



HAL
open science

Étude de l'utilisation de miroirs pour réaliser des visées indirectes dans un contexte de suivi automatisé continu par stations totales

Samuel Gargiulo

► **To cite this version:**

Samuel Gargiulo. Étude de l'utilisation de miroirs pour réaliser des visées indirectes dans un contexte de suivi automatisé continu par stations totales. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2024. dumas-04784673

HAL Id: dumas-04784673

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04784673v1>

Submitted on 15 Nov 2024

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 D'INGENIEURS GEOMETRES ET TOPOGRAPHES

MEMOIRE

présenté en vue d'obtenir

le **DIPLOME D'INGENIEUR CNAM**

SPECIALITE : Géomètre et Topographe

par

Samuel GARGIULO

Étude de l'utilisation de miroirs pour réaliser des visées indirectes dans un
contexte de suivi automatisé continu par stations totales.

Soutenu le 2 septembre 2024

JURY

Madame Joëlle NICOLAS-DUROY

Présidente du jury

Monsieur Stéphane DURAND

Maître de stage

Monsieur José CALI

Enseignant référent

Remerciements

J'aimerais remercier toutes les personnes qui m'ont entouré et accompagné au cours de ce travail de fin d'études.

En premier lieu, je remercie chaleureusement mon maître de stage, Stéphane DURAND. Ses conseils avisés et son accompagnement constant, lors de nos réunions planifiées ou improvisées, m'ont été extrêmement précieux et m'ont guidé dans mes moments de doute.

Je tiens également à remercier mon enseignant référent, José CALI, pour son suivi attentif et les nombreuses pistes et conseils qu'il m'a fournis durant ces cinq mois.

Je tiens évidemment à adresser mes remerciements au laboratoire Géomatique et Foncier de l'ESGT pour leur soutien et le financement des sujets de recherche comme celui-ci. Il permet ainsi de développer de nouvelles méthodes innovantes qui, je l'espère, ouvriront de nouvelles perspectives dans le domaine de la topographie.

Merci à Juliane BESSEYRE, pour sa présence tout au long de ce projet et son aide lors de la rédaction de ce mémoire.

Enfin, je voudrais remercier ma famille qui m'a soutenu et pris régulièrement des nouvelles durant cette longue période d'autonomie.

Liste des abréviations

AV	Angle Vertical
CNAM	Conservatoire National des Arts et Métiers
Di	Distance inclinée
ESGT	Ecole Supérieure d'ingénieurs Géomètres et Topographes
Hz	Lecture horizontale
SMR	Spherical Mounted Reflector
TFE	Travail de Fin d'Études
V	Angle zénithal

Table des matières

Remerciements	2
Liste des abréviations	3
Introduction	5
I REALISATION DE VISEES INDIRECTES VIA UN MIROIR.....	8
I.1 PRINCIPES ET MISE EN PLACE DU SYSTEME.....	8
I.1.1 APPROCHES DU SUJET ET INTERETS DE L'UTILISATION D'UN MIROIR	8
I.1.2 REFERENTIELS UTILISES ET EQUATION DE PLAN DANS L'ESPACE.....	8
I.1.2.1 REFERENTIELS LOCAUX DU TACHEOMETRE	8
I.1.2.2 PARAMETRES DE L'EQUATION DE PLAN DU MIROIR.....	9
I.1.2.3 PASSAGE D'UN REPERE A L'AUTRE A L'AIDE DE LA MATRICE R.....	10
I.1.3 TACHEOMETRE ET SUPPORT MECANIQUE.....	12
I.2 CALCUL DES COORDONNEES DE POINTS A TRAVERS LE MIROIR.....	12
I.2.1 APPLICATION DE LA PREMIERE LOI DE SNELL DESCARTES DANS NOTRE CONTEXTE.....	13
I.2.2 METHODE DE CALCUL POUR TROUVER LES COORDONNEES DU POINT PAR VISEE INDIRECTE	13
I.2.2.1 IMAGE D'UN POINT A TRAVERS LE MIROIR	13
I.2.2.2 VECTEUR ORTHOGONAL A UN PLAN ET RESOLUTION DES COORDONNEES DE LA CIBLE	14
I.2.3 PRECISION DES COORDONNEES A PARTIR DE MESURES INDIRECTES	14
I.2.3.1 PRECISIONS DES MESURES ET DES PARAMETRES DU PLAN DU MIROIR	15
I.2.3.2 ÉQUATION ASSOCIEE AUX PRECISIONS FINALES	15
II PARAMETRES DU PLAN DU MIROIR	17
II.1 DETERMINATION DES PARAMETRES PAR AUTOCOLLIMATION	17
II.2 DETERMINATION DES PARAMETRES PAR VISEES DIRECTES ET INDIRECTES	18
II.2.1 METHODE DE CALCUL THEORIQUE	19
II.2.2 CALCUL DES PARAMETRES DU PLAN DU MIROIR PAR MOINDRES CARRES IMPLICITES	20
II.2.3 PRECISIONS DES PARAMETRES DU PLAN DU MIROIR.....	21
II.3 OUTILS DE SIMULATION DE VISUALISATION DE MESURES INDIRECTES SUR MIROIR.....	21
III TESTS EXPERIMENTAUX ET ANALYSE DES RESULTATS	23
III.1 PREMIERE EXPERIENCE.....	23
III.1.1 DESCRIPTION DE LA PREMIERE EXPERIENCE	23
III.1.2 ANALYSE DES RESULTATS	24
III.2 DEUXIEME EXPERIENCE SANS LUMIERE ET ANALYSE	28
III.2.1 DESCRIPTION DE LA DEUXIEME EXPERIENCE	28
III.2.2 ANALYSE DES RESULTATS	29
III.2.3 INFLUENCE DE LA TEMPERATURE INTERNE LORS DE LA DEUXIEME EXPERIENCE	30
III.3 DETERMINATION DES PARAMETRES ET RECONSTRUCTION DES COORDONNEES	31
III.3.1 ÉTALONNAGE DES PARAMETRES DU PLAN DU MIROIR ET PRECISIONS ASSOCIEES	32
III.3.2 ÉCART PAR RAPPORT AUX COORDONNEES VRAIES	34
III.4 DECALAGE PAR RAPPORT AU CENTRE DU PRISME.....	35
Conclusion.....	38
Bibliographie	39
Table des figures.....	40
Table des tableaux	40

Introduction

Dans le secteur de la topographie, il existe un domaine où les compétences des topographes sont régulièrement mandatées. Ce domaine que l'on connaît sous le nom d'auscultation topographique permet la surveillance d'infrastructures ainsi que de terrains naturels. Cette surveillance a différents objectifs en fonction du contexte mais a généralement pour rôle principal de réaliser une observation périodique de la structure, en vue d'observer son comportement dans le temps, garantissant donc la détection précoce de tout risque potentiel de mouvements ou déformations et la mise en place de mesures préventives appropriées (Ifsttar et Cerema, 2016). Qu'il s'agisse d'anciennes constructions telles que des églises ou des châteaux, de structures plus récentes comme des barrages, des ponts ou des tunnels, des phénomènes naturels comme des glissements de terrain ou encore des falaises, il est de la responsabilité des topographes missionnés de garantir un suivi adapté au contexte et aux risques spécifiques. Ces risques, provoqués par différents facteurs tels que des phénomènes naturels liés au climat ou à l'usure, mais aussi par des interventions humaines comme des travaux, exigent des professionnels qu'ils atteignent un certain niveau de précision, entre quelques millimètres et quelques dixièmes de millimètre, en utilisant des méthodes appropriées.

C'est dans ce contexte que le laboratoire Géomatique et Foncier de l'ESGT s'intéresse à une nouvelle approche de mesures indirectes dans la direction du nadir avec des stations totales équipées d'un miroir. En effet, ce miroir fixé au-dessus du tachéomètre et incliné de manière adaptée, permettrait de réaliser des visées en dessous de la station. Il servirait donc d'intermédiaire entre l'appareil et la cible, car conformément à la première loi de Snell-Descartes (Engo, 2017), le rayon va être « réfléchi » avec un angle égal à l'angle d'incidence.

Effectivement, lorsque des cibles sont placées en dessous du tachéomètre, les visées directes deviennent impossibles au-delà d'un certain angle zénithal (limite variable selon le modèle), car le socle de l'appareil empêche ces visées. En utilisant un miroir, il est possible de surmonter ce problème, particulièrement lorsque l'installation de stations totales devant ou au pied de la structure est impossible ou compliquée. Si des stations au sommet de la structure sont envisageables, notre tachéomètre équipé d'un miroir peut réaliser des mesures au nadir, offrant ainsi une nouvelle configuration pour les réseaux de surveillance des infrastructures.

Voyons d'abord comment les géomètres réalisent aujourd'hui les différentes missions d'auscultation en les illustrant par des exemples concrets. Puis, nous pourrons faire le lien

avec notre méthode en démontrant en quoi elle peut être complémentaire voire plus adaptée en fonction des contextes.

Les barrages représentent des infrastructures particulièrement encadrées et surveillées par les topographes. En raison de leur importance stratégique et des dangers qu'ils peuvent engendrer en cas de rupture, il est nécessaire de mettre en place un suivi régulier. Généralement, lors d'une auscultation tachéométrique, des prismes sont mis en place sous la forme d'un quadrillage le long du barrage afin d'être relevés par une ou plusieurs stations (Scholtes, et al., 2012). Cette méthode permet de comparer au cours du temps la position 3D des prismes de manière à observer leurs déplacements et potentiellement de créer des modélisations 3D précises pour évaluer la stabilité de la structure (Bouhouche, et al., 2018)

Dans le contexte d'auscultation automatisée de barrage, si la mise en place de stations au sommet du barrage est envisageable et qu'un quadrillage de prisme est placé le long de la paroi, notre système permettra de changer la géométrie du réseau mais aussi d'éviter de positionner des stations sur les rivages en aval du barrage. Toutefois, il est crucial de tenir compte du fait que le tachéomètre sera installé sur le barrage et subira, par conséquent, les mêmes mouvements de déplacement que ce dernier. Pour pallier cette contrainte, il faudra s'assurer de mettre en place des cibles de référence non rattachées au barrage et supposées immobiles. Ainsi, il sera aussi possible de calculer le déplacement du tachéomètre dans le temps.

Un autre domaine où notre méthode pourrait être avantageusement appliquée est celui des missions de surveillance des falaises, notamment celles situées en bord de côtes subissant donc les aléas de l'eau. Ces falaises sont en contact direct avec la mer ou l'océan, ce qui complique la mise en place de stations totales face à elles. Habituellement, les équipes missionnées utilisent un drone équipé d'un lidar ou d'un appareil photo pour modéliser la falaise (Ayache, et al., 2020). En combinant plusieurs modélisations réalisées à différents intervalles de temps, il devient donc possible d'estimer le mouvement de la falaise et de prévoir ses éventuels éboulements. Dans ce cas, si la structure de la falaise permet la mise en place d'une station ainsi que de prismes le long de la paroi, alors il est concevable de mettre en place notre méthode de manière à avoir un suivi constant de l'évolution des déplacements de cette dernière. Effectivement, en supposant que les prismes ont été placés de manière optimale aux endroits critiques, le tachéomètre équipé du miroir qui réaliserait l'auscultation automatisée pourra avertir si des mouvements trop importants surviennent.

Une autre application possible est le suivi de zones souterraines telles que des puits, tunnels ou infrastructures souterraines. Lors d'un TFE réalisé en 2010, il avait déjà été question de répondre à cette question en positionnant le tachéomètre à l'envers et au-dessus de puits (Nallet, 2010), mais la conclusion a été que le système de motorisation de l'appareil n'était pas conçu pour supporter ce type d'usage. Ici, il est donc question de mettre en pratique notre méthode en ayant d'aussi bons résultats qu'avec une visée directe mais en réalisant la visée via le miroir. En orientant le miroir de manière à ce que le tachéomètre puisse observer les différents prismes positionnés dans le puits, il sera donc possible de mesurer ces points avec précision. S'il s'agit d'infrastructures souterraines, ces points pourront servir de référence pour d'autres stations sous terre et, potentiellement, permettre aussi de géoréférencer les nuages de points souterrains.

En revanche, des interrogations vont subsister quant à l'efficacité et à la fiabilité de cette solution. Si elle offre la possibilité d'effectuer des auscultations par automatisation sur le long terme, il reste important de s'interroger sur sa précision et sa robustesse dans des conditions réelles d'utilisation. La durabilité de ce dispositif ainsi que sa capacité à maintenir des mesures précises et constantes au fil du temps font partie des éléments majeurs à évaluer. Effectivement, le miroir étant accessoire au tachéomètre, il convient de s'assurer qu'il reste immobile tout au long de la mission d'auscultation afin de ne pas altérer les résultats.

Par conséquent, face aux défis techniques posés par l'intégration d'une nouvelle méthode utilisant un miroir, nous en venons à nous poser la question de la pertinence et l'efficacité de cette extension du tachéomètre avec l'exigence de l'auscultation topographique actuelle.

Dans la première partie de ce mémoire nous verrons quelques principes et rappels de notions qui seront utilisés tout au long de ce rapport, puis les méthodes de calculs qui permettront de reconstruire les coordonnées de cibles via des visées indirectes ainsi que leurs précisions.

Ensuite, nous présenterons deux solutions permettant de calculer les paramètres du plan du miroir, en détaillant pour chacune, les méthodes de calcul, ainsi que leur précision associée.

Enfin, dans la dernière partie nous réaliserons des tests expérimentaux qui mettrons en application ce qui a été étudié précédemment, afin d'analyser la répétabilité des mesures mais aussi les précisions associées aux paramètres du plan du miroir et aux coordonnées calculées via des visées par l'intermédiaire du miroir.

I Réalisation de visées indirectes via un miroir

I.1 Principes et mise en place du système

Avant de comprendre comment les coordonnées d'une cible sont calculées à travers une visée via un miroir, penchons-nous sur les principes employés, les référentiels considérés ainsi que le montage mécanique supportant le miroir utilisé dans ce travail.

I.1.1 Approches du sujet et intérêts de l'utilisation d'un miroir

Ce travail de fin d'études vise à proposer une méthode utilisant un miroir fixé sur un tachéomètre, permettant par exemple d'effectuer des visées au nadir.

Le miroir sera donc fixé, à l'aide d'un montage mécanique, au sommet du tachéomètre et positionné de manière spécifique pour augmenter le champ de visibilité au nadir (Figure 1). Son inclinaison et sa position pourront être ajustées afin de convenir au mieux aux besoins des différentes missions. Dans ce mémoire, nous aborderons le cas d'un miroir solidaire avec le tachéomètre et qui « tournera » donc avec lui.

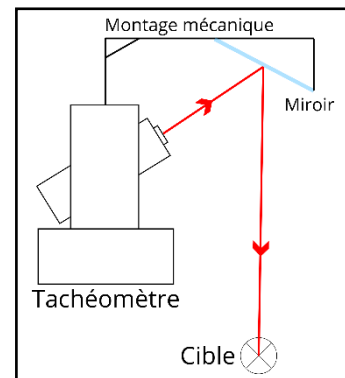


Figure 1 : Schéma explicatif des visées indirectes via un miroir rattaché au tachéomètre (Illustration personnelle)

I.1.2 Référentiels utilisés et équation de plan dans l'espace

I.1.2.1 Référentiels locaux du tachéomètre

Durant ce TFE, nous allons exprimer les coordonnées des points dans un référentiel local lié au tachéomètre. Ce repère (T, T_u, T_v, T_w) est exprimé comme ceci :

- T représente le point d'origine de toutes les mesures réalisées par la station totale ;
- T_w est l'axe principal de la station totale, verticalisé et orienté positivement vers le zénith ;
- T_u est la direction correspondant au zéro du limbe du tachéomètre dans notre contexte d'étude, mais il peut très bien s'agir d'une autre direction, du Nord (N) ;
- T_v complète le trièdre direct.

Dans notre travail, le miroir étant attaché au tachéomètre, il tourne avec lui, il faut alors tenir compte de ce mouvement pour déterminer sa position dans l'espace. Nous devons donc considérer un second repère, lié au tachéomètre, dans lequel le miroir est immobile. Ce repère sera noté (T, T_x, T_y, T_z) et défini tel que :

- T correspond toujours au point d'origine de toutes les mesures réalisées par la station totale ;
- T_z est confondu avec à l'axe T_w , soit l'axe principal de la station totale, considéré verticalisé et positif vers le zénith ;
- T_x est le deuxième axe principal, il s'agit de la projection de l'axe de visée sur le plan horizontal, positif dans la direction de visée. Ainsi, l'angle entre l'axe T_u et l'axe T_x correspond à la mesure de lecture horizontale (H_z), soit l'angle entre le zéro du limbe de l'appareil et la direction du point visé ;
- T_y correspond à l'axe secondaire de l'appareil soit à l'axe des tourillons, et se situe par définition dans le plan horizontal.

I.1.2.2 Paramètres de l'équation de plan du miroir

Dans ce travail, nous considérerons que le miroir utilisé est parfaitement plan (en première approximation) et nous le modéliserons comme un plan dans l'espace. Pour définir l'orientation et la position d'un plan dans un repère tri-dimensionnel, nous utilisons classiquement l'équation : $ax + by + cz + d' = 0$ (De Marçay). Les paramètres a , b et c définissent la direction de la normale au plan du miroir (Figure 2), c'est-à-dire son orientation dans l'espace. La normale \vec{n} est, dans le contexte de notre étude, un vecteur perpendiculaire au plan du miroir positif dans la direction du nadir. Pour que le résultat de cette équation soit nul, il faut que les coordonnées x , y et z appartiennent au plan de paramètres a , b , c et d' .

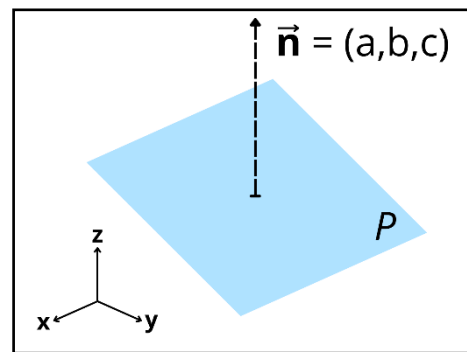


Figure 2 : Schéma d'un plan P et de sa normale \vec{n} dans le repère (T, T_x, T_y, T_z)
(Illustration personnelle)

Dans le repère (T, T_x, T_y, T_z) lié à la direction de visée de l'appareil, la position du miroir dans l'espace est fixe. Nous noterons n_x , n_y , n_z les paramètres du vecteur normal au plan du miroir dans ce repère.

Nous aurons besoin également d'exprimer les coordonnées de ce vecteur dans le repère (T, T_u, T_v, T_w) . Nous noterons n_u , n_v , n_w les paramètres du vecteur normal au plan du miroir dans ce repère et montrerons dans la partie suivantes les relations entre ces deux expressions.

Nous considèrerons également, pour simplifier, que la normale sera dans notre cas un vecteur unitaire ($\sqrt{a^2 + b^2 + c^2} = 1$).

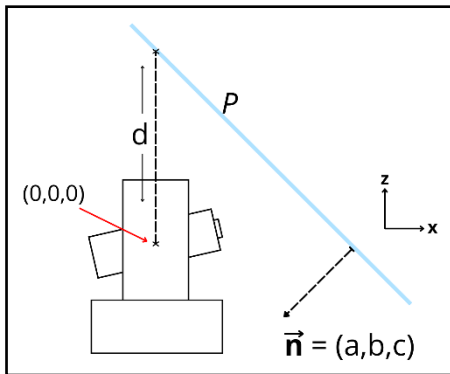


Figure 3 : Schéma explicatif des paramètres du plan P dans le repère (T, T_x, T_y, T_z) (Illustration personnelle)

Nous voulons maintenant trouver le paramètre d' qui va permettre de connaître la position du plan du miroir. Pour déterminer d' , plaçons nous dans le repère (T, T_x, T_y, T_z) . Comme illustré par la Figure 3, d correspond à la distance entre l'axe des tourillons de l'appareil, et l'intersection entre l'axe vertical et le plan du miroir. Ce point d'intersection correspond au point ayant pour coordonnées $(0, 0, d)$. Or nous savons que si l'on considère un point M dans le repère

(T, T_x, T_y, T_z) de coordonnées $M = (x_M, y_M, z_M)$ situé sur le plan du miroir, l'équation du plan peut être exprimée comme l'ensemble des points (x, y, z) tels que :

$$n_x(x - x_M) + n_y(y - y_M) + n_z(z - z_M) = 0$$

Dans notre cas $x_M = y_M = 0$ et $z_M = d$, d'où l'équation suivante :

$$n_x x + n_y y + n_z z - n_z d = 0 \quad (1)$$

On comprend alors que $d' = -cd$

Ainsi, en connaissant ces quatre paramètres, nous connaissons la position et l'orientation du miroir dans le repère (T, T_x, T_y, T_z) . Nous verrons dans la partie I.2 comment reconstruire les coordonnées 3D de points via des visées indirectes grâce aux paramètres du plan du miroir, puis dans la partie II, nous verrons comment ces paramètres sont déterminés ainsi que leur précision associée.

I.1.2.3 Passage d'un repère à l'autre à l'aide de la matrice R

Si le repère (T, T_x, T_y, T_z) permet d'exprimer la position du miroir dans l'espace de manière simple, le repère (T, T_u, T_v, T_w) est préférable pour exprimer les coordonnées des points dans l'espace. Nous devons donc être capable d'exprimer les paramètres du plan du miroir dans le repère (T, T_u, T_v, T_w) connaissant ceux dans le repère (T, T_x, T_y, T_z) .

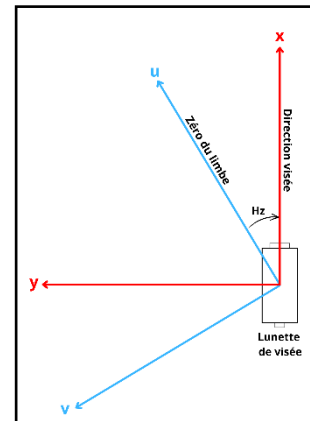


Figure 4 : Lien entre les repères (T, T_x, T_y, T_z) et (T, T_u, T_v, T_w) (Illustration personnelle)

Pour rappel, une rotation d'un angle α autour de l'axe T_z a pour matrice :

$$R = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Dans notre cas, pour passer du repère (T, T_u, T_v, T_w) au repère (T, T_x, T_y, T_z) , il faudra tenir compte de l'angle H_z fourni par la station totale. Cette lecture horizontale H_z étant mesurée dans le sens inverse au sens trigonométrique (*Figure 4*), nous obtenons alors l'équation :

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(H_z) & -\sin(H_z) & 0 \\ \sin(H_z) & \cos(H_z) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (3)$$

Considérons un point M visé par le tachéomètre depuis une visée directe. Nous obtenons donc une lecture horizontale H_z , un angle zénithal V et une distance inclinée Di . Dans le repère (T, T_u, T_v, T_w) les coordonnées du point M seront :

$$\begin{cases} u_M = Di \cos(H_z) \sin(V) \\ v_M = -Di \sin(H_z) \sin(V) \\ w_M = Di \cos(V) \end{cases} \quad (4)$$

Dans le repère (T, T_x, T_y, T_z) les coordonnées du point M seront :

$$\begin{cases} x_M = Di \sin(V) \\ y_M = 0 \\ z_M = Di \cos(V) \end{cases} \quad (5)$$

En développant l'équation (3), nous exprimons les coordonnées dans le repère (T, T_x, T_y, T_z) en fonction de celles calculées dans le repère (T, T_u, T_v, T_w) :

$$\begin{cases} x_M = \cos(H_z)u_M - \sin(H_z)v_M \\ y_M = \sin(H_z)u_M + \cos(H_z)v_M \\ z_M = w_M \end{cases} \quad (6)$$

Et par identification puis inversion, nous pouvons en déduire l'expression des paramètres du vecteur normal au plan du miroir dans le repère (T, T_u, T_v, T_w) en fonction de ceux calculés dans le repère (T, T_x, T_y, T_z) :

$$\begin{cases} n_u = \cos(H_z)n_x + \sin(H_z)n_y \\ n_v = -\sin(H_z)n_x + \cos(H_z)n_y \\ n_w = n_z \end{cases} \quad (7)$$

I.1.3 Tachéomètre et support mécanique

Le tachéomètre utilisé pour cette étude est un Topcon MS1AXII (Topcon, 2014). L'avantage est que sa poignée est amovible et une fois retirée, nous disposons sur le dessus de deux emplacements permettant d'accueillir le montage mécanique que l'on observe sur la Figure 5. Ce support mécanique est composé de tiges et liens en métal de la marque Melles Griot. Il s'agit de pièces utilisées en optique qui permettront au miroir d'avoir une stabilité suffisante pour réaliser nos différents tests et mener à bien ce projet. Ce type de montage mécanique permet de fixer le miroir dans la position que nous



Figure 5 : Montage mécanique supportant le miroir fixé sur le Topcon MS1AXII (Photo personnelle)

souhaitons afin de choisir le champ de visibilité des visées indirectes. Il peut être déplacé verticalement et ajusté en inclinaison. Cependant, pour maximiser la surface d'impact de la visée sur le miroir, celui-ci devra être aligné dans la direction de l'axe de visée, soit l'axe T_x .

I.2 Calcul des coordonnées de points à travers le miroir

Maintenant que nous avons pris en compte les différentes notions de base qui s'appliquent à notre étude, penchons-nous sur la méthode de calcul qui permettra de reconstruire les coordonnées de points par l'intermédiaire du miroir.

Nous supposons ici connaître les paramètres du miroir n_x , n_y , n_z et d dans le repère (T, T_x, T_y, T_z) tournant avec l'appareil ainsi que la matrice de covariance $\Sigma_{\hat{x}}$ associée aux précisions de chacun de ces paramètres. La partie II détaillera les méthodes de calcul de ces paramètres et leur précision associée.

I.2.1 Application de la première loi de Snell Descartes dans notre contexte

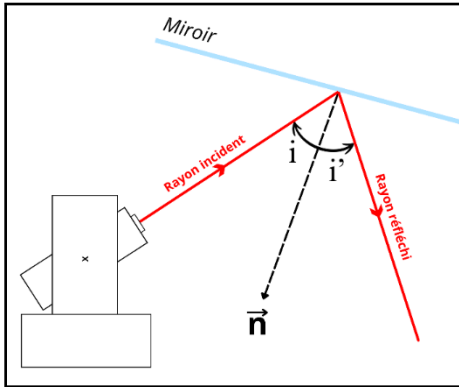


Figure 6 : Schéma de l'application de la première loi de Snell Descartes dans le contexte de notre étude (Illustration personnelle)

Pour déterminer les coordonnées des points par visée indirecte, nous utilisons la première loi de Snell-Descartes (Engo, 2017). Cette loi mentionne que lorsque la visée du tachéomètre est orientée sur un miroir, cette visée est réfléchiée avec un angle égal à l'angle d'incidence, mesuré par rapport à la normale du miroir. Ainsi, l'angle d'incidence i est égal à l'angle de réflexion i' comme représenté sur la Figure 6. La normale et les deux rayons (incident et réfléchi) appartiennent au même plan, appelé plan d'incidence.

I.2.2 Méthode de calcul pour trouver les coordonnées du point par visée indirecte

On considère un point M visé par le tachéomètre par l'intermédiaire du miroir, point calculé dans le repère (T, T_u, T_v, T_w) . Nous utilisons la valeur de lecture horizontale (H_z), d'angle zénithal (V), et de distance inclinée (Di) fournies par l'appareil. Nous supposons connaître les paramètres n_x, n_y, n_z et d du plan du miroir calculés dans le repère (T, T_x, T_y, T_z) . Avec ces sept paramètres, il est possible de reconstruire les coordonnées du point M .

I.2.2.1 Image d'un point à travers le miroir

En s'aidant de l'équation (5), nous obtenons les coordonnées de l'image du point M dans le repère (T, T_x, T_y, T_z) , point que nous appellerons M' . Ce point M' est le symétrique du point M par rapport au plan du miroir. Et comme illustré sur la Figure 7, le segment passant par ces deux points est perpendiculaire au plan et la distance M'/plan et plan/M sont égales.

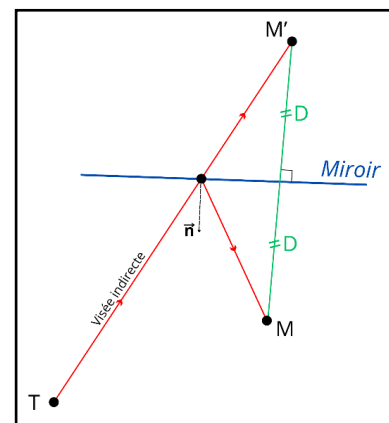


Figure 7 : Principe de symétrie entre deux points par rapport à un plan (Illustration personnelle)

Nous voulons maintenant connaître la direction et la longueur du vecteur $\overrightarrow{M'M}$ pour pouvoir calculer les coordonnées du point M .

I.2.2.2 Vecteur orthogonal à un plan et résolution des coordonnées de la cible

Premièrement, nous allons calculer la distance D qui sépare le point M' du plan du miroir (*Figure 7*). Voici l'équation utilisée pour trouver la distance D :

$$D = |n_x x_{M'} + n_y y_{M'} + n_z z_{M'} - n_z d|$$

Avec $|_ |$ désignant la valeur absolue. Sachant que la position du point M' suit la direction de l'axe de visée, soit l'axe T_x , alors $y_{M'} = 0$, d'où :

$$D = |n_x x_{M'} + n_z z_{M'} - n_z d| \quad (8)$$

Avec la valeur de D connue, il faut maintenant la multiplier par deux pour trouver la distance entre le point M' et M , car $D = \text{distance}(M'/\text{plan}) = \text{distance}(\text{plan}/M)$. Ainsi, en repartant des coordonnées de $M' = (x_{M'}, y_{M'}, z_{M'})$, puis en multipliant la distance totale ($D_{\text{totale}} = 2 \times D$) par les paramètres n_x , n_y et n_z qui correspondent aux directions de la normale mais aussi à la direction entre le point M' et M , nous obtenons l'équation :

$$\begin{cases} x_M = x_{M'} + 2Dn_x \\ y_M = y_{M'} + 2Dn_y \\ z_M = z_{M'} + 2Dn_z \end{cases} \quad (9)$$

Il ne faut cependant pas oublier que les coordonnées que nous venons de définir sont dans le repère (T, T_x, T_y, T_z) . Ainsi, pour exprimer les coordonnées de M dans le repère (T, T_u, T_v, T_w) , nous utilisons l'équation (6) inversée :

$$\begin{cases} u_M = \cos(Hz)x_M + \sin(Hz)y_M \\ v_M = -\sin(Hz)x_M + \cos(Hz)y_M \\ w_M = z_M \end{cases} \quad (10)$$

Nous venons donc de reconstruire les coordonnées de la cible M à partir des paramètres du plan du miroir ainsi que des mesures H_z , V et Di de la visée indirecte. Nous allons maintenant déterminer la précision des coordonnées obtenues.

I.2.3 Précision des coordonnées à partir de mesures indirectes

Comme dans la partie précédente, nous supposons la matrice de covariance des précisions sur les paramètres n_x , n_y , n_z et d , soit la matrice $\Sigma_{\hat{X}}$, connue. Nous réaliserons les calculs de précisions dans le repère (T, T_u, T_v, T_w) , car les coordonnées finales se trouvent dans celui-ci.

I.2.3.1 Précisions des mesures et des paramètres du plan du miroir

Les précisions des mesures correspondent aux précisions des lectures horizontales (H_z), angles zénithaux (V) et distances inclinées (Di). Concernant notre tachéomètre, les précisions sont de 0.3 mgon en angulaire et $\pm 1 \text{ mm} \pm 1 \text{ ppm}$ en distance (Topcon, 2014).

On définit le vecteur L qui correspond aux mesures prises par le tachéomètre lors des visées indirectes qu'on écrit sous la forme :

$$L = \begin{bmatrix} H_z \\ V \\ Di \end{bmatrix} \quad (11)$$

Ainsi, avec ces précisions et connaissant l'ordre des mesures dans le vecteur L , nous pouvons construire la matrice de covariance $\Sigma_{\hat{L}}$ de dimension 3×3 qui se présente comme suit :

$$\Sigma_{\hat{L}} = \begin{bmatrix} \sigma_{H_z}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_V^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{Di}^2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Expression dans laquelle σ_{H_z} , σ_V et σ_{Di} sont respectivement les précisions a priori sur les mesures H_z , V et Di . Quant à la matrice de covariance $\Sigma_{\hat{X}}$ de dimension 4×4 , celle-ci s'écrira de cette manière :

$$\Sigma_{\hat{X}} = \begin{bmatrix} \sigma_a^2 & \sigma_{ab} & \sigma_{ac} & \sigma_{ad} \\ \sigma_{ab} & \sigma_b^2 & \sigma_{bc} & \sigma_{bd} \\ \sigma_{ac} & \sigma_{bc} & \sigma_c^2 & \sigma_{cd} \\ \sigma_{ad} & \sigma_{bd} & \sigma_{cd} & \sigma_d^2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Où σ_i est la précision sur i et σ_{ij} la covariance entre les paramètres i et j . Nous voulons maintenant combiner ces deux matrices de covariance pour obtenir une matrice unique regroupant les précisions des sept paramètres nécessaires pour déterminer les coordonnées de la cible via une visée indirecte. Cette nouvelle matrice de covariance, de dimension 7×7 , sera appelée $\Sigma_{\hat{W}}$ et aura la forme suivante :

$$\Sigma_{\hat{W}} = \begin{bmatrix} \Sigma_{\hat{X}} & 0 \\ 0 & \Sigma_{\hat{L}} \end{bmatrix} \quad (14)$$

I.2.3.2 Équation associée aux précisions finales

On considère le vecteur Y qui correspond aux coordonnées du point M , soit :

$$Y = \begin{bmatrix} u_M \\ v_M \\ w_M \end{bmatrix} \quad (15)$$

Ainsi, nous cherchons, pour trouver les précisions de ces inconnues, la matrice de covariance $\Sigma_{\hat{Y}}$. Nous utilisons pour cela la formule de propagation de variance :

$$\Sigma_{\hat{Y}} = H \cdot \Sigma_{\hat{W}} \cdot H^T \quad (16)$$

Où H est la matrice des dérivées partielles des équations liant les coordonnées dans le repère (T, T_u, T_v, T_w) , les mesures et les paramètres du miroir de l'équation (10).

En développant les formules présentes dans la partie I.2.2.2, nous pouvons exprimer les coordonnées u_M, v_M, w_M dans le repère (T, T_u, T_v, T_w) sous la forme :

$$\begin{cases} u_M = f_1(n_x, n_y, n_z, d, Hz, V, Di) = \cos(Hz) Di \sin(V) + \cos(Hz) 2Dn_x + \sin(Hz) 2Dn_y \\ v_M = f_2(n_x, n_y, n_z, d, Hz, V, Di) = -\sin(Hz) Di \sin(V) - \sin(Hz) 2Dn_x + \cos(Hz) 2Dn_y \\ w_M = f_3(n_x, n_y, n_z, d, Hz, V, Di) = Di \cos(V) + 2Dn_z \end{cases}$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} f_1 = \cos(Hz) (Dp \sin(V) + 2Dn_x) + 2Dn_y \sin(Hz) \\ f_2 = -\sin(Hz) (Dp \sin(V) + 2Dn_x) + 2Dn_y \cos(Hz) \\ f_3 = Di \cos(V) + 2Dn_z \end{cases} \quad (17)$$

Avec D toujours donnée par l'équation (8). Nous pouvons donc exprimer la matrice H de dimension 3×7 en calculant les dérivées partielles des équations f_1, f_2 et f_3 par rapport à ces sept paramètres, et en calculant les valeurs de ces dérivées partielles aux valeurs connues des paramètres du plan et effectives des mesures. Une fois la matrice H connue, nous appliquons la formule de l'équation (16) afin de trouver les précisions sur les coordonnées du point M dans la diagonale de la matrice $\Sigma_{\hat{Y}}$.

Nous venons de déterminer les précisions des coordonnées de points mesurés par visée indirecte à l'aide des paramètres du plan, voyons maintenant comment ces paramètres sont déterminés.

II Paramètres du plan du miroir

Dans cette deuxième partie, nous chercherons à connaître les paramètres du plan du miroir ainsi que leur précision associée. Pour ce faire, nous proposerons deux méthodes différentes, en évaluant l'efficacité et la faisabilité de chacune d'elles dans le contexte de notre étude.

II.1 Détermination des paramètres par autocollimation

L'autocollimation permet d'orienter l'axe de visée de la station totale dans la direction perpendiculaire au plan d'un miroir (Alajouanine, 1984). Combinée à une mesure de distance réalisée par la station totale, cette méthode permet de déterminer les 4 paramètres du plan du miroir.

Étant donné que la visée est perpendiculaire au miroir, elle est alignée avec la normale au plan du miroir. Cela permet donc de déterminer les trois paramètres a , b et c de cette normale et le paramètre d sera lui calculé à partir d'une mesure zénithale et de distance. Ces paramètres seront calculés dans le repère (T, T_x, T_y, T_z) , où l'axe de visée correspond à la direction T_x .

Sur certains tachéomètres, notamment le modèle Topcon que nous utilisons, cette visée est effectuée automatiquement. L'appareil dispose d'un système de pointé automatique permettant de se positionner perpendiculairement au miroir. Mais, cela présente plusieurs contraintes. Étant donné que le miroir est fixé à l'appareil et tourne avec lui, le pointage automatique ne peut agir que sur l'angle zénithal. Il est donc obligatoire que le miroir soit initialement positionné perpendiculairement à l'axe de visée et qu'il reste stable au fil du temps. Bien que réalisable, cette solution est complexe à mettre en œuvre à notre échelle et non adaptée à notre besoin.

Un autre problème réside dans la distance minimale requise pour que le pointé automatique soit réalisable, et s'il l'est, précis. Au niveau de l'appareil, le pointé automatique et de mesure de distances sont liés. Nous avons constaté, avec notre tachéomètre Topcon, que la visée d'autocollimation fonctionne au-delà d'une distance de *25 centimètres*, mais échoue en deçà. Un autre essai avec un tachéomètre Leica modèle MS50 a révélé que le pointage automatique n'est plus possible à moins de *1.5 mètre*, l'appareil refusant d'effectuer des mesures de distance en dessous de cette longueur.

Une alternative consiste à effectuer cette visée manuellement. Effectivement, comme tous les appareils Leica, notre MS50 peut être équipé d'un oculaire d'autocollimation, avec

lequel il est possible de pointer manuellement sur le miroir le point où la visée est perpendiculaire. Pour ce faire, il faut éclairer le réticule pour en voir l'image dans l'oculaire, puis superposer le réticule et son image pour aligner la visée de l'appareil perpendiculairement au miroir. Théoriquement, si la normale au plan du miroir est parfaitement alignée avec l'axe de visée de l'appareil, alors la direction du paramètre b ainsi que l'axe T_y seront confondus, rendant la valeur de ce paramètre nulle. Or, l'avantage de cette méthode est que la valeur du paramètre b n'a pas besoin d'être parfaitement nulle, car nous verrons l'image du réticule non alignée sur ce réticule et suivant l'axe H_z . Cependant, il sera difficile de déterminer précisément l'écart angulaire et sa précision.

Cette méthode présente aussi la limitation de ne pas pouvoir déterminer la distance séparant le miroir du tachéomètre, rendant impossible la détermination du paramètre d . En effet, l'autocollimation manuelle ne permet pas de solutionner le problème de la mesure de distance qui est impossible à moins de 1.5 *mètre* avec les appareils de la marque Leica. Une solution pour contourner ce problème consiste à effectuer une mesure de dénivelé avec un niveau et une mire, entre l'axe des tourillons et l'intersection du miroir avec l'axe vertical, de manière à déterminer la distance qui équivaut à la valeur de ce paramètre.

Un autre gros défaut de la solution de l'autocollimation pour déterminer les paramètres est que le miroir doit obligatoirement être orienté perpendiculairement à l'axe de visée. Cette contrainte risque alors de limiter les visées au nadir car le miroir sera orienté perpendiculairement à la visée du tachéomètre. La solution serait d'avoir un miroir plus long dans la direction de l'axe de visée, mais l'hypothèse qu'il s'agisse toujours d'un plan parfaitement horizontal risque de devenir incorrecte.

II.2 Détermination des paramètres par visées directes et indirectes

Une seconde méthode pour déterminer les quatre paramètres du plan du miroir consiste à effectuer une visée sur une cible visible, à la fois en visée directe et en visée indirecte, c'est-à-dire par l'intermédiaire du miroir. En connaissant les positions de la cible M et de son image M' réfléchi par le miroir, il est alors possible de calculer les paramètres n_x, n_y, n_z et d du plan ainsi que leur précision associée.

Si, sur le terrain de la zone d'auscultation, un ou plusieurs points sont placés de manière à être visibles à la fois en visée directe et indirecte, nous pourrions utiliser la méthode des moindres carrés implicites pour ajuster les paramètres du plan du miroir à partir de plusieurs doubles visées (visée directe et indirecte), ainsi que déterminer leur précision

associée. Cette méthode permettra également de vérifier que ces paramètres n'évoluent pas au fil du temps à cause d'éventuels mouvements du miroir. Les paramètres pourront être recalculés automatiquement au cours de la campagne de mesures, afin d'assurer une précision optimale, ce qui est assez important dans le contexte de l'auscultation.

Voyons maintenant comment à partir de ces doubles visées, les quatre paramètres, ainsi que leur précision associée pourront être déterminés.

II.2.1 Méthode de calcul théorique

Comme nous avons pu le mentionner dans la partie I.2.2.1, la position de la cible et de son image sont à la même distance du plan du miroir. Le point I , visible sur la Figure 8, représente le milieu du segment MM' et est donc un point appartenant au plan du miroir. Nous commençons par calculer les coordonnées de M et de M' dans le repère (T, T_u, T_v, T_w) à l'aide de l'équation (4). Le vecteur $\overrightarrow{M'M}$ est, par définition, orthogonal au plan du miroir car il s'agit de deux points symétriques à celui-ci. Nous considérons la distance D_t , soit la distance entre M et M' définie par :

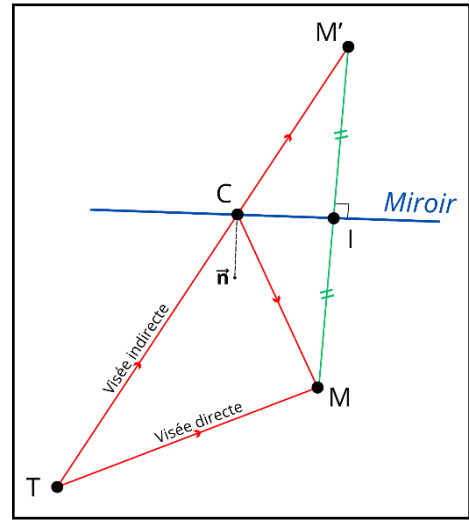


Figure 8 : Schéma illustrant la double visée sur la cible M et son image M' (Illustration personnelle)

$$D_t = \sqrt{(u_{M'} - u_M)^2 + (v_{M'} - v_M)^2 + (w_{M'} - w_M)^2} \quad (18)$$

En divisant le vecteur $\overrightarrow{M'M}$ par sa longueur D_t , nous obtiendrons un vecteur normal unitaire au plan du miroir, identifié au vecteur $\vec{n} = (n_u, n_v, n_w)$. Nous pouvons donc en déduire les trois équations suivantes dans le repère (T, T_u, T_v, T_w) :

$$\begin{cases} n_u = (u_{M'} - u_M)/D_t \\ n_v = (v_{M'} - v_M)/D_t \\ n_w = (w_{M'} - w_M)/D_t \end{cases} \quad (19)$$

Nous souhaitons désormais passer dans le repère (T, T_x, T_y, T_z) pour faire apparaître les paramètres n_x, n_y, n_z du plan du miroir que l'on cherche à calculer. En appliquant la formule de l'équation (7) aux paramètres n_u, n_v et n_w , cela permet de constituer les trois équations d'observation suivantes :

$$\begin{cases} n_x \cos(Hz_{M'}) + n_y \sin(Hz_{M'}) = Di_{M'} \cos(Hz_{M'}) \sin(V_{M'}) - Di_M \cos(Hz_M) \sin(V_M) / D_t & (20) \\ n_y \cos(Hz_{M'}) - n_x \sin(Hz_{M'}) = Di_{M'} \sin(Hz_{M'}) \sin(V_{M'}) - Di_M \sin(Hz_M) \sin(V_M) / D_t & (21) \\ n_z = Di_{M'} \cos(V_{M'}) - Di_M \cos(V_M) / D_t & (22) \end{cases}$$

Nous avons mentionné dans la partie I.1.2.2 que lorsqu'un point appartenait au plan du miroir, alors l'équation de plan était bien égale à zéro. Sachant que nous connaissons les paramètres de la normale ainsi que la position de I , milieu du vecteur $\overline{M'M}$ (Figure 8), nous pouvons calculer la valeur du paramètre d . Voici l'équation permettant de connaître les coordonnées du point I dans le repère (T, T_u, T_v, T_w) :

$$\begin{cases} u_I = (u_{M'} + u_M) / 2 \\ v_I = (v_{M'} + v_M) / 2 \\ w_I = (w_{M'} + w_M) / 2 \end{cases} \quad (23)$$

Et l'équation d'observation faisant intervenir le paramètre d du plan du miroir :

$$[n_x \cos(Hz_{M'}) + n_y \sin(Hz_{M'})] u_I + [n_y \cos(Hz_{M'}) - n_x \sin(Hz_{M'})] v_I + n_z (w_I - d) = 0 \quad (24)$$

II.2.2 Calcul des paramètres du plan du miroir par moindres carrés implicites

La méthode des moindres carrés implicites est particulièrement adaptée ici. En effet, elle permet non seulement d'estimer les paramètres du plan du miroir, que l'on ait visé un ou plusieurs points en direct et indirect, mais également de déterminer les précisions de ces paramètres (si au moins deux points sont visés) et de vérifier le bon déroulement du traitement.

Pour chaque double visée sur un point, nous aurons six mesures : quatre valeurs angulaires ($Hz_{indirecte}$, $Hz_{directe}$, $V_{indirecte}$ et $V_{directe}$) et deux distances inclinées ($Di_{indirecte}$ et $Di_{directe}$). Le nombre total de mesures dépendra donc du nombre de doubles visées réalisées.

On définit n comme le nombre de mesures (six par point visé en direct et indirect), m comme le nombre d'inconnues (soit les quatre paramètres du plan du miroir), et p comme le nombre d'équations d'observation (quatre par point visé en direct et indirect), telles que définies précédemment dans la partie II.2.1. Dans la formulation du problème en moindres carrés implicites, nous aurons quatre équations d'observation f pour la $i^{ème}$ double visée :

$$f_{1i} = \frac{Di_{M_i'} \cos(Hz_{M_i'}) \sin(V_{M_i'}) - Di_{M_i} \cos(Hz_{M_i}) \sin(V_{M_i})}{D_t} - [n_x \cos(Hz_{M_i'}) + n_y \sin(Hz_{M_i'})]$$

$$f_{2i} = \frac{Di_{M_i'} \sin(Hz_{M_i'}) \sin(V_{M_i'}) - Di_{M_i} \sin(Hz_{M_i}) \sin(V_{M_i})}{D_t} - [n_y \cos(Hz_{M_i'}) - n_x \sin(Hz_{M_i'})]$$

$$f_{3i} = \frac{Di_{M_i'} \cos(V_{M_i'}) - Di_{M_i} \cos(V_{M_i})}{D_t} - n_z$$

$$f_{4i} = [n_x \cos(Hz_{M_i'}) + n_y \sin(Hz_{M_i'})]u_{Ii} + [n_y \cos(Hz_{M_i'}) - n_x \sin(Hz_{M_i'})]v_{Ii} + n_z w_{Ii} - n_z d$$

Avec D_t calculée à l'équation (18) et u_I, v_I, w_I les coordonnées du point I calculées à l'équation (23).

La construction des matrices permettant la résolution du problème par moindres carrés implicites nécessite de dériver partiellement ces équations par rapport aux paramètres du plan mais aussi par rapport aux mesures (Durand, 2018). La résolution complète du problème a été intégrée dans un programme Python développé au cours de ce travail.

II.2.3 Précisions des paramètres du plan du miroir

Afin de connaître les précisions associées aux paramètres du plan du miroir, il nous faut calculer la matrice de covariance $\Sigma_{\hat{x}}$ que nous avons mentionnée dans la partie I.2.3 et qui s'écrit comme l'équation (13). Pour connaître la méthode de calcul qui permet la résolution de cette matrice, référons-nous à un mémoire traitant des moindres carrés (Alliez-Dron, 2016).

II.3 Outils de simulation de visualisation de mesures indirectes sur miroir

A travers cette partie II, nous avons identifié deux solutions pour étalonner les paramètres du plan du miroir. D'autres solutions existent, comme l'utilisation d'un niveau et d'une mire pour calculer l'inclinaison du miroir et ainsi déterminer les paramètres du plan, ou encore avec un laser tracker pour relever plusieurs points sur le miroir à l'aide d'un prisme, afin d'estimer sa position et son orientation dans l'espace. Ces deux solutions, bien que techniquement réalisables, ne sont pas pratiques dans le cadre de l'auscultation automatisée, car elles nécessitent une intervention humaine pour recalibrer les paramètres au cours de la campagne de mesures.

En revanche, la méthode impliquant la double visée ne requiert que des points de référence visibles à la fois en visées directes et indirectes, ce qui est plus adapté pour une auscultation automatisée supposée sans intervention. Toutefois, cette méthode, ainsi que

celle de l'autocollimation, impose des contraintes sur la position du miroir. En effet, pour étalonner les paramètres mais aussi relever des cibles situées au nadir de l'appareil, le miroir doit être positionné de manière spécifique pour permettre ces deux tâches.

C'est pourquoi, durant ce TFE, nous avons aussi proposé un script python permettant de simuler des visées directes et indirectes. Comme illustré sur la Figure 9, ce programme nous permet de visualiser ces deux types de visées (indirectes en rouge et directes en bleu) afin de déterminer les zones où positionner les cibles de référence nécessaires à la double visée. En ajustant l'inclinaison du miroir, sa hauteur par rapport à l'axe vertical, ainsi que sa longueur selon l'axe de visée, nous pouvons ainsi estimer le champ de visibilité de l'appareil.

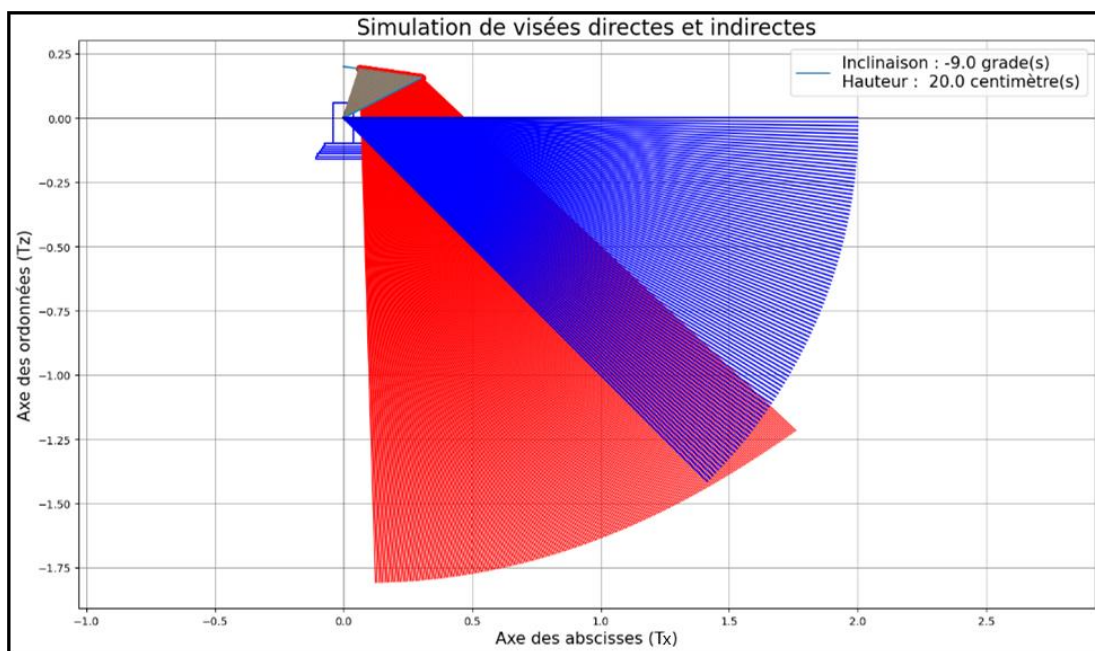


Figure 9 : Graphique simulant les deux types de visée en fonction de la position et de l'orientation du miroir

Dans la prochaine partie, nous déterminerons les paramètres du plan du miroir à l'aide de la méthode de la double visée. Cette approche nous permettra de définir les précisions associées aux paramètres et aux coordonnées. À travers différentes expériences détaillées, nous appliquerons les calculs théoriques à des situations pratiques, afin de conclure sur l'efficacité de cette méthode.

III Tests expérimentaux et analyse des résultats

Dans cette troisième partie, nous mettrons en œuvre les concepts et méthodes exposés précédemment. Les programmes que nous avons développés permettront non seulement de traiter les données acquises, mais aussi d'analyser la stabilité et la répétabilité des mesures effectuées avec nos montages mécaniques.

III.1 Première expérience

Le montage expérimental présenté à la Figure 5 a été mis en œuvre lors d'une expérience de plusieurs jours dans laquelle nous avons demandé à l'instrument de mesurer de manière automatique, à intervalles de temps réguliers, plusieurs prismes situés autour de lui, en direct et par l'intermédiaire du miroir.

Les objectifs de cette expérience sont d'abord de vérifier que les mesures indirectes sont réalisables. Effectivement, nous nous assurerons de la faisabilité du pointé automatique sur le prisme et de la prise des mesures angulaires et de distances. Nous souhaitons aussi quantifier la répétabilité des mesures indirectes par rapport aux mesures directes et relever d'éventuels systématismes apportés par l'utilisation du miroir. Puis, nous calculerons, par la méthode de double visée, les paramètres du plan, et quantifierons leur stabilité au cours du temps ainsi que leur précision associée. Enfin, nous vérifierons que les coordonnées obtenues par visées indirectes sont bien cohérentes avec celles obtenues en visées directes.

III.1.1 Description de la première expérience

Cette première expérience est réalisée sur une période de 48 heures, où, toutes les 5 minutes de manière automatique, le tachéomètre va réaliser une série de doubles visées sur chacun des prismes mis en place. Ces prismes sont au nombre de cinq ($P1$, $P2$, $P3$, $P4$ et $P5$), et sont répartis autour de la station T (Figure 10). Il s'agit de modèles de prismes différents de manière à potentiellement observer des différences au moment du traitement des données.

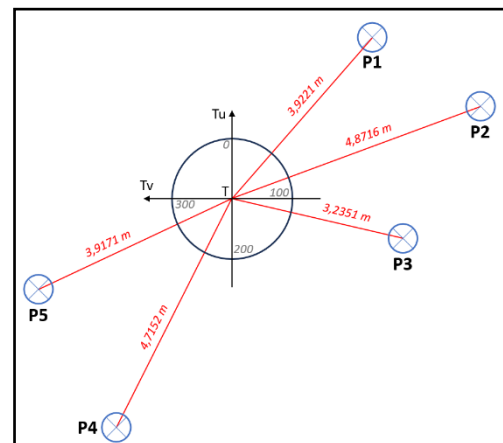


Figure 10 : Position des cinq prismes dans le repère (T, T_u, T_v) lors du premier test (Source personnelle)

Les valeurs angulaires varient entre 45 et 273 gon en lectures horizontales et entre 119 et 129 gon en angle zénithal pour les visées directes et entre 58 et 68 gon pour les

visées indirectes. Les coordonnées et les modèles respectifs de chaque prisme sont présentées dans le Tableau 1, dans le repère (T, T_u, T_v, T_w) :

	u (m)	v (m)	w (m)	Modèles
P1	2.7432	-2.3917	-1.4627	<i>Prisme Baechler 40 mm de diamètre</i>
P2	1.6121	-4.3587	-1.4619	<i>Prisme Bohnenstingl 1.5'' avec coin cube en verre 25 mm de diamètre</i>
P3	-0.6586	-2.8328	-1.4177	<i>Prisme Leica GPHIP</i>
P4	-3.9988	2.0157	-1.4770	<i>Prisme SMR 0.5''</i>
P5	-1.5461	3.2897	-1.4607	<i>Red Ring Reflector 1.5'' marque Leica/Hexagon</i>

Tableau 1 : Coordonnées et modèles respectifs des cinq prismes, dans le repère (T, T_u, T_v, T_w) , utilisés au cours de la première expérience

Pour permettre les visées indirectes, la position et l'orientation du miroir ont été spécifiquement déterminées. Comme représenté sur la Figure 11, le miroir a été positionné de cette manière sur le tachéomètre. Nous retrouvons également dans le Tableau 2 les configurations choisies pour le tachéomètre lors de l'automatisation de cette première expérience.

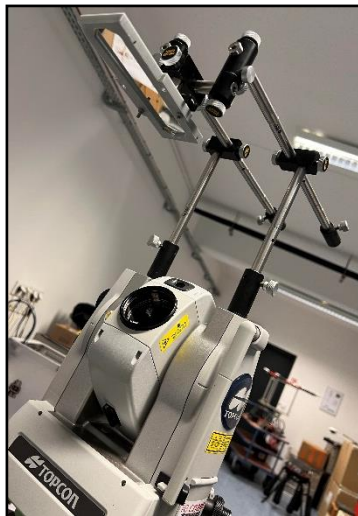


Figure 11 : Montage mécanique supportant le miroir rattaché au tachéomètre lors du premier test (Photo personnelle)

Tachéomètre Topcon MS1AXII	
Pointé	<i>Automatique (ATR)</i>
Mesure	<i>Simple face</i>
Réfraction	<i>0 ppm</i>
Constante prisme	<i>0 centimètre</i>
Mode mesure distance	<i>Standard Infrarouge</i>

Tableau 2 : Configurations du tachéomètre Topcon MS1AXII au moment de la première expérience

Le miroir a pour dimension une longueur de 12,1 centimètres, dans la direction de l'axe de visée, et une largeur de 3,6 centimètres.

III.1.2 Analyse des résultats

Un de nos premiers objectifs est de s'assurer de la robustesse du montage qui soutient le miroir. Si le miroir venait à se déplacer au cours du temps, les mesures angulaires varieraient en conséquence. Ainsi, en effectuant des mesures répétées sur un même point M ,

nous pourrons analyser son mouvement en observant l'évolution des valeurs angulaires. En calculant l'écart-type de ces valeurs angulaires tout au long de la campagne de mesures, nous aurons ainsi des informations sur la répétabilité des mesures.

L'instrument que nous utilisons est annoncé avec une précision, en double retournement, de 0.30 mgon . Comme nous travaillons en simple retournement, nous considérerons dans la suite une précision a priori sur les mesures angulaires de 0.42 mgon .

Pour commencer, nous représentons les valeurs angulaires à travers un graphique 2D où les angles zénithaux sont représentés sur l'axe des ordonnées et les angles horizontaux sur l'axe des abscisses. Chaque valeur angulaire a été soustraite par la moyenne des valeurs de sa série, afin de centrer les données autour de la position $(0,0)$. Comme représenté sur la Figure 12, nous obtenons un nuage de points avec, en bleu, les valeurs angulaires des visées directes et, en rouge, celles des visées indirectes. Les résultats obtenus, pour l'ensemble des 5 prismes utilisés, ont été représentés ici, afin de mettre en avant le fait que nous observons le même résultat sur chacun d'eux.

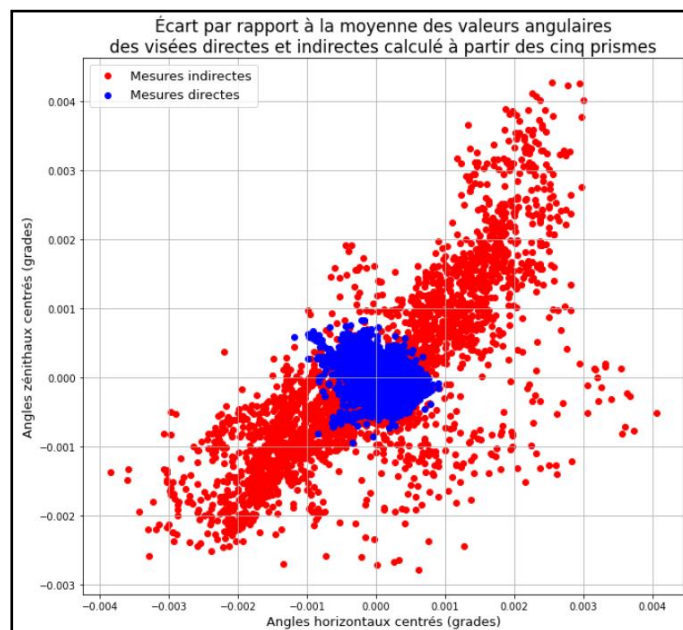


Figure 12 : Graphique représentant les écarts des valeurs angulaires par rapport à la moyenne pour chacun des cinq prismes

Nous remarquons à travers ce nuage de points que les valeurs des visées directes se situent à $\pm 0.1\text{ mgon}$ de la moyenne. La moyenne des écart-types sur chaque prisme ayant pour valeur, 0.26 mgon en angle zénithal et 0.29 mgon en horizontal, sont conformes aux précisions attendues pour l'appareil. Nous pouvons donc conclure que les valeurs angulaires des visées directes respectent la précision annoncée et pourront servir de référence pour les visées indirectes.

Concernant les valeurs des visées prises par l'intermédiaire du miroir, nous remarquons une dispersion plus importante. Effectivement, les valeurs forment une diagonale représentée par une variation simultanément négative puis positive des deux types de mesures angulaires, à l'exception de quelques points aberrants dont nous analyserons les causes plus tard. Au niveau des écarts-types, calculés de la même manière que précédemment, nous obtenons les valeurs de 1.30 mgon en zénithal et 1.38 mgon en horizontal. De plus, la moyenne absolue des écarts par rapport à la moyenne est de 1.04 mgon en zénithal et 1.17 mgon en horizontal. Nous constatons une dégradation des valeurs plus importante en horizontal qu'en zénithal, mais les deux mesures angulaires restent éloignées des précisions que nous avons en visées directes.

Intéressons-nous maintenant aux séries temporelles des mesures en visées directes et indirectes. La Figure 13 (respectivement Figure 14) contient, pour le prisme P1, l'évolution temporelle des valeurs des angles zénithaux (respectivement angles horizontaux). Ces résultats sont représentatifs de ceux obtenus avec les 5 prismes et chaque valeur angulaire a été soustraite par rapport à la première valeur de sa série afin de centrer les courbes d'évolution entre elles. La courbe bleue représente l'évolution des visées directes et la rouge, celle des visées indirectes.

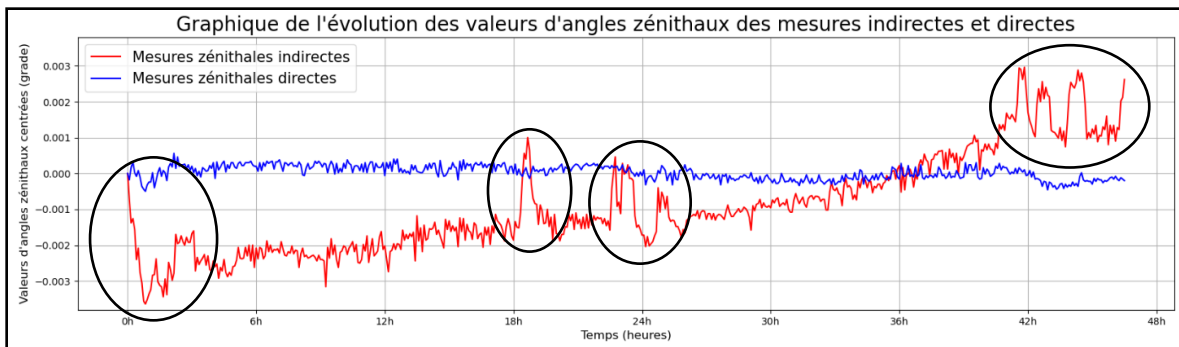


Figure 13 : Graphique représentant l'évolution des valeurs d'angles zénithaux des visées directes et indirectes durant 48 heures

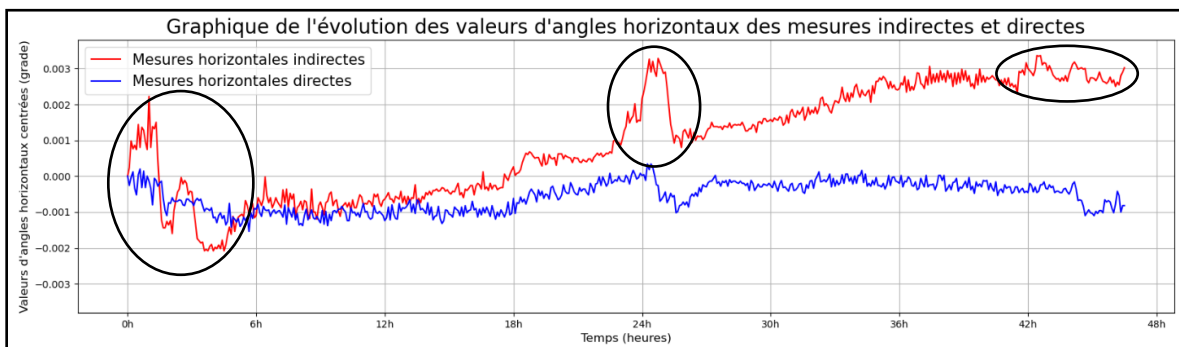


Figure 14 : Graphique représentant l'évolution des valeurs d'angles horizontaux des visées directes et indirectes durant 48 heures

Tout d'abord, par rapport aux courbes représentant l'évolution des visées directes, celle des valeurs d'angles zénithaux semble plus constante que celle des valeurs d'angles horizontaux. Cependant, lorsque nous calculons leur écart-type, 0.42 mgon en zénithal et 0.35 mgon en horizontal, les deux sont bien dans les spécifications constructeur.

Ensuite, concernant les visées indirectes de la Figure 13, nous observons une évolution globalement linéaire et croissante. Mais nous remarquons la présence de quelques pics, entourés en noir, témoins d'un changement brusque des valeurs. L'écart type calculé à partir de ces valeurs d'angles zénithaux est de 1.26 mgon , non conforme aux précisions attendues.

Du côté des valeurs d'angles horizontaux, nous observons qu'elles subissent ces mêmes pics de valeur aux mêmes périodes. Avec un écart-type non conforme de 1.34 mgon , l'évolution des valeurs semble également suivre une tendance linéaire et croissante.

La première conclusion à tirer de ces premiers résultats est que la répétabilité des visées indirectes n'est pas encore aussi bonne que celle des visées directes. Nous pouvons expliquer cette différence par la tendance linéaire et croissante qui semble montrer un mouvement du miroir, mais cela n'explique néanmoins pas l'origine de ces pics en début, milieu et fin de la campagne de mesures. Plusieurs raisons peuvent expliquer ces brusques pics de valeur :

La première est peut-être une influence provenant de la température interne de l'appareil. Nous disposons, au cours de cette expérience, de la prise de cette température dès qu'une visée est réalisée. Nous avons donc dix valeurs de température pour chacune des séries. La Figure 15 illustre l'évolution de cette température au cours du temps.

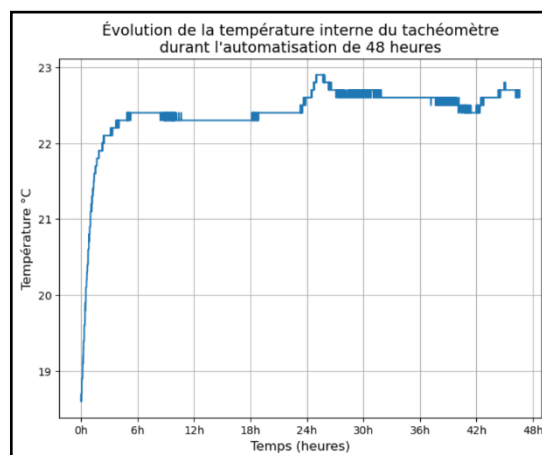


Figure 15 : Graphique représentant l'évolution de la température ($^{\circ}\text{C}$) interne du tachéomètre au cours de la première expérience

Nous observons ainsi une montée en température progressive entre 18.5 et $22.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ qui correspond à la température de fonctionnement après 5 heures de levé. Cette évolution semble corrélée avec les variations d'angles, principalement celles des angles zénithaux observés à cette même période. Le pic de température avoisinant les $23 \text{ }^{\circ}\text{C}$ peu après la 24^{ème} heure, semble lui aussi correspondre à celui observé sur la Figure 13 et la Figure 14.

La seconde hypothèse met en cause l'éclairage dans la pièce de l'expérience. En effet, juste au-dessus du pilier supportant le tachéomètre se trouve plusieurs lampes néon. Or, quand l'appareil réalise une visée à travers le miroir, sa lunette est orientée vers l'éclairage. Ce phénomène où l'éclairage et le miroir sont alignés avec l'axe de visée de l'appareil pourrait avoir un impact sur la mesure. Cette théorie est plausible, car les périodes où les pics de valeurs sont observés correspondent au moment où des personnes étaient présentes dans la salle d'expérience avec la lumière allumée. Et les moments où ces lumières sont éteintes (la nuit), correspondent sur la courbe à l'évolution linéaire constante.

III.2 Deuxième expérience sans lumière et analyse

Afin d'analyser au mieux l'évolution du mouvement du miroir, il a été essentiel de minimiser au maximum la présence de facteurs extérieurs à notre système.

III.2.1 Description de la deuxième expérience

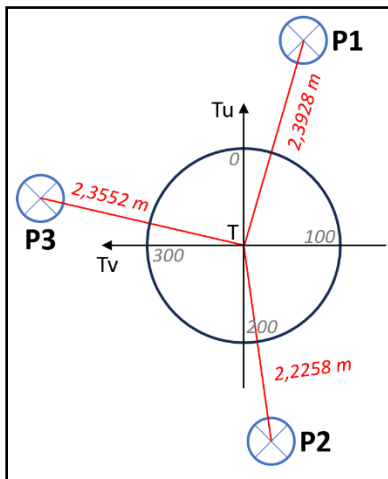


Figure 16 : Position des trois prismes dans le repère (T, T_u, T_v, T_w) lors du second test (Source personnelle)

Nous avons donc mis en place une deuxième expérience, et avons installé l'appareil dans une pièce que nous savions non fréquentée. Nous avons disposé trois prismes dans des directions opposées (Figure 16). Pendant quatre jours, le tachéomètre a effectué une série de mesures toutes les quatre minutes, comprenant chacune trois doubles visées. Le Tableau 3 recense les coordonnées, dans le repère (T, T_u, T_v, T_w) , et modèles des trois prismes utilisés lors de ce second test :

	u (m)	v (m)	w (m)	Modèles
P1	1.9845	-0.5743	-1.2072	Prisme Bohnenstingl 1.5'' avec coin cube en verre 25 mm de diamètre
P2	-1.8505	-0.2589	-1.2095	Prisme Bohnenstingl 1.5'' avec coin cube en verre 25 mm de diamètre
P3	0.4555	1.9710	-1.2060	Prisme Leica GPHIP

Tableau 3 : Coordonnées et modèles respectifs des trois prismes, dans le repère (T, T_u, T_v, T_w) , utilisés au cours de la deuxième expérience

Les configurations du tachéomètre sont les mêmes que celles énoncées dans le Tableau 2.

III.2.2 Analyse des résultats

Les séries temporelles des valeurs d'angles horizontaux et zénithaux sont représentés sur la Figure 17 et la Figure 18, où encore une fois les valeurs ont été soustraites par la moyenne de leur série. Nous représentons uniquement les résultats obtenus pour le prisme P1, représentatifs des résultats obtenus pour l'ensemble des prismes.

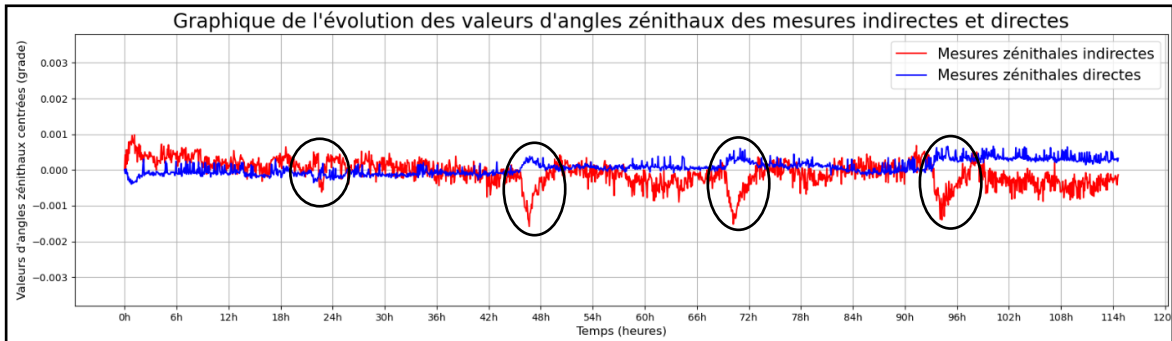


Figure 17 : Graphique représentant l'évolution des valeurs d'angles zénithaux des visées directes et indirectes durant quatre jours

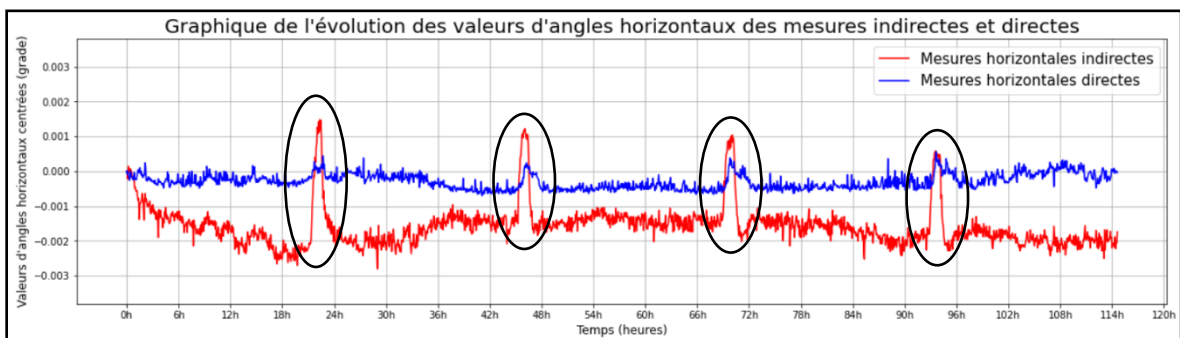


Figure 18 : Graphique représentant l'évolution des valeurs d'angles horizontaux des visées directes et indirectes durant quatre jours

Concernant l'évolution des valeurs d'angles zénithaux, nous observons que la courbe des visées indirectes est proche avec celle des visées directes, à quelques exceptions près. Cela se confirme avec un écart-type, calculé sur 1720 valeurs, de 0.19 mgon en visée directe et de 0.36 mgon en visée indirecte, toutes deux conformes à la précision a priori attendue pour cet appareil. Et pour les valeurs d'angles horizontaux, avec des écarts-types légèrement plus élevés : 0.22 mgon en visée directe et 0.59 mgon en visée indirecte qui ici n'est pas conforme à la précision attendue.

On observe, encore une fois, sur ces deux graphiques la présence récurrente de pics de valeurs entourés en noir, avec une périodicité apparente, se manifestant aux mêmes périodes. Bien visibles sur les mesures indirectes, et moins importantes sur celles directes, ces pics influencent les écarts types, rendant difficile une conclusion définitive sur la stabilité du miroir. À l'exception de ces variations périodiques, les mesures restent stables, confirmant notre hypothèse concernant l'influence de l'éclairage direct.

Un test potentiel pour atténuer l'impact de la lumière sur les mesures, consisterait à placer un cache au-dessus du tachéomètre de manière à limiter la lumière directe sur le miroir, et à allumer et éteindre périodiquement la lumière. Ainsi, en réalisant ce test en intérieur puis extérieur, il serait possible de visualiser, via les différents graphiques, l'efficacité d'une telle protection. Cependant, cette expérience n'a pas pu être réalisée par manque de temps, mais serait intéressante pour approfondir notre étude.

Regardons ensuite si ces pics périodiques ont un lien avec la température interne du tachéomètre, maintenant que nous savons que la lumière n'a pas pu influencer les courbes.

III.2.3 Influence de la température interne lors de la deuxième expérience

Lors de cette seconde expérience, nous avons aussi relevé les valeurs de température interne du tachéomètre. Valeurs que nous avons représentées sur un graphique (*Figure 19*), comprenant aussi les valeurs angulaires des visées indirectes de manière à pouvoir bien comparer le moment d'apparition ainsi que la durée de ces pics :

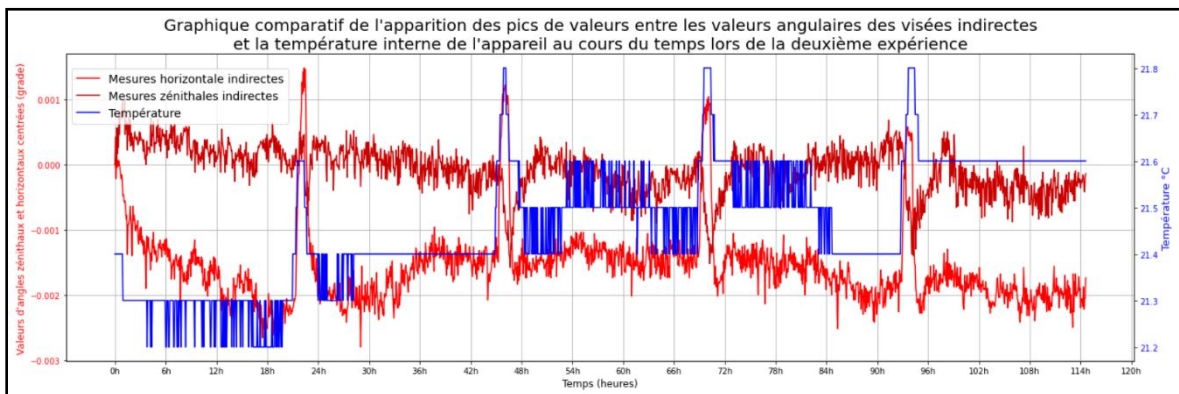


Figure 19 : Graphique rassemblant l'évolution des valeurs angulaires des visées indirectes et l'évolution de la température lors de la deuxième expérience

Si nous calculons le coefficient de corrélation entre les valeurs de température et les angles horizontaux, nous obtenons un coefficient de 0.31 soit 31%. Cela indique une faible corrélation globale entre ces deux séries de valeurs. Cependant, visuellement, nous constatons une forte corrélation, notamment au niveau des pics. Aucun facteur externe n'expliquant ces variations, nous supposons qu'elles sont directement liées à l'appareil, qui reste allumé plusieurs jours sans se mettre en veille. Ces pics seraient alors des artefacts causés par un phénomène interne, faisant périodiquement varier sa température interne.

Étant donné que nous nous intéressons pour l'instant à la stabilité de notre montage, nous avons supprimé manuellement les mesures relevées pendant ces pics de température afin d'obtenir deux nouveaux graphiques d'évolution des valeurs angulaires.

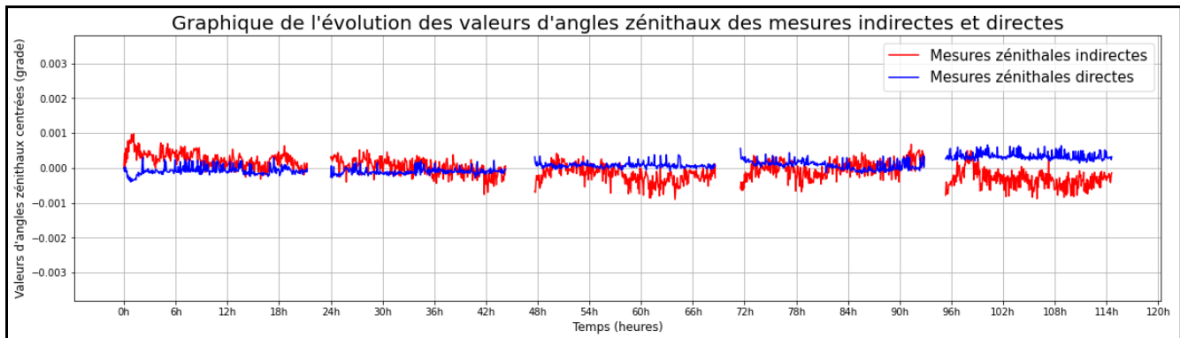


Figure 20 : Graphique représentant l'évolution des valeurs d'angles zénithaux des visées directes et indirectes durant quatre jours après suppression des pics de valeurs

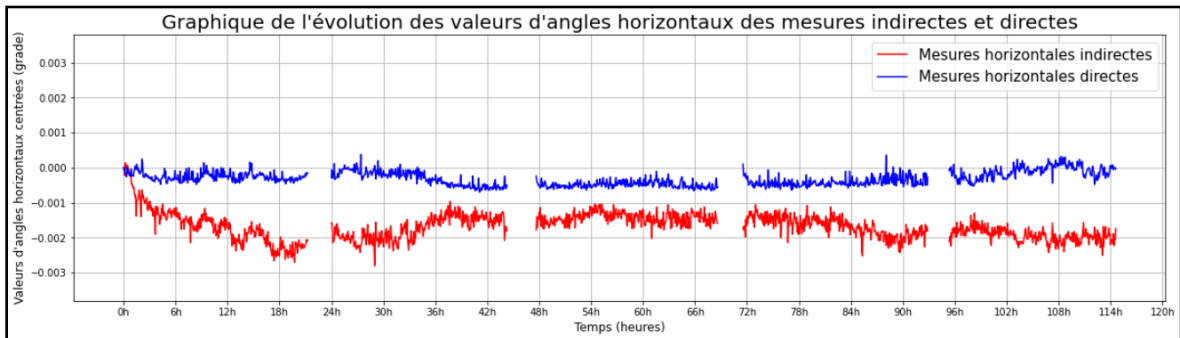


Figure 21 : Graphique représentant l'évolution des valeurs d'angles horizontaux des visées directes et indirectes durant quatre jours après suppression des pics de valeurs

A partir de ces nouvelles séries temporelles (*Figure 20*, *Figure 21*), nous calculons les nouveaux écarts-types (*Tableau 4*) et obtenons finalement des valeurs en adéquation avec les précisions attendues sur cet instrument.

	Visées directes	Visées indirectes
Angles zénithaux (mgon)	0.18	0.31
Angles horizontaux (mgon)	0.20	0.38

Tableau 4 : Récapitulatif des écarts-types finaux après traitement des mesures de la deuxième expérience

Finalement, en réalisant ce test qui se concentrait uniquement sur l'analyse de la stabilité du montage mécanique, nous avons pu démontrer que celui-ci restait suffisamment immobile au cours du temps pour garantir des mesures conformes. Cette deuxième expérience nous a donc permis de prouver qu'un montage stable dans le temps permet de répondre efficacement aux problématiques des auscultations topographiques mais qu'il ne faut cependant pas négliger les facteurs extérieurs.

III.3 Détermination des paramètres et reconstruction des coordonnées

Nous savons que le montage mécanique de notre système garantit une stabilité permettant de réaliser des visées conformes. Désormais, nous souhaitons mettre en application la méthode de la double visée introduite à la partie II.2 de manière à étalonner

les paramètres du plan du miroir ainsi que leur précision associée. Puis, à partir de ces derniers nous reconstruirons les coordonnées de points comme expliqué à la partie I.2.

Les valeurs des calculs qui vont suivre proviennent de la deuxième expérience après avoir éliminé les pics liés à l'instrument. Au total, nous avons 1524 séries de mesures, sur une durée de quatre jours.

III.3.1 Étalonnage des paramètres du plan du miroir et précisions associées

A l'aide des moindres carrés implicites, nous allons pouvoir déterminer les paramètres a , b , c et d dans le repère (T, T_x, T_y, T_z) , à partir de plusieurs doubles visées. Nous avons démontré précédemment que les visées directes et indirectes offraient une très bonne répétabilité. En calculant les valeurs des paramètres pour chaque série de trois doubles visées sur les trois prismes, nous devrions obtenir des valeurs similaires à chaque série. En plus des paramètres, nous déterminerons également leur précision associée ainsi que l'estimateur du facteur unitaire de variance \hat{s}_{0I}^2 , un indicateur de qualité. Cet estimateur devra avoir une valeur proche de 1 pour attester d'une bonne précision (Durand, 2018) (Alliez-Dron, 2016). Calculons ces éléments sur la première série afin de se faire une idée des valeurs que nous obtiendrons :

	Valeurs (m)	Précisions (mm)	\hat{s}_{0I}^2
a	-0.064775	0.277	20.93
b	0.001832	0.022	
c	-0.997929	0.780	
d	0.127442	0.387	

Tableau 5 : Valeurs de l'estimateur du facteur unitaire de variance et des précisions associées aux paramètres du plan du miroir calculés dans le repère (T, T_x, T_y, T_z) , à partir de la première série de la deuxième expérience

D'après le Tableau 5, la valeur de l'estimateur du facteur unitaire de variance est loin du résultat attendu. Et cela se répète au cours des séries avec des valeurs d'indicateur variant de 5 à 60. Ces valeurs ne sont donc pas en adéquation avec les résultats des tests de répétabilités. Ainsi, nous pouvons en déduire, grâce à cet indicateur de qualité, que les paramètres estimés du plan du miroir ne sont potentiellement pas cohérents avec les mesures réalisées en direct et indirect sur les différents prismes. Nous allons donc calculer les paramètres du plan du miroir pour chacun des trois prismes de manière à connaître leurs valeurs moyennes et écarts-types ainsi que leur précision associée. Le tableau suivant

récapitule donc les valeurs moyennes et écarts-types obtenus pour chacun des paramètres (i) et précisions associées (σ_i) sur les trois prismes :

	Prisme 1		Prisme 2		Prisme 3	
	Moyenne (m)	Écart-type (mm)	Moyenne (m)	Écart-type (mm)	Moyenne (m)	Écart-type (mm)
a	-0.063874	0.035	-0.063513	0.041	-0.063828	0.036
b	0.001880	0.007	0.001838	0.014	0.001867	0.007
c	-0.997956	0.002	-0.997979	0.003	-0.997959	0.002
d	0.126206	0.098	0.125928	0.107	0.125944	0.096
	Moyenne (mm)		Moyenne (mm)		Moyenne (mm)	
σ_a	0.515		0.494		0.512	
σ_b	0.008		0.008		0.009	
σ_c	0.288		0.308		0.292	
σ_d	0.959		0.849		0.935	

Tableau 6 : Moyennes et écarts-types des valeurs et précisions des paramètres dans le repère (T, T_x, T_y, T_z) calculés pour chacun prisme à partir de la deuxième expérience

D'après les valeurs présentées dans le Tableau 6, nous remarquons que les écarts-types des prismes 1 et 3 sont similaires mais aussi plus petits que le prisme 2. Les moyennes des paramètres de ces deux prismes semblent aussi proches contrairement au prisme 2. Nous pouvons en déduire que la répétabilité des mesures a été moins bonne sur le prisme 2, cela a donc générés des paramètres moins cohérents comparés aux prismes 1 et 3. Au niveau des précisions associées à chaque paramètre, le prisme 2 semble ici aussi obtenir des résultats moins bons. Nous remarquons cependant que pour chacun des prismes c'est le paramètre b , qui correspond à la direction de l'axe T_y , qui a la meilleure précision, alors que pour les trois autres paramètres nous obtenons une précision au dixième de millimètre.

Concentrons-nous désormais sur l'évolution de la valeur des paramètres au cours du temps. Nous avons pu voir dans le Tableau 6 que les écarts-types des paramètres et de leur précision associée sont très proches entre chaque prisme à 0.1 millimètre près, nous pouvons donc supposer que les courbes auront les mêmes allures sur les différents graphiques. C'est pourquoi nous ne représenterons que ceux du prisme 1 qui servira de référence aux deux autres :

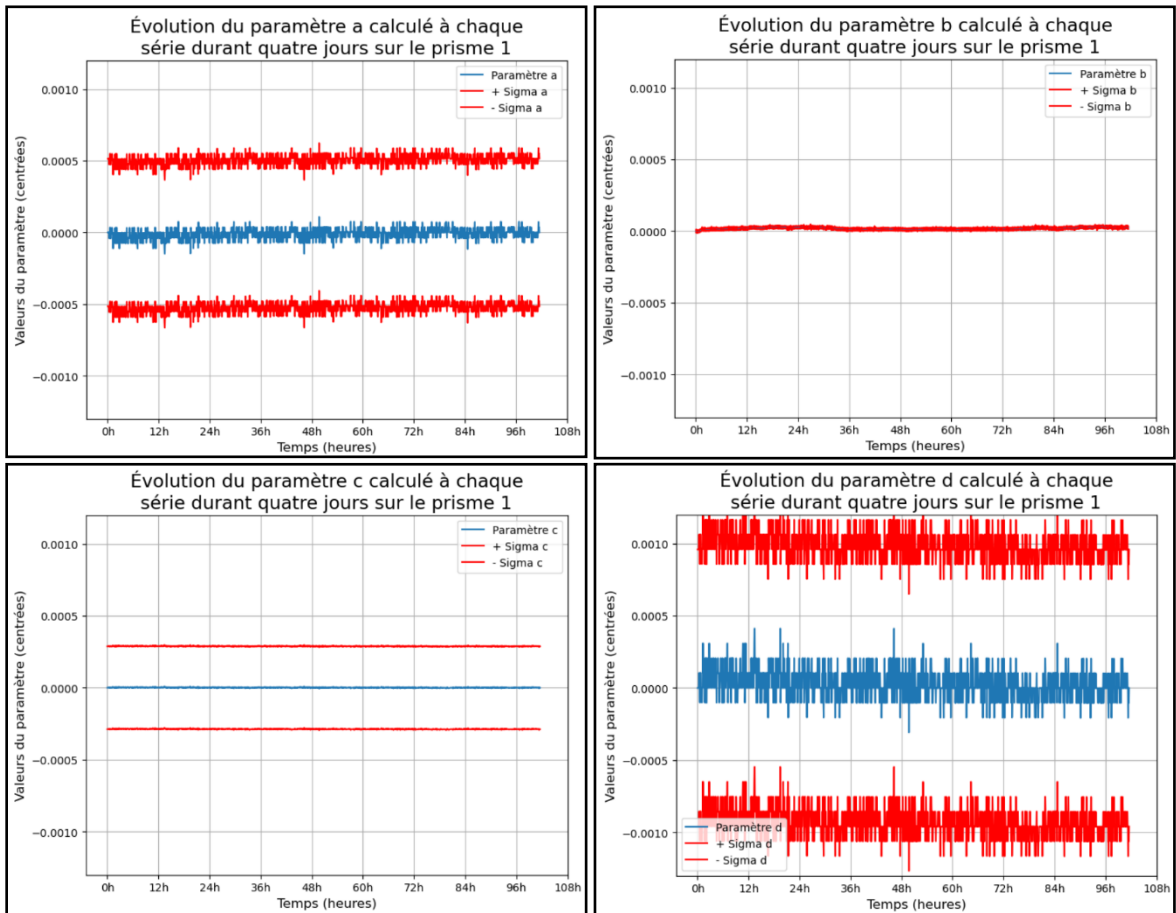


Figure 22 : Graphiques d'évolution des quatre paramètres du plan du miroir centrés et calculés à partir de chaque série sur le prisme 1 avec $\pm\sigma_i$

Sur la Figure 22, nous retrouvons bien les valeurs fournies par le Tableau 6, notamment au niveau des écarts-types. En effet, les paramètres b et c ont la variation la plus faible contrairement au paramètre a et surtout à d .

III.3.2 Écart par rapport aux coordonnées vraies

Nous avons constaté dans la partie précédente que les valeurs des paramètres variaient à 0.1 millimètre près, en fonction des prismes utilisés comme référence. Pour comprendre l'origine de cet écart, nous allons calculer la différence de position entre les coordonnées déterminées par la visée directe et celles reconstruites par visée indirecte. Cet écart sera mesuré pour chaque série et pour chacun des trois prismes, en utilisant les paramètres du plan du miroir figurant dans le Tableau 5.

Les résultats présentés sur la Figure 23 révèlent deux points essentiels. Premièrement, l'écart en position 3D pour chaque prisme reste globalement linéaire tout au long de l'expérience. En calculant l'écart-type de ces écarts pour chaque prisme, nous obtenons une moyenne de 0.05 millimètre, ce qui indique une très bonne

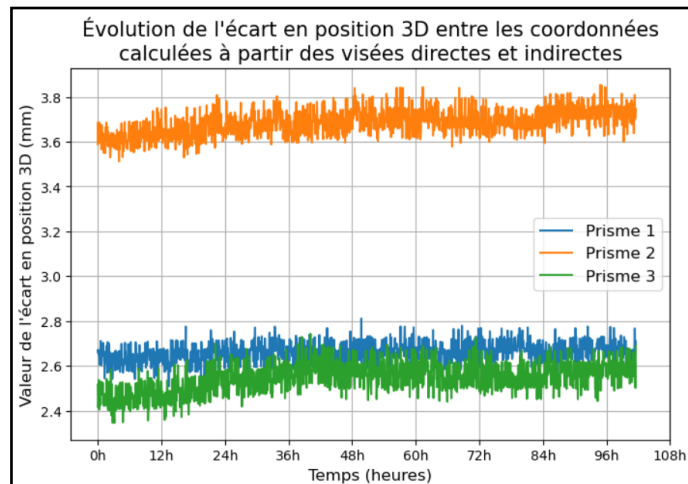


Figure 23 : Graphique représentant l'évolution de l'écart en position 3D calculé à partir des visées directes et indirectes

répétabilité des mesures, bien que l'exactitude par rapport aux coordonnées vraies soit imparfaite. Deuxièmement, cet écart de distance, ou "biais", varie selon les prismes. Cependant, comme nous avons pu le voir dans le Tableau 3, cela ne dépend pas du modèle de ces derniers. On remarque que les valeurs des biais sont plus faibles et proches entre elles pour les prismes 1 et 3 que pour le prisme 2, ce qui est en adéquation avec ce qui a été dit lorsque nous commentons les valeurs du Tableau 6. On peut alors supposer que plus la valeur du biais est importante (ici $\approx 3,7$ millimètres pour le prisme 3), plus les valeurs des paramètres seront faussées.

Maintenant que nous avons identifié l'existence d'un biais lors de la reconstruction des coordonnées à partir des visées indirectes, il nous faut comprendre son origine et aussi savoir si nous pouvons le corriger.

III.4 Décalage par rapport au centre du prisme

Durant nos multiples tests, nous avons identifié un défaut lors de la visée indirecte en direction du prisme. Lorsque l'axe de visée d'un tachéomètre est orienté vers un prisme, il effectue un pointé automatique pour se positionner de manière autonome sur le centre du prisme. Cependant, en observant à travers la lunette de l'appareil, nous avons constaté qu'en visée indirecte, le tachéomètre se positionne bien sur le prisme, mais pas exactement en son centre. Les analyses de répétabilité effectuées en partie III.2, ainsi que les écarts-types calculés au Tableau 6 montrent que ce décalage par rapport au centre du prisme est constant et propre à chaque position de prisme tout au long de la campagne de mesures. Comme illustré clairement sur la Figure 24, nous avons visé un prisme en direct puis indirect, en orientant ce prisme perpendiculairement à chaque visée. Cela signifie que nous avons aligné le prisme de manière à ce que l'axe de visée impacte la surface du prisme

perpendiculairement, démontrant ainsi qu'il ne s'agit pas d'une erreur due à l'orientation du prisme.

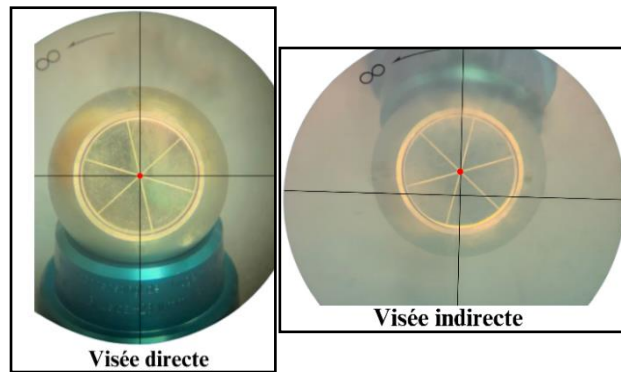


Figure 24 : Centrage automatique sur un prisme lors d'une visée directe et indirecte (Source personnelle)

Tout d'abord, nous constatons que le centrage automatique de la visée directe fonctionne correctement, conformément aux attentes d'un tachéomètre. En revanche, concernant la visée indirecte, nous observons que le prisme apparaît à l'envers car il s'agit de l'image du prisme à travers le miroir. En effet, le miroir étant positionné au-dessus de l'appareil, l'image de ce que le tachéomètre pointera sera inversée. Il est donc probable que l'erreur de centrage provienne de ce phénomène d'inversion du prisme. Cependant, lorsque nous avons essayé avec un miroir fixe, à deux mètres, face au tachéomètre et orienté de manière à ce que la visée pointe un prisme, l'image du prisme est aussi inversée mais cette fois-ci de gauche à droite. Or, malgré cette inversion de l'image du prisme, le centrage est parfaitement au centre du prisme. Nos hypothèses sont donc les suivantes : est ce que le sens d'inversion de l'image, la distance entre le miroir et le tachéomètre ainsi que le fait que le miroir soit rattaché à l'appareil ont un impact sur le centrage automatique ?

Dans la partie II.2, nous avons expliqué qu'il était nécessaire de viser exactement le même point M en visée directe et indirecte pour étalonner les paramètres du plan du miroir. Or, nous constatons ici que ce n'est pas le même point qui est visé lors de la double visée, ce qui fausse les valeurs des paramètres ainsi que leur précision associée. De plus, ce biais est propre à chaque position de prisme, indépendamment de leur modèle, et varie en fonction de l'orientation et de la distance du prisme, comme observé lors de nos tests. Cette variation explique la valeur élevée de l'estimateur du facteur unitaire de variance du Tableau 5, due à l'étalonnage de valeurs de paramètres différentes entre chaque prisme.

Ce biais est un facteur non négligeable qui se doit d'être corrigé afin d'assurer une bonne calibration des paramètres pour déterminer la position exacte de point à travers le miroir. Cependant, dans ce TFE, nous nous sommes particulièrement concentrés sur la partie

concernant le montage mécanique. Nous voulions nous assurer que, sur de longues périodes similaires à celles rencontrées en auscultation, le miroir soit suffisamment stable pour garantir la fiabilité des mesures. La question du décalage par rapport au centre du prisme mérite donc d'être approfondie lors de futures recherches sur ce sujet.

Nous avons mentionné en début de partie III que l'objectif était de déterminer la répétabilité des mesures, en analysant les différents écarts-types, ainsi que les précisions associées aux paramètres et aux coordonnées des points reconstruits à partir des visées indirectes. Cependant, nous avons constaté qu'il est impossible de déterminer correctement ces coordonnées de points indirects, et donc les précisions associées, en raison de l'erreur de centrage lors des visées indirectes. En supposant que le problème de centrage soit résolu et en tenant compte des résultats satisfaisants de répétabilité, nous pouvons supposer que les précisions associées aux coordonnées calculées à partir des visées indirectes seraient comparables à celles obtenues avec les visées directes. Cependant, il est encore impossible pour nous de garantir cette hypothèse.

Conclusion

À travers ce mémoire de fin d'études, nous avons réalisé de nombreux calculs théoriques et tests pratiques afin de développer une solution pour effectuer des visées indirectes avec un miroir rattaché au tachéomètre. L'objectif était de garantir, dans le contexte de l'auscultation topographique, une précision comparable à celle des visées directes habituelles.

Après plusieurs essais de montage mécanique, nous avons conçu un système stable assurant une répétabilité proche de celle des visées directes. Les précisions associées aux paramètres du plan du miroir témoignent également de la fiabilité de notre dispositif. En parallèle, nous proposons de nouveaux montages utilisant des pièces imprimées en 3D, légères et conçues pour maintenir parfaitement le miroir, servant de prototypes visant une précision optimale.

Nous nous étions fixés comme objectif un écart maximal de 0.1 *millimètre* entre les coordonnées calculées via visées directes et indirectes de manière à être le plus conforme possible au contexte de l'auscultation topographique. La répétabilité des mesures en visée indirecte a bel et bien respecté cette condition comme nous avons pu le voir lors de la deuxième expérience. Cependant, un biais persiste entre le point d'impact de la visée indirecte et le centre du prisme, nécessitant des recherches supplémentaires pour le comprendre et l'éliminer.

Durant cette étude, plusieurs idées intéressantes ont émergé, mais n'ont pas pu être approfondies. Parmi celles-ci, une méthode envisageant des visées indirectes par double retournement avec des miroirs de chaque côté du tachéomètre. Mais aussi l'idée d'installer deux miroirs dans l'axe de visée de l'appareil, chacun incliné différemment pour augmenter le champ de visibilité. Nous avons aussi envisagé un système avec un miroir motorisé dont l'inclinaison serait intégrée aux paramètres du plan, permettant une orientation précise des visées indirectes.

Finalement, ce sujet de TFE a été pour moi l'occasion de mettre en pratique la pluridisciplinarité des connaissances acquises à l'ESGT. Développer une méthode novatrice d'auscultation, impliquant un miroir rattaché au tachéomètre, jamais imaginée auparavant, a été une opportunité de recherche unique. De plus, travailler aux côtés d'enseignants-chercheurs durant ces cinq mois a été une expérience extrêmement enrichissante m'apportant rigueur et prise de recul pour intégrer au mieux le milieu professionnel avec compétence.

Bibliographie

- Alajouanine, Yves. 1984.** Contrôle de la Planéité d'un Marbre et de la Rectitude d'une Glissière par la Méthode d'Autocollimation. *aft*. 1984, p. 41.
- Alliez-Dron, Sébastien. 2016.** *Étude expérimentale de l'apport de la combinaison de mesures GNSS et topométriques*. Le Mans : HAL, 2016. dumas-01658208.
- Ayache, B et Garnier, C. 2020.** *Modélisation 3D des falaises de Saint-Jean-de-Luz : acquisition, analyse "qualité" des données et analyse diachronique entre 2017 et 2019*. 2020. pp. 21-23. BRGM/RP-69865-FR.
- Bouhouche, Nadia et Gourine, Bachir. 2018.** Auscultation par GPS d'un barrage en enrochement : modélisation en 3D du comportement du barrage par l'utilisation du logiciel ANSYS. XYZ. 1er trimestre, 2018, N°154.
- De Marçay, François.** Droites et plans dans l'espace. Orsay, France : Département de Mathématiques d'Orsay, Université Paris-Saclay.
- Durand, Stéphane. 2018.** Génération d'observations pour la validation ou la comparaison de logiciels d'ajustement de mesures par moindres carrés. XYZ. 2018, 157.
- Engo, Nana. 2017.** *Éléments d'optique géométrique matricielle*. s.l. : The Publisher, 2017.
- Ifstar et Cerema. 2016.** *Surveillance des pentes et des falaises instables, Conception et mise en oeuvre des dispositifs de mesure - Acquisition et traitement de l'information*. Marne-la-Vallée : s.n., 2016. ISBN 978-2-85782-710-8.
- Nallet, Thomas. 2010.** *Utilisation des tachéomètres automatiques pour le suivi d'ouvrage : application à des géométries complexes*. Londres : Sol Data, 2010.
- Scholtes, Philippe et LEROY , Raphaël . 2012.** *Concept de l'auscultation topométrique, de la théorie à la pratique*. Chambéry : s.n., 2012.
- Topcon. 2014.** *Fiche technique MS05AXII / MS1AXII Series*. 2014.

Table des figures

Figure 1 : Schéma explicatif des visées indirectes via un miroir rattaché au tachéomètre	8
Figure 2 : Schéma d'un plan P et de sa normale n dans le repère (T, Tx, Ty, Tz)	9
Figure 3 : Schéma explicatif des paramètres du plan P dans le repère (T, Tx, Ty, Tz)	10
Figure 4 : Lien entre les repères (T, Tx, Ty, Tz) et (T, Tu, Tv, Tw)	10
Figure 5 : Montage mécanique supportant le miroir fixé sur le Topcon MS1AXII.....	12
Figure 6 : Schéma de l'application de la première loi de Snell Descartes dans le contexte de notre étude	13
Figure 7 : Principe de symétrie entre deux points par rapport à un plan.....	13
Figure 8 : Schéma illustrant la double visée sur la cible M et son image M'	19
Figure 9 : Graphique simulant les deux types de visée en fonction de la position et orientation du miroir	22
Figure 10 : Position des cinq prismes dans le repère (T, Tu, Tv) lors du premier test.....	23
Figure 11 : Montage mécanique supportant le miroir rattaché au tachéomètre lors du premier test	24
Figure 12 : Graphique représentant les écarts des valeurs angulaires par rapport à la moyenne pour chacun des cinq prismes	25
Figure 13 : Graphique représentant l'évolution des valeurs d'angles zénithaux des visées directes et indirectes durant 48 heures	26
Figure 14 : Graphique représentant l'évolution des valeurs d'angles horizontaux des visées directes et indirectes durant 48 heures	26
Figure 15 : Graphique représentant l'évolution de la température ($^{\circ}\text{C}$) interne du tachéomètre au cours de la première expérience	27
Figure 16 : Position des trois prismes dans le repère (T, Tu, Tv) lors du second test	28
Figure 17 : Graphique représentant l'évolution des valeurs d'angles zénithaux des visées directes et indirectes durant quatre jours	29
Figure 18 : Graphique représentant l'évolution des valeurs d'angles horizontaux des visées directes et indirectes durant quatre jours.....	29
Figure 19 : Graphique rassemblant l'évolution des valeurs angulaires des visées indirectes et l'évolution de la température lors de la deuxième expérience.....	30
Figure 20 : Graphique représentant l'évolution des valeurs d'angles zénithaux des visées directes et indirectes durant quatre jours après suppression des pics de valeurs	31
Figure 21 : Graphique représentant l'évolution des valeurs d'angles horizontaux des visées directes et indirectes durant quatre jours après suppression des pics de valeurs	31
Figure 22 : Graphiques d'évolution des quatre paramètres du plan du miroir centrés et calculés à partir de chaque série sur le prisme 1 avec $\pm\sigma_i$	34
Figure 23 : Graphique représentant l'évolution de l'écart en position 3D calculé à partir des visées directes et indirectes	35
Figure 24 : Centrage automatique sur un prisme lors d'une visée directe et indirecte	36

Table des tableaux

Tableau 1 : Coordonnées et modèles respectifs des cinq prismes, dans le repère (T, Tu, Tv, Tw) , utilisés au cours de la première expérience	24
Tableau 2 : Configurations du tachéomètre Topcon MS1AXII au moment de la première expérience.....	24
Tableau 3 : Coordonnées et modèles respectifs des trois prismes, dans le repère (T, Tu, Tv, Tw) , utilisés au cours de la deuxième expérience.....	28
Tableau 4 : Récapitulatif des écarts-types finaux après traitement des mesures de la deuxième expérience.....	31
Tableau 5 : Valeurs de l'estimateur du facteur unitaire de variance et des précisions associées aux paramètres du plan du miroir calculés dans le repère (T, Tx, Ty, Tz) , à partir de la première série de la deuxième expérience	32
Tableau 6 : Moyennes et écarts-types des valeurs et précisions des paramètres dans le repère (T, Tx, Ty, Tz) calculés pour chacun prisme à partir de la deuxième expérience	33

Étude de l'utilisation de miroirs pour réaliser des visées indirectes dans un contexte de suivi automatisé continu par stations totales.

Mémoire d'Ingénieur C.N.A.M., Le Mans 2024

RESUME

L'utilisation d'un miroir rattaché au sommet d'un tachéomètre et orienté de manière à ce que les visées, à travers ce dernier, puissent atteindre des cibles au nadir normalement inatteignables. Développer ce système pour le domaine de l'auscultation automatisée, où des stations totales équipées du miroir, seraient mises en place au sommet des infrastructures à surveiller. C'est dans ce contexte, que le laboratoire Géomatique et Foncier de l'ESGT s'est interrogé sur l'efficacité et la précision qu'aurait ce nouveau système. Ainsi, cette méthode innovante d'acquisition de mesures par l'intermédiaire d'un miroir va nécessiter de développer les calculs nécessaires à la détermination des paramètres du plan du miroir ainsi que les précisions associées. Puis, à partir de ces paramètres étalonnés dans un référentiel spécifique, il est alors possible de reconstruire les coordonnées de cibles. Les objectifs en termes de répétabilité ont bien été atteints (répétabilité comparable entre visées directes et visées indirectes). Cependant, en termes d'exactitude, nous avons constaté un problème lors des visées indirectes (mauvais centrage au centre du prisme de la part du tachéomètre) dont l'origine n'a pas pu encore être déterminée. Ce mémoire décrit donc les étapes de réflexion et de mise au point de cette nouvelle approche, avec encore un certain nombre de points à éclaircir avant son éventuelle mise en pratique.

Mots clés : Auscultation automatisée, miroir, tachéomètre, précision, visée indirecte, moindres carrés

SUMMARY

The use of a mirror attached to the top of a tacheometer, oriented to enable sightings through it to reach normally inaccessible nadir targets. This system is being developed for automated auscultation, where total stations equipped with the mirror would be installed atop the infrastructures to monitored. In this context, the Géomatique et Foncier laboratory of ESGT has investigated the effectiveness and precision of this new system. Consequently, this innovative method of measurement acquisition through a mirror will require the development of calculations necessary to determine the mirror plane parameters and their associated accuracies. Once these parameters are calibrated within a specific reference frame, it becomes possible to reconstruct the coordinates of the targets. The objectives in terms of repeatability have been achieved (with comparable repeatability between direct and indirect sightings). However, in terms of precision, an issue was observed during indirect sightings (poor centering of the prism by the tacheometer), the cause of which has yet to be determined. This thesis, therefore, describes the steps of conceptualizing and developing this new approach, with several points still to be clarified before its potential practical implementation.

Key words : Automated auscultation, mirror, tacheometer, accuracy, indirect sighting, least-squares