



HAL
open science

Étude de l'influence des gradients de température sur un réseau d'auscultation

Zian Favaro

► **To cite this version:**

Zian Favaro. Étude de l'influence des gradients de température sur un réseau d'auscultation. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2019. dumas-02466374

HAL Id: dumas-02466374

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02466374>

Submitted on 4 Feb 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

Zian FAVARO

Etude de l'influence des gradients de température sur un réseau d'auscultation

Soutenu le 05 septembre 2019

JURY

PRÉSIDENT : Monsieur Ghyslain FERRÉ

**MEMBRES : Monsieur Stéphane DURAND
Monsieur Maxime TATIN
Monsieur Laurent LONGUEVERGNE
Monsieur José CALI**

**Maître de stage
Maître de stage
Maître de stage
Professeur référent**

Remerciements

J'aimerais commencer ce mémoire en adressant de sincères remerciements à toutes les personnes qui ont rendu possible la réalisation de ce projet.

J'ai eu l'occasion d'évoluer dans deux structures différentes au cours de ce Travail de Fin d'Etudes, j'ai été accueilli au sein de l'entreprise Cementys pour trois mois, avant de rejoindre l'équipe du laboratoire Géomatique et Foncier de l'ESGT. Ces deux structures ont financé le projet et m'ont mis à disposition l'ensemble des moyens humains et matériels dont j'avais besoin. J'aimerais adresser un grand merci à leur directeur respectifs, M. Vincent LAMOUR et M. Jérôme VERDUN, ainsi qu'à M. Maxime TATIN mon encadrant chez Cementys.

J'en profite pour remercier l'ensemble des employés de Cementys et du personnel du laboratoire, qui ont toujours pris le temps de répondre à mes questions et de m'aider.

J'aimerais également remercier M. José Cali, mon professeur référent. Merci pour le temps que vous m'avez accordé et tous les conseils que vous m'avez prodigués.

Je termine par ceux qui m'ont consacré le plus de temps.

J'adresse un immense merci à M. Thibault Colette, mon manager chez Cementys. Merci beaucoup pour tout ce que tu m'as appris, et pour le temps que tu as sacrifié pour m'aider. Tu as toujours été très arrangeant avec moi, et tu as toujours fait en sorte que je puisse traiter mon sujet dans les meilleures conditions possibles. Tu as été un excellent manager.

Pour finir, je tiens à remercier très chaleureusement M. Stéphane Durand, mon encadrant au laboratoire Géomatique et Foncier et la personne à l'origine de ce sujet. Avant tout, merci de m'avoir sélectionné et permis de réaliser ce Travail de Fin d'Etudes. Merci pour ta gentillesse et ta pédagogie, tu as toujours pris le temps de répondre à mes questions et de m'aider quand j'étais bloqué, et ce, même à distance. Merci de m'avoir toujours conseillé justement face aux choix que j'avais à faire. Merci également pour le travail que tu as effectué sur le réseau, que ce soit pour la mise en place ou la programmation, tu m'as permis de gagner énormément de temps. Je garde en tête tous les conseils que tu m'as donnés, et les appliquerai tout au long de mon parcours professionnel.

Liste des abréviations

AEMD : Appareil Electronique de Mesure de Distances

ATR : Automatic Target Recognition (Reconnaissance Automatique de Cibles)

BTP : Bâtiment et Travaux Publics

CCTP : Cahier des Clauses Techniques Particulières

CoMeT : Compensation de Mesures Topographiques

ESGT : Ecole Supérieure des Géomètres et Topographes

GNSS : Global Navigation Satellite System

IAG : International Association of Geodesy (Association Internationale de Géodésie)

Laboratoire GeF : Laboratoire Géomatique et Foncier

MRA/CRA : Module/Coefficient de Réfraction Atmosphérique

RATP : Régie Autonome des Transports Parisiens

TFE : Travail de Fin d'Etudes

VRS : Visées Réciproques Simultanées

ZIG : Zone d'Influence Géotechnique

Glossaire

Automatic Target Recognition (ATR) : Dispositif permettant aux stations totales robotisées de repérer et viser une cible ou un prisme sans l'aide d'un opérateur. Reconnaissance automatique de cible en français, le capteur identifie le prisme et mesure sa position sur un capteur d'image afin de déterminer son emplacement angulaire exact.

Double retournement (DR) [AFTOPO, 2000]: Mode opératoire qui consiste à pointer un objet dans deux positions du cercle vertical (cercle à gauche, cercle à droite), ce qui implique un pivotement de l'alidade de 200 grades (180 degrés) autour de l'axe principal et un basculement de la lunette autour de l'axe secondaire. L'intérêt de cette technique est qu'elle permet d'éliminer certaines erreurs instrumentales.

Module de Réfraction Atmosphérique (MRA) : Egalement appelé Coefficient de Réfraction Atmosphérique (CRA), ce module sert à caractériser la courbure d'un rayon lumineux, en la comparant au rayon terrestre.

Visées Réciproques Simultanées (VRS) : Méthode topographique consistant à faire se viser deux stations totales au niveau de leur centre géométrique au même moment, dans le but d'obtenir des informations sur l'état de l'atmosphère séparant les deux instruments.

Zone d'Influence Géotechnique (ZIG) : Volume de terrain au sein duquel il y a une interaction entre l'ouvrage ou l'aménagement du terrain et l'environnement. Dans le cadre du projet Grand Paris Express, il s'agit de parcelles de terrains qui risquent de subir un mouvement lié aux travaux souterrains.

Table des matières

Remerciements	2
Liste des abréviations	3
Glossaire	4
Introduction	7
I IMPACT DE LA REFRACTION ATMOSPHERIQUE SUR UN RESEAU D'AUSCULTATION	9
I.1 DIFFERENTES SOURCES D'ERREURS OU D'IMPRECISIONS SUR UN RESEAU D'AUSCULTATION	9
I.1.1 Erreurs instrumentales	9
I.1.2 Erreurs environnementales.....	10
I.2 DESCRIPTION PHYSIQUE DU PRINCIPE DE REFRACTION ATMOSPHERIQUE	11
I.2.1 L'indice de réfraction de l'air	11
I.2.2 Equation eikonale et loi de Snell-Descartes.....	12
I.2.3 Bilan.....	15
I.3 DIFFERENTES METHODES DE MISE EN EVIDENCE ET DE CORRECTION DE LA REFRACTION ATMOSPHERIQUE	16
I.3.1 Utilisation du MRA et résolution de figures géométriques.....	16
I.3.1.1 Module de réfraction atmosphérique.....	16
I.3.1.2 Visées réciproques simultanées.....	17
I.3.1.3 Réfraction latérale	20
I.3.1.4 Traitement en réseau	21
I.3.2 Méthodes expérimentales : création d'abaques.....	22
I.3.3 Méthodes pratiques pour minimiser l'effet de la réfraction atmosphérique.....	22
I.3.4 Méthodes récentes de traitement de la réfraction en topométrie.....	23
I.3.4.1 Méthodes numériques de détermination d'un trajet optique	23
I.3.4.2 Méthodes dispersométriques et scintillométriques.....	23
I.4 ETUDE DE L'IMPACT DE LA REFRACTION SUR DONNEES REELLES ISSUES DES TRAVAUX DE CEMENTYS.....	25
I.4.1 Présentation des méthodes de travail et des objectifs de Cementys	25
I.4.2 Analyse de données réelles	27
I.4.3 Problèmes de monumentation et solution proposée.....	30
II EXPERIENCES REALISEES EN CONDITIONS REELLES	32
II.1 PRESENTATION DES EXPERIENCES METTANT EN EVIDENCE LA REFRACTION ATMOSPHERIQUE .	32
II.2 RESULTATS POUR LES SUIVIS ANGULAIRES ET DE COORDONNEES	33
II.3 QUANTIFICATION DE LA REFRACTION VERTICALE	34
II.3.1 Modélisation du MRA et calculs réalisés	34
II.3.1.1 Correction des distances mesurées	34
II.3.1.2 Modélisation du MRA vertical.....	35
II.3.2 Présentation des résultats	38
II.4 RESULTATS RELATIFS A LA REFRACTION LATERALE.....	40
II.4.1 Modélisation et calculs réalisés	40
II.4.2 Présentation des résultats	43
III RESEAU EXPERIMENTAL AU LABORATOIRE GEF	45
III.1 PRESENTATION GENERALE	45
III.1.1 Géométrie du réseau.....	45
III.1.2 Fonctionnement du réseau.....	46
III.2 RESULTATS OBTENUS	49

III.2.1	Traitement en réseau sans prise en compte de la réfraction	49
III.2.2	Traitements de la réfraction verticale.....	51
III.2.3	Traitements de la réfraction latérale.....	52
III.3	AMELIORATIONS POSSIBLES	55
Conclusion.....		56
Bibliographie		57
Liste des figures.....		59
Liste des tableaux		59

Introduction

En 2010, l'Etat français a créé la Société du Grand Paris, une entreprise publique dont l'objectif est de piloter le projet du Grand Paris Express, à savoir, la création de nouvelles lignes de métro. Effectivement, en vue des Jeux Olympiques d'été de 2024, et dans le but de moderniser la capitale, ce sont 200 kilomètres de voies qui doivent être creusées. Ces lignes nouvelles permettront de désengorger les existantes, de mieux desservir les banlieues et de pouvoir effectuer des trajets au niveau de la périphérie de Paris, ce qui présente un gain de temps important pour les usagers de la RATP. Ces travaux souterrains entraînent un risque important de fragilisation du bâti existant à la surface. Les groupements d'entreprises du BTP font alors appel à des entreprises spécialisées dans l'auscultation, pour assurer le suivi temps réel des déformations, et ainsi limiter les risques.

L'auscultation par méthode tachéométrique repose sur des mesures de distances par télémètres laser et des mesures d'angles entre différentes cibles pointées automatiquement. La réfraction atmosphérique est un phénomène physique bien connu, qui entraîne une courbure des rayons lumineux. Ces courbures présentes entre un tachéomètre et sa cible entraînent une erreur sur la mesure de distance, mais elles modifient également les valeurs angulaires mesurées. Ces effets sont difficiles à appréhender et donc que très rarement pris en compte et corrigés. Cependant, dans un réseau d'auscultation automatisé, les effets de la réfraction (verticale ou latérale) peuvent se traduire, au niveau des séries temporelles de positions, par un niveau de bruit plus ou moins important, limitant la précision des données et augmentant le risque de fausses alertes. L'étude de l'influence de la réfraction est donc un sujet d'actualité, d'autant plus avec le développement d'importants chantiers.

Cementys est une entreprise spécialisée dans l'auscultation, et est chargée de la surveillance de plusieurs tronçons du Grand Paris Express. Impactée par ces problèmes liés à la réfraction, elle a cherché à collaborer avec le laboratoire GeF de l'ESGT. Ce laboratoire a, quant à lui, toujours consacré une partie de ses recherches aux mesures de précision et aux problématiques qui en découlent.

Le laboratoire Géosciences Rennes s'intéresse à la compréhension de l'écoulement de l'eau dans des milieux hétérogènes. Dans le but de déployer un système de mesure qui combinerait des observations GNSS et topométriques, une collaboration s'est formée entre ces deux laboratoires. La problématique de la réfraction atmosphérique a déjà été traitée

dans deux TFE codirigés par ces deux organismes. Le premier avait pour but d'étudier le potentiel d'une station totale pour les mesures de déformations effectuées par Géosciences Rennes et avait conduit à des expériences sur la réfraction et sur son influence sur les mesures tachéométriques [Assemat, 2015]. Sans remettre en cause les hypothèses ou méthodes classiques du traitement de la réfraction en topométrie (utilisation du coefficient de réfraction k , approximation de la perturbation par un gradient moyen uniquement vertical...), cette étude prodiguait un certain nombre de conseils pour mener au mieux des missions d'auscultations. Le TFE suivant s'est intéressé à la prise en compte de gradients de température plus réalistes (plus seulement verticaux), et s'est articulé autour d'une méthode de résolution numérique du problème, la méthode Fast Marching [Gobron, 2017].

Le sujet de TFE que je vais vous présenter est né de la collaboration tripartite entre le laboratoire GeF, l'entreprise Cementys et le laboratoire Géosciences Rennes. Celui-ci s'inscrit dans la continuité des études passées, avec l'apport de données réelles par Cementys.

Comment corriger l'effet de la réfraction atmosphérique sur un réseau d'auscultation ? Cette problématique ne reprend pas le terme de « gradient de température », mais celui de « réfraction atmosphérique ». En effet, l'ensemble des calculs réalisés sont basés sur des formules de détermination de modules de réfraction atmosphérique. De plus, nous n'avons pas les moyens d'isoler uniquement les gradients de température, bien qu'ils soient prépondérants dans les phénomènes de réfraction. En effet, la courbure des rayons est également induite par bien d'autres facteurs, tels que les variations de pression, d'humidité, ou encore de pourcentage de CO₂ dans l'air. En outre l'intérêt principal de ce TFE pour les entreprises spécialisées dans l'auscultation réside dans le fait de corriger les données brutes de tout impact lié à la réfraction atmosphérique. C'est de ces différentes considérations qu'est issue la problématique précédemment citée.

Le premier chapitre présente un état de l'art des différentes pistes explorées par la communauté scientifique pour diminuer l'influence de ce phénomène sur les mesures. Je présente ensuite des études effectuées sur des données réelles chez Cementys, ayant pour but de montrer un possible effet de la réfraction sur ces mesures. Le second chapitre est consacré à la présentation de diverses expériences réalisées en conditions réelles, permettant de montrer la nécessité de la prise en compte de ces effets. Pour finir, le dernier chapitre présente un réseau d'auscultation expérimental réalisé au sein du laboratoire GeF et les différents résultats qu'il a permis d'obtenir.

I Impact de la réfraction atmosphérique sur un réseau d'auscultation

I.1 Différentes sources d'erreurs ou d'imprécisions sur un réseau d'auscultation

L'auscultation est une technique topographique consistant à observer la présence (ou l'absence) d'un mouvement sur un ensemble de cibles par mesures tachéométriques. Dans le contexte du Grand Paris Express, les cahiers des charges contraignent les entreprises à ausculter avec une grande précision, il est donc important de tenir compte des erreurs environnementales. L'enjeu est de savoir si le mouvement observé est dû à des imprécisions de mesures ou à une réelle déformation physique. Nous pouvons les regrouper en deux catégories principales, les erreurs instrumentales et environnementales. Une autre source d'erreur est d'origine humaine, mais les réseaux étant automatisés, nous ne l'aborderons pas.

I.1.1 Erreurs instrumentales

L'origine de ces erreurs est interne à l'appareil de mesure. Les constructeurs essayent sans cesse d'améliorer la précision des appareils, cependant, des contraintes techniques subsistent, de même que des contraintes de marché, les entreprises utilisatrices n'étant pas enclines à déboursier d'importantes sommes d'argent supplémentaires pour un gain de précision minime.

Les principales erreurs sont dues au distancemètre, à la précision de gravure des cercles, à l'ATR ainsi qu'à des défauts de perpendicularité des axes (erreurs de collimation horizontale, d'index du cercle vertical et de tourilonnement). La plupart de ces erreurs peuvent être réduites à des niveaux négligeables en effectuant un double retournement, et sont en partie gérées électroniquement par l'instrument. Pour finir, certaines erreurs (erreur cyclique, erreur d'échelle ...) doivent être corrigées à la suite d'un étalonnage.

Les différentes expériences présentées dans la suite de ce mémoire ont été réalisées avec des stations totales TOPCON MS05AXII et MS1AXII, dont les caractéristiques techniques principales sont résumées dans le Tableau 1.

Type de mesure	Précision (MS05AXII / MS1AXII)
Mesure angulaire	0.5'' / 1''
Mesure de distance (en mode « Fine measurement » et sur prisme)	0.8 mm + 1 ppm / 1 mm + 1 ppm
Système ATR	1''
Portées (sur prisme standards et dans de bonnes conditions atmosphériques ¹)	De 1.3 m à 3500 m
Portée recommandée en auscultation	Jusqu'à 120 m

Tableau 1 : Caractéristiques principales des stations totales utilisées pour ce TFE

Ces données sont issues du manuel technique fourni par TOPCON CORPORATION [TOPCON, 2014]. En se basant sur la norme ISO 17123-3, nous considérons que les écarts types annoncés ont un niveau de confiance de 68% en double retournement.

I.1.2 Erreurs environnementales

Pour terminer, l'exactitude et la fiabilité des mesures sont limitées par des facteurs environnementaux, que l'on peut regrouper en deux ensembles, les effets atmosphériques directs et indirects. Le bilan de ces différentes erreurs est établi à partir des TFE [ASSEMAT, 2015] et [GOBRON, 2017], ainsi que de la documentation technique [TOPCON, 2014].

Les erreurs environnementales directes sont celles qui entachent la précision de la mesure intrinsèquement. Il s'agit des erreurs liées aux variations de température, de pression, d'humidité, de teneur en CO₂, de teneur en autres gaz, mais également l'erreur due au rayonnement ainsi que l'erreur de divergence du faisceau. L'ensemble de ces erreurs peuvent être regroupées dans ce qu'on appelle l'erreur de réfraction atmosphérique, qui englobe tous ces phénomènes. Le terme de réfraction atmosphérique indique les effets de l'atmosphère sur la courbure du rayon lumineux et sur la vitesse des ondes électromagnétiques.

Les effets atmosphériques indirects, quant à eux, apparaissent sous la forme de mouvements subis par les instruments ou leurs accessoires (prismes, cibles...) le temps

¹ Pas de brume, visibilité d'environ 40 km, ciel couvert, pas de scintillement.

d'un cycle de mesure. Il peut s'agir de mouvements des couches superficielles du sol, mais également de déformations de la monumentation. En effet, les variations météorologiques peuvent induire une dilatation des supports, et créer un mouvement indésirable appelé « effet tournesol ».

I.2 Description physique du principe de réfraction atmosphérique

Le TFE présenté étant basé sur la réfraction et ses effets, il est important de décrire le phénomène et les dernières avancées concernant sa modélisation. La lumière est un phénomène physique électromagnétique qui présente des propriétés d'ondes et des propriétés de corpuscules. En topométrie nous ne nous intéressons à la lumière qu'en tant qu'onde électromagnétique. Nous pouvons la traiter comme une onde ou plus simplement comme un rayon. Traiter de la réfraction atmosphérique revient à étudier l'influence des milieux sur la propagation de l'onde lumineuse. Dans les plus basses couches de l'atmosphère où nous travaillons, le milieu de propagation de la lumière est l'air. Ce milieu n'est pas homogène pour de nombreuses raisons (variation de sa composition chimique, de sa température, de sa pression ...). Une manière de caractériser ce milieu est de parler de son indice de réfraction noté n .

I.2.1 L'indice de réfraction de l'air

L'air est constitué de différents gaz que sont le diazote, le dioxygène, l'argon et le dioxyde de carbone. La lumière ne se propage pas à la même vitesse dans chacun de ces gaz, et ce changement de vitesse est une propriété du milieu. La réfraction atmosphérique est donc directement liée à l'indice de réfraction de l'air.

L'air est un milieu dispersif pour le spectre exploité par les stations totales (situé entre 600 et 750 nm), ce qui signifie que son effet réfractif dépend de la longueur d'onde qui s'y propage. Un indice de réfraction mesuré n'est donc valable que pour une longueur d'onde donnée. Les ondes émises par les stations totales étant modulées, il convient de dissocier l'indice de phase et l'indice de groupe. Néanmoins, on ne s'intéresse très généralement qu'à l'indice de phase.

Pour un milieu transparent (sans absorption ni diffusion), cet indice est défini par la formule suivante :

$$n_{\varphi} = \frac{c}{v_{\varphi}}$$

Équation 1 : Définition de l'indice de phase

Avec n_φ l'indice de réfraction de phase (nombre réel sans unité), c la vitesse de la lumière dans le vide (299 792 458 m/s) et v_φ la vitesse de l'onde dans le milieu (en m/s).

Plusieurs modèles de détermination de cet indice existent. Les plus connus étant ceux de Ciddor [Ciddor, 1996] (modèle conventionnellement adopté par l'IAG en 1999), de Barrel et Sears [Kasser, 1985], d'Eldén [Eldén, 1966]), et de Sampson [Sampson, 2001]. Nous ne rentrerons pas dans le détail de ces formules, qui sont exposées de manière précise dans la thèse de T.B. Afeni [Afeni, 2011]. Néanmoins, retenons juste que ces formules font appel à de nombreuses données météorologiques, comme la densité de l'air, la densité de la vapeur d'eau de l'air, la température ou encore la pression partielle de vapeur d'eau.

L'intérêt de la détermination de cet indice de réfraction est qu'il est utilisé pour décrire la trajectoire d'un rayon lumineux, par le biais de la loi de Snell-Descartes, que nous allons présenter ci-après.

I.2.2 Equation eikonale et loi de Snell-Descartes

Connaissant l'indice de réfraction en différents points d'un trajet optique, il est possible de déterminer le trajet suivi par l'onde entre deux points. L'équation eikonale est l'équation fondamentale régissant le trajet de la lumière dans un milieu. C'est de cette équation que sont tirés la loi de Snell-Descartes et le principe de Fermat. Dans un milieu d'indice $n(\vec{r})$, elle s'écrit [Pérez, 1996] :

$$\frac{d}{ds} \left(n \frac{d\vec{r}}{ds} \right) = \vec{\nabla} n$$

Équation 2 : Equation eikonale

Cette équation permet de faire le lien entre l'optique géométrique et l'optique ondulatoire, elle lie la variation d'un rayon optique avec le gradient d'indice. Nous nous contenterons de décrire la loi de Snell-Descartes dans la suite de ce mémoire, car celle-ci suffit à comprendre le phénomène de réfraction.

Dans un milieu homogène isotrope, d'indice de réfraction constant, un rayon lumineux se propage en ligne droite. Si un rayon lumineux passe au travers d'un dioptre séparant deux milieux de réfringences différentes (indices de réfractions n_1 et n_2), alors les angles définissant les faisceaux incidents et réfractés par rapport à la normale au dioptre (i_1 et i_2) sont liés par la relation :

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2 = \text{constante}$$

Équation 3 : Loi de Snell-Descartes dans le cas discret

Nous pouvons également illustrer cette relation par la Figure 1 suivante :

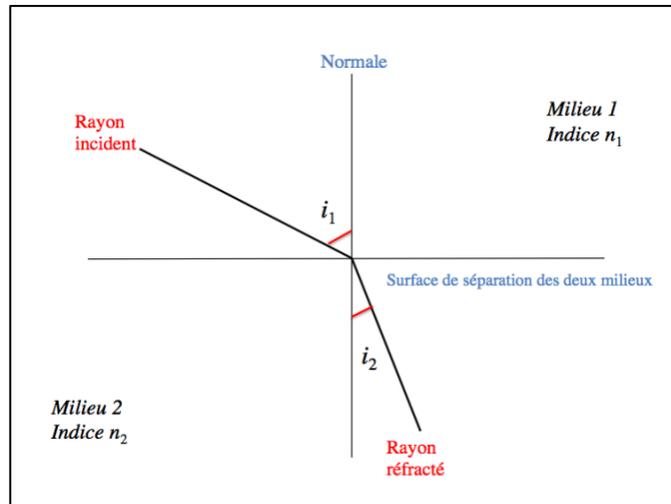


Figure 1 : Illustration de la loi de Snell-Descartes dans le cas discret (Source : [Mirages, 2014])

Lorsque l'indice de réfraction varie au sein du milieu, la propagation des rayons n'est plus rectiligne (le milieu n'est ni homogène, ni isotrope, et c'est le cas de l'atmosphère). On observe donc une courbure des rayons qui s'effectue dans le sens du gradient d'indice. Cette courbure des rayons est à l'origine des mirages, ou encore de l'effet Novaya Zemlya². La réfraction est causée par des variations d'indice le long du rayon, ce qui dépend de l'état physique de l'atmosphère. On considère ici la réfraction terrestre (en opposition à la réfraction astronomique) d'un rayon traversant uniquement la couche la plus inférieure de l'atmosphère (30 m d'épaisseur environ). La formulation précédente de la loi de Snell-Descartes n'est valable que lors d'un brusque changement de milieu. La variation de l'indice de réfraction se fait d'une manière continue dans l'air, il faut donc s'intéresser à la loi de Snell-Descartes dans le cas continu :

$$\delta i = -\frac{\tan i}{n} \delta n$$

Équation 4 : Loi de Snell-Descartes dans le cas continu

² Mirage particulier des régions polaires, voir < https://fr.wikipedia.org/wiki/Effet_Novaya_Zemlya>

Cette formule s'obtient par la différentielle totale de l'équation 3, et permet d'exprimer la variation élémentaire δi de l'angle en fonction de celle de l'indice de réfraction notée δn . La variation de l'indice de réfraction est liée au gradient de n le long du chemin optique. Une analyse approfondie de cette formule est disponible dans la revue scientifique XYZ n°158 [Touzé, 2019].

Parlons à présent du principe de Fermat. Nous pouvons l'énoncer de la manière suivante « Pour aller d'un point-source S à un point-détecteur D après une réflexion ou une réfraction, la lumière suit un chemin pour lequel le temps de parcours est localement minimal » [Gounon, 2004].

$$L_{AB} = \int_a^b n(s) ds$$

Équation 5 : Principe de Fermat

Ce principe permet de comprendre comment se comporte un rayon lumineux dans l'atmosphère. Nous pouvons prendre un exemple grossier. En sachant que la densité de l'air diminue quand la température augmente, et que la lumière se déplace plus vite dans un milieu moins dense, nous comprenons qu'un rayon lumineux se courbera de la manière présentée dans la Figure 2 suivante :

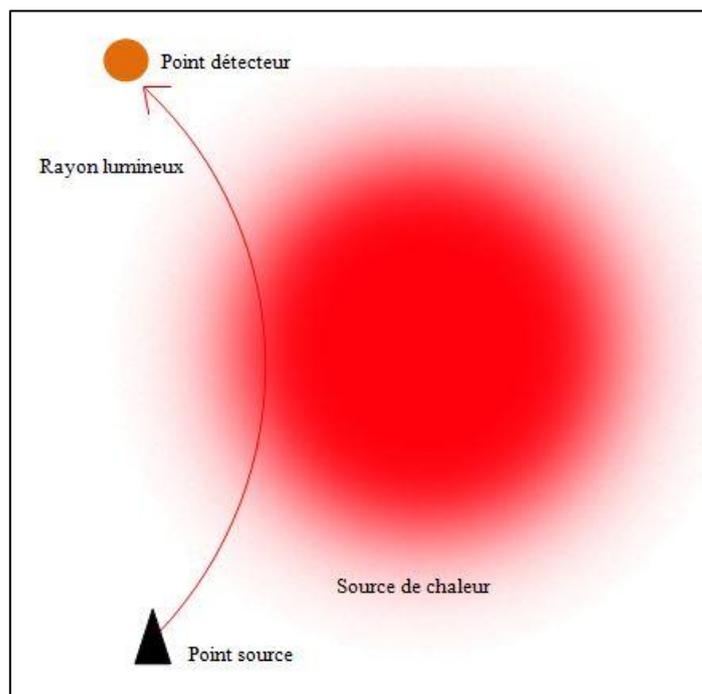


Figure 2 : Illustration du principe de Fermat

I.2.3 Bilan

Faisons à présent un bref bilan des différents effets indésirables de la réfraction atmosphérique sur un réseau d'auscultation.

Premièrement, le phénomène de réfraction entraîne une modification de la longueur d'onde utilisée par les instruments, ce qui affecte les mesures de distances. Il existe cependant des modèles éprouvés, comme ceux de Ciddor [Ciddor, 1996] et de Barrel et Sears [Kasser, 1985], qui permettent de corriger les distances mesurées à partir des paramètres météorologiques. Les modèles de correction à appliquer dépendent de la longueur d'onde des télémètres, et sont fournis par les constructeurs. Nous présenterons le modèle fourni par TOPCON dans la suite de ce mémoire.

Ensuite, la courbure des rayons lumineux entraîne un allongement du trajet optique pour le laser utilisé par l'AEMD, et donc une erreur sur les distances mesurées. Cependant nous montrerons que cette erreur est infime (voir partie II.4.1) pour des distances raisonnables (jusqu'à 300 m) et qu'elle n'a donc pas à être prise en compte.

Pour finir, la courbure des rayons entraîne une erreur sur la direction visée de la part de l'ATR (ou de l'opérateur) qui fausse les mesures angulaires. C'est précisément cet effet indésirable que nous allons chercher à corriger dans nos réseaux d'auscultation.

Le travail de J. Assémat [Assémat, 2015] s'est en particulier intéressé à caractériser l'influence de la réfraction sur les mesures tachéométriques. Nous retiendrons les quelques données chiffrées suivantes issues de son mémoire :

- Une variation de température de 1 °C entraîne une variation de 1 ppm sur la mesure de distance ;
- Une variation de pression de 4 hPa entraîne une variation de 1 ppm sur la mesure de distance ;
- Une variation du taux d'hygrométrie de 20% entraîne une variation de 1 ppm sur la mesure de distance

Les effets angulaires de ces variations sont bien plus difficile à quantifier, mais il ressort de ces données que les gradients de température sont bien le facteur prépondérant dans le phénomène de réfraction atmosphérique.

I.3 Différentes méthodes de mise en évidence et de correction de la réfraction atmosphérique

I.3.1 Utilisation du MRA et résolution de figures géométriques

I.3.1.1 Module de réfraction atmosphérique

La réfraction atmosphérique entraîne une erreur angulaire. Il est possible de traiter directement cet écart angulaire (noté δ) ou bien de passer par le coefficient de réfraction, que nous noterons k (parfois également noté Cr dans la littérature), également appelé module de réfraction atmosphérique (MRA). On définit k comme étant le rapport entre le rayon terrestre R_T et le rayon de courbure de la ligne de visée r [Hirt et al., 2010] :

$$k = \frac{R_T}{r}$$

Équation 6 : Coefficient de réfraction atmosphérique

Cette formule fait appel à une hypothèse forte sur la structure de l'atmosphère : elle est considérée comme une suite de couches concentriques d'indices de réfraction décroissants avec l'altitude (atmosphère stratifiée). On considère alors que la réfraction est uniquement verticale. Plusieurs méthodes existent pour calculer ce coefficient. Il existe dans un premier temps des formules empiriques basées sur des paramètres météorologiques. Une première est présentée dans [Baselga et al., 2014] :

$$k = 10^{-6} R_T \left(78 \frac{p}{T^2} \left(0.034 + \frac{dT}{dz} \right) + \frac{11}{T} \frac{de}{dz} \right)$$

Équation 7 : Détermination de k grâce aux paramètres météorologiques

Dans cette formule R_T est le rayon de la Terre, p la pression en hPa, T la température en K, e la pression de vapeur d'eau en hPa et z l'altitude en m. Une formule simplifiée et plus généralement employée, issue de [Hirt et al., 2010], est la suivante :

$$k = 503 \frac{p}{T^2} \left(0.034 + \frac{dT}{dz} \right)$$

Équation 8 : Détermination simplifiée de k grâce aux paramètres météorologiques

Les termes sont les mêmes que dans l'équation précédente. Il est possible d'utiliser la valeur moyenne du gradient de température dans la troposphère, $\frac{dT}{dz} \approx -0.0065$ K/m.

La valeur moyenne retenue et généralement utilisée par les géomètres pour le module de réfraction atmosphérique est de 0.13. Cette valeur a été déterminée par Carl Friedrich Gauss en 1826. [AFTOPO, 2000] préconise d'utiliser une valeur moyenne de 0.16 et [TOPCON, 2014] recommande la valeur de 0.2. Toutes ces valeurs ont été obtenues à partir de formules faisant appel aux paramètres météorologiques, seulement, d'après [Torge, 2001], il n'est pas recommandé d'utiliser ces valeurs dans les plus basses couches de l'atmosphère (jusqu'à 40 m au-dessus du sol).

I.3.1.2 Visées réciproques simultanées

Le défaut des formules empiriques est qu'elles ne sont pas adaptées aux cas de mesures dans les basses couches de l'atmosphère. Une solution est alors de chercher à déterminer directement la valeur de k à partir d'observations, par visées réciproques simultanées. Cette technique consiste à faire se viser simultanément et réciproquement deux tachéomètres, et est très utilisée en nivellement indirecte de précision. La somme des deux angles verticaux enregistrés (V_1 et V_2 en grades) est censée être la suivante :

$$V_1 + V_2 = 200 + e$$

Équation 9 : Somme des angles verticaux lors d'une VRS

Dans cette formule e est l'erreur sphérique, c'est l'écart angulaire (en grade) entre les zéniths des points 1 et 2. Or la présence de réfraction atmosphérique entre les deux instruments modifie la valeur des angles verticaux. On obtient alors facilement la formule de détermination de l'angle de réfraction δ ([Baselga et al., 2014]) :

$$\delta = \frac{1}{2}(200 + e - V_1 - V_2)$$

Équation 10 : Détermination de l'angle de réfraction vertical par VRS

En plus de considérer une atmosphère stratifiée, la technique des VRS ne permet que de trouver un seul angle de réfraction, commun aux deux stations. Nous sommes obligés de faire l'hypothèse que la réfraction est la même aux points 1 et 2 (hypothèse dite de Biot et Bouguer, [DPTS, 2010]). Cette technique a vu apparaître de nombreuses formules permettant de déterminer un k moyen entre les deux instruments. La plus juste a été développée par [Tsoulis et al., 2008] et est expliquée dans [Balsega et al., 2014] :

$$k = \frac{2R_T}{s} \sin\left(\frac{1}{2} \left(200 + \sin^{-1}\left(\frac{s}{R_T} \sin\left(\frac{1}{2} (200 - e + V_1 - V_2)\right)\right) - V_1 - V_2\right)\right)$$

Équation 11 : Détermination de k par [Tsoulis et al., 2008]

Dans cette formule s est la distance pente séparant les deux instruments et e vaut :

$$e = \sin^{-1}\left(\frac{s}{R_T} \sin\left(\frac{1}{2} (200 - e + V_1 - V_2)\right)\right)$$

Équation 12 : Formule exacte de l'erreur sphérique e

Or cette équation n'est pas linéaire, e étant des deux côtés de l'équation. [Tsoulis et al., 2008] a montré que la solution à l'équation 11 peut être obtenue de manière exacte en recourant à une équation du quatrième degré ou à un processus itératif.

Intéressons nous à présent aux formules approchées de détermination de k par VRS. La formule suivante est celle qui a été utilisée tout au long de ce TFE, et est issue de [Milles et al., 1999] :

$$k \approx 1 + \frac{2R_T}{D_h} \left(\frac{1}{\tan V_1} - \tan\left(\frac{V_2 - V_1}{2}\right) \right)$$

Équation 13 : Approximation courante de k par VRS

Dans cette formule apparaît d , la distance horizontale entre les deux stations :

$$D_h = s * \cos\left(\frac{V_2 - V_1}{2}\right)$$

Équation 14 : Distance horizontale entre deux points

Nous retenons cette formule car elle est simple à utiliser et couramment employée, tout en étant proche de la réalité ([Milles+, 1999]). Les écarts trouvés entre cette formule approchée et celle présentée par [Tsoulis et al., 2008] (Equation 11) ne sont pas significatifs (inférieurs aux précisions des instruments utilisés) pour des distances de quelques centaines de mètres. De plus, dans le cadre de notre travail, une détermination approchée du MRA suffit, la correction des angles étant l'étape la plus importante (elle ne dépend pas du MRA déterminé). Une donnée intéressante est la précision des valeurs du MRA que nous obtenons avec cette méthode, présentée dans la Figure 3 :

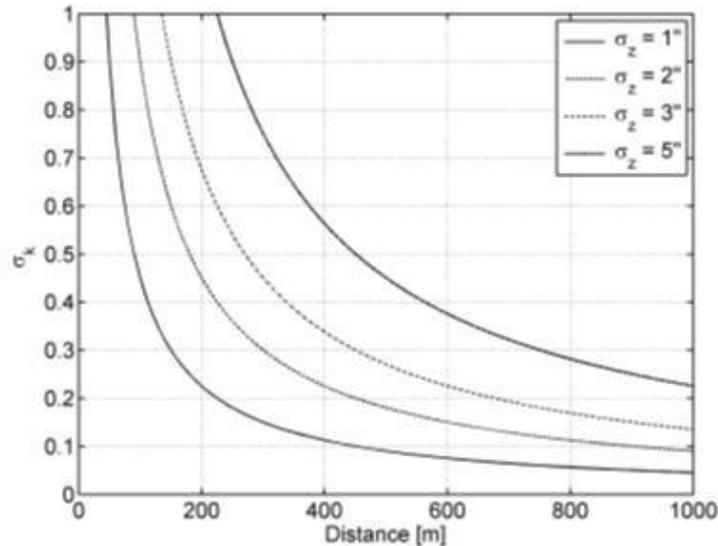


Figure 3 : Ecart-type de k en fonction de la précision des tachéomètres et de la distance les séparant [Hirt et al., 2010]

Nous nous référerons à ce graphique quand nous présenterons les résultats obtenus durant le TFE. Pour terminer nous pouvons présenter une autre formule approchée permettant de déterminer k , issue de [Hirt et al., 2010] :

$$k \approx 1 - \frac{V_1 - V_2 - 200}{\frac{200}{\pi}} * \frac{R_T}{s}$$

Équation 15 : Approximation de k par VRS

Les nombreuses expériences utilisant des VRS ont permis d'obtenir des valeurs de k réalistes. Celles-ci montrent toujours des valeurs minimales vers midi, et maximales la nuit. [Hübner, 1977] voyait varier k de -10 à +15 au cours d'une journée pour des visées effectuées à 50 cm du sol, et de -3 à +5 quand les visées passaient à 1.5 m du sol. De la même manière, [Hirt et al., 2010] présente des valeurs de k variant de -3.5 à +3.5 à 3 m du sol, puis des valeurs allant de -4 à +6 à 1.5 m et enfin des valeurs extrêmes allant de -47 à +20 directement au-dessus du sol. Les variations de k sont généralement de ± 1.5 en trente minutes. Ces résultats montrent bien que la valeur trouvée par C. F. Gauss de +0.13 n'est pas adaptée pour décrire les effets de la réfraction dans la couche inférieure de l'atmosphère.

Plusieurs applications du MRA existent, comme le fait de pouvoir connaître la correction C_r à apporter sur les altitudes des points visées en nivellement indirecte par la formule suivante, issue de [DPTS, 2010] :

$$C_r = \frac{k * s^2}{2R_T}$$

Équation 16 : Formule de correction altimétrique à partir de k

A 300 m, les effets engendrés par la réfraction sont présentés dans le Tableau 2 :

k	Erreur sur l'altitude (mm)
0.13	1
-1	-7
-3	-21

Tableau 2 : Effet de la réfraction sur la mesure de l'altitude d'un point situé à 300 m

Ce tableau permet d'appréhender l'impact de la réfraction verticale sur l'altitude, et l'effet qu'elle peut avoir sur un réseau d'auscultation, si elle n'est pas prise en compte.

I.3.1.3 Réfraction latérale

La réfraction latérale (influence des variations d'indices sur les angles horizontaux), ou horizontale, est un phénomène peu traité par les topographes, et qui a longtemps été considéré comme impossible à corriger [Brabant, 2011]. De récents travaux présentés dans [Bolzon et al., 2017] ont cependant apporté des résultats convaincants. L'idée qu'ils ont mise en place est d'effectuer des mesures angulaires horizontales dans un triangle, et de résoudre ce même triangle à partir des distances horizontales et du théorème d'Al-Kashi. L'une des visées rase un mur chauffé par le soleil, pour obtenir des résultats plus parlants, et les autres visées sont considérées comme non affectées. Pour une visée passant à 5 cm du mur, ils obtiennent une erreur de fermeture de 0.025 gon.

La formule utilisée, définie par Wilhelm W. [Wilhelm, 1994] est présentée sur la Figure 4 suivante :

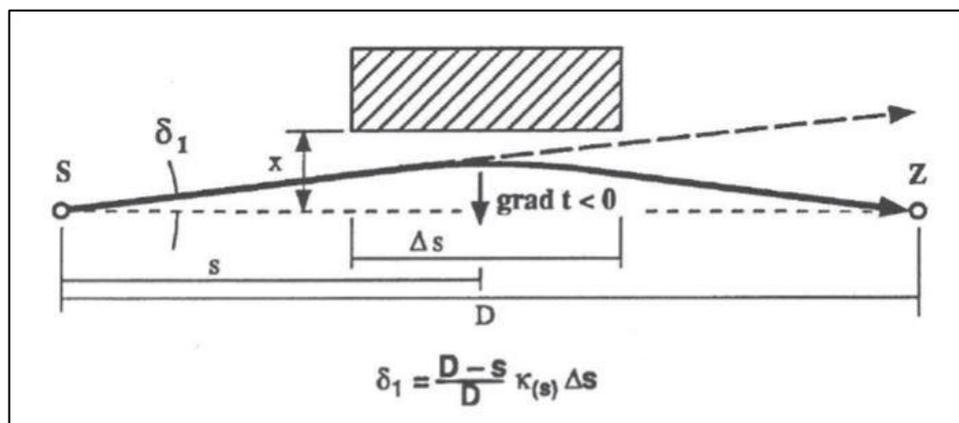


Figure 4 : Schéma de la formule de Wilhelm W.

En fonction de l'angle de réfraction δ_1 (en dmgon), on peut déterminer k (noté sur le schéma $K_{(s)}$) :

$$k = \frac{\delta_1 * D}{\Delta S(D - s)}$$

Équation 17 : Détermination de k par Wilhelm W.

L'inconvénient de cette formule (et de l'expérience plus généralement) est qu'elle nécessite de connaître l'emplacement de l'obstacle créant de la réfraction, et de considérer qu'il n'y en a pas ailleurs. Les valeurs de k trouvées par cette expérience vont jusqu'à 11 pour une visée passant à 5 cm du mur, et autour de 1 quand la visée passe à 20 cm. Les conclusions sont que l'impacte peut être considérable dans des situations extrêmes (comme en passant à 5 cm du mur) mais qu'à partir de 25 cm l'effet est presque inexistant. Pour sa part, W. Wilhelm avait trouvé des erreurs angulaires allant jusqu'à 0.15 gon pour des visées le long d'une façade en métal sombre.

Nous reprenons le principe du triangle résolu par le théorème d'Al-Kashi pour traiter la réfraction latérale dans la suite de ce mémoire.

I.3.1.4 Traitement en réseau

La plupart des logiciels d'ajustement de réseaux topographiques peuvent prendre en entrée une valeur de MRA et appliquer des correctifs sur les mesures à partir de cette valeur. Néanmoins, il est nécessaire de connaître à l'avance cette valeur de MRA. L'un des objectifs de ce TFE est d'intégrer au sein d'un réseau d'auscultation les VRS et la résolution de triangle, afin de déterminer des valeurs de MRA sur chacune des visées, et de pouvoir corriger les angles bruts en fonction.

Un autre travail sur le traitement en réseau a été présenté dans [Touzé, 2019]. L'objectif était de faire varier k manuellement, dans le but de déterminer la valeur la plus cohérente pour le réseau traité (celle qui permettait de conserver le plus d'observations à l'issue du traitement). L'expérience a permis d'obtenir une meilleure cohérence sur l'ensemble du réseau, avec un k moyen final de -2.121. Une variante à cet exercice serait de passer k comme un paramètre à déterminer au sein du réseau, et d'ajuster sa valeur. Ce type d'expérience n'aura pas le temps d'être traité ici.

I.3.2 Méthodes expérimentales : création d'abaques

Une solution pour corriger les effets de la réfraction est de se référer à un abaque, ou à des résultats d'expériences. [Hirt et al., 2010] présente un important nombre de valeurs de MRA, obtenues dans différents cas, et il est possible de se référer à ces valeurs plutôt qu'à celle couramment utilisée de +0.13. Les avantages principaux de cette méthode est qu'elle nécessite une instrumentation minimale, et permet un important gain de temps. Cependant, il n'existe pas à ce jour de documents ayant pour objectif d'être des abaques. Il faudrait réaliser de très nombreux tests car énormément de paramètres influent (température, pression, ensoleillement, distances aux objets, matériaux...).

I.3.3 Méthodes pratiques pour minimiser l'effet de la réfraction atmosphérique

Avant de devoir corriger les mesures, l'idéal est d'éviter au maximum qu'elles soient entachées par l'effet réfractif de l'air. Nous pouvons tirer différents enseignements des résultats d'expériences exposés dans les paragraphes précédents. Une première recommandation est d'éviter de réaliser des visées rasantes (dans les trois dimensions, que ce soit proche du sol, des murs...), même quand il s'agit d'objets ponctuels (poteaux métalliques...). Nous préconisons de ne jamais effectuer des visées à moins de 50 cm du sol, pour éviter le phénomène des ondulations³. Lors de travaux de précisions, comme l'auscultation, nous retenons une distance au sol minimum de 1.2 m. Nous recommandons également d'éviter les trajets optiques survolant différentes surfaces (eau, bitume, gazon...), et ceux survolant une interface de deux différentes couvertures de sol. Les températures des sols étant différentes en fonction des matériaux les recouvrant, des transferts thermiques se produisent et entraînent de la réfraction atmosphérique.

Les différentes expériences menées montrent que les gradients de température sont les plus faibles la nuit [Chzranowski, 2006], ceci est en parti dû à l'irrégularité de la couverture nuageuse durant la journée. Il est favorable d'effectuer les mesures la nuit et au petit matin, et de les répéter sur plusieurs heures afin de créer un effet de randomisation du phénomène et ainsi de « noyer » l'impact la réfraction.

³ Phénomène où l'air échauffé au contact du sol s'élève à travers les couches d'air supérieures, sa masse volumique devenant plus faible. Les ondulations se produisent quand le sol est surchauffé par le soleil. L'opérateur voit alors « danser » l'image. Les ondulations correspondent au phénomène de flamboiement de l'air.

Ces différentes recommandations sont générales et nous les retrouvons dans l'ensemble des ouvrages traitant du phénomène de réfraction atmosphérique ([Brabant, 2011], [Milles et al., 1999] ...).

I.3.4 Méthodes récentes de traitement de la réfraction en topométrie

I.3.4.1 Méthodes numériques de détermination d'un trajet optique

Le principe de ces méthodes est de simuler un trajet optique dans un espace pour déterminer numériquement l'influence de la réfraction sur les mesures. Comme vu précédemment, il est possible de déterminer le trajet d'une onde électromagnétique dans un milieu hétérogène si l'on connaît les valeurs des indices de réfraction de chaque point du milieu, grâce à l'équation eikonale. Il est possible de créer un champ scalaire (comportant ces différents indices) à partir de mesures ponctuelles de divers paramètres météorologiques (en les interpolant sur l'ensemble de l'espace étudié). L'algorithme de Dijkstra se propose d'exploiter cette méthode. Nous pouvons également citer la méthode Fast Marching [Gobron, 2017] qui produit une carte des temps d'arrivée d'une onde électromagnétique depuis une source ponctuelle à partir d'une carte des normes des vitesses (champ scalaire). Il faut ensuite faire appel à des algorithmes de calculs de géodésiques⁴ pour estimer le chemin le plus rapide séparant un point de l'espace à la source (le chemin qu'emprunterait la lumière). D'autres algorithmes existent, et ceux-ci sont développés plus en détail dans le mémoire de K. Gobron [Gobron, 2017].

Nous pourrions penser qu'un lever ponctuel et épars de données météorologiques permettrait par interpolation de modéliser un module de réfraction en trois dimensions sur un très grand espace, mais nous prouverons par la suite que le phénomène est trop local pour avoir recours à ce type de dispositif.

I.3.4.2 Méthodes dispersométriques et scintillométriques

Pour compléter ce tour d'horizon des différentes méthodes de détermination et de correction de l'erreur de réfraction atmosphérique, nous pouvons évoquer les méthodes dispersométriques et scintillométriques.

⁴ Chemin de moindre coût (le plus rapide) entre deux points

La première consiste en l'utilisation de plusieurs rayons lumineux, de différentes longueurs d'ondes, pour une même visée (au moins 2). L'effet réfractif de l'air dépendant de la longueur d'onde, une différence de courbure des rayons entraîne une différence angulaire lors de la mesure. La dispersométrie exploite cet écart angulaire (proportionnel à l'écart entre les longueurs d'onde) pour déterminer l'état de l'atmosphère le long du trajet optique, et ainsi corriger les mesures de l'erreur de réfraction atmosphérique. Il est possible que la thèse sur laquelle débouche ce TFE fasse appel à cette méthode.

La scintillométrie, quant à elle, consiste à étudier la propagation des ondes électromagnétiques dans un milieu turbulent. Il est possible de considérer les gradients verticaux de température comme étant des turbulences de l'atmosphère, et grâce à un scintillomètre ou à un traitement d'image, de corriger les mesures de la réfraction atmosphérique.

Ces deux techniques de détermination ne seront pas abordées plus en détail dans ce mémoire car nous ne les utilisons pas. Pour plus d'informations sur chacune d'elles, je vous renvoie au TFE de K. Gobron [Gobron, 2017] où celles-ci sont exposées plus en détail, ainsi qu'à l'article de H. Ingensand [Ingensand, 2008] pour la dispersométrie et à la thèse de P. Flach [Flash, 2000] pour la scintillométrie.

Concluons en rappelant que dans la suite de ce mémoire, nous n'utiliserons que les VRS et les résolutions de triangles dans des réseaux pour l'estimation de MRA et la correction des mesures. Nous étudierons comment cela influence les séries temporelles des mesures, des coordonnées et de leur précision.

I.4 Etude de l'impact de la réfraction sur données réelles issues des travaux de Cementys

I.4.1 Présentation des méthodes de travail et des objectifs de Cementys

Comme énoncé dans l'introduction, les premiers mois de ce TFE ont été réalisés au sein de l'entreprise Cementys. Spécialisée dans l'auscultation, l'entreprise est responsable de la surveillance de différents tronçons du projet Grand Paris Express. Nous pouvons citer les tronçons T3A et T2C (situés sur la ligne 15 sud), localisés respectivement en rouge et bleu sur la Figure 5 ci-dessous, et sur lesquels j'ai été amené à travailler régulièrement.

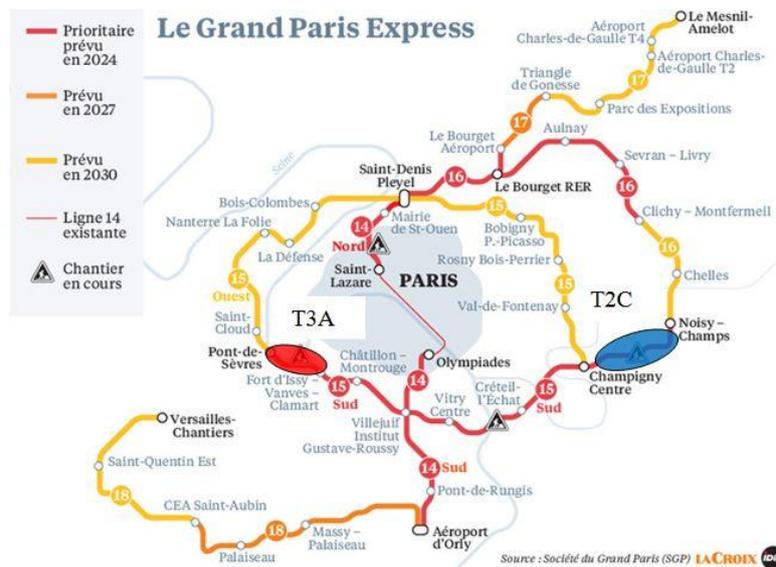


Figure 5 : Projet Grand Paris Express (source [LaCroix, 2018])

Pour réaliser les auscultations tachéométriques l'entreprise place des prismes d'auscultation sur les façades des bâtiments situés dans la zone d'influence géotechnique, mais également sur les voies de chemin de fer, sur les voies de tramway ou encore sur les routes. Les stations totales sont placées à l'intérieur ou à l'extérieur des ZIG et commencent chaque cycle de mesure en visant des prismes de référence, qui sont eux, impérativement placés en dehors des ZIG. Les stations visent ensuite en double retournement l'ensemble des prismes visibles depuis leur position. Les fréquences des cycles de mesures dépendent des besoins des clients (généralement un cycle toutes les 20 minutes ou toutes les heures). Certaines zones peu sensibles ne nécessitent de prendre des mesures qu'une fois par semaine (parfois même toutes les deux semaines), auquel cas les techniciens effectuent des visées manuelles.

La grande majorité des stations sont permanentes et effectuent leurs cycles de mesure automatiquement. Il s'agit uniquement des TOPCON MS05AXII ou MS1AXII, et nous les avons exploités pour l'ensemble de nos expériences. Elles sont généralement placées sur des mâts de 2 à 4 mètres de hauteur, pour les protéger et faciliter les visées. Pour permettre leur alimentation et la communication des données aux équipes chargées du traitement, des coffrets sont disposés au pied de chaque station :

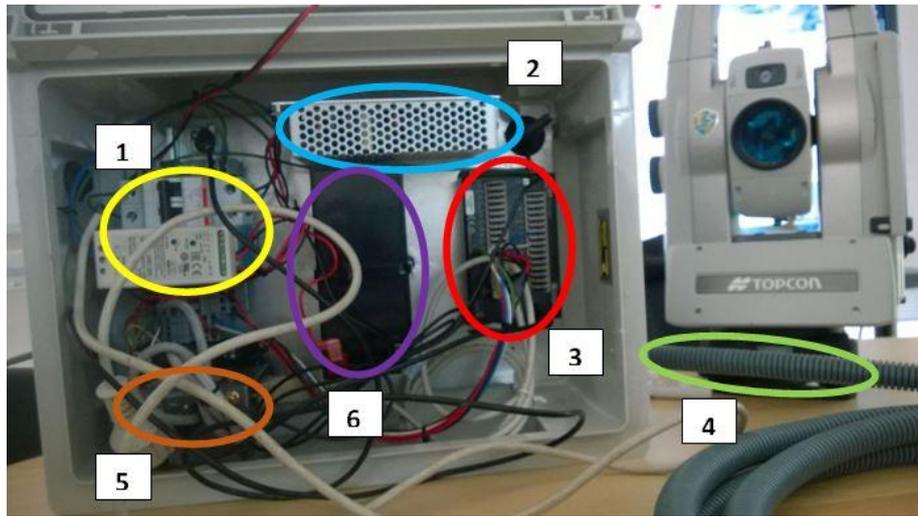


Figure 6 : Contenu d'un coffret de pilotage de station Cementys

Dans ces coffrets, illustrés sur la Figure 6, nous retrouvons un disjoncteur et un transformateur (n°1) qui permet de transformer le courant électrique alternatif en courant continu de 12 volts (l'alimentation du coffret se fait par raccordement aux accès électriques des chantiers, par batteries externes, ou grâce à des panneaux solaires). Il y a ensuite un convertisseur (n°2) qui permet d'obtenir un courant de 12 volts stabilisé et de protéger l'ordinateur, le modem et la station. L'ordinateur embarqué est une centrale de mesure CAMPBELL CR300 (n°3). Il permet d'envoyer les commandes de pilotage à la station, et de récupérer les données brutes des cycles de mesures via le câble de liaison (n°4, ce câble permet également d'alimenter électriquement la station). Les données sont alors transmises au modem 3g (n°5) qui les fait parvenir au centre de traitement. Nous retrouvons également une batterie de secours (n°6) dans chaque coffret pour ne pas interrompre le travail des stations en cas de coupure d'alimentation.

Le traitement informatique des données est entièrement automatisé. La première étape consiste à calculer la position et l'orientation de la station. Les prismes de références sont géoréférencés et permettent de réaliser un calcul dit de station libre⁵. Ce calcul est réalisé par le logiciel d'ajustement de mesures topographiques CoMeT [Durand, 2017], qui détermine également les coordonnées de chacun des prismes visés. Des programmes réalisés en interne permettent ensuite d'afficher les différentes séries temporelles sur une interface web nommée Vista Data Vision. Actuellement, Cementys (comme la plupart des acteurs de l'auscultation sur ce type de chantiers) ne travaille pas avec des réseaux de plusieurs stations, elles sont toutes calculées et traitées indépendamment.

Le cahier des clauses techniques particulières pour la ligne 15 sud du Grand Paris Express (cf [CCTP, 2015]), indique, concernant les coordonnées fournies par auscultation, qu'une précision de ± 0.3 mm doit être garantie en X, Y et Z. Le document ne précise pas le seuil de confiance concernant cette précision. Si ces précisions doivent s'entendre à 1 sigma (68%), il est impératif pour les acteurs de l'auscultation tels que Cementys d'assurer une prise en compte optimale des effets de la réfraction pour permettre d'atteindre ce niveau de précision.

I.4.2 Analyse de données réelles

Cementys disposant d'un historique de plusieurs années de mesures sur les chantiers du Grand Paris, j'ai pu réaliser une analyse des séries temporelles de coordonnées en cherchant à savoir si les variations pouvaient être ou non imputées à la réfraction atmosphérique. Les variations les plus importantes qu'il m'ait été données d'étudier proviennent d'une station du projet T3A, la station 1 située près du pont de Sèvres. La particularité des visées effectuées est qu'elles survolent la Seine, elles sont donc en théorie plus affectées par les gradients de température. De plus certains prismes sont situés à plus de 250 mètres de la station (pour une même courbure de rayon, plus la distance est importante, plus l'impact sur les coordonnées est important). Les séries temporelles de coordonnées verticales (Z) présentées sont celles des prismes 34, 35 et 36, dont les emplacements sont représentés sur la Figure 7 ci-après. Les coordonnées X et Y varient

⁵ Synthèse des méthodes de triangulation et de résection, permettant de déterminer les coordonnées d'un point à partir de mesures angulaires et de distances sur (au minimum) deux autres points dont les coordonnées sont connues. CoMeT utilise la méthode des moindres carrés pour effectuer ce calcul.

moins, elles ne sont donc pas présentées ici. De nombreuses autres séries temporelles ont été étudiées mais les conclusions étant similaires, celles-ci n'apparaissent pas dans ce rapport.



Figure 7 : Emplacements de la station 1 et des prismes 34, 35 et 36

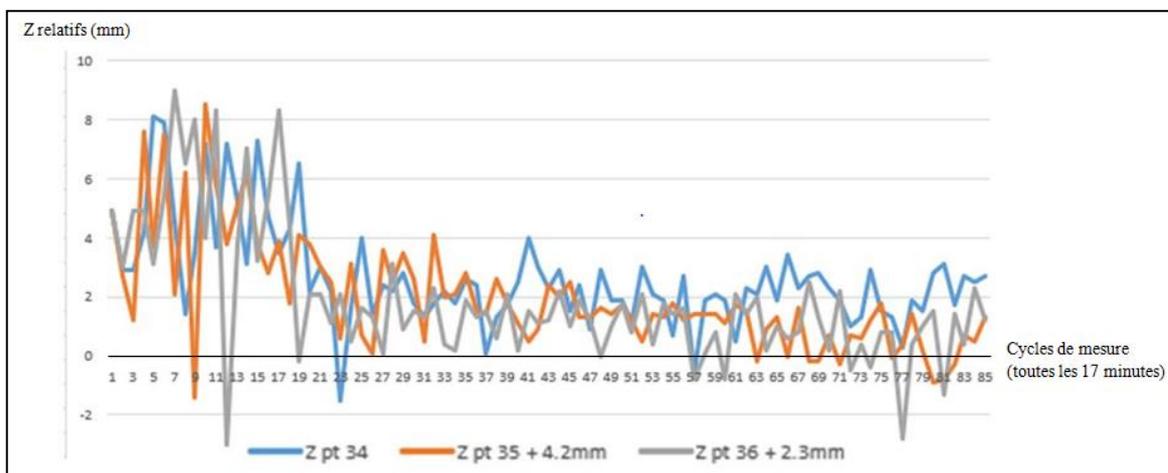


Figure 8 : Evolution des Z relatifs des points 34, 35 et 36 (en mm) du 16/08/2018 12h00 au 17/08/2018 12h00

Différentes constatations peuvent être faites en observant cette Figure 8. La plus marquante est que les variations ont une amplitude de plus d'1 cm sur une journée. Cette amplitude est bien supérieure aux précisions théoriques des stations totales (nous devrions observer des variations de 1.5 mm à cette distance). Elle s'explique soit par un réel mouvement du bâtiment, soit par des perturbations météorologiques. Ce type de variation

se produisant quotidiennement, nous pouvons conclure que ce n'est pas dû à un réel mouvement du sol. De plus les variations les plus importantes se produisent en début d'après-midi, là où les effets thermiques sont les plus importants. Nous n'avons pas pu établir de corrélations entre ces mouvements et la précision de la détermination des coordonnées de la station (estimateur du facteur unitaire de variance issu du calcul de station libre), ni entre ces mouvements et l'évolution du $G0^6$. Si ces paramètres varient, nous pouvons nous attendre (mais pas systématiquement) à un mouvement des prismes observés, dans le cas où une référence a bougé par exemple. Les visées sont donc impactées par le phénomène de réfraction atmosphérique, ou par un mouvement du support de la station (ce qui est effectivement le cas, comme nous le verrons plus tard). De plus, ce qui nous fait pencher en faveur d'un effet lié à la réfraction, est que les 3 séries temporelles ont des comportements similaires. Ceci peut s'expliquer par la grande similitude des trajets optiques depuis la station. Des études menées sur l'évolution des angles enregistrés ont mené aux mêmes conclusions.

Nous avons réalisé le même type d'analyse sur le tronçon T2C, dans une toute autre configuration, présentée dans la Figure 9 ci-après :

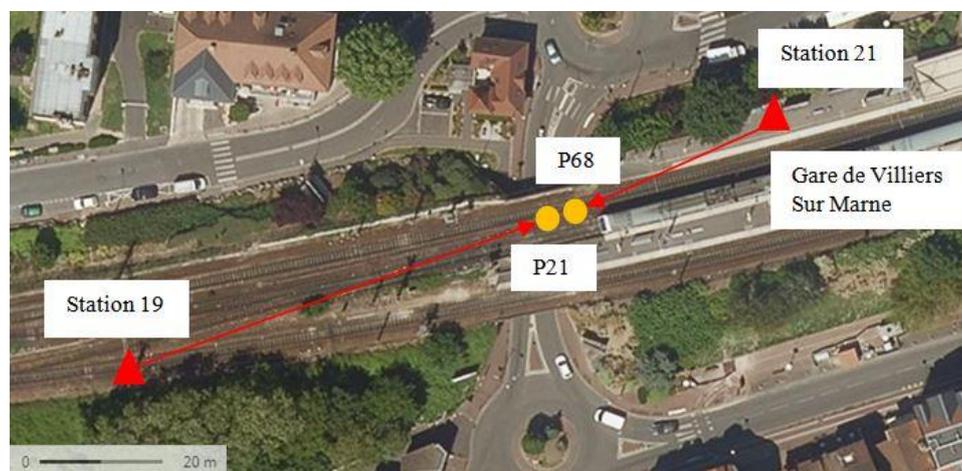


Figure 9 : Emplacements des stations 19 et 21 et des prismes 21 et 68

Cette fois-ci les deux prismes étudiés n'étaient pas visés par les mêmes stations, et les coordonnées ne suivaient pas les mêmes évolutions. Cette constatation confirme ce qui était avancé dans la partie I.3.4.1 : le phénomène de réfraction est trop local pour pouvoir

⁶ Gisement du zéro du limbe de l'instrument. Le $G0$ correspond à l'orientation de la station.

être traité globalement. Cette mise en évidence du problème de réfraction a mené à la réalisation des différentes expériences présentées dans la suite de ce mémoire.

I.4.3 Problèmes de monumentation et solution proposée

En étudiant des chantiers réels d'auscultation continue, l'objectif était de mettre en évidence la présence de réfraction sur des cas réels. Mais la difficulté est de s'assurer que l'on est bien en présence de réfraction et pas d'autres phénomènes, les chantiers réels n'étant pas forcément dimensionnés et mis en œuvre spécifiquement pour l'étude de la réfraction. Sur les chantiers linéaires du type Grand Paris Express, les coordonnées des stations sont recalculées à chaque cycle à partir des mesures sur des références extérieures. Le compensateur de l'appareil assure que son axe principal est toujours suivant la verticale du lieu. Les mouvements des supports des stations (ou effets tournesol, présenté dans la partie I.1.2) ne sont normalement pas un problème. Cependant, deux problèmes subsistent. La dilatation du support peut s'effectuer durant la période de mesure. De même, avec le temps, le support peut fléchir en continu (Il arrive que le sol sous les mâts finisse par se tasser, ou bien que les chantiers avoisinants fassent vibrer les mâts), de sorte que le compensateur sorte de sa plage de travail.

Dans le premier cas, le compensateur continue de travailler alors que l'instrument se déplace. Les angles verticaux enregistrés ne sont donc pas faussés. Par contre c'est la position du centre optique de l'appareil qui varie, et cette variation se répercute sur les coordonnées calculées. Une solution envisageable serait d'effectuer des visées sur les prismes de références à la fin du cycle (voire au milieu également), afin d'observer si la station a bougé, et le cas échéant, d'interpoler le mouvement pour connaître la position de la station lors de chaque mesure sur prisme.

La plage de travail des compensateurs TOPCON est de 6' d'arc (0.1 deg). Au-delà de cette valeur, l'instrument continue de corriger les angles verticaux, mais moins efficacement, des angles de roulis et de tangage apparaissent et correspondent aux erreurs du compensateur. On observe alors des variations sinusoidales sur les coordonnées Z calculées, d'une période d'un jour, qui suivent le fléchissement du support de l'instrument au cours de la journée. Une première solution à ce problème est d'utiliser des embases autonivelantes (Voir < <https://www.sccsurvey.co.uk/ad-12-self-levelling-tribrach.html>>) ou motorisées et commandées à distance. Durant ce TFE, une autre solution a été

développée, et adaptée au contexte des chantiers de Cementys. Elle consiste à effectuer les calculs de coordonnées par transformations de Bursa-Wolf.

Des programmes de calculs de transformation à 6 et 7 paramètres (en retirant le facteur d'échelle pour la transformation à 6 paramètres) ont donc été développés pour l'entreprise. Le principe est de calculer les coordonnées de tous les prismes visés par la station en local, puis de calculer les paramètres de la transformation par méthode des moindres carrés linéaires grâce aux prismes de référence (dont on connaît les coordonnées géoréférencées). On applique ensuite cette transformation aux autres prismes visés.

L'intérêt de cette méthode de calcul est qu'elle fonctionne même si l'appareil n'est pas du tout verticalisé, a contrario, elle ajoute des imprécisions liées au calcul de la transformation. De plus il faut nécessairement 3 prismes de références visés à chaque cycle.

Le calcul à 6 paramètres (sans facteur d'échelle) semble plus adapté en théorie, car les mesures sont toutes effectuées avec le même télémètre, et car enlever un paramètre permet de mieux contraindre le calcul. Cependant, les mesures de distances ne sont pas toujours corrigées des paramètres météorologiques. S'il fait très chaud ou très froid, l'ensemble des distances mesurées vont être trop importantes ou trop courtes. Le nuage de points obtenu va alors être similaire à la réalité, mais à un facteur d'échelle près. Dans la transformation à 7 paramètres, le facteur d'échelle pourra alors faire office de « correction » des distances. Dans ce TFE, cette méthode a été développée pour corriger les séries temporelles d'un autre phénomène que la réfraction, et pouvoir ensuite observer effectivement la réfraction dans les mesures. Si les programmes fonctionnent parfaitement et sont désormais intégrés par l'entreprise Cementys, il reste à étudier plus en détail la précision des transformations obtenues et l'impact sur les coordonnées des points et leurs précisions. Ce qui est hors des objectifs de ce stage.

La solution la plus simple reste cependant de limiter au maximum les effets de dilatation des supports, en améliorant la monumentation. Il est possible d'isoler les mâts des stations pour en limiter la dilatation, ou encore de fabriquer des abris pour les stations. Cette dernière solution permet de limiter la dilatation du support mais également de protéger l'instrument de la surchauffe induite par le rayonnement direct du soleil.

II Expériences réalisées en conditions réelles

En étudiant les données réelles des chantiers T3A et T2C, nous avons pu constater la présence effective d'un impact de la réfraction. Seulement, d'autres problèmes sont mélangés avec (effet tournesol, problèmes de monumentation, géométrie de réseau figée ...), et nous ne pouvons pas la quantifier. Nous avons donc souhaité réaliser des expériences de courte durée, pour mettre en évidence, dans des cas maîtrisés, la présence de réfraction. Celles-ci sont réalisées dans des conditions atmosphériques proches de celles des stations permanentes. Les premiers tests réalisés portent uniquement sur la précision du système ATR. Il va s'agir de vérifier que les écarts-types annoncés par TOPCON sont réalistes, et donc que les variations observées sur les séries temporelles de coordonnées ne sont pas simplement liées à la précision instrumentale. Deux expériences différentes ont été menées. Elles sont présentées, ainsi que leurs résultats, dans l'Annexe n°1. Les conclusions sont que les précisions annoncées par le constructeur sont justes, et que nous pouvons donc continuer nos expériences.

II.1 Présentation des expériences mettant en évidence la réfraction atmosphérique

Ces différentes expériences peuvent être réalisées simultanément. Il s'agit de placer deux stations totales et un prisme en formant un triangle. Les stations doivent être éloignées pour ne pas avoir des trajets optiques similaires pour les visées sur le prisme. Deux opérateurs sont nécessaires et doivent effectuer une visée en direction de l'autre station simultanément (VRS) puis une visée en direction du prisme, simultanément aussi. Les visées s'effectuent en double retournement, et l'opération se répète un certain nombre de fois.

Trois traitements peuvent alors être effectués. Le premier consiste à étudier les écarts-types angulaires de chaque station pour les visées sur prisme (nous pouvons également comparer l'évolution des coordonnées du prisme calculées depuis chacune des stations). Le but est de mettre en avant la présence de réfractions atmosphériques différentes pour des trajets optiques différents. Le second traitement consiste à étudier la présence de réfraction atmosphérique verticale entre les deux stations, grâce aux visées réciproques simultanées. Pour finir, il est possible d'étudier la présence de réfraction latérale au sein du triangle.

Ces expériences ont été menées plusieurs fois dans la cour de Cementys (nous n’analyserons que celles du 04/04/2019, réalisées entre 16h et 17h, avec un temps ensoleillé et une température moyenne de 11°C, car les résultats sont les plus satisfaisants) puis une fois au dessus de la Seine (voir la Figure 10), pour se rapprocher au mieux des conditions de mesure de la station située proche du pont de Sèvres (dont les données ont été analysées dans la partie I.4.2). Cette seconde expérience a été réalisée le 08/04/2019 de 14h30 à 16h, le temps était au beau fixe et la température variait entre 18 et 20°C.

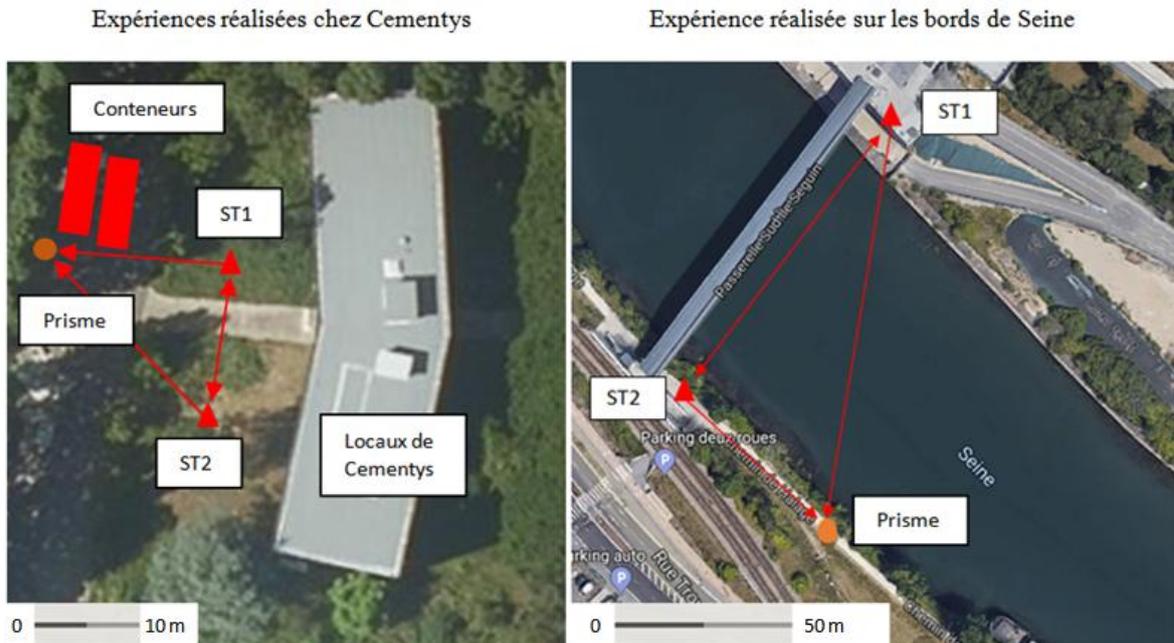


Figure 10 : Emplacements des différentes expériences

II.2 Résultats pour les suivis angulaires et de coordonnées

Pour les premiers tests, réalisés dans la cour de Cementys (Figure 10), la station 1 avait des visées qui passaient très près d’un conteneur métallique exposé au soleil (environ 10 cm). Pour la station 2, l’ensemble des visées passaient loin du sol et de tout objet (≈ 1 m). Les écarts-types angulaires (E-t) obtenus après 50 cycles de mesures sont cohérents et précisés dans le Tableau 3 :

Angles	E-t ST1	E-t ST2	Facteur multiplicatif entre E-t
Verticaux	0.00031 gon	0.00021 gon	1.42
Horizontaux	0.00058 gon	0.00022 gon	2.60

Tableau 3 : Ecart-types angulaires obtenus lors de l’expérience de suivi de coordonnées réalisée chez Cementys

Lors de l’expérience sur les bords de Seine, la station 2 effectuait les visées le long de la berge (voir la Figure 10), et c’est dans cette zone que les échanges latéraux de

température sont les plus importants entre le sol et l'eau (bien que les visées au-dessus de l'eau soient elles aussi impactées). Les résultats sont présentés dans le Tableau 4 suivant :

Angles	E-t ST1	E-t ST2	Facteur multiplicatif entre E-t
Verticaux	0.00039 gon	0.00060 gon	1.56
Horizontaux	0.0023 gon	0.00287 gon	1.26

Tableau 4 : Ecart-types angulaires obtenus lors de l'expérience de suivi de coordonnées réalisée sur les bords de Seine

Les résultats sont donc cohérents pour les écarts-types angulaires (obtenus après 15 cycles de mesure), et nous pouvons remarquer que les angles horizontaux ont été fortement impactés par les effets atmosphériques. Cependant nous ne retrouvons pas cette cohérence au niveau des écarts-types sur la détermination des coordonnées du prisme :

Coordonnées	E-t depuis ST1	E-t depuis ST2	Facteur multiplicatif entre E-t
X	0.0036 m	0.0017 m	0.48
Y	0.0018 m	0.0014 m	0.74
Z	0.0007 m	0.0005 m	0.68
3D	0.0040 m	0.0022 m	0.54

Tableau 5 : Ecart-types obtenus sur les coordonnées du prisme lors de l'expérience sur les bords de Seine

Cette différence peut cependant s'expliquer par le fait que la distance entre la station 1 et le prisme était 2.3 fois supérieure à celle entre la station 2 et le prisme. La mesure de distance est donc moins précise, et elle impacte d'avantage la précision des coordonnées.

II.3 Quantification de la réfraction verticale

II.3.1 Modélisation du MRA et calculs réalisés

Nous allons voir comment ont été modélisés les coefficients de réfraction atmosphérique verticaux, mais avant tout calcul, les programmes réduisent les angles et corrigent les distances.

II.3.1.1 Correction des distances mesurées

Comme précisé à la partie I.2.3, le phénomène de réfraction entraîne une modification de la longueur d'onde utilisée par les instruments, ce qui affecte les mesures de distances. Le modèle de correction appliqué tout au long de ce TFE est celui fourni par TOPCON (basé sur celui de Barrel et Sears), avec le résultat ΔD qui est la correction atmosphérique, exprimée en ppm :

$$\Delta D = 282.324 - \frac{0.294362 * p}{1 + 0.003661 * t} + \frac{0.04127 * e}{1 + 0.003661 * t}$$

Équation 18 : Modèle de correction des distances proposé par TOPCON

Dans cette formule, t est la température (°C), p la pression (hPa), et e la pression de vapeur d'eau (hPa). Nous obtenons e par la formule suivante :

$$e = h * \frac{6.11 * 10^{\left(\frac{7.5 * t}{t + 237.3}\right)}}{100}$$

Équation 19 : Pression de vapeur d'eau

Ici, t est encore une fois la température et h est le taux d'hygrométrie (%).

Concernant l'acquisition des données météorologiques, le plus juste est de disposer de capteurs proches des instruments et des prismes, et de moyenner les données de deux capteurs pour corriger une visée. Cependant, une étude menée par [Assemat, 2015] montre qu'il n'y a que peu de différences à utiliser des données météorologiques d'une seule station, ou de plusieurs moyennées (voire même de découper le trajet optique en plusieurs tronçons et les corriger indépendamment). Pour ces premières expériences, les données météorologiques étaient issues de stations permanentes, propriétés de Cementys, et situées à proximité des expériences. Leur précision est de 0.1 °C pour la température, 0.1 hPa pour la pression et 1 % pour l'hygrométrie, ce qui est suffisant pour nos travaux.

II.3.1.2 Modélisation du MRA vertical

Le code développé permet de déterminer la valeur du coefficient de réfraction vertical moyen au moment de la mesure entre les deux stations qui effectuent les visées réciproques simultanées. Il permet également de donner les valeurs des angles verticaux corrigés des erreurs liées à la réfraction. Le code prend en compte la sphéricité de la Terre.

Comme il n'est pas possible de viser simultanément en mode automatique les centres optiques des appareils, il a fallu placer des prismes au dessus et tenir compte dans les traitements des bras de levier. La première étape de calcul consiste à corriger les angles verticaux et les distances pour qu'ils correspondent aux visées sur les centres optiques et non aux visées sur prismes. Nous utilisons les formules du théorème d'Al-Kashi pour effectuer ces corrections. La Figure 11 permet d'illustrer les calculs :

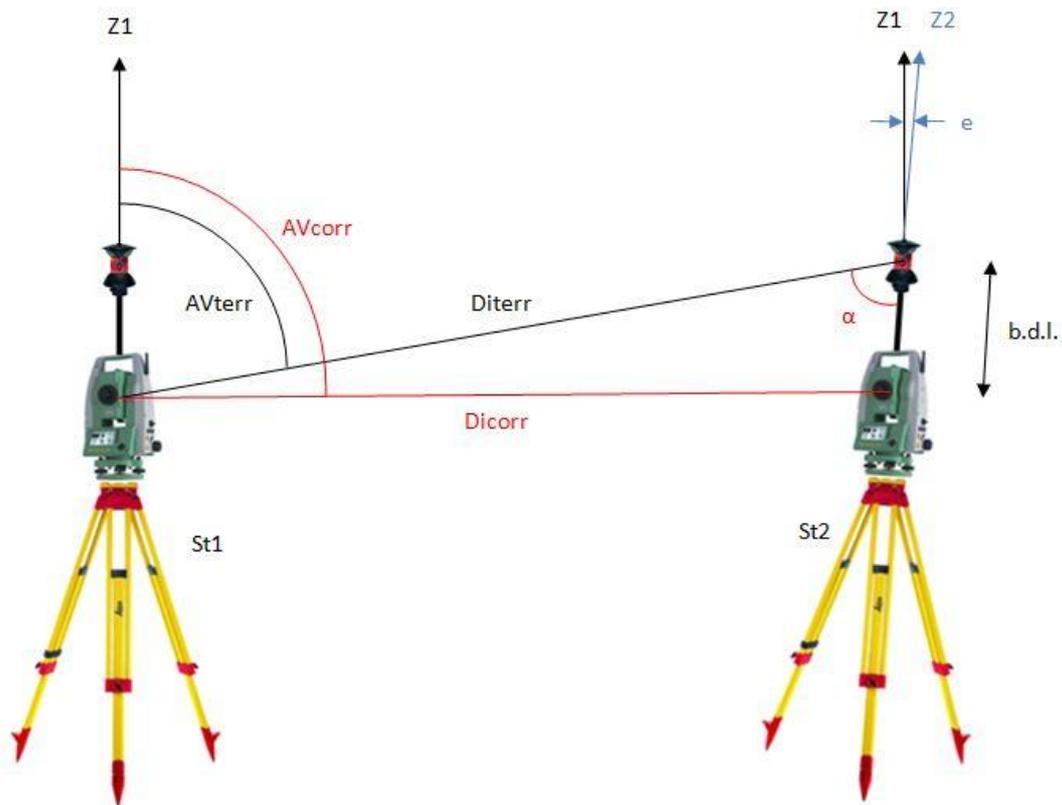


Figure 11 : Schéma représentant les stations totales au moment des VRS

Dans ce schéma, on définit deux repères locaux, dont l'origine est chacune des stations ST1 et ST2. La direction Z1 (respectivement Z2) représente la direction du zénith à la station ST1 (resp. ST2). L'axe X1 est orienté vers le zéro du limbe horizontal de la station ST1 (pareil pour X2 et ST2). L'acronyme b.d.l. correspond au bras de levier de la station 2. AVterr est l'angle vertical enregistré (terrain) depuis la station 1, et Diterr la distance inclinée enregistrée. Ici, e représente l'angle entre les directions du zénith en ST1 et ST2 (cet écart provient de la sphéricité de la Terre). On se place dans le repère local associé à ST1, et on considère la Terre comme une sphère de rayon R_t pour simplifier les calculs. AVcorr et Dicorr sont l'angle vertical et la distance inclinée corrigés. Pour finir, α est l'angle permettant de résoudre le triangle Diterr-b.d.l.-Dicorr grâce au théorème d'Al-Kashi.

Pour déterminer e nous calculons une distance horizontale moyenne entre les deux stations, grâce à la formule :

$$Dh = \left(\frac{Diterr1 + Diterr2}{2} \right) * \cos\left(\frac{AVterr2 - AVterr1}{2} \right)$$

Équation 20 : Distance horizontale moyenne entre deux points

Ici, D_{terr1} et D_{terr2} sont les distances inclinées des visées sur prisme de chacune des stations, et AV_{terr1} et AV_{terr2} les angles verticaux. Une fois la distance horizontale connue, nous pouvons déterminer l'angle au centre de la Terre correspondant à l'angle e par la formule approchée [Baselga et al., 2014] :

$$e = 2 * \sin^{-1} \frac{Dh/2}{Rt}$$

Équation 21 : Formule approchée de l'erreur sphérique

Rt est le rayon de la Terre. La distance horizontale est approchée, car on se base sur des angles et distances issus des visées sur prismes, et non sur centre optique, mais cette imprécision est négligeable par rapport au rayon de la Terre, qui lui-même est fixé à 6371000 m (valeur conventionnellement admise). Cette correction de sphéricité ne prend pas en compte la forme ellipsoïdale de la Terre, ni l'altitude, c'est une correction moyenne, qui peut être utilisée sans informations de géoréférencement.

Une fois e obtenue nous pouvons aisément déterminer α par la formule « $\alpha = AV_{terr} - e$ ». Nous utilisons alors les formules du théorème d'Al-Kashi pour déterminer D_{corr} et AV_{corr} .

Ce calcul est effectué pour les deux stations. Nous contrôlons l'écart entre les deux distances corrigées. Mathématiquement elles doivent être identiques, dans les faits, la précision des télémètres ne le permet pas (l'écart correspond à cette précision).

A partir de ces angles et distances corrigés, nous pouvons donc calculer une valeur du MRA vertical grâce à la formule de l'Equation 13. Encore une fois, nous faisons l'hypothèse d'une réfraction verticale régulière et d'un angle de réfraction identique pour les 2 stations (hypothèse de Biot et Bouguer [DPTS, 2010]).

Pour finir, le programme calcule les angles verticaux corrigés, ceux que l'on devrait trouver en visant le centre géométrique de l'autre station, s'il n'y avait pas de réfraction atmosphérique. Pour y arriver, nous additionnons l'angle de réfraction (qui peut être positif ou négatif) à la valeur de l'angle trouvé précédemment (l'angle correspondant à la visée sur le centre optique de l'autre instrument). Pour déterminer cet angle de réfraction, nous utilisons la formule de l'Equation 10.

II.3.2 Présentation des résultats

Comme évoqué précédemment, il a été nécessaire de placer un prisme sur chacune des stations utilisées grâce à des arceaux conçus pour placer des antennes GNSS (ou des prismes) Leica à l'aplomb d'une station totale, comme le montre la Figure 12 ci-après.

Nous considérons que les prismes sont parfaitement à l'aplomb des centres optiques des tachéomètres. Il faut cependant déterminer un bras de levier entre le centre du prisme et le centre optique. Cette détermination nécessitant d'être précise (autour de 0.1 mm), elle s'est effectuée au laboratoire de métrologie de l'ESGT, par nivellement indirect et direct (servant de contrôle). Il a également fallu réaliser l'étalonnage des télémètres TOPCON pour les prismes Leica utilisés. Nous avons pour cela utilisé la base d'étalonnage de l'ESGT et déterminé uniquement les constantes d'addition (à 0.1 mm près).



Figure 12 : Montage d'un prisme Leica GMP101 sur une station TOPCON

	Bras de levier	Ecart-type
Station 1	0.30579 m	0.00012 m
Station 2	0.31037 m	0.00007 m

Tableau 6 : Bras de levier mesurés et précisions associées

Cette expérience a été menée aux mêmes endroits que les suivis angulaires et de coordonnées. Cependant, lorsque les distances sont courtes (14 m dans la cours de Cementys), les résultats ne sont pas satisfaisants. Il existe deux explications à cela. De près l'ATR a du mal à déterminer exactement le centre du prisme, et une très légère variation sur l'angle vertical entraîne un écart important sur la détermination du MRA. De plus, une

légère erreur sur la détermination d'un des bras de levier aura la même conséquence. Dans le cours de Cementys, nous obtenons un MRA moyen de 11.2, ce qui n'est pas en accord avec la bibliographie (la hauteur par rapport au sol était environ de 1.6 m).

Concernant les visées au dessus de la Seine, nous obtenons des résultats cohérents (voir Figure 13). Le MRA moyen calculé est de +0.11. Cette valeur est très proche de celle couramment utilisée de +0.13, mais au vu des variations et du fait que le test n'a duré qu'une heure et demie, nous ne pouvons pas considérer qu'appliquer cette valeur moyenne aux visées de la station permanente située à proximité soit judicieux.

Les résultats sont très variables, avec une amplitude maximale de 1.2 en moins d'une heure. Ceux-ci ne sont pas surprenants si nous les comparons à ceux obtenus par [Hirt et al., 2010]. Sur une période de 10-30 min, ils trouvent une amplitude de 1-1.5 par temps ensoleillé, et les variations sont sinusoïdales ou en dent de scie également.

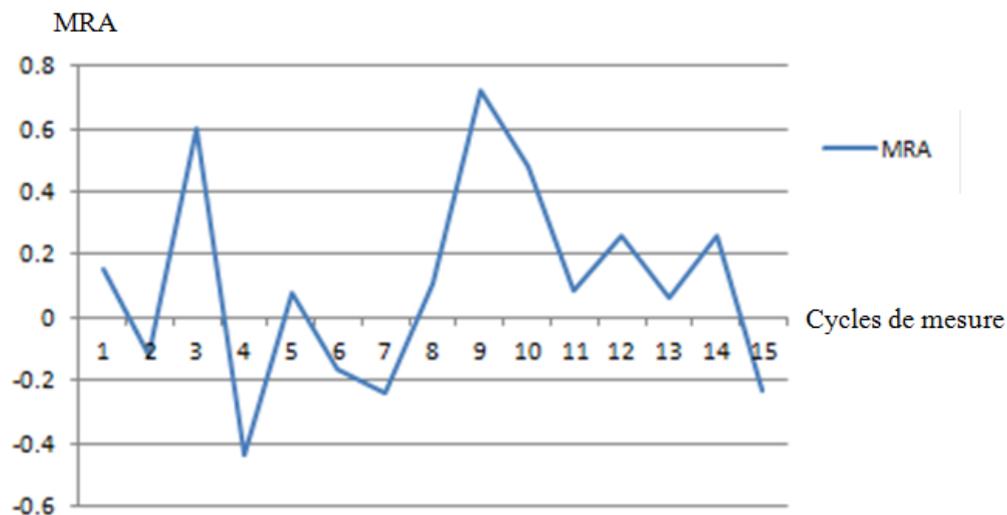


Figure 13 : Résultats obtenus pour le MRA vertical

Pour finir, nous pouvons étudier la précision théorique avec laquelle nous déterminons ce MRA. Pour cela nous nous référons à la Figure 3 (partie I.3.1.2). La distance séparant les stations est de 90 m et nous pouvons nous baser sur une précision angulaire de 1'' d'arc (en composant quadratiquement la précision de l'ATR et celle de la gravure des cercles nous obtenons un écart-type de 1.12'' d'arc, correspondant à 0.000345 gon). Nous obtenons une précision sur la détermination du MRA de 0.45. Cette valeur étant inférieure à l'amplitude observée, nous pouvons conclure qu'il y a bien une influence de la réfraction verticale sur les mesures de la station permanente.

II.4 Résultats relatifs à la réfraction latérale

II.4.1 Modélisation et calculs réalisés

Les programmes développés permettent de déterminer la présence de réfraction latérale, de la quantifier et de corriger les angles horizontaux. Deux versions existent, une première pour traiter les expériences présentées dans cette partie (où il n'y a que deux stations et un prisme) et une autre permettant de traiter 3 stations, qui sera exposée dans la partie suivante de ce mémoire.

Le protocole sur le terrain est le suivant, nous plaçons deux tachéomètres et un prisme de sorte à former un triangle, en faisant attention à éviter au maximum les problèmes de réfraction entre les stations, et en essayant au contraire d'en faire apparaître sur l'une des visées sur le prisme. La Figure 14 ci-dessous permet de comprendre facilement les calculs effectués dans le programme :

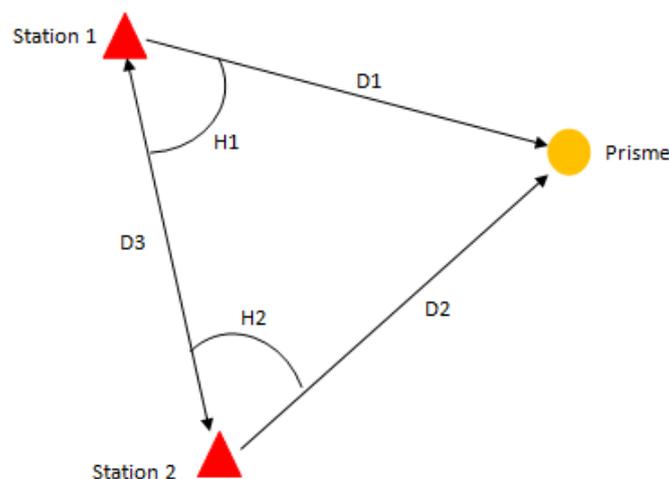


Figure 14 : Schéma de l'instrumentation nécessaire à la détermination du MRA latéral

Nous mesurons sur le terrain les angles horizontaux $H1$ et $H2$ (comme différences de lectures horizontales) ainsi que 3 distances inclinées. Nous calculons les distances horizontales $D1$, $D2$ et $D3$ correspondantes à celles-ci.

Nous résolvons le triangle grâce aux formules du théorème d'Al-Kashi seulement avec les distances horizontales. Nous obtenons alors les angles $H1'$ et $H2'$ par le calcul (ils correspondent à $H1$ et $H2$). Nous pouvons donc calculer l'écart entre l'angle mesuré sur le terrain et l'angle calculé (considéré comme juste), et à partir de cet écart, déterminer le MRA horizontal (les formules sont présentées dans la suite de ce paragraphe).

Nous savons que les distances, une fois corrigées des paramètres météorologiques, ne sont presque pas affectées par la réfraction atmosphérique [Bolzon et al., 2017]. Le rayon courbé a quasiment la même longueur qu'un rayon rectiligne, comme le prouve le Tableau 7. Dans ce tableau, pour différentes valeurs de MRA sur chaque ligne et différentes distances horizontales sur chaque colonne, on indique l'allongement du rayon lumineux du fait du MRA.

MRA	Distances horizontales (en mètre)					
0	10	20	50	100	200	300
1	10.00000	20.00000	50.00000	100.00000	200.00000	300.00000
10	10.00000	20.00000	50.00000	100.00000	200.00000	300.00000
100	10.00000	20.00000	50.00000	100.00001	200.00008	300.00028

Tableau 7 : Impact du MRA sur l'allongement d'un rayon lumineux

On observe qu'avec une valeur de MRA égale à 100 (valeur aberrante, bien supérieure aux valeurs mesurées) et une distance horizontale de 300 m (en auscultation il est très rare de viser si loin), la courbure du rayon lumineux n'ajoute que 2.8 dixièmes de millimètre sur la distance. Cette erreur est donc largement négligeable.

Dans la configuration où il n'y a que deux stations, nous ne pouvons prendre en compte la réfraction verticale que sur la visée inter-stations (elle pourrait avoir un impact sur la détermination des distances horizontales). Heureusement, cette prise en compte est relativement négligeable si les visées sont proches 100 gon pour déterminer une distance horizontale, en voici une démonstration :

Nous prenons des distances inclinées de 200 m, et un angle relativement important de 105 gon. La distance horizontale vaut 199.3835 m. Ensuite, imaginons trois valeurs de réfraction atmosphérique, une première aberrante de -101, une seconde, très importante de -10.1 et une dernière, cohérente, de -1. Les écarts sont les suivants :

MRA	Erreur angulaire :	Ecart sur le calcul d'une distance horizontale (avec une distance inclinée de 200 m et une visée de 105 gon) :
-101	0.1 gon	2.49 cm
-10.1	0.01 gon	2.47 mm
-1	0.001 gon	0.25 mm

Tableau 8 : Impact de la réfraction verticale sur les distances horizontales

Les visées ne se font que très rarement à de telles distances, et rappelons que 1 mm à 200 m correspond à la précision du distancemètre de l'appareil. Si nous disposons de

trois stations, il est tout de même préférable de prendre en compte la réfraction verticale sur toutes les visées, et c'est ce que nous faisons pour le réseau expérimental.

Le fait de n'utiliser que deux tachéomètres possède un inconvénient, la correction des angles se fait en formulant l'hypothèse d'une absence de réfraction latérale au niveau de la visée entre les deux stations. Nous savons que ce n'est pas exact. Pour que cette hypothèse soit la plus valable possible, en pratique, nous évitons la présence d'obstacles, susceptibles d'induire des gradients de température latéraux sur cette ligne de visée.

En plus de la réfraction atmosphérique verticale, nous corrigeons les angles verticaux des erreurs liés à la sphéricité de la Terre. Nous calculons des distances horizontales pour déterminer les angles par le calcul, seulement une distance horizontale n'est qu'une distance inclinée projetée sur le plan horizontal d'une station. Il est essentiel que toutes les distances horizontales soient calculées sur des plans parallèles (ou sur un même plan) pour que les angles calculés soient cohérents. Or, la sphéricité de la Terre ne permet pas d'avoir des plans parallèles pour les différentes stations, nous corrigeons donc les valeurs des angles verticaux pour annuler ce défaut des plans horizontaux non parallèles. Ce calcul est expliqué en détail dans l'Annexe n°2.

Nous nous contrôlons en vérifiant que les distances horizontales calculées depuis deux stations sont bien strictement les mêmes.

Revenons aux écarts angulaires obtenus entre les angles horizontaux terrains, et ceux calculés grâce au théorème d'Al-Kashi. Ces écarts sont répartis entièrement sur les visées sur le prisme, et correspondent donc aux angles de réfraction. Le programme commence alors par corriger les lectures angulaires en ajoutant ou soustrayant ces écarts (en fonction de la position des points et de la valeur de l'écart). Puis un contrôle est réalisé, en recalculant l'angle à partir de la lecture terrain sur la station, et de la lecture corrigée sur le prisme (rappelons que dans ce cas nous considérons la visée inter-stations dénuée de toute réfraction latérale), et en comparant ce nouvel angle à celui trouvé au début grâce aux formules du théorème d'Al-Kashi. Cette différence doit être strictement nulle.

A présent, passons à la détermination du MRA latéral. La formule de détermination est basée sur les travaux de M. Wilhelm (voir Equation 17). Cependant cette formule a été adaptée, car ici nous faisons l'hypothèse d'une réfraction moyenne présente sur l'ensemble de la ligne de visée (même hypothèse que pour la réfraction verticale), alors que M.

Wilhelm étudie l'impact d'un objet (un mur) bien défini et considéré comme étant la seule source de réfraction. La formule adaptée et utilisée est la suivante :

$$k = \frac{2 * \delta_1}{D}$$

Équation 22 : Formule utilisée pour déterminer le MRA latéral

Avec δ_1 l'écart sur l'angle en cc (1 cc = 0.1 milligrade) et D la distance horizontale entre les 2 points. Cette formule a été obtenue en considérant que le mur (étudié par M. Wilhelm) était proche de la visée sur l'ensemble du trajet optique.

Une autre formule de détermination d'un MRA horizontal à partir de l'angle de réfraction a été développée durant ce TFE et est présentée dans l'Annexe n°3.

Pour finir, le programme s'intéresse au signe du MRA trouvé, et permet de dire si depuis la station, la courbure du rayon est dirigée vers la gauche ou vers la droite. Ceci a un intérêt pour vérifier si la présence d'un objet le long de la ligne de visée a eu l'impact que l'on attendait ou non.

II.4.2 Présentation des résultats

La méthode de calcul réalise des hypothèses fortes (absence de réfraction entre les stations). De ce fait, nous pouvons vérifier la cohérence relative des valeurs obtenues, mais pas fournir de valeurs absolues de réfraction latérale (Celles calculées ne sont certainement pas exactes). Voici ce que nous avons obtenu à la suite de l'expérience réalisée dans la cour de Cementys :

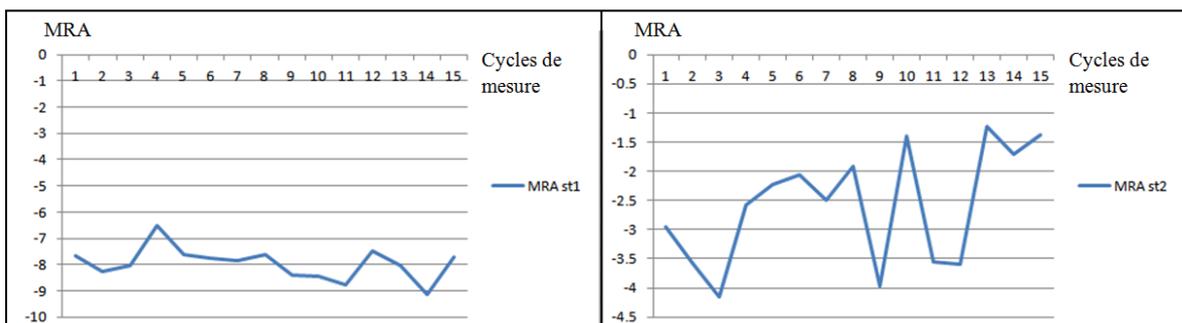


Figure 15 : MRA latéral calculé dans la cour de Cementys

Sur la Figure 15, nous pouvons observer des variations allant de -9.1 à -6.5 pour la station ST1 et une valeur moyenne de -8.0. Concernant la station ST2, les valeurs extrêmes sont -4.1 et -1.2, et la moyenne est de -2.6. La cohérence de ces valeurs réside dans le fait

que la station ST1 effectuait des visées rasantes le long d'un conteneur métallique chauffé par le soleil (voir Figure 10). De plus les valeurs négatives (dans cette configuration) indiquent une courbure des rayons lumineux en direction de ce conteneur, ce qui est en accord avec le principe de Fermat (voir Figure 2).

Pour finir, la Figure 16 présente les résultats obtenus après avoir effectué les visées au dessus de la Seine :

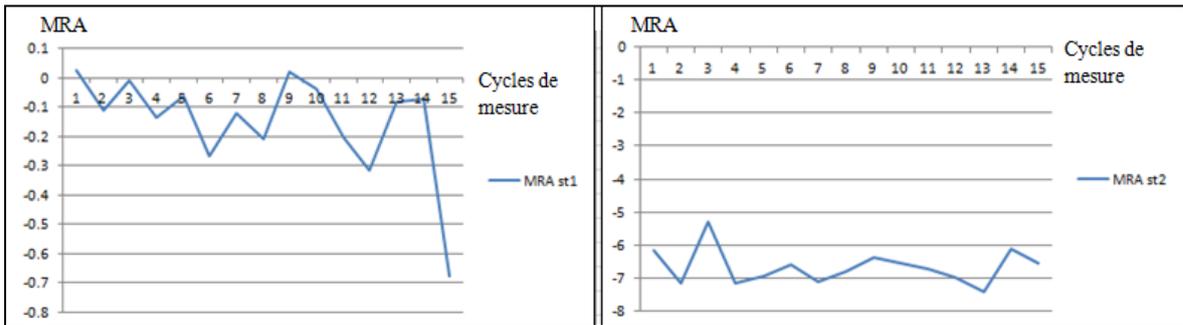


Figure 16 : MRA latéral calculé sur les bords de Seine

Encore une fois, ceux-ci sont cohérents. Les valeurs sont comprises entre -0.7 et 0 pour la station 1, avec une moyenne de -0.15, et entre -7.3 et -5.2 pour la station 2, avec une moyenne de -6.66. Pour rappel, la station 2 était celle qui effectuait les visées le long de la berge, il est donc logique que l'on obtienne une réfraction latérale bien plus importante. De plus, comme précédemment, les rayons se courbent en direction de la berge, où la température est plus élevée qu'au dessus de la masse d'eau.

III Réseau expérimental au laboratoire GeF

Ce réseau d'auscultation, mis en place sur le toit du bâtiment de l'ESGT, représente l'étape la plus importante de ce TFE. En effet, il va permettre d'étudier précisément les impacts de la réfraction atmosphérique sur un réseau d'auscultation, et de vérifier si ce phénomène peut être simplement corrigé par visées réciproques simultanées.

III.1 Présentation générale

Ce réseau est expérimental, mais il a pour objectif d'être réaliste, ou réalisable pour de réelles auscultations. Cependant, un effort important a été porté sur la qualité de la monumentation et la protection des instruments de l'environnement, ce qui n'est pas toujours évident à mettre en œuvre. L'objectif ici est de tout maîtriser (environnement, monumentation ...) pour n'observer que de la réfraction.

III.1.1 Géométrie du réseau

Ce réseau d'auscultation se compose de trois stations totales, qui effectuent des visées entre elles ainsi que sur trois prismes. La Figure 17 ci-dessous permet d'en avoir une bonne vision globale :

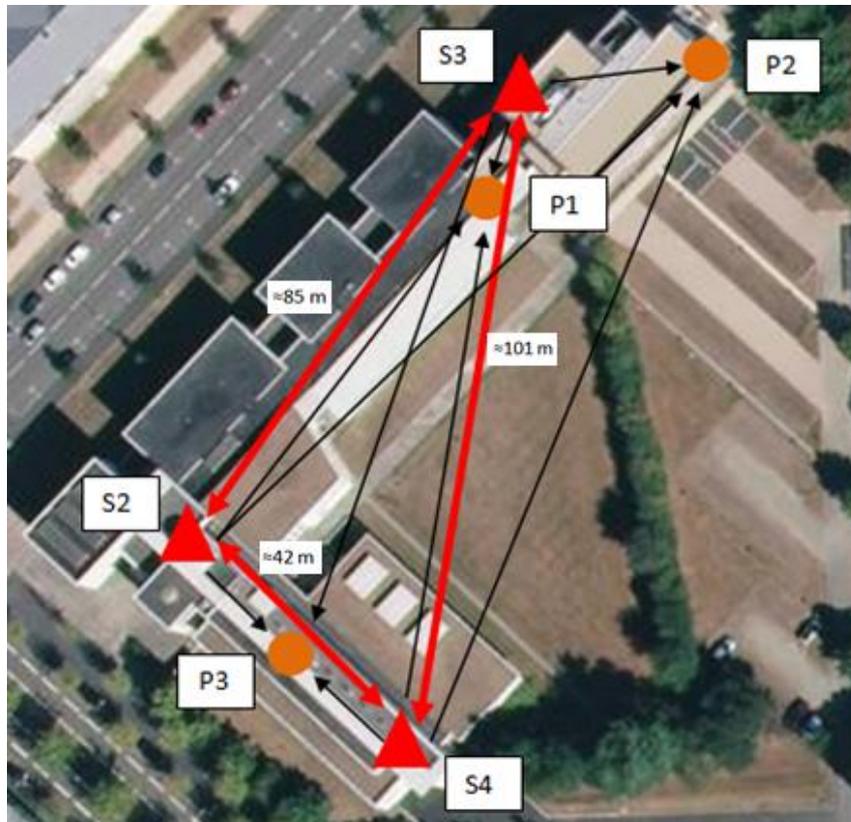


Figure 17 : Schéma du réseau expérimental (une flèche indique une mesure)

III.1.2 Fonctionnement du réseau

Le réseau a la particularité d'intégrer des visées réciproques simultanées. En effet, toutes les stations sont équipées de 1 ou 2 prismes montés sur arceaux, permettant aux autres de les viser. Les stations s'allument toutes les 30 minutes pour effectuer un cycle de mesure. Les cycles se déroulent toujours de la même manière, elles commencent par viser simultanément le prisme P1, puis le P2 et enfin le P3. Une fois ces visées terminées, la station S2 et la station S3 effectuent une visée réciproque simultanée (elles visent simultanément le prisme monté sur l'autre station), puis c'est au tour des stations S2 et S4 de se viser en enfin aux stations S3 et S4. La Figure 18 illustre les matériels mis en œuvre sur les différents points.



Figure 18 : Photographies des stations du réseau

Sur ces photographies nous pouvons remarquer les prismes montés sur arceaux. Ceux-ci sont des prismes d'auscultation de hautes précisions (Leica GPR112), cependant nous considérons une précision de centrage de 0.5 mm, pour couvrir les défauts de centrage des arceaux. Comme précédemment, les bras de levier ont été déterminés avec une précision avoisinant le dixième de millimètre. Les stations sont montées sur consoles et sur un pilier géodésique pour S4. Les piliers en béton sont parmi les supports les plus stables, le béton possédant une très faible dilatation sous l'effet de la température (4.5 fois moins qu'un bois comme le bouleau par exemple, connu pour être peu impacté). Ces piliers sont décrits plus en détail dans [Assemat, 2015]. Sur les photographies des stations S3 et S4, nous pouvons également remarquer la présence de « cabanes » de protection, celles-ci ont pour but de protéger les stations du soleil, de la pluie, des intempéries plus

généralement, mais elles servent surtout à protéger les supports du soleil, et ainsi d'éviter au maximum qu'ils se dilatent. Ce sont l'utilisation de supports adaptés et de « cabanes » protectrices qui participent à la très bonne monumentation évoquée plus tôt. Nous pouvons enfin remarquer la présence de caisses au pied des stations. Celles-ci servent à l'alimentation et au pilotage des instruments, ainsi qu'à la réception des données. Leur contenu est présenté sur la Figure 19 :

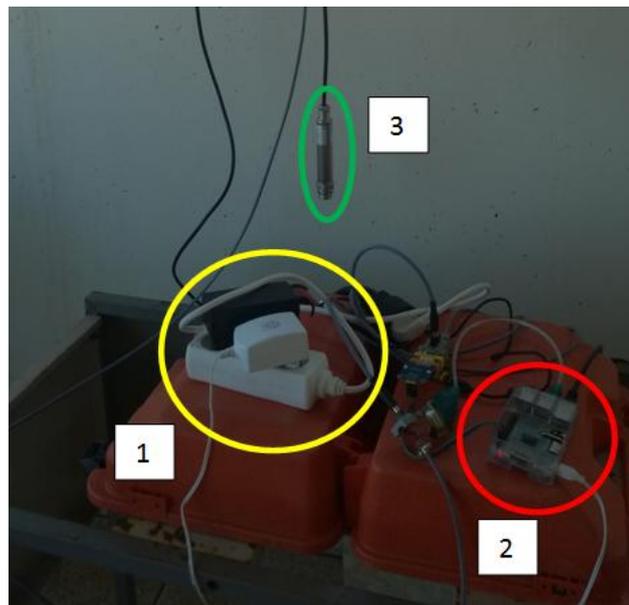


Figure 19 : Alimentation et pilotage des stations

Sur cette photographie nous pouvons observer l'alimentation (en 1) de la station totale, du Raspberry pi (en 2) et de la station météorologiques (en 3). Seules S2 et S3 en possèdent une, la station S4 récupère les données de S2 et ce sont des capteurs pression et température STS DTM. Les transformateurs alimentent les stations en courant continu de 12 volts, et sont simplement branchés sur secteur. Chaque station est pilotée par un Raspberry pi à l'aide de scripts python. Un quatrième permet de les contrôler à distance (envoi de nouvelles lignes de commandes, modification des codes existants ...). C'est également ce quatrième ordinateur qui permet de gérer la synchronisation de toutes les stations (Celle-ci est basée sur son horloge interne, il commande aux stations de toutes s'allumer simultanément et de prendre une même mesure à la même heure). Enfin, toutes les données brutes acquises par les stations sont redirigées vers ce quatrième Raspberry pour être traitées.

Concernant les prismes auscultés, P1 et P3 sont des Leica GZR4 360° (d'une précision de centrage annoncée à 2 mm sur une même face, mais possédants un écart de 5

mm entre les différentes faces) et P2 est un Leica GPH (précision de centrage de 0.3 mm). Tous ces prismes, ainsi que ceux placés sur les stations, ont été étalonnés avec les télémètres TOPCON.

Différents calculs sont réalisés à partir de ce réseau. Premièrement, dès la réception des données brutes, les angles mesurés sont réduits, et les distances sont corrigées des paramètres météorologiques à partir des stations placées en S2 et S3 (nous ne possédons pas de capteurs d'hygrométrie et entrons donc 50 % dans les modèles de correction). Ces données sont alors insérées dans un fichier .JOB pré-rempli. Ce fichier contient les lignes concernant la projection (CC48), les différentes coordonnées approchées et fixées (pour le calcul, S4 est fixé, ainsi que l'azimut allant de S4 à S2, ce qui contraint peu le réseau mais permet d'avoir une bonne cohérence entre les points), les lignes relatives aux précisions de chaque type d'observations (calculées à partir des précisions annoncées par le constructeur et des précisions de centrages énoncées plus tôt) ainsi que les différentes hauteurs de cibles (correspondant aux bras de levier pour les prismes montés sur les stations, et nulles dans les autres cas). Ces fichiers .JOB (il en existe un par cycle de mesure) sont ensuite exploités par le logiciel d'ajustement de mesures topographiques CoMeT. Nous extrayons et étudions différentes informations issues du calcul de Comet : l'estimateur du facteur unitaire de variance, les variances partielles (pour analyser l'impact de chaque type d'observation sur la cohérence globale du réseau), les coordonnées ajustées de chaque point du réseau, ainsi que les précisions qui y sont associées. Simultanément et à partir des données brutes, nous calculons les MRA verticaux et horizontaux présents sur chaque ligne de visée inter-stations (grâce aux programmes présentés dans la partie II de ce mémoire). Pour finir nous récupérons diverses informations pour chacune des stations lors de chaque prise de mesures. Ces informations sont les données du compensateur (nous renseignant sur la verticalité des instruments), la température interne de l'appareil et les données des stations météorologiques (température et pression externe). Le but est de faire apparaître des corrélations.

Les stations S2 et S3 sont des TOPCON MS05AXII, d'une précision angulaire de 0.5'' d'arc. En composant quadratiquement cette précision avec celle de l'ATR, nous obtenons un écart-type de 0.000345 gon (3.45 cc). La station S4 quant à elle est une TOPCON MS1AXII, son écart-type sur les mesures angulaires est de 0.000436 gon (4.36 cc).

III.2 Résultats obtenus

Les différents résultats présentés ci-dessous ont été obtenus à partir de mesures réalisées entre le 29/05/19 et le 21/06/2019.

III.2.1 Traitement en réseau sans prise en compte de la réfraction

Nous présentons ici les résultats issus du logiciel CoMeT à partir des observations brutes, dans le but de pouvoir les comparer aux résultats prenant en compte la réfraction. Commençons par regarder l'évolution de l'estimateur du facteur unitaire de variance ($s\hat{\sigma}^2$) :

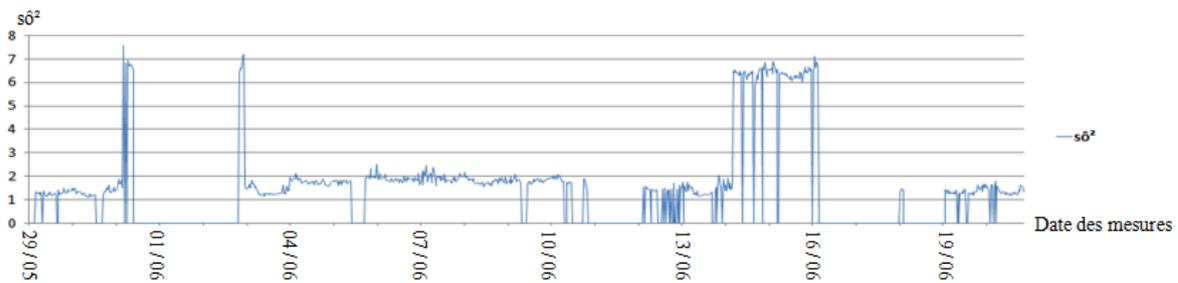


Figure 20 : Evolution du $s\hat{\sigma}^2$ entre 29/05/2019 et le 21/06/2019

La Figure 20 nous montre une valeur moyenne pour le $s\hat{\sigma}^2$ sur cette période de 2.34 (elle doit être proche de 1 si le réseau est parfaitement cohérent). Nous constatons que cette valeur est relativement haute mais que le test de validation globale (test du chi-deux) est validé dans environ 70 % des cas. Ceci nous renseigne sur le fait que le réseau tel qu'il a été conçu est très stable, et qu'il est peu impacté par la réfraction atmosphérique (qui n'est pas du tout prise en compte ici). Les quelques sauts importants que nous observons dans les valeurs sont dus à des stations qui se sont déverticalisées (les arceaux augmentant la prise au vent). Nous pouvons à présent nous intéresser aux variances partielles moyennes pour voir quelles observations dégradent le plus la cohérence du réseau (cf. Tableau 9) :

Observations	Variances partielles moyennes
Distances	1.898
Angles horizontaux	1.202
Angles verticaux	0.584
$s\hat{\sigma}^2$	2.34

Tableau 9 : Variances partielles moyennes obtenues sans prise en compte de la réfraction

Nous pouvons observer ici que ce sont les distances qui dégradent le plus la cohérence de notre réseau, suivies des angles horizontaux. Ceci peut provenir des erreurs de centrage. Les angles verticaux sont relativement cohérents entre eux. Ce tableau servira

de référence pour la suite. Pour finir, prenons un point en exemple (ici le point P1) et analysons les variations sur ses coordonnées relatives (en m), présentées sur la Figure 21 :

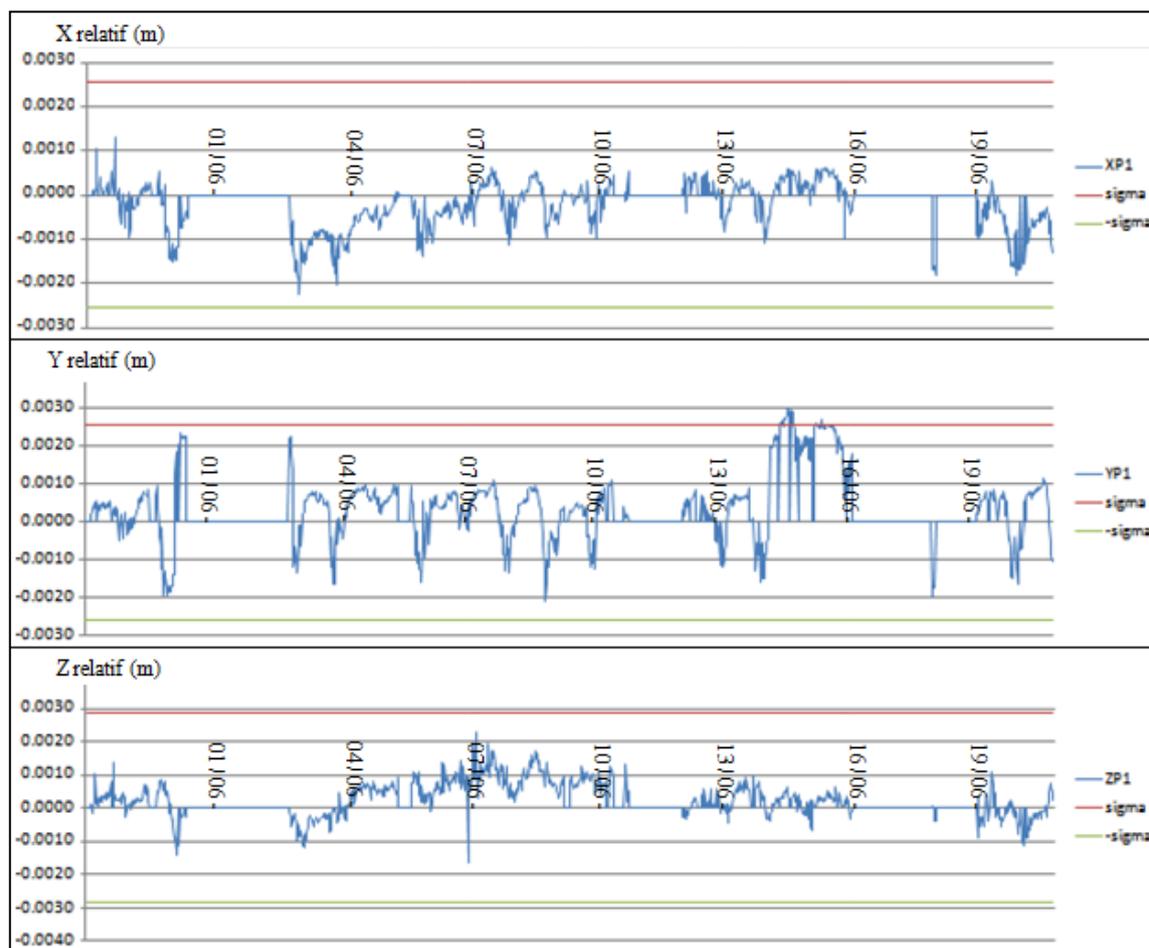


Figure 21 : Evolution des coordonnées relatives du point P1

Les traits rouges et verts représentent l'intervalle de confiance (à 95 %) dans lequel doit se situer la coordonnée. Nous observons aisément que les variations des coordonnées ajustées ne dépassent jamais cet intervalle de confiance (c'est le cas pour les coordonnées de l'ensemble des points). La réfraction atmosphérique, non prise en compte dans les précisions à-priori, aurait pu entraîner d'importantes variations sur ces coordonnées.

Ces informations tendent à montrer qu'en travaillant rigoureusement la monumentation, en évitant les visées rasantes et trop longues, et en ayant une surabondance de mesure (ici nous avons un degré de liberté de 28), la réfraction atmosphérique peut ne pas impacter significativement les réseaux d'auscultations. Les coordonnées ajustées étant toutes dans leurs intervalles de confiance, nous ne pouvons pas améliorer ce point. Regardons néanmoins quels effets bénéfiques peut apporter le fait de prendre en compte la réfraction.

III.2.2 Traitements de la réfraction verticale

Les calculs effectués sont ceux présentés dans la partie II.3.1.2. La Figure 22 ci-dessous représente l'évolution du MRA vertical calculé entre les stations S2 et S4 (l'Annexe n°4 présente plus en détail les résultats pour les autres visées, qui sont similaires, avec des amplitudes beaucoup plus faibles) :

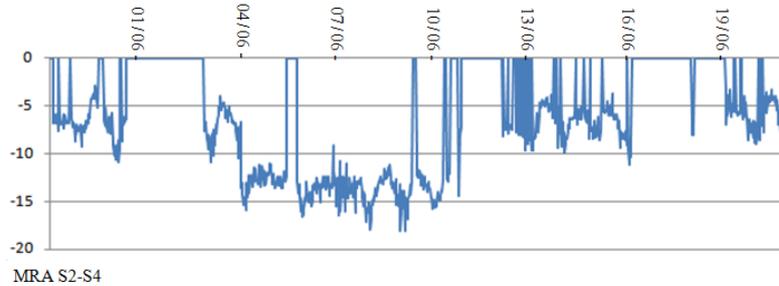


Figure 22 : Evolution du MRA vertical entre les stations S2 et S4

Cette courbe met en évidence la présence de réfraction verticale entre ces deux stations. En effet, si l'on se réfère à la littérature, il est logique d'obtenir ce type de variations journalières, avec les minimums atteints aux alentours de midi. L'amplitude totale est de 14, avec des valeurs atteignant -18 et en se référant à la Figure 3, nous pouvons estimer la précision de notre détermination à 1, à cause de la courte distance séparant les stations (42 m). Pour finir, ces variations sont également corrélées avec les données de températures et de pressions issues des stations météorologiques.

Notre objectif est de voir comment, à partir des VRS, nous pouvons améliorer la précision de notre réseau. Nous avons réalisé deux traitements différents ayant pour but de corriger les données brutes de cette réfraction verticale. Le premier consiste à corriger uniquement les angles verticaux (on leur soustrait les angles de réfraction calculés) des visées sur les autres stations. Nous lançons alors le traitement sous CoMeT avec ces nouveaux angles.

Observations	Variances partielles moyennes
Distances	1.900
Angles horizontaux	1.200
Angles verticaux	0.124
$s\hat{\sigma}^2$	1.97

Tableau 10 : Variances partielles moyennes obtenues en corrigeant les angles verticaux

Nous pouvons observer une légère amélioration de l'estimateur du facteur unitaire de variance (passé de 2.3 à 2). Nous pouvons surtout remarquer que l'influence des angles

verticaux sur la cohérence globale du réseau a grandement diminuée (la variance partielle est passée de 0.5 à 0.1). Le second traitement, plus complet, consiste à remplacer ces mêmes angles verticaux, mais cette fois-ci par ceux permettant de viser les centres optiques des autres instruments (en étant corrigés de la réfraction). Nous remplaçons également les distances pour que celles-ci correspondent également aux visées sur centre optique, et mettons des hauteurs de cibles à 0 m. D'une station ou de l'autre, la distance est à présent la même, ce qui améliore la cohérence du réseau. Le Tableau 11 présente les résultats :

Observations	Variances partielles moyennes
Distances	1.770
Angles horizontaux	1.202
Angles verticaux	0.125
$s\hat{\sigma}^2$	1.90

Tableau 11 : Variances partielles moyennes obtenues en corrigeant les angles verticaux et les distances

Cette fois-ci nous obtenons encore une légère amélioration sur la cohérence globale du réseau, et nous pouvons également constater que l'influence des distances a légèrement diminuée. Nous en concluons que cette méthode de correction est meilleure que la précédente, et qu'il est judicieux de l'appliquer pour améliorer globalement un réseau.

III.2.3 Traitements de la réfraction latérale

Concernant la réfraction latérale, les différentes courbes montrant l'évolution des MRA sur chaque ligne de visée sont disponibles dans l'Annexe n°5. Celles-ci ne sont pas présentées ici car elles sont relativement constantes, et dépendent du choix quant à la répartition de l'écart angulaire. Nous avons utilisé le même programme de calculs que celui présenté dans la partie II.4.1 mais en l'adaptant cette fois-ci à une configuration de trois stations (nous obtenons simplement trois écarts angulaires au lieu de deux, et concernant le traitement de la sphéricité de la Terre, une seule station reste la référence, et nous modifions les plans horizontaux des deux autres (voir Annexe n°2)). Il peut être appliqué à des réseaux de plus grande importance, il suffit de traiter les stations trois par trois (il semble judicieux d'utiliser la triangulation de Delaunay pour grouper les stations par trois, de manière à minimiser les effets de la sphéricité de la Terre). Pour rappel, l'angle de réfraction horizontal est obtenu en comparant l'angle terrain à l'angle calculé par le théorème d'Al-Kashi. Cet écart angulaire doit alors être réparti sur les visées. Trois répartitions différentes ont été testées. La première consiste à répartir de manière égale cet

écart angulaire sur les deux visées (les courbes de l'Annexe n°5 ont été obtenues avec cette méthode). Les deux autres répartitions sont plus réfléchies, et seront présentées par la suite.

Concernant les traitements sous CoMeT, nous avons conservé les modifications liées au MRA vertical (modification des angles verticaux, des distances, et des hauteurs de cibles), et avons testé d'apporter les trois corrections différentes sur les angles horizontaux. Le Tableau 12 présente les résultats obtenus avec la 1^{ère} méthode (répartition égale des écarts angulaires sur les deux visées) :

Observations	Variations partielles moyennes
Distances	1.694
Angles horizontaux	2.269
Angles verticaux	0.123
$s\hat{o}^2$	2.10

Tableau 12 : Variations partielles moyennes après correction des angles horizontaux (répartition moyenne)

Nous pouvons constater instantanément que cette correction n'est pas adaptée, car celle-ci a dégradé la cohérence du réseau, et en particulier à cause des angles horizontaux.

La seconde méthode de répartition s'est faite en étudiant les valeurs des écarts angulaires (relativement constants pour chaque station) et avait pour objectif de coller au mieux à la réalité. En moyenne, la station S2 avait un angle terrain plus important que l'angle calculé de 0.0045 gon, la station S3 avait un angle terrain moins important de 0.0025 gon et la station S4 un angle terrain moins important de 0.0016 gon. La somme de ces trois écarts est quasiment nulle. La Figure 23 présente le phénomène imaginé :

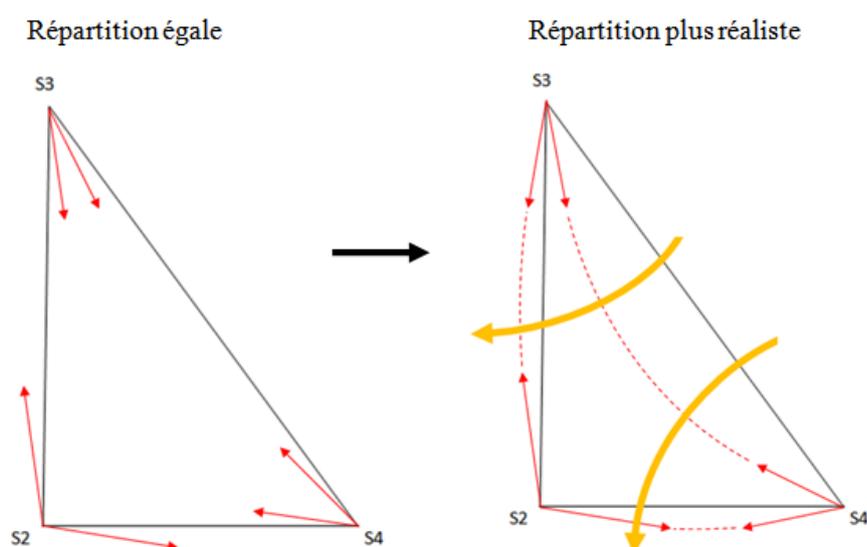


Figure 23 : Schéma de la seconde méthode de répartition des écarts angulaires horizontaux

Sur ce schéma, les angles horizontaux terrains apparaissent sous forme de flèches rouges, et les épaisses flèches orange représentent la direction que pourrait avoir les gradients de température. Les corrections consistent à rabattre les flèches rouges sur les traits noirs (donc les angles terrains sur les angles calculés). L'avantage de cette seconde répartition est qu'elle permet d'avoir des angles de réfraction (quasiment) égaux pour les deux stations qui se visent. Cependant, les résultats obtenus ne se sont pas révélés satisfaisants. En effet, l'estimateur du facteur unitaire de variance moyen obtenu est de 6.24, et il ne descend jamais sous la barre des 3.5. Le test du chi-deux échoue systématiquement, nous avons donc abandonné cette méthode

Passons à la dernière solution envisagée. Pour celle-ci nous avons fait l'hypothèse d'une absence de réfraction latérale entre les stations S3 et S4 (cette visée passe à plus de 10 m du sol, et loin de tout objet), et nous avons donc imaginé que la réfraction latérale pouvait se comporter comme sur la Figure 24 :

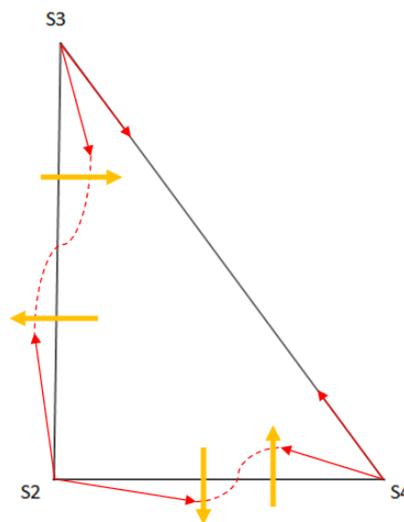


Figure 24 : Schéma de la troisième méthode de répartition des écarts angulaires horizontaux

Observations	Variations partielles moyennes
Distances	1.486
Angles horizontaux	1.385
Angles verticaux	0.122
$s\hat{o}^2$	1.23

Tableau 13 : Variations partielles moyennes après correction des angles horizontaux (troisième répartition)

Cette fois-ci, l'estimateur du facteur unitaire de variance a baissé drastiquement, de même que l'influence des distances. Néanmoins, elle ne semble toujours pas réussir à faire diminuer l'incidence des angles horizontaux sur la cohérence du réseau. De plus, comme la

précédente, elle possède un important défaut : il a fallu analyser les résultats obtenus précédemment pour imaginer comment l'appliquer, et elle n'est valable que dans cette configuration précise.

Les différents traitements de la réfraction effectués (verticale ou latérale) n'ont pas fait varier les écarts-types sur les variations des coordonnées ajustées.

III.3 Améliorations possibles

Les résultats obtenus ne sont pas ceux que nous escomptions, notamment en ce qui concerne les coordonnées, qui étaient toutes situées dans les intervalles de confiance. Changer la valeur des précisions a priori permettrait d'obtenir des coordonnées qui sortent des intervalles. De même, nous utilisons des précisions de centrage pour prendre en compte les décalages des prismes par rapport aux stations (ou les défauts de géométrie des prismes GZR4), alors qu'il serait plus juste de calculer des excentremets.

Une autre manière de faire apparaître des résultats plus flagrants est de dégrader le réseau. En effet, la très bonne monumentation, l'absence de visées rasantes et les distances relativement courtes (pas plus d'une centaine de mètres) font que la réfraction n'a pas eu d'impact sur les coordonnées ajustées. Dans le but de faire apparaître de la réfraction et d'avoir des résultats plus parlants, il est envisageable de placer des plaques métalliques proches de certaines visées. Nous n'aurons pas le temps de traiter cette expérience.

D'autres études seraient réalisables à partir de ce réseau expérimental. Dans un premier temps, il faudrait continuer à chercher la solution de la répartition optimale des écarts angulaires horizontaux. Ensuite, la détermination d'un MRA vertical et d'un MRA horizontal comme des paramètres inconnus serait intéressante. Ces valeurs seraient celles permettant de diminuer au maximum les variations sur les coordonnées ajustées. Enfin, les prismes auscultés étant visés simultanément par les trois stations, des études concernant la réfraction latérale seraient envisageables (en étudiant l'évolution des gisements par exemple), de même pour la réfraction verticale (en comparant les différentes altitudes obtenues depuis chaque station pour un même point ...). Nous n'aurons pas le temps d'approfondir ces sujets durant ce TFE.

Conclusion

Différents enseignements peuvent être tirés des travaux menés durant ce TFE. Une première conclusion est que le phénomène de réfraction atmosphérique peut effectivement entraîner des effets négatifs lors de travaux topométriques, et que de nombreux chantiers d'auscultations subissent certainement ces impacts. Néanmoins, nous avons eu l'occasion de constater qu'un soin particulier apporté à la mise en place des réseaux permettait de limiter grandement les déconvenues liées aux effets environnementaux.

Nous pouvons également aborder la question du coefficient de réfraction. Il semble clair désormais que la valeur traditionnellement employée de $+0.13$ n'est pas judicieuse et ne permet pas une modélisation correcte du phénomène pour les travaux topométriques, habituellement réalisés en étant proche du sol. D'une manière plus générale, au vu des variations de ce coefficient dans le temps, fixer une valeur ne peut pas permettre une correction réellement efficace. Pour en terminer avec ce coefficient, il apparaît désormais logique de s'intéresser à une modélisation en trois dimensions, remplaçant celle strictement verticale à laquelle nous sommes habitués.

Concernant les méthodes de travail employées, nous recommandons l'utilisation des visées réciproques simultanées, couplées aux résolutions de triangles dans les réseaux. Il reste du travail concernant la quantification de la réfraction latérale, mais la méthode employée semble prometteuse pour les réseaux d'auscultation. Cependant, la réfraction atmosphérique étant un phénomène extrêmement variable, que ce soit dans le temps ou dans l'espace, les méthodes de détermination les plus justes semblent résider dans les méthodes numériques ou dispersométriques. La personne en charge de la thèse faisant suite à ce TFE aura tout intérêt à se concentrer sur ces techniques. Une chose est sûre, il reste encore du travail à accomplir concernant la réfraction atmosphérique.

D'un point de vue plus personnel, j'espère sincèrement avoir pu faire évoluer la recherche dans ce domaine. J'espère également que les travaux entrepris, notamment vis-à-vis de la réfraction latérale, seront approfondis. Pour finir, sans que ce soit un élément foncièrement lié à la réfraction atmosphérique, j'espère que les travaux commencés à propos de la sphéricité de la Terre, pourront également être repris et développés dans le futur.

Bibliographie

Ouvrages imprimés

- [Brabant, 2011] BRABANT M et al. Topographie opérationnelle. Editions Eyrolles, 2011, p. 526
- [Milles et al., 1999] MILLES S et al. Topographie et topométrie modernes. Editions Eyrolles, 1999.
- [Pérez, 1996] PEREZ J.P. Optique. Fondements et applications, 5^e édition, Editions Masson, Paris, 1996, p. 169.
- [Torge, 2001] TORGE W. Geodesy, third completely revised and extended edition, Editions Walter de Gruyter, New York, 2001, p. 368.

Chapitre dans un ouvrage imprimé

- [Ciddor, 1996] CIDDOR P. Refractive index of air : new equations for the visible and near infrared. In : *Applied optics* 35.9. 1996, pp. 1566-1573
- [Chrzanowski, 2006] Chrzanowski A et al. Accuracy evaluation of geodetic monitoring of deformations in large open pit mines. In: 12th FIG Symposium on Deformation Measurements, Barden. 2006, p. 11.
- [Touzé, 2019] TOUZE T. N'ayez pas peur du coefficient de refraction ! Première partie sur les enjeux de réfraction en nivellement trigonométrique. In : *XYZ* 158. 2019, p.12

Travaux universitaires

- [Afeni, 2011] AFENI T B. « An approach to eradicate the effects of atmospheric variations on total station distance measurement in a surface mine environment: The impact of taking measurement through a glass medium. ». PhD thesis, University of the Witwatersrand, Johannesburg, 2011, 306 p.
- [Assemat, 2015] ASSEMAT J. « Evaluation des performances de capteurs topographiques pour la mesure de déformation ». Mémoire de TFE, INSA de Strasbourg, 2015, 69 p.
- [Bolzon et al., 2017] BOLZON N, CHEVALLIER N. « Quantification de la réfraction latérale ». Travail d'étude, HEIG, Yverdon-les-bains, 2017, 22 p.
- [Flach, 2000] FLACH P. « Analysis of refraction influences in processing geodesy using image and turbulence models ». PhD thesis, Swiss Federal Institute of Technology in Zurich (ETHZ), 2000.
- [Gobron, 2017] GOBRON K. « Étude de la correction des effets de la réfraction atmosphérique sur les mesures tachéométriques ». Mémoire de TFE, ENSG, Paris, 2017, 73 p.

Articles de périodiques imprimés

- [Baselga et al., 2014] BASELGA M et al. *Practical formulas for the refraction coefficient*. In : *Journal of Surveying Engineering*. American Society of Civil Engineers, 2014, p. 16
- [Eldén, 1966] ELDEN B. *The refractive index of air*. In: *Metrologia* 2.2. 1966, p. 71.

[Hirt et al., 2010] HIRT C et al. *Monitoring of the refraction coefficient in the lower atmosphere using a controlled setup of simultaneous reciprocal vertical angle measurements*. In: Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2010, 115.

[Hübner, 1977] HUBNER E. *Einfluss der terrestrischen refraction auf den laserstrahl in bodennahen luftschichten*. In: Vermessungstechnik, 1977, 25.

[Ingensand, 2008] INGENSAND H. *Concepts and solutions to overcome the refraction problem in terrestrial precision measurement*. In: Geodezija ir Kartografija, 2008, 34.2, pp. 61–65.

[Tsoulis et al., 2008] TSOULIS D et al. *Theoretical and Numerical Aspects of the Geodetic Method for Determining the Atmospheric Refraction Coefficient Using Simultaneous and Mutual Zenith Observations*. In : Journal of Surveying Engineering. 2008, 134, pp. 3-12

[Wilhelm, 1994] WILHELM W. *Die Seitenrefraktion : Ein unbeliebtes Thema ? Oder ein Thema nur für Insider ?* In : VPK. 1994, 92, pp.75-82

Sites web

[AFTOPO, 2000] Association Française de Topographie. Lexique topographique, [en ligne]. Disponible sur : < <https://www.aftopo.org>>. (consulté le 25/05/2019)

[Gounon, 2004] Principe de Fermat, applications à la réflexion et à la réfraction. In : GOUNON J. CultureMATH, [en ligne]. Disponible sur : <<http://culturemath.ens.fr/>>. (consulté le 28/06/2019)

[LaCroix, 2018] Le Grand Paris Express se fera, mais avec du retard. In : BOURBON J-C. LaCroix, [en ligne]. Disponible sur : <<https://www.la-croix.com/>>. (consulté le 30/06/2019)

[Mirages, 2014] Le principe de réfraction. In : Les Mirages, [en ligne]. Disponible sur : <<https://les-mirages-ldb1s.webnode.fr/>>. (consulté le 29/06/2019)

Documents techniques

[CCTP, 2015] Société du Grand Paris. CCTP - Livret 9 Auscultations.

<PN1206-3_05_ACT_NOT_001650_04--011172_D00.Docx>. 2015, p.54

[TOPCON, 2014] TOPCON CORPORATION. Instruction Manual Measuring Station MS05AXII MS1AXII MS05AXII-m MS1AXII-m. 2014, p.182

Documents de formation

[DPTS, 2010] Département Positionnement Terrestre et Spatial. Mesure des altitudes. ENSG. 2010, p.44

[Durand, 2017] DURAND S. CoMeT – Compensation de Mesures Topographiques : Manuel utilisateur. CNAM. GeF laboratory, Le Mans, 2017. Version 2017.02.14.

[Kasser, 1985] KASSER M. Appareils électroniques de mesures de distances. IGN. 1985, p.33

[Sampson, 2001] SAMPSON D. A comparaison of photogrammetrically determined astronomical refraction of sunlight at high zenith angles with a ray-tracking computer model employing rawinsonde profiles. Université d'Alberta, 2001.

Liste des figures

Figure 1 : Illustration de la loi de Snell-Descartes dans le cas discret (Source : [Mirages, 2014])..	13
Figure 2 : Illustration du principe de Fermat.....	14
Figure 3 : Ecart-type de k en fonction de la précision des tachéomètres et de la distance les séparant [Hirt et al., 2010]	19
Figure 4 : Schéma de la formule de Wilhelm W.....	20
Figure 5 : Projet Grand Paris Express (source [LaCroix, 2018])	25
Figure 6 : Contenu d'un coffret de pilotage de station Cementys	26
Figure 7 : Emplacements de la station 1 et des prismes 34, 35 et 36	28
Figure 8 : Evolution des Z relatifs des points 34, 35 et 36 (en mm) du 16/08/2018 12h00 au 17/08/2018 12h00.....	28
Figure 9 : Emplacements des stations 19 et 21 et des prismes 21 et 68	29
Figure 10 : Emplacements des différentes expériences.....	33
Figure 11 : Schéma représentant les stations totales au moment des VRS	36
Figure 12 : Montage d'un prisme Leica GMP101 sur une station TOPCON	38
Figure 13 : Résultats obtenus pour le MRA vertical	39
Figure 14 : Schéma de l'instrumentation nécessaire à la détermination du MRA latéral	40
Figure 15 : MRA latéral calculé dans la cour de Cementys	43
Figure 16 : MRA latéral calculé sur les bords de Seine	44
Figure 17 : Schéma du réseau expérimental (une flèche indique une mesure)	45
Figure 18 : Photographies des stations du réseau.....	46
Figure 19 : Alimentation et pilotage des stations.....	47
Figure 20 : Evolution du $s\hat{o}^2$ entre 29/05/2019 et le 21/06/2019.....	49
Figure 21 : Evolution des coordonnées relatives du point P1	50
Figure 22 : Evolution du MRA vertical entre les stations S2 et S4.....	51
Figure 23 : Schéma de la seconde méthode de répartition des écarts angulaires horizontaux	53
Figure 24 : Schéma de la troisième méthode de répartition des écarts angulaires horizontaux	54

Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques principales des stations totales utilisées pour ce TFE.....	10
Tableau 2 : Effet de la réfraction sur la mesure de l'altitude d'un point situé à 300 m	20
Tableau 3 : Ecart-types angulaires obtenus lors de l'expérience de suivi de coordonnées réalisée chez Cementys.....	33
Tableau 4 : Ecart-types angulaires obtenus lors de l'expérience de suivi de coordonnées réalisée sur les bords de Seine	34
Tableau 5 : Ecart-types obtenus sur les coordonnées du prisme lors de l'expérience sur les bords de Seine	34
Tableau 6 : Bras de levier mesurés et précisions associées.....	38
Tableau 7 : Impact du MRA sur l'allongement d'un rayon lumineux	41
Tableau 8 : Impact de la réfraction verticale sur les distances horizontales.....	41
Tableau 9 : Variations partielles moyennes obtenues sans prise en compte de la réfraction.....	49
Tableau 10 : Variations partielles moyennes obtenues en corrigeant les angles verticaux.....	51
Tableau 11 : Variations partielles moyennes obtenues en corrigeant les angles verticaux et les distances	52
Tableau 12 : Variations partielles moyennes après correction des angles horizontaux (répartition moyenne)	53
Tableau 13 : Variations partielles moyennes après correction des angles horizontaux (troisième répartition)	54

Etude de l'influence des gradients de température sur un réseau d'auscultation.

Mémoire d'Ingénieur C.N.A.M., Le Mans 2019

RESUME

La réfraction atmosphérique, induite en grande partie par les gradients de température, est un phénomène physique qui modifie la trajectoire des rayons lumineux de manière inconstante. Celle-ci a donc un impact non négligeable sur les activités topométriques, et en particulier sur l'auscultation, qui requiert une grande précision.

La technique des visées réciproques simultanées, le travail en réseau et une amélioration de la monumentation permettent néanmoins de diminuer et de corriger certains effets de la réfraction, qu'elle soit verticale ou latérale. Ces corrections mènent à une amélioration globale des précisions sur les coordonnées calculées, et à une plus grande cohérence globale au sein des réseaux.

Mots clés : Réfraction atmosphérique, réfraction latérale, auscultation, topométrie, visées réciproques simultanées, travail en réseau.

SUMMARY

Atmospheric refraction, induced largely by temperature gradients, is a physical phenomenon that changes the trajectory of light rays inconstantly. This has a significant impact on topometric activities, particularly on auscultation, which requires great precision.

The simultaneous reciprocal observations technique, the networking and an improvement of the monumentation make it possible to reduce and correct some effects of the refraction, whether vertical or lateral. These corrections lead to an overall improvement in the precision of the calculated coordinates, and to a greater overall coherence within the networks.

Key words: Atmospheric refraction, lateral refraction, auscultation, surveying, simultaneous reciprocal observations, networking.

Table des annexes

Annexe 1 Contrôle de la précision de l'ATR	2
Annexe 2 Prise en compte de la sphéricité de la Terre dans les programmes de calcul de la réfraction latérale	4
Annexe 3 Développement d'une nouvelle formule pour le MRA latéral.....	11
Annexe 4 Evolutions du MRA vertical au sein du réseau expérimental du 29/05/2019 au 21/06/2019	13
Annexe 5 Evolutions du MRA latéral au sein du réseau expérimental du 29/05/2019 au 21/06/2019 .	15

Annexe 1

Contrôle de la précision de l'ATR

Un premier test a consisté à comparer des mesures réalisées automatiquement par l'instrument à des mesures prises par visées manuelles. Pour la précision des visées manuelles, il faut s'intéresser à l'acuité visuelle. Le minimum visible par l'œil humain emmétrépe (œil sans troubles de la vision) est de 0.5'' d'arc, et le minimum séparable est de 1' d'arc. C'est cette valeur qu'il faut conserver, elle correspond au pouvoir de résolution de l'œil. Le grossissement de la lunette est x30, nous divisons donc cette résolution par 30. De plus, il faut composer quadratiquement cette précision avec la précision angulaire de l'appareil, qui ici est de 0.5'' d'arc. Nous trouvons une précision de pointé-lecture d'environ 0.15 mm à 16.8 m (distance à laquelle les tests ont été effectués).

Les mesures automatiques et manuelles étaient effectuées à la suite le plus rapidement possible, pour ne pas avoir de changements trop importants de l'atmosphère entre les deux. Elles ont été effectuées sur les deux stations totales qui ont servi à réaliser les autres expériences. Ces mesures ont été effectuées 30 fois pour chacune des stations.

Les résultats obtenus étaient cohérents pour la précision de l'œil. Les mesures automatiques s'avèrent être en moyenne 4 fois plus précises que les mesures manuelles, il est donc préférable d'utiliser ces dernières si l'on cherche à déterminer des valeurs de MRA. Le Tableau 1 suivant présente les différentes valeurs d'écart-types (E-t) moyens obtenus sur les coordonnées des points visés :

	E-t ATR ST1 (m)	E-t visées manuelles ST1 (m)	Facteur multiplicatif entre E-t
X	0.00006	0.00013	2.1
Y	0.00006	0.00012	2.0
Z	0.00004	0.00017	4.3
	E-t ATR ST2 (m)	E-t visées manuelles ST2 (m)	Facteur multiplicatif entre E-t
X	0.00004	0.00019	4.6
Y	0.00006	0.00015	2.5
Z	0.00004	0.00025	6.1

Tableau 1 : Comparaison d'écart-types sur des coordonnées obtenues par visées automatiques et manuelles

Une autre expérience consistait à placer les deux stations totales très proche l'une de l'autre et à les faire viser un même prisme (voir Figure 1). Le but est d'avoir des trajets optiques similaires pour les deux stations, et donc que l'environnement influence les mesures de chaque station de la même manière. En étudiant l'évolution des coordonnées du prisme

calculées par chacune des stations, on fait apparaître des écarts qui ne proviennent que de l'ATR et de la précision de la gravure des cercles.



Figure 1 : Mise en place de l'expérience visant à contrôler la précision des ATR

Les mesures automatiques étaient lancées en même temps pour les deux stations, et celles-ci étaient à l'ombre, de manière à limiter au maximum tout impact de l'environnement.

Les résultats obtenus étaient relativement cohérents et sont présentés dans le Tableau 2. L'écart-type angulaire a été d'environ 0.00035gon pour chacune des stations (pour les angles horizontaux et verticaux), ce qui correspond parfaitement aux 1'' d'arc annoncé par le constructeur pour la précision de l'ATR composé avec le 0.5'' d'arc pour la précision de gravure des cercles.

Angles	Ecart-types ST1	Ecart-types ST2	Facteur multiplicatif entre E-t
Verticaux	0.00038 gon	0.00032 gon	0.86
Horizontaux	0.00031 gon	0.00035 gon	1.15

Tableau 2 : Ecart-types angulaires caractérisant la précision du système ATR

Concernant les coordonnées, celles-ci évoluaient similairement pour les deux stations. L'écart entre les deux jeux de coordonnées avait un écart-type moyen de 0.2 mm, ce qui est imputable aux précisions de l'ATR et du distancemètre. Nous en concluons que les précisions annoncées par le constructeur sont justes, et pouvons continuer nos expériences.

Durant la seconde expérience, 4 tests ont été réalisés à propos de la position du réticule avant la mesure automatique (en haut à gauche, en haut à droite, en bas à droite et en bas à gauche) et aucune différence n'a été remarquée dans les résultats.

Annexe 2

Prise en compte de la sphéricité de la Terre dans les programmes de calcul de la réfraction latérale

Pour calculer les angles de réfraction latéraux, nous nous basons sur l'écart entre les angles horizontaux terrains et les angles horizontaux calculés à partir des distances horizontales et du théorème d'Al-Kashi. Seulement, les distances horizontales ne sont que des distances inclinées projetées sur un plan (le plan horizontal de l'appareil, perpendiculaire à son zénith et passant par le centre optique). Pour que les angles calculés grâce au théorème d'Al-Kashi soient justes, il faut que les différentes distances horizontales calculées soient projetées sur un même plan (ou au minimum sur des plans parallèles). Nous allons voir comment ce problème a été résolu, en nous basant sur l'exemple où il n'y a que deux stations et un prisme (voir la Figure 2 ci-dessous).

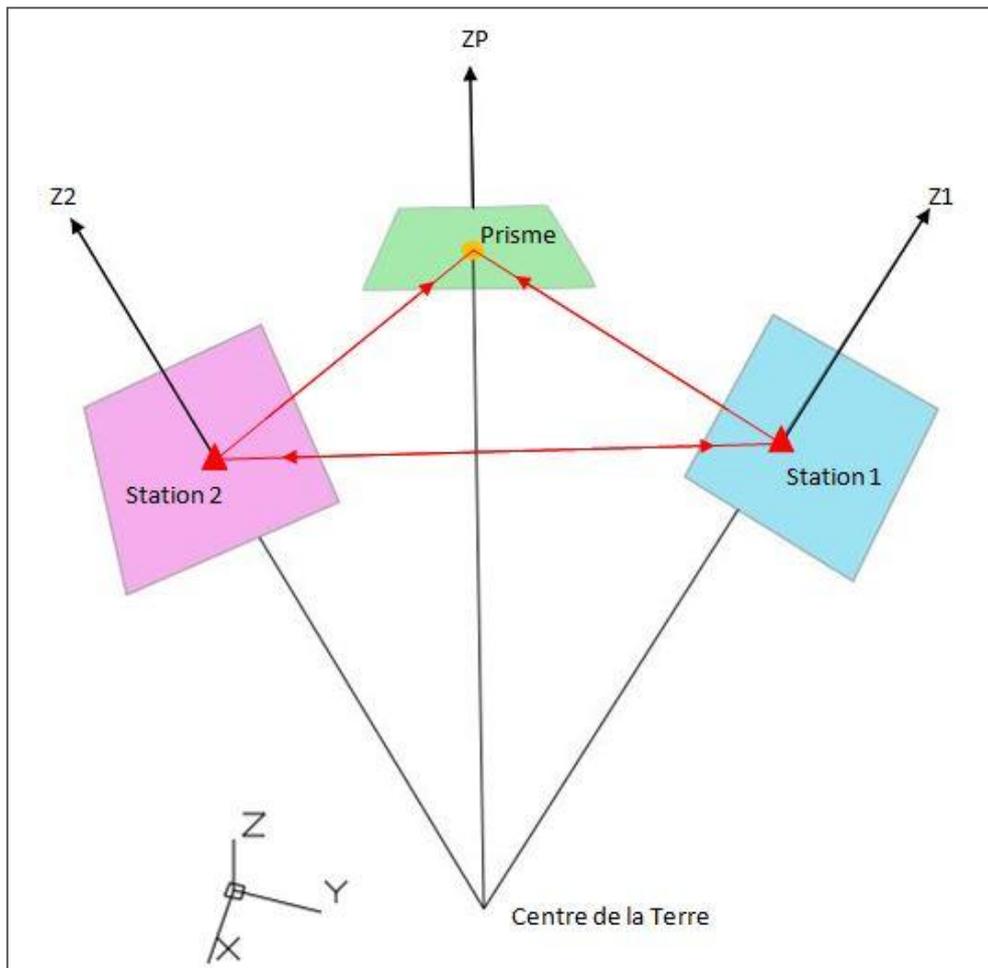


Figure 2 : Schéma représentant les deux stations et le prisme

Sur cette Figure 2, nous pouvons imaginer les deux stations et le prisme ayant chacun un zénith différent (définis par trois repères locaux, où les zéniths représentent les axes verticaux), et donc un plan horizontal différent. Sur le schéma, Z représente le zénith du point. Les traits de couleur rouge représentent les visées effectuées, et donc les distances inclinées. Nous conserverons ce code couleur pour la suite : le bleu pour la station 1, le rose pour la station 2, et le vert pour le prisme.

Nous effectuons alors un basculement de plan, pour qu'au niveau de la station 2, le zénith soit le même que celui de la station 1 (les plans deviennent parallèles), le but de cette opération est que les distances horizontales calculées depuis les deux stations se fassent sur des plans parallèles, et donc qu'elles soient parfaitement cohérentes. Sur les schémas suivants, α , β , α' et β' sont les angles de site des visées.

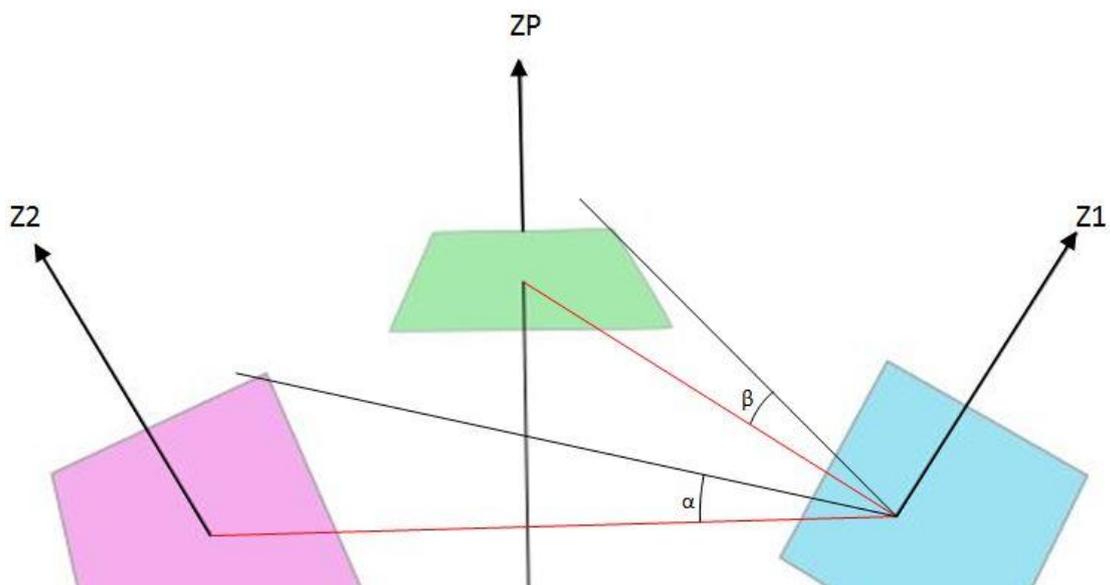


Figure 3 : Distances horizontales depuis la station 1

La Figure 3 ci-dessus nous montre la projection des distances inclinées sur le plan de la station 1, les traits noirs représentent donc les distances horizontales obtenues depuis la station 1. L'angle α représente l'angle entre la visée sur l'autre station et le plan horizontal, et l'angle β représente l'angle entre la visée sur le prisme et ce même plan horizontal.

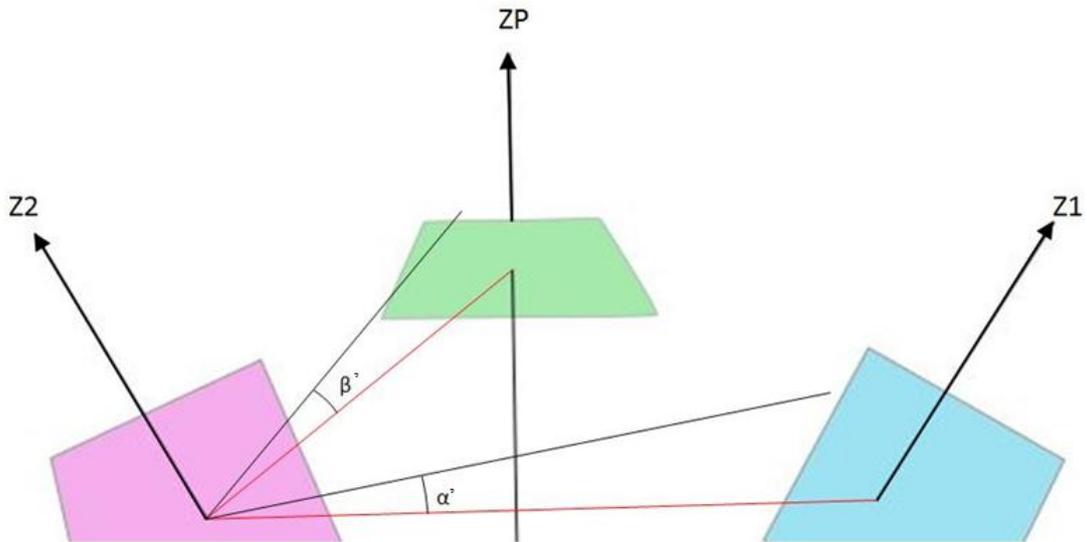


Figure 4 : Distances horizontales depuis la station 2

La Figure 4 nous montre les mêmes angles et distances horizontales, mais cette fois-ci obtenus depuis la station 2. Nous observons aisément que la distance inclinée séparant les deux stations est la même, mais que les distances horizontales calculées ne sont pas les mêmes (dû aux plans parallèles). C'est ici qu'intervient le basculement de plan, et il se fait de la manière décrite sur la Figure 5 :

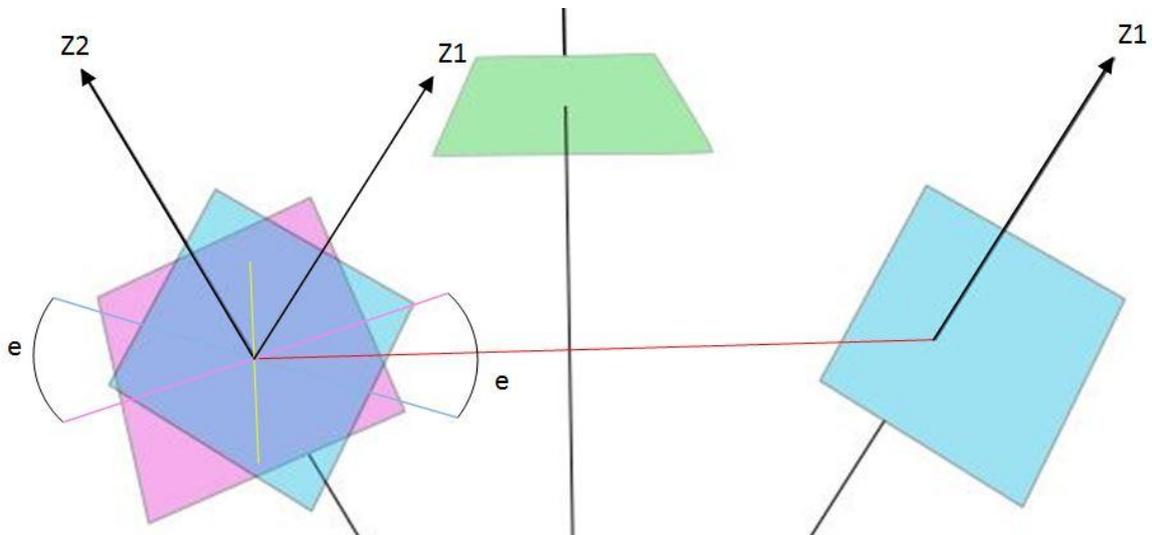


Figure 5 : Schéma du basculement de plan

Nous ramenons la station 1 (ou plutôt son zénith et son plan horizontal) au niveau de la station 2. Intuitivement, nous remarquons que les plans se coupent en une droite qui est perpendiculaire au plan contenant les deux zéniths et la droite séparant les deux stations (en rouge ici). Sur cette ligne, aucune correction ne doit être apportée aux angles verticaux de la station 2 (étant donné que les plans s'y confondent), et elle apparaît en jaune sur le schéma.

Nous remarquons également que l'écart angulaire entre les deux plans le long de la visée inter-stations correspond à l'écart angulaire entre les deux zéniths des stations. Cet écart est nommé e sur le schéma, et correspond donc à l'erreur sphérique. Nous remarquons enfin que e est l'écart angulaire le plus important que nous puissions obtenir. La correction maximale à apporter aux angles zénithaux de la station 2 correspond donc à cet angle e , et nous savons que le long de la droite jaune (normale au plan contenant les deux zéniths) il n'y a aucune correction à apporter.

Une vue en coupe (voir la Figure 6 ci-après) permet de mieux comprendre la manière avec laquelle il faut corriger les angles :

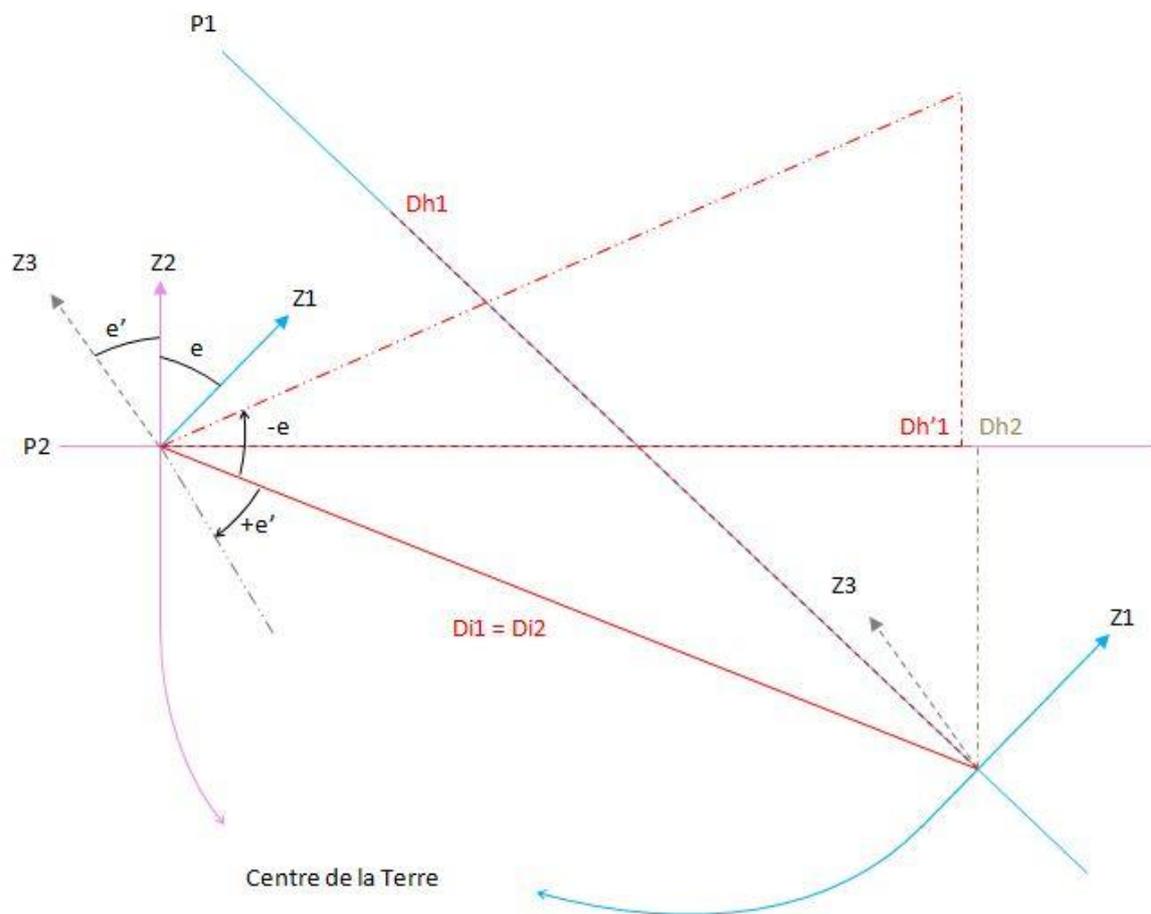


Figure 6 : Vue en coupe du basculement de plan

Sur cette coupe nous retrouvons la station 1 à l'intersection de la direction zénithale $Z1$ et du plan $P1$, et la station 2 à l'intersection de la direction zénithale $Z2$ et du plan $P2$. La ligne rouge continue représente la visée inter-stations, et donc la distance inclinée les séparant.

Nous commençons par projeter cette distance inclinée sur les deux plans horizontaux P1 et P2, nous obtenons donc Dh1 et Dh2. Nous remarquons encore une fois que ces distances ne sont pas les mêmes.

Comme précédemment nous amenons le plan horizontal de la station 1 au niveau de la station 2 (représenté sur le schéma uniquement par la direction zénithale Z1). L'écart angulaire séparant les deux zéniths est noté e. Nous remarquons aisément que pour faire basculer le plan horizontal de la station 1 parallèlement à celui de la station 2, il faut retrancher l'écart e aux angles zénithaux de la station 2. C'est ce que nous faisons avec la distance inclinée, nous obtenons la droite rouge à tireté et pointillé. Cette fois-ci, quand nous projetons cette nouvelle ligne sur le plan P2, nous obtenons la distance horizontale Dh'1, qui est strictement égale à Dh1.

Sur le dernier schéma apparaît également Z3. C'est un zénith fictif qui ne sert qu'aux calculs. Placé au niveau de la station 1, il est impossible qu'un zénith soit incliné ainsi. Seulement il est intéressant de s'attarder sur ce cas particulier, où l'écart entre les zéniths est noté e', et où pour corriger les angles zénithaux de la station 2 il faut additionner l'angle e' aux angles terrains. Nous pouvons imaginer un point noté P3, et nous intéresser aux valeurs des corrections à apporter en fonction de sa direction. Il ressort du schéma que :

- Si l'angle horizontal St1-St2-P3 = 0 gon, la correction à apporter est -e ;
- Si l'angle horizontal St1-St2-P3 = 200 gon, la correction à apporter est e.

C'est de cette constatation que nous pouvons affirmer que si l'angle horizontal St1-St2-P3 vaut 100 gon, la correction à apporter est nulle (la moyenne de e et -e fait 0). C'est ce que nous pouvons imaginer facilement avec le schéma en 3D précédent et la ligne jaune.

A partir de cette constatation, il a été déduit que les corrections à apporter étaient proportionnelles aux angles horizontaux St1-St2-Prisme, le programme calcule donc ces angles, réalise un produit en croix et corrige les angles zénithaux proportionnellement aux angles horizontaux en suivant cette règle :

Si l'angle horizontal vaut 0gon, la correction à apporter est -e ; Si l'angle horizontal vaut 100gon, la correction à apporter est 0 ; Si l'angle horizontal vaut 200gon, la correction à apporter est e.

Quand nous utilisons trois stations, le problème se résout de la même manière. Nous choisissons un plan de référence (celui de l'une des stations, et pour notre réseau expérimental

nous avons choisi la station la plus proche des deux autres) et nous corrigeons les angles verticaux des deux autres en respectant cette méthode. Un contrôle évident qui est toujours réalisé est de vérifier que la distance horizontale issue de la station qui a subi les corrections (St2 dans les schémas précédents) est bien strictement la même que celle issue de la station de référence (St1 sur les schémas). Nous disposons d'un contrôle supplémentaire quand nous mettons en place trois stations. En effet, les deux stations qui subissent des corrections sur leurs angles verticaux se visent l'une et l'autre, et on calcule donc deux distances horizontales qui sont censé être projetées sur le même plan. Pour notre réseau expérimental, nous obtenons en moyenne un écart de 0.9 micromètre (la distance est de plus de 110 m). Cette valeur nous conforte dans l'idée que la correction est valide et que les basculements de plans sont correctement effectués. En effet, cet écart peut n'avoir que deux origines, soit une légère approximation est réalisée dans les calculs (que nous allons présenter dans le paragraphe suivant), soit l'écart vient du fait que les angles horizontaux ne correspondent pas parfaitement à des visées sur l'autre station (à cause de la précision des instruments, du centrage du prisme sur la station et de la réfraction latérale).

Concernant les imprécisions potentielles dans les calculs, nous imaginons qu'elles peuvent provenir de deux choses :

- Nous ne sommes pas sûr que les corrections sur les angles verticaux doivent être apportées d'une manière strictement proportionnelle aux angles horizontaux, c'est une hypothèse qui a semblé fonctionner, mais une autre idée est que les corrections doivent être apportées proportionnellement à la tangente de l'angle horizontal (à la manière d'une erreur de tourillonnement en tachéométrie, qui est proportionnelle à la tangente de l'angle de site et qui revient aussi à résoudre un problème de basculement de plan) ;
- Nous sommes persuadés que ces basculements de plans ont une légère incidence sur les angles horizontaux. Les angles horizontaux terrains devraient alors être légèrement modifiés pour pouvoir être comparés aux angles calculés à partir des distances horizontales.

Nous savons peu de choses sur cette modification, seulement qu'elle dépend des angles verticaux, et qu'elle n'est pas proportionnelle à l'angle, ou à une fonction trigonométrique de l'angle. Par manque de temps, ces deux hypothèses ne pourront pas être prouvées durant ce TFE. Nous invitons les personnes intéressées par ce sujet à réaliser des

tests de projections de points d'un plan à un autre, de la manière présentée sur la Figure 7 suivante :

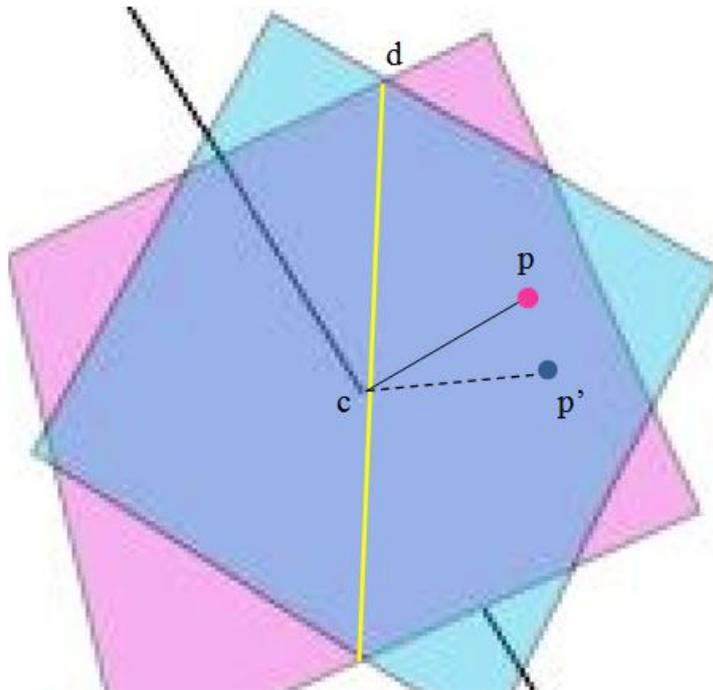


Figure 7 : Projection de points d'un plan à un autre

Sur ce schéma, le point c est le centre optique de la station 2, le point d est un point quelconque situé sur la droite d'intersection des deux plans horizontaux, le point p est un point quelconque situé sur le plan horizontal de la station 2 et le point p' est son projeté sur le plan horizontal de la station 1.

Il s'agirait alors de calculer les angles « $d-c-p$ » et « $d-c-p'$ » et d'observer quelles sont les différences.

Nous pensons que cette méthode expérimentale permettrait de découvrir la fonction de correction à apporter, s'il y en a une.

De la même manière, un élément de réponse concernant cette fonction de correction est peut-être à chercher du côté de la trigonométrie sphérique. En effet, les angles horizontaux terrains ne correspondent pas aux angles calculés à cause de l'excès sphérique, qu'il faudrait soustraire aux angles terrains pour pouvoir les comparer d'une manière plus juste aux angles calculés grâce au théorème d'Al-Kashi.

Annexe 3

Développement d'une nouvelle formule pour le MRA latéral

Dans la partie IV.3 de ce mémoire, nous présentons comment obtenir un angle de réfraction latéral. Une fois cet angle obtenu, nous pouvons réaliser l'hypothèse de Biot et Bouguer, à savoir que l'angle est le même pour les deux stations, et donc que la réfraction est unidirectionnelle et qu'elle agit de manière constante sur la ligne de visée. A partir de cet angle et de la distance horizontale séparant les deux points, nous pouvons déterminer le rayon de courbure du faisceau lumineux, et donc un MRA. Le schéma présenté sur la Figure 8 (très exagéré) aide à la compréhension des calculs :

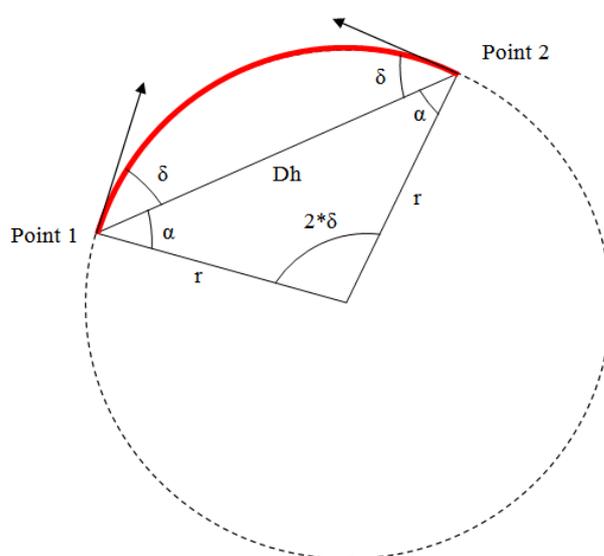


Figure 8 : Schéma représentant la courbure latérale d'un rayon et ses propriétés

Sur ce schéma, Dh représente la distance horizontale entre les deux points, la courbe rouge représente le rayon lumineux courbé, le cercle pointillé représente sa continuité (un cercle, étant donné que nous considérons la courbure constante), r est le rayon de ce cercle, les flèches sont les tangentes au cercle, δ est l'angle de réfraction au point 1 (nous considérons donc que c'est le même au point 2), et α le complémentaire à $\pi/2$ près de δ .

Nous voulons déterminer r et nous connaissons Dh et δ . Une tangente est toujours perpendiculaire à un rayon, c'est pourquoi la somme de δ et α fait $\pi/2$. Nous pouvons donc déterminer la valeur de l'angle au centre, qui est égale à $\pi - \alpha - \alpha$, autrement dit à $2 * \delta$.

Nous pouvons à présent déterminer r grâce à la formule des sinus (ou d'autres formules) :

$$\frac{Dh}{\sin(2 * \delta)} = \frac{r}{\sin \alpha} \leftrightarrow r = \frac{Dh * \sin \alpha}{\sin(2 * \delta)}$$

Équation 1 : Formule des sinus dans un triangle

Une fois ce rayon de courbure obtenu, et en connaissant le rayon terrestre (6371000 m), nous pouvons aisément déterminer le MRA par la formule :

$$MRA = \frac{R_{Terre}}{r}$$

Équation 2 : Définition du module de réfraction atmosphérique

Cependant, comme nous l'ont montré les données du réseau expérimental, cette hypothèse d'angles de réfraction égaux et d'un rayon de courbure moyen est fautive.

Durant ce TFE, la formule utilisée pour la détermination du MRA latéral est une adaptation de celle de M. Wilhelm. Ce choix peut paraître surprenant, les deux équations formulant les mêmes hypothèses, mais il vient du fait que la formule de M. Wilhelm fait office de référence pour ceux qui s'intéressent à la réfraction horizontale, et elle a été éprouvée à plusieurs reprises [Bolzon et al., 2017].

Annexe 4

Evolutions du MRA vertical au sein du réseau expérimental du 29/05/2019 au 21/06/2019

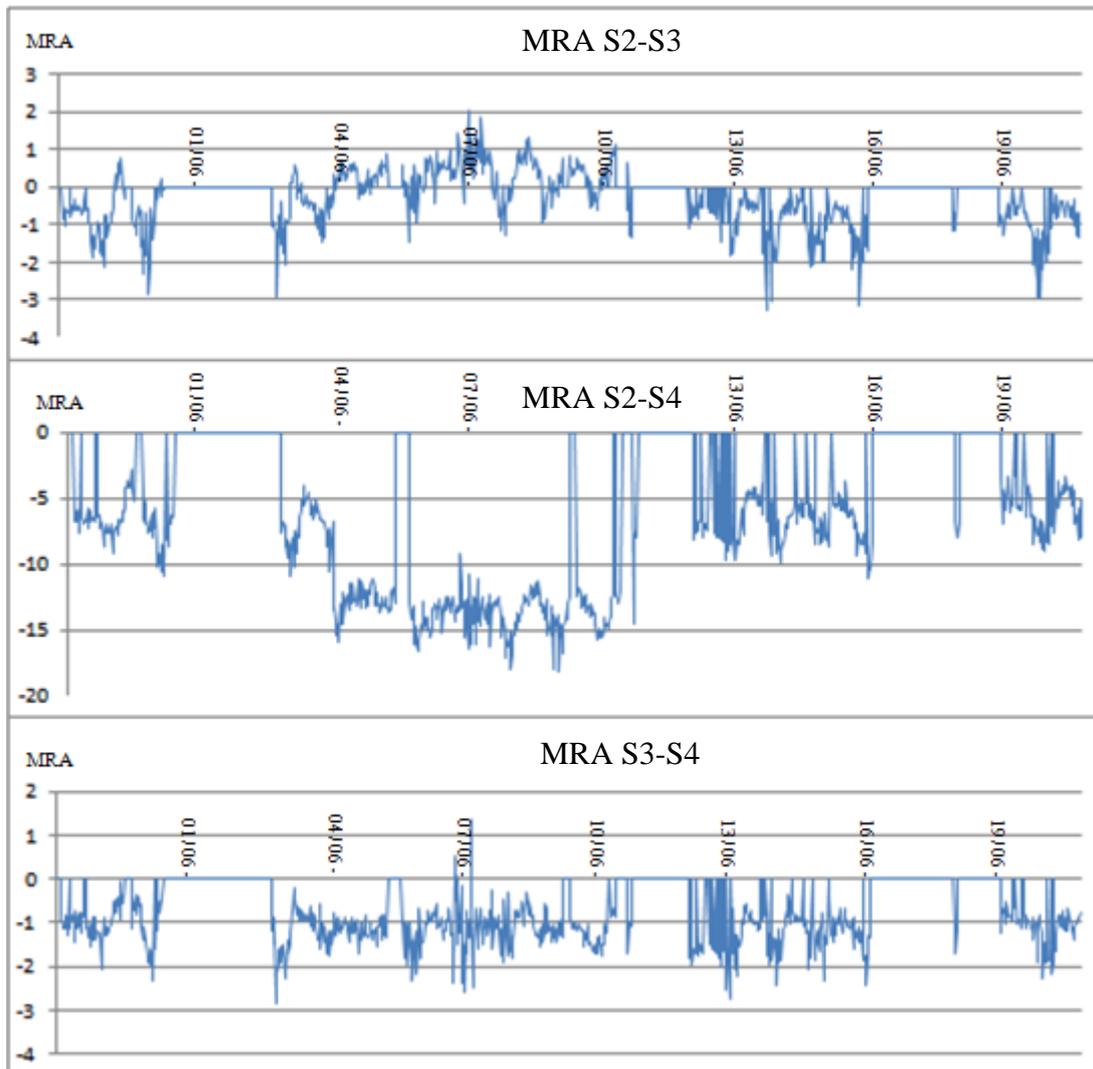


Figure 9 : Evolutions des différents MRA verticaux

La Figure 9 présente les évolutions des valeurs de MRA vertical calculées entre les différentes stations. Concernant les valeurs déterminées entre S2 et S3, nous pouvons remarquer une évolution cyclique, d'une période journalière, atteignant son minimum aux alentours de midi. Les valeurs sont situées entre -3 et +2, et elles correspondent parfaitement à ce que nous trouvons dans la littérature pour un trajet passant à quelques mètres du sol.

Les valeurs de MRA déterminées entre les stations S2 et S4 ont été analysé dans le corps du mémoire. Nous pouvons simplement retenir que les variations sont plus importantes, et les valeurs plus importantes. Ceci s'explique par le fait que la visée s'effectue relativement proche du sol (à moins de 1 mètre pour certains endroits) et que la distance séparant les

stations est courte (42 m), cela impacte sur la précision de la détermination du MRA, et la précision de détermination des bras de levier peut avoir un impact systématique sur cette détermination.

Pour finir, entre les stations S3 et S4, l'évolution du MRA est très proche de celle située entre les stations S2 et S3. Les valeurs oscillent seulement entre -2 et +1, ce qui s'explique par le fait que la visée s'effectue à une dizaine de mètre du sol pour une grande partie du trajet optique.

Annexe 5

Evolutions du MRA latéral au sein du réseau expérimental du 29/05/2019 au 21/06/2019

Les Figures 10, 11 et 12 présentent les différentes valeurs de MRA latéral obtenues respectivement depuis les stations S2, S3 et S4. Ces valeurs ont été calculées à partir d'angles de réfraction obtenus après une répartition égale des écarts angulaires sur chacune des deux visées. Pour rappel, les écarts angulaires apparaissent entre les angles mesurés sur le terrain, et les angles calculés grâce au théorème d'Al-Kashi. Cette répartition angulaire a pour conséquence de nous faire obtenir des valeurs de MRA qui sont symétriques (égales à un facteur d'échelle près) pour les deux visées issues d'une même station. Celles-ci ne sont pas égales car la distance séparant les stations intervient dans le calcul du MRA. Nous ne pouvons pas nous intéresser aux valeurs absolues calculées, mais nous pouvons étudier le comportement des courbes et leur absence de variations.

Les différents pics dans les valeurs correspondent à des périodes où l'une des stations totales n'était plus verticalisé.

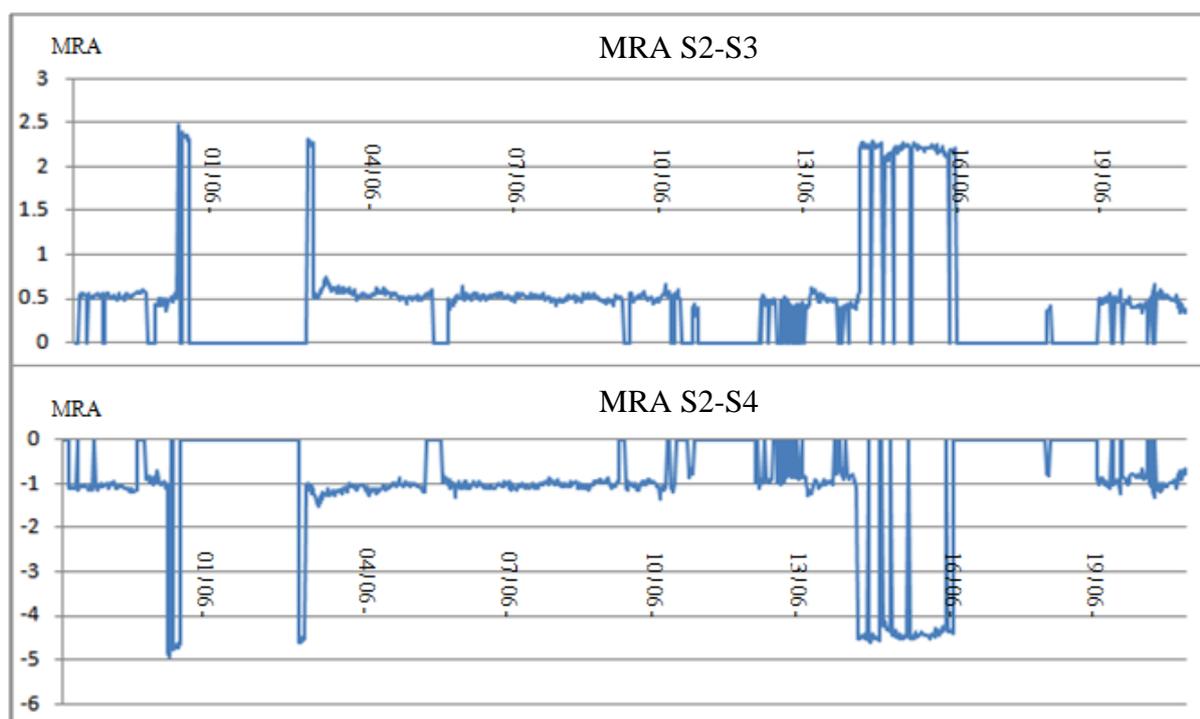


Figure 10 : Evolution des MRA latéraux issus de la station S2

Nous observons sur la Figure 10 des valeurs de MRA relativement constantes. La distance séparant S2 et S3 est quasiment égale au double de la distance séparant S2 et S4, et

nous le retrouvons dans les valeurs des MRA. La constance des courbes signifie que le phénomène de réfraction latérale se produit de la même manière au cours de la journée dans notre cas (l'écart angulaire calculé pour la station 2 est logiquement constant lui aussi, et est situé aux alentours de 0.0045 gon).

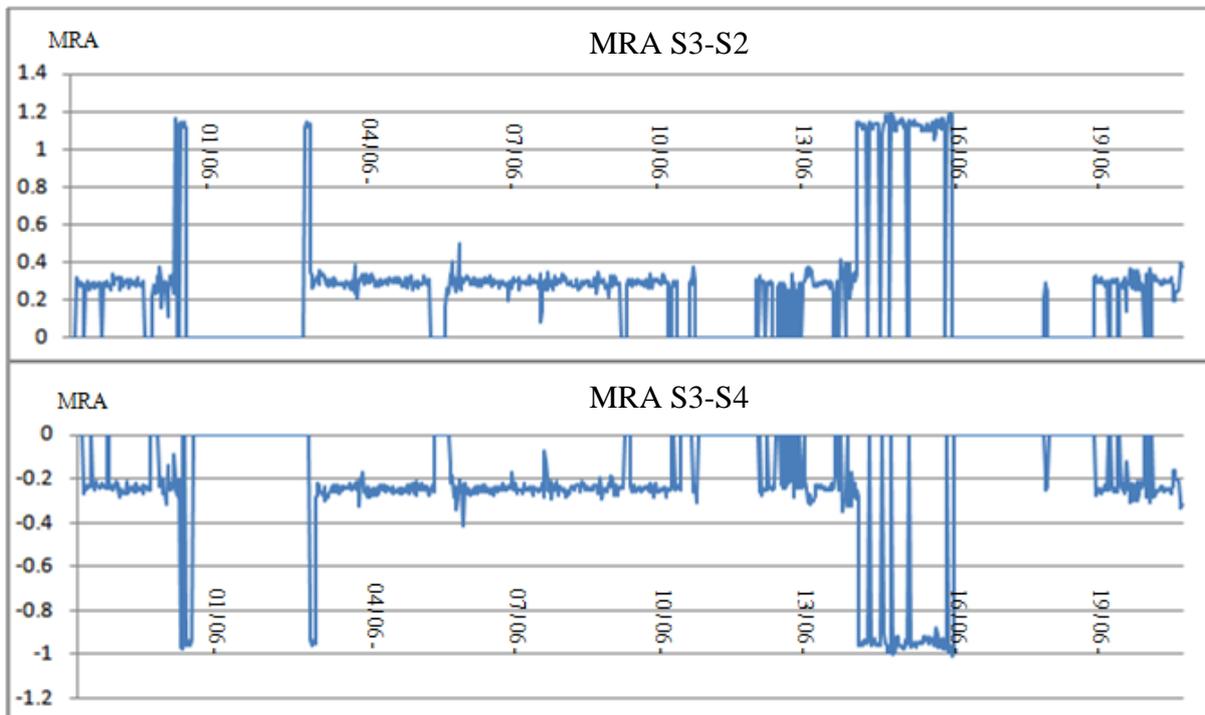


Figure 11 Evolution des MRA latéraux issus de la station S3

La Figure 11 nous montre des résultats très similaires à ceux de la Figure 10. Ici l'écart entre les valeurs de MRA situés sur les deux visées est cependant moins important, mais on l'explique par le fait que les distances sont similaires (85 m et 101 m). Dans le cas de la station S3, l'écart angulaire (toujours constant) se situe aux alentours de 0.0025 gon.

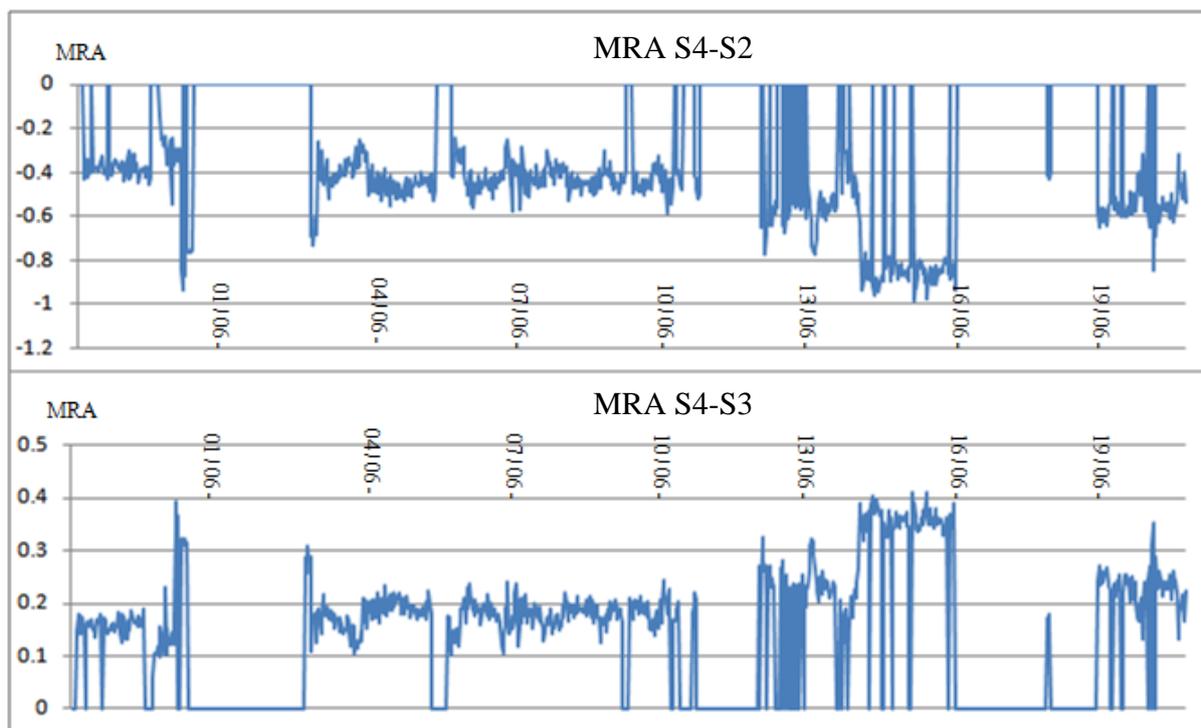


Figure 12 : Evolution des MRA latéraux issus de la station S4

Pour finir, la Figure 12 fait elle encore apparaître des résultats comparables aux précédents. Néanmoins, nous pouvons observer sur celle-ci des variations cycliques journalières. Ces variations proviennent d'un élément présent sur l'une des deux visées qui réagit à l'ensoleillement. Cet élément est probablement le cadre métallique de la cabane servant à protéger la station, qui est très proche de la visée S4-S3. Celui-ci n'impacterait pas les visées issues de S3 car il est très éloigné de cette station (et il n'aurait donc une incidence que sur la fin du trajet optique). Une étude similaire au travail de [Bolzon et al., 2017] pourrait être menée concernant ce portant métallique, mais nous n'aurons pas le temps de la traiter ici. De plus, les variations observées ne sont pas significatives :

L'écart moyen angulaire vaut 0.0016 gon pour la station S4. Il oscille, de la même manière que les MRA calculés, entre 0.0014 gon et 0.0018 gon. On obtient donc 4 cc d'écart entre les extremums. La station S4 ayant une précision angulaire de 4.36 cc (1'' d'arc de précision de gravure des cercles composé avec 1'' d'arc de précision de l'ATR), on ne peut pas affirmer que les variations observées proviennent d'un effet de réfraction (elles peuvent provenir du bruit lié aux mesures).