dans la base de données sur serveur au même format que les tables de sorties de Geomos pour pouvoir utiliser les mêmes entrées présent par DELTA Advance pour le calcul par moindres carrés.
- 4 : Emission d'un signal, à définir, pour demander à DELTA Advance d'effectuer le calcul du cycle.
- 5 : En parallèle, émission en continue des informations de nivelles longitudinales et transversales.
- 6 : Liaison avec DELTA CONTROL des fonctions « Mettre en pause » et « Cycle forcé ».
- 7 : Une fois « 1 » et « 2 » initialisé, fonctionnement de « 3 » à « 6 » en boucle.

Annexe 2

Carnets de terrains

Distance berge	Distance Station	Hz	Av	T (°C)	Heure
STI_1 (île) 2,30 m	ST_1 (quai) 84,2499 m	Echec	Echec	27	11h45m00
		Echec	Echec	27	11h45m15
		Echec	Echec	27	11h45m30
		Echec	Echec	27	11h45m45
		343,8522	99,5987	27	11h46m00
		343,8520	99,5988	27	11h46m15
		343,8518	99,5987	27	11h46m30
		343,8519	99,5996	27	11h46m45
		343,8520	99,5988	27	11h47m00
343,8521	99,5997	27	11h47m15		
STI_2 8,48 m	ST_1 90,2342 m	347,1632	99,7361	27	12h05m00
		347,1669	99,7359	27	12h05m15
		347,1665	99,7372	27	12h05m30
		347,1663	99,7371	27	12h05m45
		347,1665	99,7363	27	12h06m00
		347,1659	99,7379	27	12h06m15
		347,1653	99,7376	27	12h06m30
		347,1665	99,7372	27	12h06m45
		347,1658	99,7369	27	12h07m00
347,1658	99,7367	27	12h07m15		
STI_3 21,2554 m	ST_1 103,2558 m	344,5889	99,7680	28	12h20m00
		344,5882	99,7678	28	12h20m15
		344,5877	99,7682	28	12h20m30
		344,5880	99,7679	28	12h20m45
		344,5873	99,7683	28	12h21m00
		344,5880	99,7685	28	12h21m15
		344,5870	99,7685	28	12h21m30
		344,5871	99,7689	28	12h21m45
		344,5874	99,7691	28	12h22m00
344,5876	99,7691	28	12h22m15		
STI_3 21,2554 m	ST_2 112,9504 m	345,1742	99,5947	29	12h22m30
		345,1746	99,5935	29	12h22m45
		345,1749	99,5942	29	12h23m00
		345,1757	99,5932	29	12h23m15
		345,1749	99,5937	29	12h23m30
		345,1750	99,5942	29	12h23m45
		345,1757	99,5930	29	12h24m00
		345,1753	99,5945	29	12h24m15
		345,1757	99,5934	29	12h24m30
345,1750	99,5930	29	12h24m45		

Distance berge	Distance Station	Hz	Av	T (°C)	Heure
ST_1 (quai) 3,20 m	STI_1 (île) 84,2499 m	Echec	Echec	27	11h45m00
		Echec	Echec	27	11h45m15
		Echec	Echec	27	11h45m30
		Echec	Echec	27	11h45m45
		84,7040	100,4044	27	11h46m00
		84,7056	100,4042	27	11h46m15
		84,7042	100,4041	27	11h46m30
		84,7043	100,4041	27	11h46m45
		84,7073	100,4042	27	11h47m00
84,7034	100,4044	27	11h47m15		
ST_1 3,20 m	STI_2 90,2342 m	351,4861	100,2659	27	12h05m00
		351,4805	100,2662	27	12h05m15
		351,4847	100,2650	27	12h05m30
		351,4818	100,2649	27	12h05m45
		351,4811	100,2658	27	12h06m00
		351,4811	100,2651	27	12h06m15
		351,4835	100,2652	27	12h06m30
		351,4845	100,2652	27	12h06m45
		351,4896	100,2666	27	12h07m00
351,4809	100,2667	27	12h07m15		
ST_1 3,20 m	STI_3 103,2558 m	218,5719	100,2329	28	12h20m00
		218,5742	100,2333	28	12h20m15
		218,5728	100,2330	28	12h20m30
		218,5746	100,2334	28	12h20m45
		218,5753	100,2328	28	12h21m00
		218,5701	100,2326	28	12h21m15
		218,5732	100,2327	28	12h21m30
		218,5740	100,2322	28	12h21m45
		218,5729	100,2321	28	12h22m00
218,5719	100,2322	28	12h22m15		
ST_2 13,0700 m	STI_3 112,9504 m	194,5690	100,4052	29	12h22m30
		194,5744	100,4063	29	12h22m45
		194,5672	100,4055	29	12h23m00
		194,5701	100,4061	29	12h23m15
		194,5695	100,4055	29	12h23m30
		194,5657	100,4048	29	12h23m45
		194,5677	100,4059	29	12h24m00
		194,5692	100,4051	29	12h24m15
		194,5727	100,4057	29	12h24m30
194,5700	100,4064	29	12h24m45		

Liste des figures

Figure n°1 : Carte schématique du réseau à l'horizon 2030.	6
Figure n°2 : Chaîne de traitement actuelle de l'entreprise DELTA Auscultation.	9
Figure n°3 : Présentation de l'architecture réseau du logiciel.	13
Figure n°4 : Capture d'écran du logiciel DELTA Control.	15
Figure n°5 : Capture d'écran du logiciel DELTA Control.	18
Figure n°6 : Requête GeoCOM.	20
Figure n°7 : Schéma de présentation du réseau de stations étudié.	24
Figure n°8 : Schéma de la condition de mise en relation	26
Figure n°9 : Photographie de l'installation d'un triplet de prismes.	28
Figure n°10 : Série temporelle de position de la station FIVC_ST01 avec références fixes.	31
Figure n°11 : Série temporelle de position de la station FIVC_ST01 en « station aveugle ».	32
Figure n°12 : Evolutions des températures et des distances.	33
Figure n°13 : Distance corrigée en fonction de l'humidité fixée.	34
Figure n°14 : Evolution des distances corrigées.	35
Figure n°15 : Séries temporelles avec distances brutes et distances corrigées.	35
Figure n°16 : Schéma représentant la méthode des visées réciproques simultanées.	40
Figure n°17 : Corrélation entre déplacements et variations de température.	42
Figure n°18 : Evolution du G0 de la station.	43
Figure n°19 : Schéma de l'expérience réalisée.	44
Figure n°20 : Courbes des valeurs de mra obtenues lors de l'expérience.	45
Figure n°21 : Illustration du phénomène de réfraction.	46
Figure n°22 : Abaque n°1.	47

Liste des tableaux

Tableau n°1 : Table « Stations ».	16
Tableau n°2 : Tables « Points » et « Groupes ».	16
Tableau n°3 : Table « Cycles ».	17
Tableau n°4 : Table « Observations ».	18
Tableau n°5 : Chiffres clés du réseau présenté.	24
Tableau n°6 : Résultats de la préanalyse avec références fixes.	28
Tableau n°7 : Résultats de la préanalyse avec références fixes et références communes.	28
Tableau n°8 : Résultats de la préanalyse avec références fixes et points doubles.	29
Tableau n°9 : Résultats de la préanalyse avec trois stations « aveugles ».	30