

Stations totales : mieux que les spécifications techniques ?

Bachelor of Science HES-SO en Géomatique

Travail de Bachelor	de Timon Januth
Examineurs	M. Vincent Barras et M. David Marty
Sujet proposé par	Institut G2C Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud (HEIG-VD) En collaboration avec Geosat SA
Date	Juillet 2015

Avant-propos

Ce travail de Bachelor a été rédigé dans le cadre du sixième semestre de la filière « Géomatique et gestion du territoire » à la Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du canton de Vaud.

Il permet de travailler sur une problématique d'ingénierie sur une durée de 10 semaines. Le sujet concerne un domaine particulier de la géomatique, la métrologie. Ce document s'adresse à des ingénieurs et à des spécialistes de la géomatique.

A cette occasion je tiens à remercier les personnes suivantes :

- Monsieur Vincent Barras, professeur à l'HEIG, pour la proposition du sujet, le suivi permanent et l'organisation des visites.
- Monsieur David Marty, ingénieur en Géomatique chez Geosat SA, pour la proposition du sujet et ses conseils lors du rendu intermédiaire.
- Monsieur Guillaume Chapotte, assistant à l'HEIG, pour toutes les explications des instruments et logiciels de traitement des données, ainsi que le suivi du travail.
- Ma famille, ma copine et mon entourage pour leur soutien, en particulier la relecture de ce document et de nombreux conseils.

Yverdon-les-Bains, le 31 juillet 2015

Timon Januth

Résumé

L'objectif est de calibrer le Leica TM50 à l'aide de l'Absolute Tracker AT401. En comparant les spécifications techniques de ces deux instruments, il existe une grande différence de précision du distancemètre de ces deux appareils. Le TM50 sera ajusté au début et à la fin de la période de tests, afin d'analyser l'évolution des erreurs d'ajustement. Un instrument ne peut pas être plus exact que sa résolution, qui est égale au plus petit mouvement détectable. Des mesures expérimentales seront effectuées pour pouvoir définir cette résolution.

La partie centrale du travail consiste à réaliser des mesures simultanées avec les deux instruments, qui permettront de définir les valeurs de calibration. D'abord, les modes de pilotages et de mesures doivent être choisis. Ensuite plusieurs tests sont prévus afin de prouver la possibilité de faire des mesures avec les deux instruments depuis la même embase. L'intérêt de stationner les deux appareils au même endroit est que les mesures brutes puissent être comparées entre elles sans traitement particulier.

Puis une démarche sera proposée pour calibrer le distancemètre du TM50 à l'aide de l'AT401. Cette calibration sera adaptée à des mesures dans un environnement intérieur à 50 m x 50 m. D'autres mesures suivront pour calibrer l'ATR. Il pourra être constaté que les erreurs sont constantes.

Une fois les valeurs de calibration déterminées, il s'agira d'évaluer leur stabilité dans le temps. Des simulations d'utilisation du TM50 sont effectuées dans des conditions météorologiques extrêmes. Cela permet d'analyser si des variations sont constatées. Puis, des visées inclinées seront réalisées, pour tester si le modèle de calibration est toujours applicable. En métrologie, les visées inclinées sont fréquentes selon le type d'objet mesuré.

Le dernier chapitre est dédié à une réflexion sur les facteurs qui causent des dilatations d'objets, une source d'erreur à laquelle un ingénieur en métrologie est souvent confronté. Finalement des mesures de points stables à des jours différents seront comparées, afin de définir des mouvements détectables par cette station totale.

I. Table des matières

1. Introduction	1
1.1. Cahier des charges	1
1.2. Point de départ	2
2. Rappels de bases théoriques	3
2.1. Mesure électronique de la distance (MED).....	3
2.2. Méthodes de détermination utilisées	3
2.3. Erreurs.....	4
2.4. Notions d'ajustement et de calibration.....	7
2.5. Exactitude d'appareil.....	8
3. Instruments.....	9
3.1. Normes ISO	9
3.2. Leica AT401	10
3.3. Leica TM50	12
3.4. Comparaison des précisions (selon constructeur)	14
4. Méthodologie des tests	15
5. Accessoires	16
5.1. Supports	17
5.2. Prismes GPH1P.....	19
6. Mesures TM50	20
6.1. Ajustement.....	20
6.2. Résolution	21
6.3. Mesures de séries.....	25
7. Calibration des instruments	26
7.1. Processus.....	26
7.2. Mode de pilotage et de mesure	27
7.3. Contrôle du décalage de centrage	29
7.4. Calibration du distancemètre	30

7.5.	Calibration de l'ATR	33
7.6.	Valeurs de calibration.....	37
8.	Contrôle du modèle de correction	38
8.1.	Stabilité des valeurs de calibration.....	38
8.2.	Visées inclinées	40
8.3.	Précision réelle du TM50 calibré	42
9.	Contrôle d'une pièce industrielle.....	44
9.1.	Sources d'erreurs	44
9.2.	Contrôle des points stables	46
10.	Perspective	48
11.	Conclusion	49
V.	Bibliographie	50
VI.	Annexes	52

II. Liste des abréviations

ATR	Automatic Target Recognition (Reconnaissance automatique de cible)
EDM (MED)	Electronic Distance Measurement (Mesure électronique de la distance)
MPE	Maximum permissible Error (erreur maximale tolérée)
PPM	Partie par million
SA	Spatial Analyzer (logiciel utilisé pour effectuer les mesures avec AT401)

III. Table des illustrations

Figure 1: Grandeurs fondamentales des ondes électromagnétiques	3
Figure 2: Termes définissant la performance d'un instrument de métrologie	8
Figure 3: Leica Absolute Tracker AT401	10
Figure 4: Leica Nova TM50	12
Figure 5: Organigramme de la méthodologie	15
Figure 6: Leica Sphère RRR (Red-Ring Reflector) sur une potence de Baechler	16
Figure 7: Sphères Leica	16
Figure 8: Ecart entre deux mesures succinctes où le support de sphère / prisme a été enlevé et remis	17
Figure 9: Supports de sphères à éviter	17
Figure 10: Supports de sphères évitant un jeu mécanique	18
Figure 11: Prisme de précision GPH1P Leica	19
Figure 12: Collimateurs pour ajustement de la station totale	20
Figure 13: Détermination de la résolution du TM50 à l'aide d'un plateau croisé	21
Figure 14: Résolution du TM50 sur une distance de 14m (pos 1 et 2)	23
Figure 15: Ecart vertical (ATR) par nombre de séries	25
Figure 16: Ecart des mesures en 2 pos / 1 pos prises avec l'AT401	27
Figure 17: Connexion radio avec le TM50 en utilisant une poignée SmartPole Leica	28
Figure 18: Détermination de l'axe du TM50 à l'aide d'une poignée SmartPole Leica	29
Figure 19: TM50 avec poignée SmartPole, utilisée pour la fixation d'une sphère	29
Figure 20: Test de détermination de l'erreur constante du distancemètre	30
Figure 21: Mesures sur la sphère avec l'AT401 (gauche) et le TM50 à droite	30
Figure 22: Ecart des distances « doit » (AT401) et des distances mesurées avec le TM50	31
Figure 23: Base d'étalonnage dans la salle de topométrie (D01) de l'HEIG	32
Figure 24: Mesures dans le hall d'entrée de l'HEIG	33
Figure 25: Mesures dans le laboratoire de topométrie (D01, HEIG)	33
Figure 26: Comparaison des écarts entre l'AT401 et le TM50 des mesures dans le hall d'entrée	34
Figure 27: Comparaison des écarts entre l'AT401 et le TM50 en prenant des visées manuelles	35
Figure 28: Schéma du contrôle des visées verticales de l'AT401	36
Figure 29: Schéma de détermination d'une erreur constante du distancemètre	37
Figure 30: Simulation des mesures à l'extérieur avec des températures élevées	38
Figure 31: Visées inclinées (2 visées un étage plus haut; 1 visée sur 3 étages)	40
Figure 32: Visées très inclinées prises depuis la même potence	41

Figure 33: Construction d'un avion (exemple d'un type Comac C919)	45
Figure 34: Contrôle des points considérés stables	46

IV. Liste des tableaux

Tableau 1: Erreurs instrumentales d'une station totale Leica	5
Tableau 2: Erreurs du distancemètre	6
Tableau 3: Influences météorologiques	7
Tableau 4: Spécifications techniques AT401	11
Tableau 5: Spécifications techniques TM50	13
Tableau 6: Mode EDM de TM50	13
Tableau 7: Comparaison des précisions instrumentales	14
Tableau 8: Test de précision des prismes GPH1P	19
Tableau 9: Valeurs d'ajustement du Leica TM50	20
Tableau 10: Résolution TM50 sur une distance de 5m	21
Tableau 11: Ecart-type et résolution du TM50 en pos 1	22
Tableau 12: Ecart-type et résolution du TM50 en pos 1 et 2	23
Tableau 13: Influence d'un écart de 0.5 mgon à des distances différentes	28
Tableau 14: Paramètres des droites de régression	31
Tableau 15: Précision absolue (biais) et la répétabilité des mesures ATR	34
Tableau 16: Précision absolue (biais) et la répétabilité des mesures manuelles	35
Tableau 17: Récapitulatif des angles d'erreurs verticales	35
Tableau 18: Valeurs de calibration appliquées	37
Tableau 19: Stabilité des valeurs de calibration	38
Tableau 20: Résidus des transformations "AT401 - TM50" avec les moyennes des visées en ATR	40
Tableau 21: Précisions absolues (moyennes des écarts entre les transformations de coordonnées)	42
Tableau 22: Résidus des transformations avec les mesures TM50 sans / avec corrections	43
Tableau 23: Résidus des transformations de coordonnées des points stables	46

1. Introduction

Ce travail offre l'occasion de travailler en profondeur sur un sujet particulier du monde de la métrologie. Des mesures expérimentales seront réalisées dans les locaux de l'HEIG-VD avec la station totale Leica TM50. En parallèle, des mesures avec l'Absolute Tracker AT401 seront effectuées afin de voir si des correctifs pour le TM50 peuvent être trouvés. Ce dernier comporte des erreurs systématiques proportionnelles à la distance et à une constante.

L'objectif est de définir un processus qui permet de déterminer des correctifs et de voir s'ils restent valides dans le temps, ainsi que de développer un outil qui appliquera des correctifs automatiquement aux mesures brutes.

Enfin, il s'agira de voir s'il est possible de répondre à un mandat pour lequel des mouvements de ± 0.1 mm doivent être détectés sur des points répartis sur un fuselage d'avion. Cela montrera si l'usage d'une station totale calibrée est envisageable et à quelles sources d'erreurs il faut faire attention pour garantir une détection de ces mouvements minimes.

1.1. Cahier des charges

Les points les plus importants de ce mandat (cf. annexe 1_1) sont décrits ci-dessous:

- Comparaison du Leica Nova TM50 et de l'AT401:
Effectuer des tests comparatifs entre ces deux appareils qui permettront de définir les spécifications réelles du TM50, en s'inspirant de la norme ISO 17123 et en prenant en compte l'ensemble du matériel du laboratoire de topométrie G2C.
- Mise en place d'un processus de recalibration :
Proposer un processus de travail qui permet de recalibrer la station totale TM50 afin de garantir un mandat de métrologie. Rédiger des recommandations pour une entreprise souhaitant développer son propre réseau de calibration. Au cas où des correctifs significatifs sont trouvés, ils seront appliqués par un logiciel de traitement.
- Evaluer la stabilité des corrections :
En prenant en compte des variations de température, de fréquence d'utilisation et d'autres paramètres jugés pertinents, la fréquence de besoin de recalibration de la station totale sera définie.

1.2. Point de départ

La métrologie est un domaine de la géomatique qui sollicite une haute précision. Ces dernières années, l'utilisation des laser trackers est devenue plus fréquente. Mais à quel point l'utilisation d'une station totale est envisageable en calibrant les erreurs systématiques ?

Est-ce que les spécifications techniques fournies par le constructeur correspondent à la réalité ?

Ce sont des questions qu'un ingénieur actif dans le monde de la métrologie se pose pour un mandat où il faut garantir le dixième de millimètre. L'utilisation d'une station totale calibrée aurait l'avantage d'être moins onéreuse qu'un laser tracker.

Cette incertitude est l'origine du travail de Bachelor, qui permet à l'étudiant d'appivoiser un domaine spécifique de la géomatique.

L'équipe des géomètres du CERN a une grande expérience dans les calibrations des stations totales. Afin de déterminer des correctifs du distancemètre, une base d'étalonnage de 60 mètres est utilisée. Pour cela un point tous les 20 cm est mesuré conjointement avec l'interféromètre et la station totale. L'intervalle de recalibration est d'un an.

Leica Geosystems propose différents certificats d'étalonnage et de calibration qui concernent les mesures angulaires et de la distance avec et sans réflecteur. Les erreurs angulaires sont déterminées par des collimateurs répartis à l'horizontale et à la verticale. Le distancemètre est notamment calibré à l'aide d'une base d'étalonnage interférométrique d'environ 120 mètres¹.

D'ailleurs, des tests² à l'ETHZ ont montré que le cercle des lectures de directions horizontales d'un Leica TM30, une station totale de monitoring, dérive en fonction du temps. Il s'agit d'une dérivation d'environ 0.15 mgon sur une durée de quatre jours. Cela est négligeable pour les mesures de courte durée, comme c'est le cas de la métrologie. En plus, il est important d'acclimater l'instrument avant de commencer les mesures.

¹ Leica Geosystems, Calibration Certificates White Paper

² LEHNING Sophie, ETHZ, MA Untersuchung des Leica TM30 für Monitoring-Anwendungen, p. 17

2. Rappels de bases théoriques

2.1. Mesure électronique de la distance (MED)

Les grandeurs fondamentales d'une onde sont :

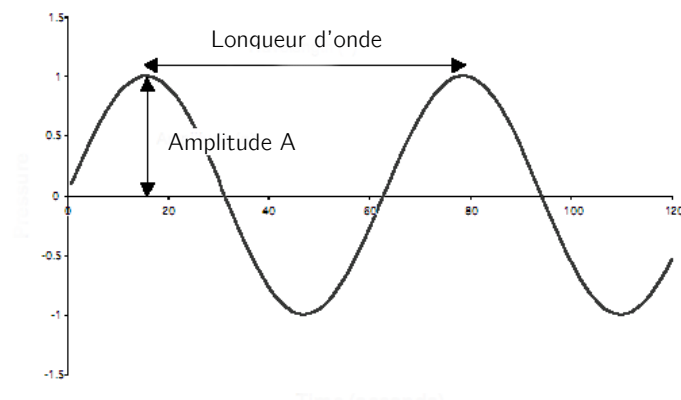


Figure 1: Grandeurs fondamentales des ondes électromagnétiques³

La *longueur d'onde* représente la distance entre deux points d'une onde sinusoïdale se trouvant sur le même niveau. Une autre grandeur est la *fréquence* ν , qui indique le nombre d'oscillations par seconde (en Hz). La *période* est la durée d'une oscillation. L'amplitude A est liée à la puissance émettrice.⁴

2.2. Méthodes de détermination utilisées

Durant ce travail, trois technologies différentes sont utilisées pour la détermination de la distance : Soit la mesure par *déphasage*, où des ondes sinusoïdales avec des longueurs d'ondes différentes sont diffusées. Le récepteur ne peut pas déterminer le nombre entier de cycles d'une onde, mais la fraction d'un cycle. En utilisant des longueurs d'ondes plus grandes que la double-distance entre l'instrument et l'objet de mesure, des distances approximatives peuvent être déterminées. Celles-ci seront affinées par des fractions d'ondes ayant une longueur de l'ordre métrique. Ce système a l'avantage de mesurer plus précisément que par *impulsion*, mais il est plus restreint à la portée, surtout sur des cibles sans réflecteur.⁵

³ Source : <http://s2.e-monsite.com/2010/02/16/12/son-ondes.gif> [consulté le 22.06.2015]

⁴ BARRAS Vincent, La mesure des distances (directe et MED), p. 3.11

⁵ JOECKEL Rainer, STOBBER Manfred, HUEP Wolfgang, Elektronische Entfernungs- und Richtungsmessung, p. 37s

Les stations totales récentes de Leica utilisent une méthode qui combine la technologie de déphasage et d'impulsion s'appelant *System Analyser*. Ce système est décrit dans le chapitre 3.3.1.

La troisième méthode est celle d'un mécomètre miniaturisé qui se trouve dans l'AT401. « Elle utilise la polarisation de la lumière émise qui, à la réception, donne un minimum ou un maximum de lumière transmise en fonction du nombre entier ou non de longueur d'onde modulée. »⁶

2.3. Erreurs

2.3.1. Erreurs instrumentales

Avant de vouloir calibrer un instrument, il faut être conscient de ses erreurs instrumentales. Un ajustement sera fait avant et après la phase de mesures, afin de suivre l'évolution des erreurs instrumentales.

On compte les erreurs suivantes :

Erreur	Désignation Leica	Description ⁷	Mesures dans 2 pos.
Erreurs d'inclinomètre	l_{comp}, t_{comp}	Si l'axe principal n'est ni parfaitement vertical, ni centré, des erreurs s'appliquent aux valeurs de l'inclinomètre. Celles-ci peuvent être déterminées en tournant l'instrument horizontalement de 200 gons.	Détection et élimination de l'erreur
Erreur de collimation horizontale	C_{Hz-col}	Cette erreur correspond au défaut de perpendicularité de l'axe optique par rapport à l'axe des tourillons. Elle peut être détectée en prenant des mesures à l'horizontale dans les deux positions de la lunette.	Détection et élimination de l'erreur
Erreur de tourillonnement	Axe a	Il s'agit d'un défaut de l'axe des tourillons par rapport à l'axe principal où la correction évolue en fonction de la tangente de l'angle vertical. L'erreur de tourillonnement peut être mise en évidence en prenant des mesures inclinées (corrigées de C_{Hz-col}) dans les deux positions de la lunette.	Détection et élimination de l'erreur

⁶ Revue XYZ, Hors-série : Un demi-siècle d'évolution technologique, p. 15

⁷ BARRAS Vincent, Les théodolites et stations totales, p. 14-27

Erreur de collimation verticale	$i_{\text{index V}}$	Elle correspond à une imprécision de la référence d'index pour la mesure des angles verticaux. C'est une erreur constante qui peut être déterminée par des mesures dans les deux positions de la lunette.	Détection et élimination de l'erreur
Erreurs de l'ATR	$H_{\text{ATR}}, V_{\text{ATR}} (C_{\text{ATR}}, i_{\text{ATR}})$	Comme pour l'axe optique il y a les mêmes erreurs pour l'axe numérique, qui est défini par le centre de l'objectif et la référence d'une cellule CCD (<i>Charge-Coupled Device</i>). Il s'agit des erreurs H_{ATR} et V_{ATR} qui peuvent être minimisées avec des mesures dans 2 positions de la lunette, mais pas éliminées.	Minimisation de l'erreur
Erreur de graduation des cercles		Due à l'imperfection des graduations de cercle. Elle est diminuée en analysant une plus grande partie du cercle lors des mesures angulaires.	Minimisation de l'erreur
Erreur d'excentricité du cercle et de la lunette	E, L	« L'excentricité du cercle est le défaut de centrage de limbe par rapport à l'axe auquel il est lié » ⁸ Elle est minimisée en prenant des lectures diamétralement opposées. L'excentricité de la lunette est présente si l'axe optique ne croise pas l'axe principal. Pour les stations totales récentes, ces erreurs sont négligeables.	Minimisation de l'erreur Elimination de l'erreur

Tableau 1: Erreurs instrumentales d'une station totale Leica

Ce tableau montre l'intérêt de prendre des mesures dans les deux positions de la lunette, ce qui permettra d'éliminer un grand nombre d'erreurs ou au moins de les minimiser.

⁸ BARRAS Vincent, Les théodolites et stations totales, p. 36

Ci-dessous sont décrites les erreurs majeures du distancemètre⁹ d'une station totale :

Erreur	Genre d'erreur	Concerne la méthode	Description
Erreur de constante	constante	déphasage / impulsion	L'erreur de constante du distancemètre est due à une mauvaise détermination de la référence.
Erreur cyclique	cyclique	déphasage (impulsion)	Il y a plusieurs raisons pour une erreur cyclique. Une des raisons est qu'il est difficile d'isoler parfaitement le récepteur d'une onde de son émetteur, ce qui engendre des interférences électriques et optiques. En plus, il y a des erreurs propres au système de déphasage.
Variation de la fréquence modulée	proportionnelle	Déphasage (impulsion)	Un quartz est responsable de la modulation d'une onde. Une mauvaise estimation de la température interne du quartz, son vieillissement et la variation de la tension électrique engendrent des erreurs. Cette dernière peut être contrôlée à l'aide d'un fréquencemètre.

Tableau 2: Erreurs du distancemètre

L'objectif de ce travail est de trouver les erreurs systématiques d'une station totale afin de déterminer des valeurs de calibration. En plus des erreurs systématiques, il y a des erreurs accidentelles qui ne pourront pas être éliminées. Il s'agit, entre autres, des trajets multiples d'un faisceau émis, d'autres surfaces réfléchissantes dans l'environnement et des problèmes dus aux prismes (salissures, etc.)¹⁰. Ces erreurs accidentelles seront à réduire par l'utilisateur en prenant les précautions d'usage.

⁹ JOECKEL Rainer, STOBBER Manfred, HUEP Wolfgang, Elektronische Entfernungs- und Richtungsmessung, p. 125-140

¹⁰ BARRAS Vincent, La mesure des distances (directe et MED), p. 48s

2.3.2. Influences météorologiques

La température, la pression, ainsi que l'humidité ont des influences sur l'indice de réfraction. L'humidité est négligeable pour les distances courtes. L'indice de réfraction exprime de quelle manière l'onde sera ralentie.

L'importance des différentes influences sur l'indice est représenté dans le tableau suivant:

	Influence pour 1 PPM ¹¹
Température	± 1 °C
Pression	± 4 mbar
Pression partielle de vapeur d'eau	± 25 mbar

Tableau 3: Influences météorologiques

2.4. Notions d'ajustement et de calibration

L'*ajustement* d'un appareil consiste à l'amélioration de l'affichage d'une valeur mesurée par rapport à la vraie valeur. Les tachéomètres actuels disposent souvent d'un programme qui prévoit des mesures par l'utilisateur afin d'ajuster les erreurs instrumentales.¹²

En revanche, la *calibration* prévoit la constatation des différences entre la vraie valeur et l'observation. Ces valeurs seront uniquement remarquées, mais pas éliminées.¹²

L'objectif est donc de trouver des valeurs de calibration pour le TM50, en prenant les observations de l'AT401 comme des vraies valeurs.

¹¹ BARRAS Vincent, La mesure des distances (directe et MED), p. 41s

¹² MOESER Michael, MUELLER Gerhard, SCHLEMMER Harald, Handbuch Ingenieurgeodäsie – Grundlagen, p. 214s

2.5. Exactitude d'appareil

Selon le vocabulaire international de métrologie¹³, on n'utilise pas le terme de précision, mais les notions de fidélité et d'exactitude. L'exactitude d'un appareil consiste à la différence entre la valeur vraie et la moyenne des observations. Une notion similaire est le biais qui représente une estimation d'une erreur systématique, ou la précision absolue. Le graphique ci-dessous les illustre :

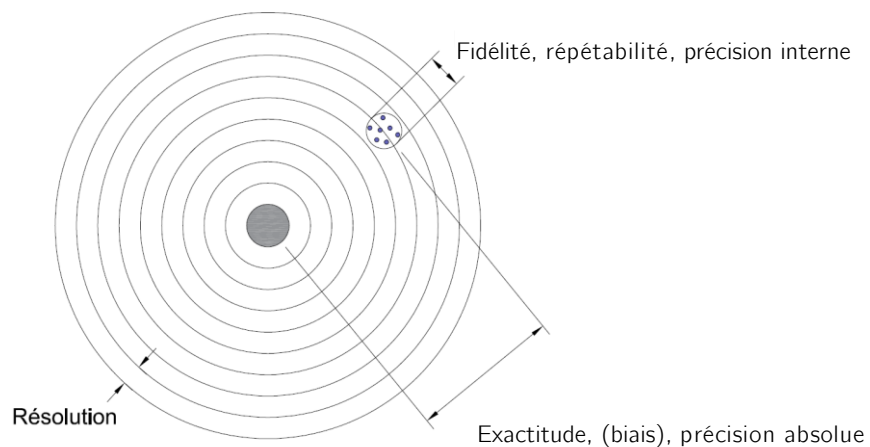


Figure 2: Termes définissant la performance d'un instrument de métrologie

Si un capteur délivre des mesures fidèles (écart-type petit) qui se trouvent près de la vraie valeur, il est exact. Une autre notion pour la fidélité, utilisée par les constructeurs, est la répétabilité. Elle décrit la dispersion maximale entre deux mesures sous des conditions identiques. Une autre notion est la précision interne.

Par la résolution d'un appareil il faut entendre la plus petite valeur qu'il peut percevoir. La résolution d'affichage comporte la valeur la plus petite qu'un système affiche.

Pour la suite de ce rapport, uniquement les notions de répétabilité, de précision absolue, de résolution et de résolution d'affichage seront utilisées.

¹³ Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM), Vocabulaire international de métrologie (VIM), p. 21s, 42

3. Instruments

Il est à préciser que tous les tests effectués lors de ce travail se réfèrent aux instruments spécifiques utilisés. Des résultats identiques ne sont pas garantis avec un autre appareil du même type.

En métrologie les laser trackers jouissent d'une grande popularité, car un objet peut être mesuré sans devoir être déplacé, à l'inverse des machines à mesurer tridimensionnelle (MMT). L'avantage des laser trackers, mesurant des distances absolues très précisément, est qu'une pièce industrielle peut être auscultée sur place pendant différentes étapes de fabrication. Le Leica AT401 est un laser tracker particulier, car il ressemble en différents éléments à une station totale, tout en garantissant des mesures de distance beaucoup plus précises.

3.1. Normes ISO

Dans les normes ISO 17123-3¹⁴ et 17123-4¹⁵ les processus de détermination des écarts-types de l'appareil sont décrits. La première norme évoque la méthode de détermination de l'écart-type des directions horizontales et des angles verticaux.

Il est important de savoir que les normes s'appliquent aux mesures qui se déroulent dans des conditions de terrain qui varient légèrement. Les paramètres importants sont la température de l'air, la pression, les variations dues aux vents et la visibilité.

Ce travail se déroule à l'intérieur sous des conditions presque inchangées. L'utilisateur est confronté à la question du comportement de l'écart-type en prenant quelques précautions. Il faut éviter les changements de température par les rayons de soleil, le chauffage, les courants d'air etc. La température est la source majeure des imprécisions météorologiques lors de mesures tachéométriques.

3.1.1. Termes statistiques

Les constructeurs expriment souvent les spécifications techniques de leurs appareils à partir d'un écart-type, comme mentionné dans le chapitre précédent. Ce terme statistique se base sur la norme ISO 3534-1¹⁶ où l'écart-type est défini comme la racine carrée de la variance.

Aujourd'hui, les constructeurs utilisent d'autres notions comme la répétabilité, la MPE (cf. *abréviations*, p. IV) et la résolution (cf. *chapitre 2.5*).

¹⁴ ISO, Optique et instruments d'optique – Partie 3 : Théodolites

¹⁵ ISO, Optique et instruments d'optique – Partie 4 : Télémètres électro-optiques

¹⁶ ISO, Statistique – Vocabulaire et symboles – Partie 1 : Termes statistiques, p. 62

3.2. Leica AT401

3.2.1. Généralités

L'Absolute Tracker AT401 de Leica permet de mesurer des distances avec une résolution de 0.1 μm . Même après une coupure du faisceau, la distance absolue peut être déterminée, contrairement à un interféromètre¹⁷.

La méthode de détermination des directions ainsi que l'inclinomètre sont de la même technologie que celle des instruments Leica Nova.

La technique que l'AT401 utilise pour mesurer des distances vient à l'origine du Kern Mekometer ME5000. Aujourd'hui, on retrouve souvent le terme « Absolute Distance Meter ADM » signifiant un distancemètre qui mesure au centième de millimètre près. Une autre particularité par rapport à une station totale est qu'il ne possède pas d'axe optique.¹⁸



Figure 3: Leica Absolute Tracker AT401

¹⁷ BARRAS Vincent, Les mensurations industrielles, p. 13

¹⁸ Hexagon Metrology, White Paper AT401

3.2.2. Spécifications techniques

Type	AT401
N° de série	390420
Fabriqué	06.2010
Spécifications techniques ¹⁹	
Angulaire	
Résolution d'affichage	0.07" (0.02 mgon)
Distance (<i>distances jusqu'à 80m</i>)	
Résolution d'affichage	0.1 μm
Précision absolue (MPE)	$\pm 10 \mu\text{m}$
Répétabilité (MPE)	$\pm 5 \mu\text{m}$
Coordonnée 3d	
Précision absolue (MPE)	$\pm 15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m} / \text{m}$
Répétabilité (MPE)	$\pm 7.5 \mu\text{m} + 3 \mu\text{m} / \text{m}$

Tableau 4: Spécifications techniques AT401

Sous ces valeurs, on retrouve les mêmes termes qu'à la *figure 2* d'où la MPE peut être comparée à la tolérance. Ce qui est flagrant est la précision absolue des mesures de distance, avec une répétabilité de 5 μm . La précision absolue angulaire est à peu près la même que dans une station totale haut de gamme (cf. *chapitre 3.4. tableau 7*).

¹⁹ Hexagon Metrology, Leica Absolute Tracker AT401 brochure

3.3. Leica TM50

3.3.1. Généralités

La station Leica Nova TM50 est un des produits récents de la famille des stations totales de Leica. L'instrument est conçu pour l'auscultation, en partie car il dispose d'un distancemètre (R1000) très précis pour sa classe et de longue portée. Comme évoqué dans les bases théoriques, les derniers instruments de Leica disposent d'une technologie s'appelant *System Analyser* qui relie la mesure d'impulsion et de déphasage. Le système utilise entre 4 et 10 fréquences différentes, selon l'intensité du faisceau reçu. Lors de la mesure, l'appareil fait une calibration de distance interne. Cela lui permet d'éviter des erreurs de constantes d'additions à cause d'un réchauffement interne de l'instrument.²⁰



Figure 4: Leica Nova TM50

²⁰ Leica Geosystems, Leica TS30 – White Paper, p. 10s

3.3.2. Spécifications techniques

Type	TM50 0.5"
N° de série	368504
Fabriqué	2014
Spécifications techniques ²¹	
Angulaire	(Ecart-type Hz, V, selon ISO 17123-3)
Hz, V	0.5" (0.15 mgon)
ATR Hz, V	0.5" (0.15 mgon)
Distance	(Ecart-type Hz, V, selon ISO 17123-4)
sur prisme	0.6 mm + 1 ppm / type 2.4 s

Tableau 5: Spécifications techniques TM50

Pour la mesure de distance, le constructeur différencie plusieurs modes de mesure:

Mode MED ²²	Écart-type (selon ISO 17123-4)
Précis	0.6 mm + 1 ppm
Standard	1 mm + 1 ppm
Moyenne	1 mm + 1 ppm

Tableau 6: Mode EDM de TM50

Ces écarts-types sont déterminés selon la norme ISO 17123 qui est présentée au chapitre 3.1. Il n'est pas clair s'il s'agit d'une valeur de précision réelle ou plutôt d'une tolérance. Il s'agit probablement d'une valeur d'environ 2σ , ce qui représente une sécurité de 95%.²³ En faisant des mesures dans les locaux de l'HEIG-VD, ces spécifications techniques seront testées à l'intérieur, où les variations de conditions météorologiques sont minimales.

²¹ Leica Geosystems, Leica Nova TM50 – Caractéristiques Techniques

²² Leica Geosystems, Leica MS50 / TS50 / TM50 – User Manual, p. 52

²³ MISSIAEN Dominique, discussion CERN, 10.06.2015

3.4. Comparaison des précisions (selon constructeur)

Dans le cadre des mesures industrielles dans un espace de 50m × 50m, des mesures de distances d'environ 30 mètres sont prises en considération. En faisant une station libre on évite les erreurs de centrages, qui ne figurent pas dans le tableau ci-dessous. En plus, les supports des sphères sur la pièce industrielle sont considérés comme stable par rapport à l'objet. Donc, pour l'estimation de la précision totale d'une détermination tridimensionnelle, uniquement les écarts-types angulaires et du distancemètre influencent les calculs.

Les précisions d'une mesure à 30 m sont les suivantes :

Instrument	$\sigma_{\text{longitudinale}}$ [mm]	$\sigma_{\text{transversale}}$ [mm]	$\sigma_{\text{verticale}}$ [mm]	σ_{totale} [mm]	Remarque	Niveau de confiance (σ)
AT401	0.005	0.069 ²⁴	0.069 ²⁴	0.098	0.5 MPE (considéré comme valeur typique selon Leica)	~ 1.5 σ
TM50	0.63	0.07	0.07	0.64	Écart-type (sans ATR)	~ 2 σ ²³

Tableau 7: Comparaison des précisions instrumentales

Ce tableau montre l'importance de la calibration du distancemètre du TM50, car il y a une grande différence entre ces deux instruments. Il faut noter qu'il s'agit des niveaux de confiance différents qui décrivent ces valeurs de précision. 1.5 σ correspond à un niveau de confiance d'environ 85%, 2 σ à 95%.

²⁴ Valeurs non spécifiées par le constructeur (détermination propre par calcul)

4. Méthodologie des tests

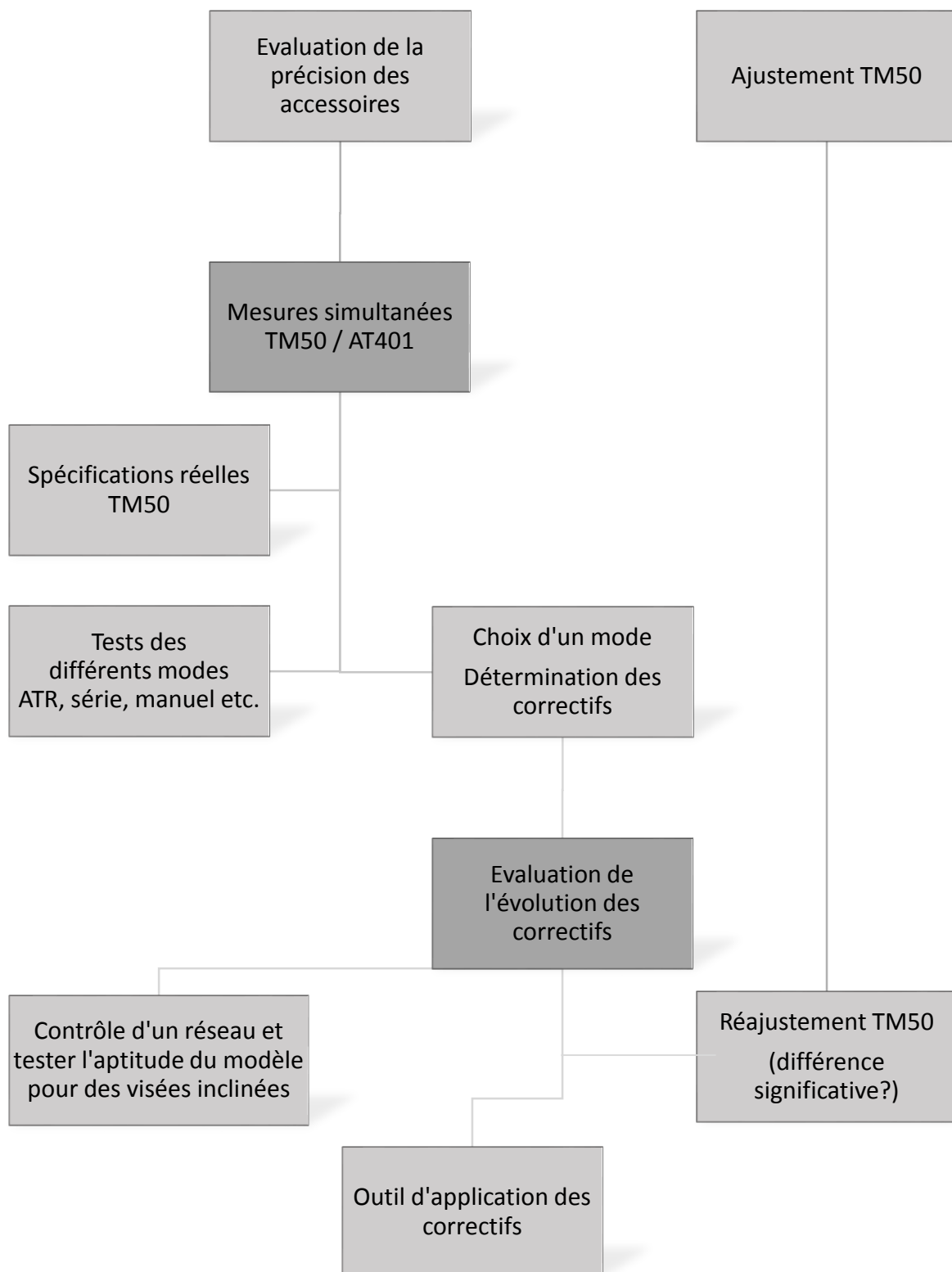


Figure 5: Organigramme de la méthodologie

5. Accessoires

[Annexe 5_0_Accessoires](#)

Plusieurs accessoires ont été utilisés durant les mesures avec l'AT401 et le TM50. Comme par exemple les sphères Leica RRR, BRR et CRR, ainsi que les supports magnétiques (NORS) qui servent à tenir la sphère, mais qui peuvent aussi être collés quelque part avec du scotch double-face.

D'autres accessoires sont également de grande importance comme par exemple les trépieds, les embases et thermomètres décrits en annexe.

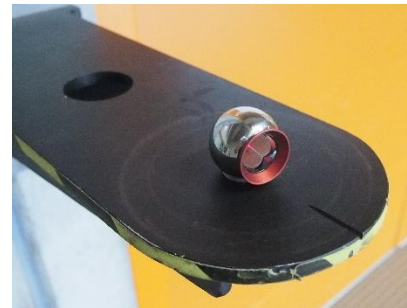


Figure 6: Leica Sphère RRR (Red-Ring Reflector) sur une potence de Baechler



Leica Sphère CCR



Leica Sphère RRR



Leica Sphère BRR

Figure 7: Sphères Leica

5.1. Supports

Annexe 5_1_Supports

Afin de déterminer les valeurs de calibration du TM50 au mieux, le choix de l'accessoire est très important. Plusieurs tests ont été effectués afin de déterminer la précision des supports de sphères et de prismes (cf. *annexe 5_1_Supports*). Encore plus déterminant que le choix de la sphère (comme par exemple Leica RRR, BRR ou CCR) est le choix de son support, comme illustré par le diagramme ci-dessous :

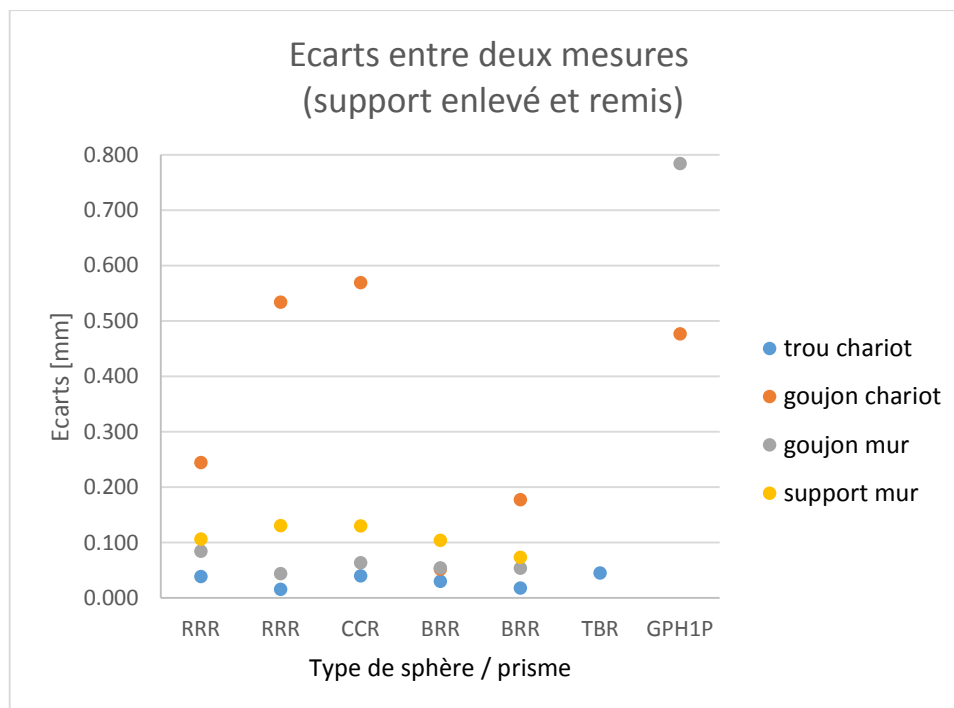


Figure 8: Ecart entre deux mesures succinctes où le support de sphère / prisme a été enlevé et remis

Les supports qui permettent un jeu mécanique sont à éviter comme par exemple les goujons magnétiques à la verticale ou les supports magnétiques mis dans des trous usinés :



Goujon (chariot)



Goujon (mur)



Support magnétique (mur)

Figure 9: Supports de sphères à éviter

En revanche il faut se baser sur des supports du type suivant :



Support magnétique NORS collé sur un trépied



Sphère RRR dans un trou d'une potence Baechler

Figure 10: Supports de sphères évitant un jeu mécanique

Afin de déterminer les valeurs de calibration du TM50, il faut notamment éviter toute erreur de centrage des sphères. C'est pourquoi des supports du type stable seront utilisés (*figure 10*). L'idéal est un support comportant un trou conique.

5.2. Prismes GPH1P

Annexe 5_2_GPH1P

L'utilisation de prismes de précision GPH1P a également été envisagée, mais des tests ont montrés des imprécisions trop importantes (cf. *figure 8*). En effet, lorsque différentes mesures sont prises en enlevant et en remettant le même prisme, des différences sont constatées. La différence augmente encore plus si on tourne le prisme de 200 gons autour de ses deux axes, ce qui est décrit précisément en *annexe 5_2_GPH1P*.



*Figure 11: Prisme de précision GPH1P
Leica*

Le tableau ci-dessous montre des écarts entre quelques mesures tests (AT401) où le prisme a été enlevé et remis sur le même support (première colonne). Dans la deuxième colonne, le prisme a été tourné de 200 gons et dans la dernière, la mesure du même point a été effectuée avec 2 prismes différents.

Distance : ~ 10m			
Écart entre 2 mesures			
Prisme	Enlever prisme et remettre	Tourner prisme de 180°	Deux prismes GPH1P différents
GPH1P	~ 0.1 mm	~ 0.4 - 0.7 mm	~ 0.3 mm

Tableau 8: Test de précision des prismes GPH1P

Le constructeur donne un écart-type de 0.3 mm. Si le prisme est orienté de la même manière, l'écart entre les deux mesures est environ de 0.1 mm. Mais il est plus grand quand deux prismes différents sont utilisés sur le même point et en moyenne de 0.6 mm si le prisme a été tourné de 200 gons autour de ses axes. Ceci est dû aux usures qui peuvent avoir une influence importante, vu que le trou du prisme n'est pas très long par rapport à la hauteur du centre de prisme. Les écarts transversaux sont généralement deux fois plus grands que les écarts verticaux.

À cause des écarts remarquables constatés en tournant le prisme, un deuxième test a été effectué avec le TM50 (*annexe 5_2_GPH1P*).

6. Mesures TM50

6.1. Ajustement

Avant de commencer toutes les mesures test, la station totale a été ajustée à l'aide du programme d'ajustement. L'HEIG possède des collimateurs qui peuvent être utilisés afin de faire des visées à l'infini, à l'horizontale mais aussi inclinées. Dans un premier temps des valeurs du compensateur l_{comp} et t_{comp} , ainsi que $i_{index V}$ et C_{Hz-col} ont été trouvées. Grâce au collimateur incliné, l'erreur de tourillonnement (Axe a) a pu être déterminée. Dernièrement, avec des longues visées sur un prisme au fond d'un long couloir, les erreurs H_{ZATR} et V_{ATR} sont calculées.



Figure 12: Collimateurs pour ajustement de la station totale

Deux mois plus tard, après les dernières mesures de calibration, le TM50 a été réajusté pour voir si les erreurs ont évoluées pendant cette période. Toutes les déterminations ainsi que leurs précisions figurent au tableau ci-dessous :

Désignation Leica [gon]	Ajustement 29.05.2015	Précision	Réajustement 17.07.2015	Précision
l_{comp}	-0.00072	0.00003	-0.00090	0.00007
t_{comp}	-0.00243	0.00011	-0.00246	0.00004
C_{Hz-col}	-0.00132	0.00014	-0.00111	0.00022
$i_{index V}$	0.00030	0.00024	0.00015	0.00013
Axe a	0.00152	0.00246	0.00103	0.00024
H_{ZATR}	0.00259	0.00020	0.00188	0.00012
V_{ATR}	0.00116	0.00012	0.00098	0.00022

Tableau 9: Valeurs d'ajustement du Leica TM50

L'erreur de tourillonnement (Axe a) a été mal déterminée la première fois, elle n'est pas significative. La seule valeur pour laquelle une évolution d'erreur peut être supposée est pour l' H_{ZATR} . En décembre 2014, la valeur a été calculée à 0.0017 gons et en avril à 0.0011 gons. Il s'agit d'une évolution aléatoire. La différence des deux valeurs H_{ZATR} (selon tableau) est de 0.71 mgon. Sur une distance de 30 mètres ça donne une erreur de 0.33 mm. Cette erreur est minimisée par plusieurs visées dans les deux positions de la lunette. Néanmoins d'autres tests seront nécessaires afin d'analyser l'importance de cette différence d'erreur.

6.2. Résolution

Annexe

N_6_2_Résolution

6.2.1. Résolution en une position de la lunette

Afin de prouver la résolution de notre TM50, de nombreuses mesures ont été effectuées sur une sphère se trouvant sur un plateau croisé. Le plateau croisé permet des déplacements de 0.025 mm qui ont été contrôlés par un pied à coulisse. La sphère a été alignée à l'œil pour que ses déplacements se trouvent dans l'axe de mesure de l'appareil. Etant magnétique, le support de sphère a pu être fixé d'une manière stable à court terme.

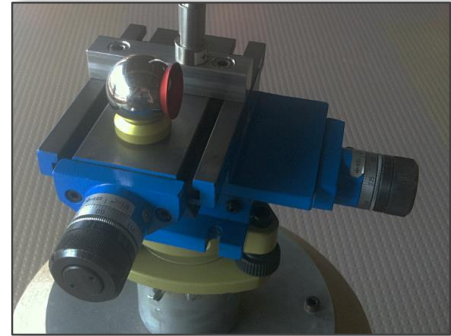


Figure 13: Détermination de la résolution du TM50 à l'aide d'un plateau croisé

Les mesures sont représentées dans un graphique où on retrouve pour chaque déplacement de 0.025mm les distances relatives à la première mesure, qui est ramenée à 0 :

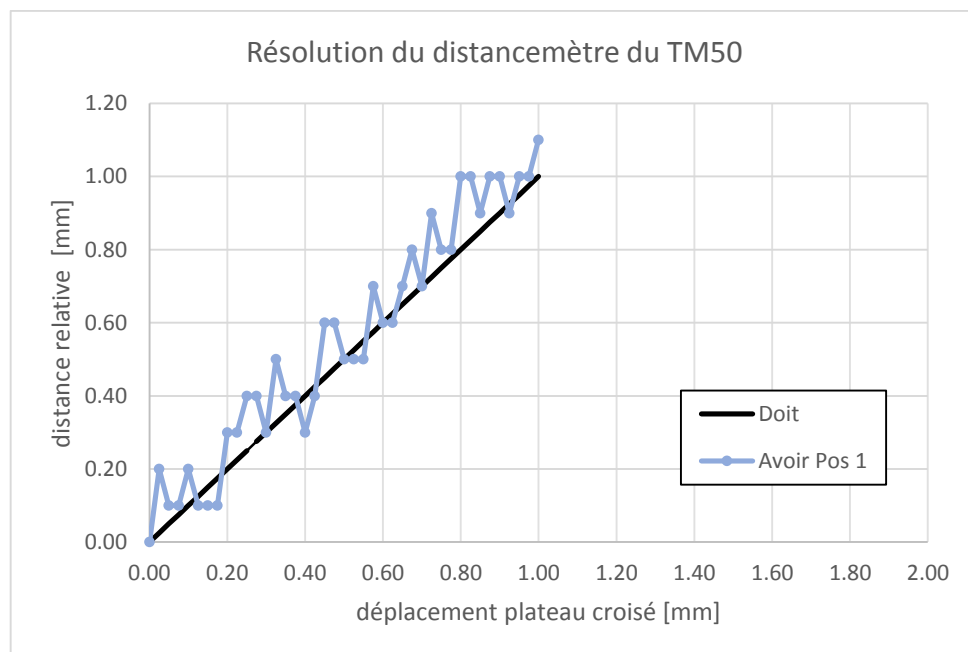


Tableau 10: Résolution TM50 sur une distance de 5m

On peut voir que les mesures (en bleu) ressemblent à une fonction en escalier avec une dispersion importante.

Si la mesure de la distance est moins précise que les déplacements du plateau croisé effectués, l'écart-type correspond à la résolution²⁵. C'est le cas si les écarts (déplacement – mesure) ne correspondent pas à une fonction en escalier.

La résolution de l'instrument en position 1 est la suivante :

Distance	5 m
Décalage (total)	0.025 mm (1.00 mm)
Résolution = Ecart-type	0.08 mm

Tableau 11: Ecart-type et résolution du TM50 en pos 1

²⁵ JOECKEL Rainer, STOBBER Manfred, HUEP Wolfgang, Elektronische Entfernungs- und Richtungsmessung, p. 160s

6.2.2. Résolution en deux positions de la lunette

Afin de déterminer les écarts entre les mesures de distances en 1^{ère} et 2^{ème} position de la lunette, un second test a été prévu. Pour celui-ci, la distance de mesure est plus grande et mieux adaptée aux distances utilisées en métrologie. Ainsi, les décalages de la sphère accrochée au plateau croisé ont été augmentés par pas de 0.10 mm.

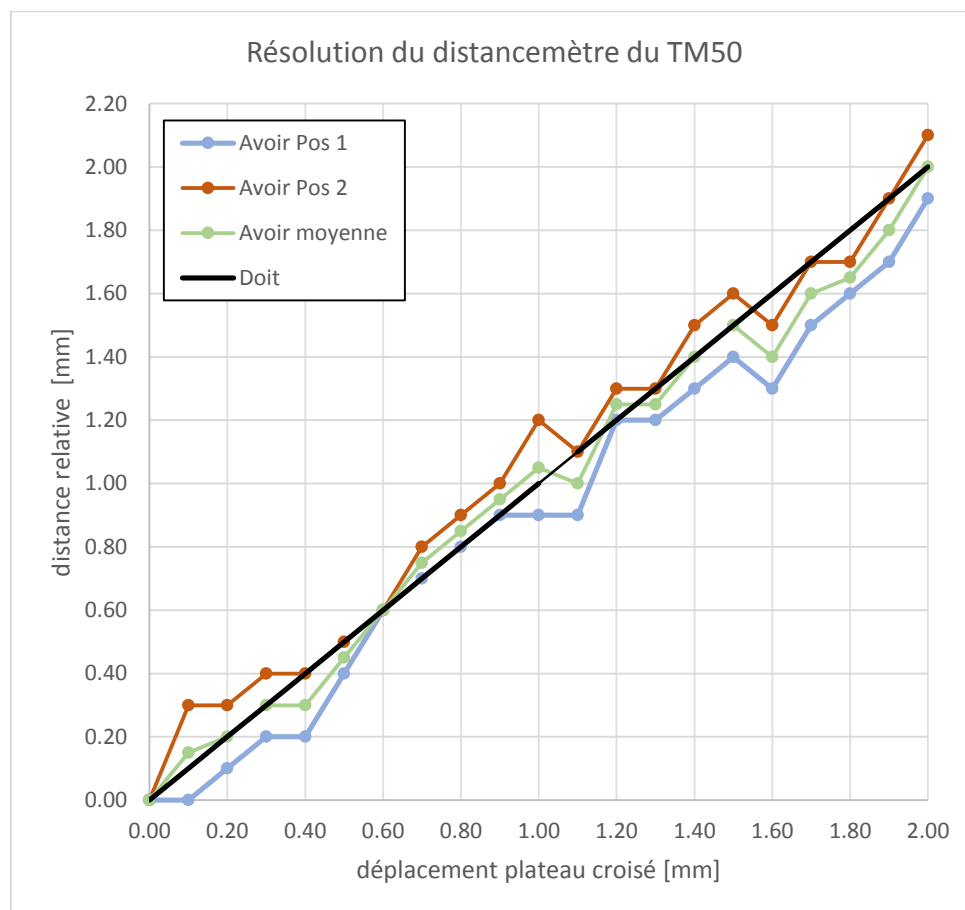


Figure 14: Résolution du TM50 sur une distance de 14m (pos 1 et 2)

Comme précédemment, l'écart-type correspond à la résolution :

Distance	14 m		
Décalage (total)	0.10 mm (2.00 mm)		
	Position 1	Position 2	Moyenne (Pos 1 et 2)
Résolution = Ecart-type	0.14 mm	0.10 mm	0.08 mm

Tableau 12: Ecart-type et résolution du TM50 en pos 1 et 2

Le tableau précédent indique l'importance de mesurer dans les deux positions de la lunette afin d'améliorer les mesures. La résolution de la moyenne est de l'ordre de 0.1 mm. Avec un tel instrument, ce ne sera pas possible de détecter des mouvements de 0.1 mm. Mais il est quand même possible d'améliorer la mesure de distance du Leica TM50 en diminuant les erreurs systématiques, ce qui est traité dans le chapitre 7.

6.3. Mesures de séries

Annexe 6_3_Mesures de séries

La mesure de série permet d'améliorer l'exactitude des mesures. Dans le cas des mesures en ATR, qui seront utilisées pendant les tests, il ne s'agit pas des vraies mesures de série mais d'une répétition de mesures sur le même point. Cela permet de diminuer l'erreur de pointé, ainsi que des erreurs aléatoires. Pour les tests futurs, trois mesures sur la même sphère seront effectuées. Même si une troisième mesure n'influence que de manière minimale les résultats par rapport à deux mesures, cela permet de fiabiliser les observations.

Le graphique suivant comporte les écarts verticaux des moyennes de 1, 2, 3 et 4 séries par rapport à la moyenne de 5 séries :

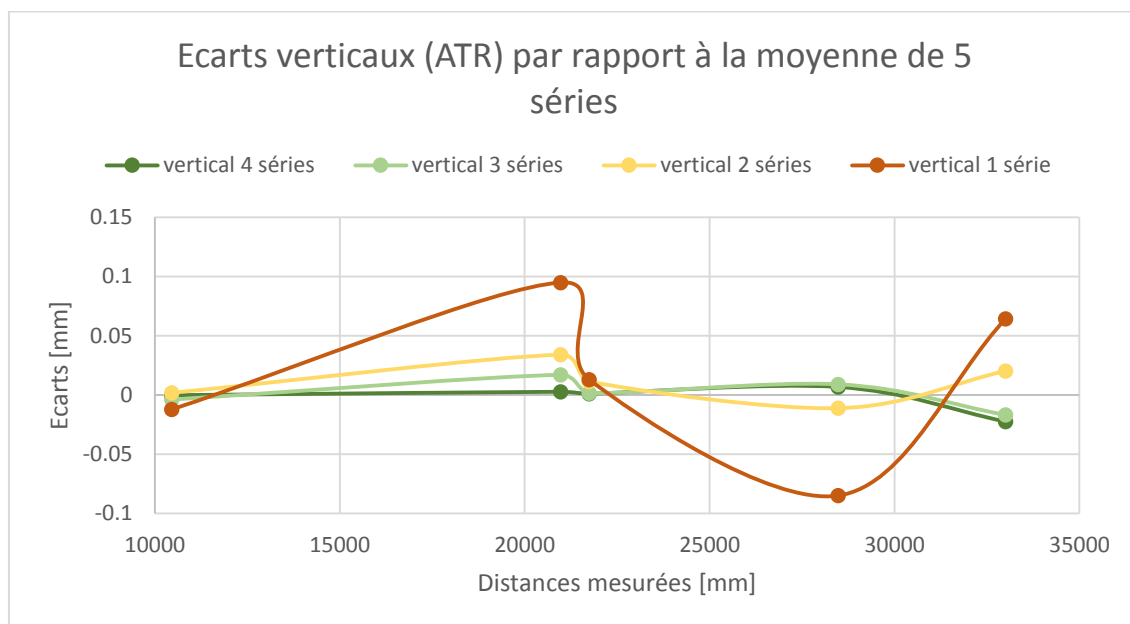


Figure 15: Ecart vertical (ATR) par nombre de séries

Ce graphique indique qu'une seule mesure ne donnera pas une valeur acceptable au point de vue de la répétabilité. Deux séries livreront des résultats suffisants (~ 0.03 mm) mais une troisième série permet de fiabiliser ces mesures. Il s'agit du meilleur rapport entre le temps de mesure et l'amélioration de la répétabilité.

7. Calibration des instruments

7.1. Processus

Un processus de calibration de la station totale doit être défini. Dans un premier temps, les différents modes de pilotage et de mesure pour les deux instruments sont testés. Dans un deuxième temps, l'erreur de centrage est analysée. Il s'agit d'une part de l'erreur de centrage entre les deux instruments stationnés sur la même embase, et d'autre part de l'erreur de centrage d'un appareil lorsqu'il est restationné.

Afin de déterminer les valeurs de calibration, en se basant sur les modes de mesures retenus précédemment, deux tests principaux sont prévus. Pour les correctifs du distancemètre, il est favorable de faire des mesures simultanées de points à peu près alignés. L'avantage d'un tel canevas est que les erreurs angulaires soient minimisées et les erreurs de centrage soient exclues. D'autres mesures, depuis la même embase, servent à comparer les visées angulaires de l'AT401 à celles du TM50. À chaque test, cinq sphères Leica ont été utilisées, car c'est le nombre de sphères dont l'HEIG dispose. L'avantage de se limiter à cinq observations par test est que les sphères ne doivent pas être déplacées, ce qui améliore la précision de la détermination de la calibration. En répétant ces mesures plusieurs fois, des valeurs statistiquement pertinentes peuvent être trouvées.

Quand on répète les mesures dans le même local, avec les mêmes instruments et le même opérateur, il faut utiliser le terme de *répétabilité*. En revanche, le terme de *reproductibilité*²⁶ sera utilisé afin de comparer des mesures prises dans des locaux différents (salle de topométrie D01 et le hall d'entrée de l'HEIG).

À la fin de ce chapitre se trouve un récapitulatif des valeurs de calibration déterminées, qui seront introduites pour d'autres mesures.

²⁶ Association Française de Normalisation, ISO Guide 98-3, p. 37

7.2. Mode de pilotage et de mesure

[Annexe 7_2a_Pilotage AT401](#)
[7_2b_Mesure 2 pos AT401](#)

Avant d'effectuer des mesures simultanées avec les deux instruments, le mode de détermination de l'AT401 a dû être choisi. Pour cela, le mode Tracker (avec une sphère auxiliaire ou par logiciel) et le pilotage de l'instrument à la main ont été testés. Comme présenté dans l'annexe 7_2a_Pilotage AT401, le mode Tracker par sphère auxiliaire est le mieux adapté.

Le choix du mode de mesure est ainsi très important afin d'obtenir des résultats satisfaisants. Il y a trois modes différents pour la mesure de la distance, *Fast*, *Standard* ou *Precise*. En comparant les distances mesurées en mode *Standard* et *Precise*, quelques micromètres de différence ont pu être constatés. Le mode *Standard* sera utilisé. Celui-ci a un temps de mesure de 2.0 secondes. Les mesures sont à prendre dans les deux positions de la lunette, afin d'éliminer et de minimiser certaines erreurs instrumentales. Le graphique ci-dessous montre la différence des mesures prises dans 1 et dans 2 positions de la lunette. L'annexe 7_2b_Mesure 2 pos AT40101b montre ces résultats de manière détaillée.

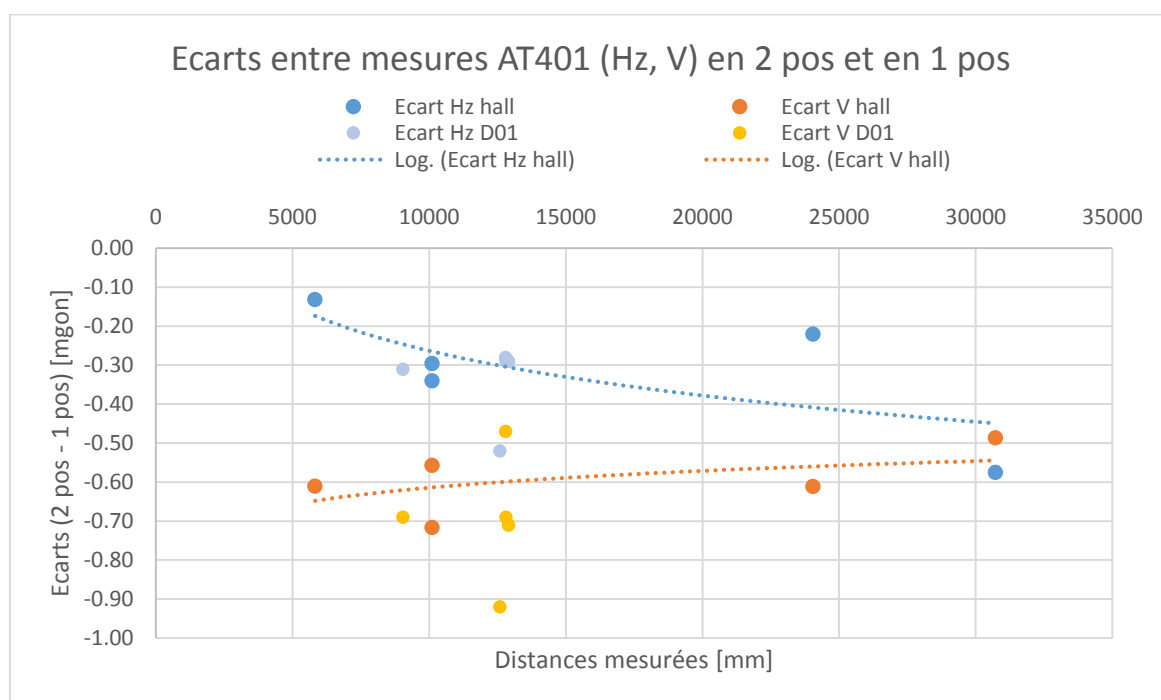


Figure 16: Ecart des mesures en 2 pos / 1 pos prises avec l'AT401

Deux échantillons montrent les mesures (écarts verticaux et horizontaux) prises dans deux endroits différents. Une série de mesure a été faite dans le hall d'entrée de l'HEIG, l'autre dans la salle de topométrie D01. L'erreur de pointé de l'ATR a une influence sur la dispersion des écarts. Il semble

que la mesure des directions horizontales soit plus précise que les mesures verticales, à courte distance (jusqu'à environ 15 m). Cela est confirmé par des mesures ultérieures. L'influence de 0.5 mgon est représenté dans le tableau suivant :

	à 5 m	à 15 m	à 30 m
Ecart de 0.5 mgon	0.04 mm	0.12 mm	0.24 mm

Tableau 13: Influence d'un écart de 0.5 mgon à des distances différentes

Ce tableau montre l'importance de prendre des mesures en 2 positions de la lunette avec l'AT401.

Pour définir le mode de pilotage du TM50, les écarts entre les mesures déclenchées manuellement et celles faites avec une connexion à distance par radio (poignée SmartPole Leica) ont été analysés (cf. *annexe N_7_2a_Pilotage TM50*). La différence de précision n'est pas significative. Pour les mesures de calibration, les observations seront donc déclenchées depuis l'instrument.



Figure 17: Connexion radio avec le TM50
en utilisant une poignée SmartPole Leica

7.3. Contrôle du décalage de centrage

Annexe 7_3_Centrage

Dans certains cas, des mesures sont prises avec deux instruments stationnés sur la même embase. Pour diminuer le jeu mécanique de l'embase, il faut appuyer contre l'instrument depuis le même côté lors de sa fixation (par exemple toujours au niveau de la vis de l'embase). Deux tests ont été effectués afin de prouver la précision de centrage entre les deux appareils mais aussi l'imprécision du fait qu'un instrument a été enlevé et remis.

Dans un premier temps, le TM50 avec la poignée SmartPole a été mis sur un pilier (cf. *annexe 7_3_Centrage Test 1*). Cette poignée comporte un trou dans lequel une sphère peut être placée. Si on lève deux points en tournant le TM50 de 200 gons, son axe vertical peut être déterminé (voir image à droite).

Les coordonnées de quatre sphères réparties autour des deux stations sont à déterminer avec le même instrument (l'AT401) depuis les deux stations. De telle manière le centre du TM50 peut être comparé en planimétrie avec le centre de l'AT401 à l'aide d'une transformation de coordonnées. Le décalage était de 10 μm , ce qui est remarquablement peu.



Figure 18: Détermination de l'axe du TM50 à l'aide d'une poignée SmartPole Leica



Figure 19:
TM50 avec poignée
SmartPole, utilisée pour la
fixation d'une sphère

Pour vérifier la précision de centrage de la poignée SmartPole sur le TM50, mais aussi la précision de centrage de l'instrument (en l'enlevant et en le remettant sur la même embase), un deuxième test a été envisagé (cf. *annexe 7_3_Centrage Test 2*). La poignée a été enlevée et remise plusieurs fois ainsi que le TM50 lui-même. Aucune augmentation d'écart n'a pu être remarquée en enlevant et en remettant l'instrument plusieurs fois. L'écart de centrage de l'instrument ne peut être déterminé à cause du jeu mécanique de la poignée. Le centrage est néanmoins meilleur que 50 μm .

7.4. Calibration du distancemètre

Annexe 7_4_distancemètre

Afin de déterminer des valeurs de calibration pour le distancemètre du TM50, des points alignés sur une distance d'environ 50 mètres ont été mesurés. Théoriquement, cette distance est supérieure aux distances de mesure habituelles, pour ne pas avoir à faire des extrapolations. Le graphique suivant montre l'installation du réseau test :

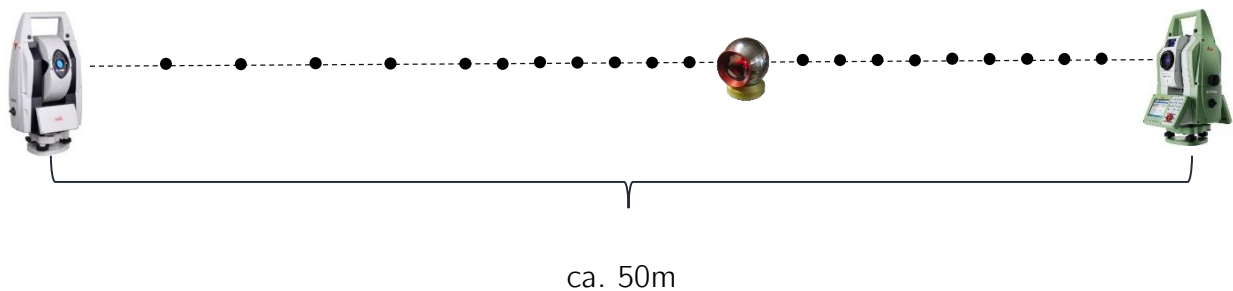


Figure 20: Test de détermination de l'erreur constante du distancemètre

La sphère se trouve sur un support magnétique collé sur un trépied, qui est déplacé par pas de 1 m sur les premiers 30 m (depuis le TM50) et ensuite avec un pas de 2 m. La sphère a pu être alignée à quelques centimètres près en posant une chevillière sur l'axe des deux instruments. L'avantage d'avoir aligné les points est que ceci limitera l'influence des erreurs angulaires. Ce test est uniquement significatif pour l'erreur constante et éventuellement le facteur d'échelle du distancemètre. Les mesures ont été effectuées pendant une période où personne n'est passé dans le couloir de l'HEIG-VD au niveau B, pour pouvoir limiter les vibrations et simplifier l'installation du test. Pour ne pas influencer le récepteur de la MED du TM50 par le faisceau de l'AT401, ce dernier a été coupé par une planche en carton (cf. image à droite).



Figure 21: Mesures sur la sphère avec l'AT401 (gauche) et le TM50 à droite

Les résultats des mesures se présentent de la manière suivante :

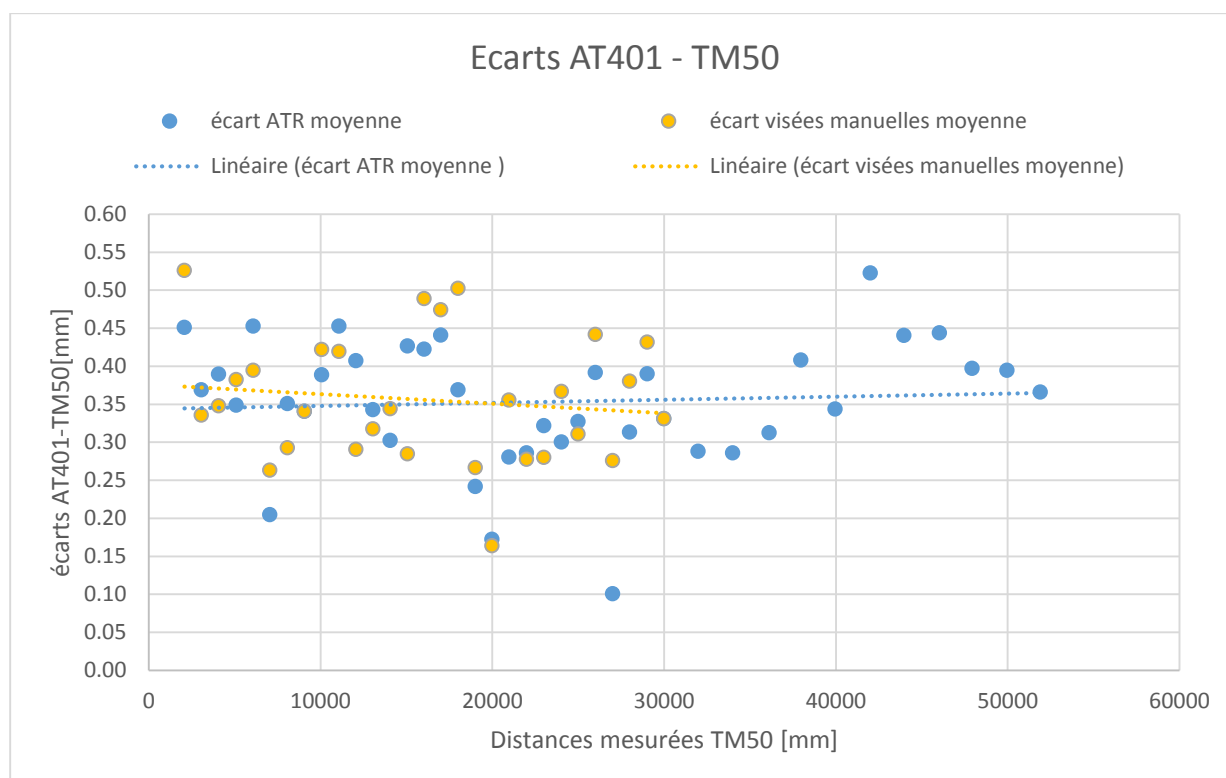


Figure 22: Ecart des distances « doit » (AT401) et des distances mesurées avec le TM50

Plus de détails sur l'installation du test et des calculs peuvent être tirés de l'*annexe 7_3_Distancemètre*.

Comme prévu, il n'y a pas de différence significative entre les mesures manuelles et ATR, car les erreurs angulaires sont minimisées pour des points alignés. Les mesures comportent du bruit qui est dû à la résolution de ± 0.10 mm. Les droites de régression ont ainsi été calculées :

	Visées ATR	Visées manuelles
Facteur d'échelle [PPM]	0.4	-1.3
Ecart-type	1.0	1.9
Constante [mm]	0.34	0.38
Ecart-type	0.03	0.03

Tableau 14: Paramètres des droites de régression

Un facteur d'échelle n'a pas pu être détecté pour les courtes distances jusqu'à 50 m. En revanche, la constante du distancemètre est significative, de $0.36 \text{ mm} \pm 0.03 \text{ mm}$ en moyenne. Ce test permet d'obtenir une première définition de la constante du distancemètre.

Vu que l'erreur systématique n'évolue pas en fonction de la distance, elle pourrait aussi être déterminée sur la base d'étalonnage de l'HEIG même si elle permet des déterminations à une moindre distance. Le banc a une longueur d'environ 5 mètres et permet de calibrer des stations totales à des portées de maximales de 20 mètres.

Ci-dessous une image de la base d'étalonnage de l'HEIG :



Figure 23: Base d'étalonnage dans la salle de topométrie (D01) de l'HEIG

7.5. Calibration de l'ATR

Annexe 7_5_ATR

D'autres mesures test ont été envisagées afin de vérifier si un systématisme entre les visées angulaires de l'AT401 et le TM50 peut être détecté. Plus précisément, un systématisme concernant les lectures angulaires en mode ATR et en manuel. Pour cela des mesures dans la salle D01 de l'HEIG, ainsi que dans le hall d'entrée ont été prises (cf. *annexe 7_5_ATR*).



*Figure 24: Mesures dans le hall
d'entrée de l'HEIG*

Pour ces tests les deux instruments ont été stationnés sur la même embase. Le jeu mécanique a été minimisé en appuyant légèrement contre l'instrument lors de la fixation, comme décrit au chapitre 7.3.

Dans la salle D01 (figure 25), où les conditions météorologiques varient très peu, les sphères ont été déterminées par l'AT401 avec une répétabilité d'environ 0.03 mm.

En revanche, dans le hall d'entrée d l'HEIG (cf. figure 24), les courants d'air sont plus fréquents. Durant la même journée de mesure, une différence de 4 °C a été remarquée. Les distances de mesure plus grandes, ainsi que la réfraction ont une influence sur la répétabilité des mesures de l'AT401, qui était d'environ 0.05 mm.

A la page suivante se trouve un graphique qui montre les résultats des mesures ATR dans la salle D01.



Figure 25: Mesures dans le laboratoire de topométrie (D01, HEIG)

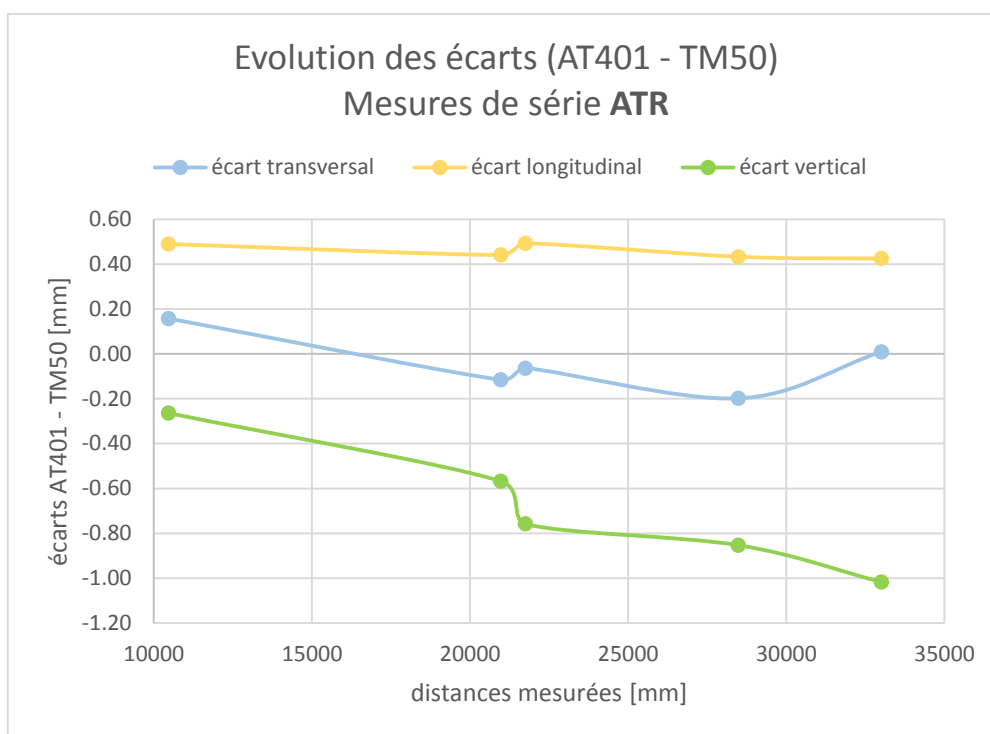


Figure 26: Comparaison des écarts entre l'AT401 et le TM50 des mesures dans le hall d'entrée (niveau F)

Unité : [mm]	transversal	longitudinal	vertical
Précision absolue	0.04	0.46	-0.69
Répétabilité	0.13	0.02	0.29

Tableau 15: Précision absolue (biais) et la répétabilité des mesures ATR

Sur le graphique ci-dessus on retrouve à nouveau l'erreur constante du distancemètre entre les deux instruments qui est légèrement plus haute que précédemment. Cela est probablement dû au décalage de centrage entre les deux instruments, de quelques centièmes de millimètres. Pour les directions horizontales les écarts ne sont pas significatifs, mais pour les angles verticaux une erreur proportionnelle à la distance peut être détectée. Cette dernière est liée à la précision de pointé de l'ATR, car pour les visées manuelles aucunes erreurs significatives n'ont pu être trouvées. Cela est représenté sur le graphique de la page suivante.

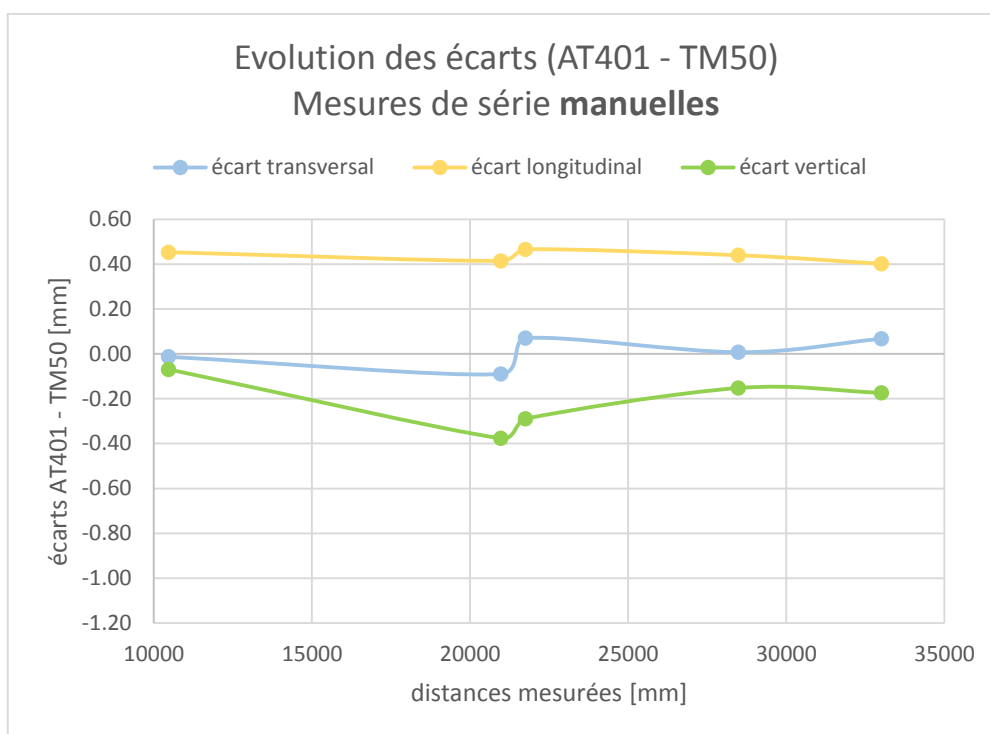


Figure 27: Comparaison des écarts entre l'AT401 et le TM50 en prenant des visées manuelles

Unité : [mm]	transversal	longitudinal	vertical
Précision absolue	0.01	0.44	-0.21
Répétabilité	0.07	0.03	0.12

Tableau 16: Précision absolue (biais) et la répétabilité des mesures manuelles

Comme attendu, les écarts dus au distancemètre sont du même ordre de grandeur que ceux avec les visées en mode ATR. Il peut être remarqué que les angles verticaux sont plus précis qu'en mode ATR.

En prenant l'écart vertical et la distance mesurée, l'angle de l'écart vertical peut être calculé. Le tableau suivant comporte un récapitulatif des corrections V_{ATR} :

Unité [gon]	Angle écart transversal (moyenne)	Ecart-type
AT401 (2 pos) – TM50 (ATR, 2pos)	-0.0026	0.0003
AT401 (2 pos) – TM50 (manuel, 2pos)	-0.0006	0.0004
TM50 (manuel, 2pos) – TM50 (ATR, 2pos)	-0.0013	0.0004

Tableau 17: Récapitulatif des angles d'erreurs verticales

Ces corrections seront contrôlées au niveau de leur stabilité dans le temps et après usage du TM50 dans des conditions extrêmes.

Vu qu'il y a également une erreur systématique entre les visées manuelles du TM50 et les mesures de l'AT401, la question de savoir si l'AT401 ne comporte pas non plus une erreur systématique d'ATR se pose. Selon des mesures de comparaison entre l'AT401 et le DNA03, effectuées par des étudiants de la FHNW²⁷, la différence transversale sur une distance d'environ 5 mètres vaut au maximum 0.02 mm. L'angle d'écart transversal est égal à 0.6^{cc}, mais aucune erreur systématique n'a pu être trouvée.

Néanmoins, il faudrait contrôler l'AT401 de l'HEIG-VD avec un test similaire. Pour cela des sphères RRR ou CCR peuvent être posées par terre sur un repère stable. Ces sphères seront mesurées par l'AT401 et nivelées ensuite en mettant une mire invar dessus. L'analyse des écarts donnera un indice sur l'erreur V_{ATR} de l'AT401. Evidemment, le niveau de précision doit être contrôlé auparavant.

Le schéma²⁸ suivant montre les mesures envisagées :

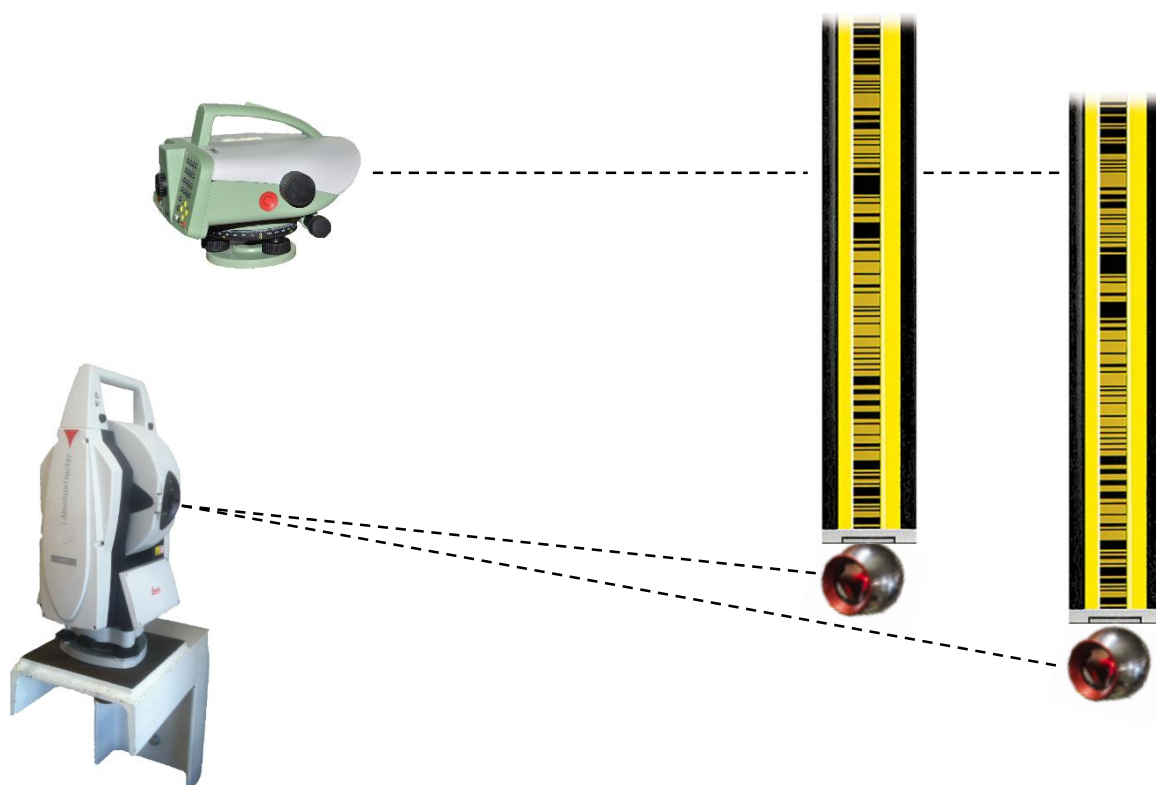


Figure 28: Schéma du contrôle des visées verticales de l'AT401

²⁷ CONCETT Stefan, VOGT Michael, Ausrichtung grosser Maschinen mit dem Absolut Tracker Leica AT401, p. 63s

²⁸ Sources : DNA03 : https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4c/Leica_Geosystems_DNA_03.JPG
Mire : <http://www.lepont.fr/mire-invar-gwcl92-pour-dna,fr,4,31660313.cfm> [consulté le 20.07.2015]

7.6. Valeurs de calibration

Annexe N_7_6_Constante TM50

En se basant sur les tests précédents, les valeurs de calibration suivantes seront appliquées dans un premier temps :

	Calibration (Correction des mesures TM50)
Distancemètre	0.36 mm
V _{ATR}	- 0.0026 gon

Tableau 18: Valeurs de calibration appliquées

Il est préférable de faire 3 séries de mesures en mode ATR et de les corriger, plutôt que de devoir faire des visées en mode manuel sans corrections. En effet, la luminosité dans le hall de mesure, ainsi que la fatigue de l'œil, influent sur les mesures manuelles.

Toutes les valeurs de calibration ont été déterminées par des mesures avec l'AT401. Mais on pourrait également calibrer le TM50 en prenant uniquement des mesures avec celui-ci. Aucune erreur proportionnelle à la distance due au distancemètre n'a été trouvée, comme par exemple une erreur cyclique ou une erreur due à la variation de la fréquence modulée. Une erreur constante peut aussi être déterminée sur des distances inconnues, en les mesurant depuis l'extérieur et depuis le milieu des deux points :

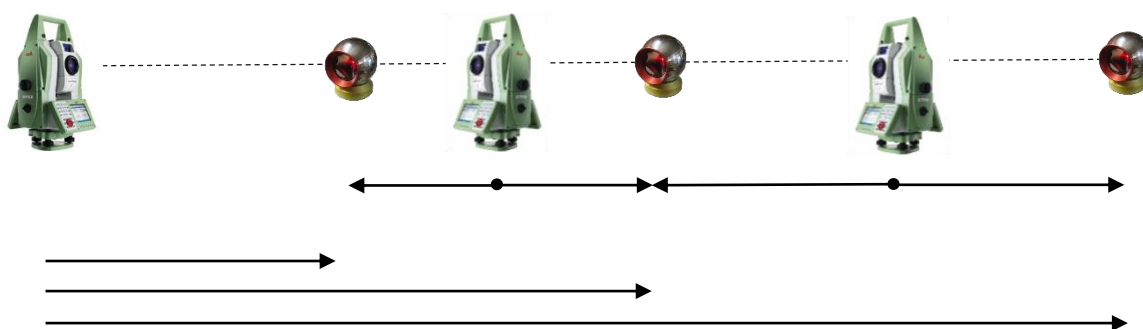


Figure 29: Schéma de détermination d'une erreur constante du distancemètre

Lors des tests une constante de $0.31 \text{ mm} \pm 0.04 \text{ mm}$ a pu être trouvée. Il ne s'agit que de trois mesures, ce qui n'est pas assez pour une détermination fiable. Mais avec un tel test la constante peut être trouvée facilement. Les calculs se trouvent en annexe *N_7_6_Constante TM50*.

8. Contrôle du modèle de correction

8.1. Stabilité des valeurs de calibration

Annexe N_8_1_Stabilité

Le CERN réalise une recalibration des stations totales généralement une fois par année. Il semble que les valeurs évoluent très peu en fonction du temps. Ce qui sera testé dans ce chapitre est de savoir si une station totale pourrait être utilisée pour des travaux à l'extérieur, sous des conditions météorologiques extrêmes, sans que ses valeurs de calibration varient. Pour cela une utilisation de l'instrument pendant une grande chaleur a été simulée. Le TM50 a été mis pendant trois heures sur le toit de l'HEIG, à une température de 33 °C.



Figure 30: Simulation des mesures à l'extérieur avec des températures élevées

Après réacclimatation à la température de l'intérieur, les valeurs de calibrations ont été vérifiées. Celles-ci n'ont pas évaluées ce qu'indique le tableau 19.

Une deuxième expérience consiste à prouver la stabilité des valeurs de calibration après une utilisation du TM50 dans un environnement avec des températures particulièrement basses. Pour ceci la station totale a été mise pour trois heures dans une chambre froide de l'HEIG, à -10 °C. Le constructeur prévoit des températures de travail jusqu'à -20 °C. Ensuite les valeurs de calibrations ont été recalculées :

	Valeurs initiales	Valeurs après utilisation sous conditions chaudes	Valeurs après utilisation sous conditions froides
Constante distancemètre [mm]	0.36	0.40 ± 0.04	0.39 ± 0.10
Constante V_{ATR} [gon]	- 0.0026	$- 0.0026 \pm 0.0003$	$- 0.0025 \pm 0.0003$

Tableau 19: Stabilité des valeurs de calibration

Les valeurs de calibration n'ont pas évolué après utilisation de la station totale sous des conditions extrêmes. Il faut préciser qu'il ne s'agit que de deux tests effectués sur un intervalle de 5 jours. Afin de fiabiliser cette hypothèse il faudrait plus de tests, sur une plus longue période.

8.2. Visées inclinées

Annexe 8_2_Visées inclinées

Jusqu'à présent les visées de comparaison se trouvaient assez proches de l'horizontale. L'objectif du test suivant est de vérifier le modèle de calibration lors de mesures inclinées. Deux sphères se trouvaient à une inclinaison de 40 gons par rapport à l'horizontale. Il s'agit d'une sphère fixée à un goujon magnétique et de deux sphères fixées sur un support magnétique collé sur le mur, un étage plus haut. En plus, une visée est faite trois étages plus haut, avec une forte inclinaison de 75 gons :

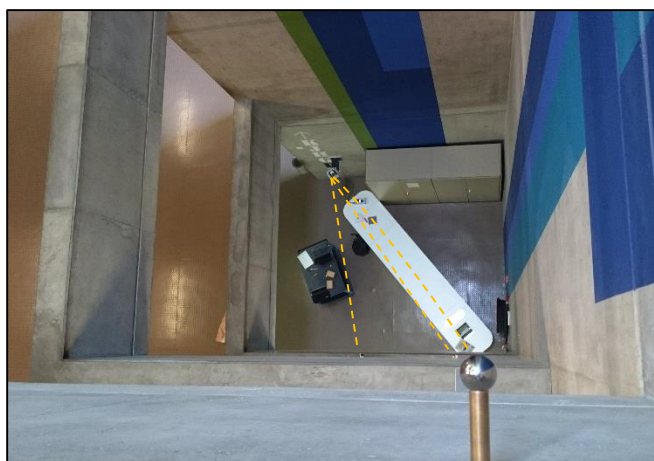


Figure 31: Visées inclinées (2 visées un étage plus haut; 1 visée sur 3 étages)

Puis les valeurs de calibration ont été calculées où les mêmes grandeurs ont pu être trouvés en tenant en compte des écarts-types (cf. annexe 8_2_Visées inclinées). Ensuite, une transformation de coordonnées des mesures brutes corrigées (TM50) a été calculée. Pour ceci, une seule rotation autour de l'axe Z doit être prise en considération, car les deux instruments n'ont pas la même référence horizontale, mais sont stationnés sur la même embase.

Le tableau suivant montre les écarts calculés après la transformation de coordonnées :

N° point	Distance inclinée approxim. [m]	Angle V approx. [gon]	Résidus sans corrections [mm]	Résidus avec corrections [mm]
310	10.64	25.487	0.53	0.25
320	4.86	61.709	0.44	0.04
210	4.42	57.301	0.40	0.08
110	24.68	102.191	1.16	0.12
120	24.65	102.120	1.16	0.13
Précision absolue (sans pt 310)			0.79	0.09
Ecart-type			0.43	0.04

Tableau 20: Résidus des transformations "AT401 - TM50" avec les moyennes des visées en ATR brutes / corrigées

L'écart « AT401 – TM50 » des deux points inclinés à 40 gons par rapport à l'horizontale, est inférieur à 1/10 de mm. Il semble qu'une inclinaison de telle ampleur est envisageable et applicable avec le même modèle de correction. Mais les distances de mesure étaient uniquement de 5 mètres. D'autres tests sur des distances plus longues devront être faits. L'erreur de tourillonnement aura une grande influence. Le point qui se trouvait à une inclinaison de 75 gons a un écart de 0.25 mm, ce qui est nettement plus, par rapport aux autres. Il s'agit d'une inclinaison trop grande et d'ailleurs, une inclinaison très rarement rencontrée en pratique.



*Figure 32: Visées très inclinées prises depuis la même
potence*

8.3. Précision réelle du TM50 calibré

Annexe N_8_3_Precision calibration

En calculant les écarts entre les mesures de l'AT401 et du TM50 la précision réelle de ce dernier peut être déterminée. Les précisions des mesures non corrigées sont généralement meilleures dans la salle de topométrie D01, car les distances de mesure sont plus courtes. Mais aussi, car les conditions atmosphériques sont plus stables et contrairement au hall d'entrée de l'HEIG, il n'y avait pas de travaux à proximité.

Ci-dessous se trouvent les résidus des transformations de coordonnées brutes et corrigées dans la salle D01 :

N° point	Distance inclinée approxim. [m]	Résidus sans corrections [mm]	Résidus avec corrections [mm]
D01_110	9.04	0.57	0.07
D01_120	12.80	0.50	0.20
D01_210	12.90	0.62	0.08
D01_310	12.81	0.54	0.15
D01_320	12.60	0.58	0.19
	Précision absolue	0.56	0.14
	Ecart-type	0.05	0.06

Tableau 21: Précisions absolues (moyenne des écarts entre les transformations de coordonnées)
et l'écart-type

Les fiches de transformations se trouvent en *annexe N_8_3_a_Precision calibration*.

Les mesures utilisées pour prouver la stabilité des valeurs de calibration (après échauffement / refroidissement du TM50) sont également utilisées pour déterminer la précision réelle du TM50, vu que les correctifs du distancemètre et de l'ATR n'ont pas évolués. Le tableau correspondant se trouve sur la page suivante. Les détails des calculs des transformations sont en annexe *N_8_3_b/c_Precision calibration*.

		Résidus sans corrections [mm]		Résidus avec corrections [mm]	
N° point	Distance inclinée approxim. [m]	Test 13.07 (b)	Test 14.07 (c)	Test 13.07 (b)	Test 14.07 (c)
D01_110	8.54	0.54	0.53	0.05	0.11
D01_120	12.47	0.70	0.60	0.07	0.09
D01_210	14.70	0.78	0.81	0.10	0.13
D01_310	12.81	0.60	0.53	0.04	0.16
D01_320	12.73	0.58	0.70	0.09	0.14
Précision absolue		0.64	0.63	0.07	0.13
Ecart-type		0.10	0.12	0.02	0.03

Tableau 22: Résidus des transformations avec les mesures TM50 sans / avec corrections

La précision absolue est égale à la moyenne des résidus « AT401-TM50 », l'écart-type consiste à la répétabilité. En fait, il s'agit plutôt d'une précision relative, car il y a également des erreurs instrumentales propres à l'AT401, mais dans ce cadre l'AT401 est admis comme valeur « doit ». Les résidus sans corrections se trouvent dans la marge des spécifications techniques données par le constructeur (cf. chapitre 3.4). Il faut préciser que l'imprécision de l'ATR ne se trouve pas dans les calculs de précision au chapitre 3.4. En plus, ce n'est pas à exclure que l'AT401 comporte lui-même une erreur systématique de V_{ATR} . De telle façon la détermination de la précision absolue (sans corrections) du TM50 sera trop pessimiste.

En regardant les résidus après application de la calibration, des valeurs homogènes de précision absolue ont pu être trouvées. En considérant les trois échantillons des deux derniers tableaux comme un seul, une précision absolue de $0.11 \text{ mm} \pm 0.05 \text{ mm}$ (1σ) est obtenue. Afin de donner la précision avec un niveau de confiance similaire de celui du constructeur (2σ), l'écart-type sera doublé. Dans un environnement restreint, avec des visées inférieures à 15 mètres, des mouvements supérieurs à 0.21 mm peuvent être détectés.

Un local moins favorable était le hall d'entrée, mais la précision absolue obtenue par la station totale restait la même que dans la salle D01. En consultant l'annexe *N_8_3_d_Precision_calibration* on constate une précision absolue calibrée de $0.09 \text{ mm} \pm 0.035 \text{ mm}$. Pour les visées inclinées (cf. chapitre 8.2 tableau 20) il s'agit de valeurs pratiquement identiques. Il semble que les mouvements de 0.20 mm peuvent être déterminés dans un espace de 30 mètres, même avec des inclinaisons d'environ 40 gons. Mais il s'agit uniquement de neuf mesures exploitables qui ont été faites dans le hall. Pour affiner l'affirmation que des mouvements supérieurs à 0.20 mm soient détectables par ce TM50 plus de mesures sont nécessaires.

9. Contrôle d'une pièce industrielle

9.1. Sources d'erreurs

La calibration effectuée sur la station totale pourrait servir à la mensuration d'une pièce industrielle lors du processus de construction ou de transformation, si la précision de l'instrument convient. Un exemple d'une telle pièce industrielle est un fuselage d'avion en transformation. Dans ce chapitre les sources d'erreurs propres à la pièce sont montrées, sans être expliquées en détail.

D'abord l'objet doit se trouver sur un support et un sol stable. Des roues ne sont pas des supports stables, même si la pression des roues sera contrôlée lors des mesures. Un hall doit être climatisé afin de ne pas permettre de dilatations du matériel en fonction de la température. En plus, la pièce doit être protégée contre les rayons de soleil pour ne pas chauffer. Néanmoins, un gradient de température entre le côté supérieur et inférieur de l'objet peut être retrouvé²⁹.

La plupart des avions ont un fuselage en aluminium, un matériau qui a l'avantage d'être léger. Selon le type d'avion, il s'agit d'une épaisseur d'enveloppe de 1 à 2 mm qui est renforcé à l'aide d'une tôle²⁹. En considérant une enveloppe continue en aluminium sur une longueur de 40 mètres, le matériel se dilate de la manière suivante pour 1 °C :

$$\Delta L = \alpha \times L \times \Delta T$$

$$\alpha_{\text{Aluminium}} = 23.1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$$

$$\Delta L = 23.1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1} \times 40\text{m} \times 1 \text{ K} = 0.000924 \text{ m}$$

$$\underline{\Delta L = 0.9 \text{ mm}}$$

Équation 1: Dilatation thermique linéaire³⁰

Déjà pour une différence d'un degré, la pièce se dilate d'environ 1 millimètre. Dans la formule ci-dessus uniquement la dilatation longitudinale est calculée, en réalité il y a des mouvements dans les trois dimensions.

La température est l'influence majeure, mais on y retrouve également des dilatations dues au propre poids de l'objet²⁹.

²⁹ GUILLAUME Michel, ZHAW, Renseignement par mail (05.06.2015)

³⁰ Commissions romandes de mathématique, de physique et de chimie, Formulaires et tables, p.147

La figure suivante montre un exemple d'un fuselage d'avion en construction :



Figure 33: Construction d'un avion (exemple d'un type Comac C919)³¹

Pour résumer, il faut un hall climatisé et des supports très stables afin d'éviter toute dilatation et déplacement de l'objet. Théoriquement, si on connaît la température de l'objet pour chaque étape de mesure, les dilatations thermiques peuvent être calculées, ce qui peut aussi être géré dans le logiciel de *Spatial Analyzer*. Mais ayant un objet d'une forme complexe avec un mélange de différents éléments, les calculs deviennent fastidieux.

Malgré des mensurations de précision au sol, un avion se déforme considérablement pendant son utilisation. À 10'000 mètres d'altitude, un avion à fuselage large s'agrandit diamétralement de 10 cm. Selon le type d'avion, les extrémités des ailes sont même soulevées de 1.5 m à 2 m. Un dernier exemple est le Concorde, qui subissait une dilatation thermique en long du fuselage de 30 cm.²⁹

³¹ Source : <http://www.flightglobal.com/assets/getasset.aspx?itemid=60157> [consulté le 20.07.2015]

9.2. Contrôle des points stables

Annexe N_9_2_Points stables

Afin de simuler le contrôle d'une pièce industrielle, des mesures sur les mêmes sphères, à des jours différents, seront comparées. Il s'agit de quatre observations sur des sphères se trouvant dans les trous des potences dans la salle D01 :



Figure 34: Contrôle des points considérés stables

Puis une transformation de coordonnées de ces deux mensurations peut être calculée. Les deux stations se trouvaient à 20 cm près au même endroit. C'est pourquoi une rotation autour de l'axe Z ainsi que trois translations sont considérées. Dans le tableau suivant se trouvent les résultats des transformations (de deux jours différents) entre les mesures brutes et entre les mesures corrigées :

N° point	Résidus de la transformation	
	Mesures brutes	Mesures corrigées
D01_110	0.04	0.03
D01_120	0.13	0.12
D01_210	0.09	0.09
D01_310	0.08	0.09
Précision relative	0.09	0.08
Répétabilité	0.04	0.04

Tableau 23: Résidus des transformations de coordonnées des points stables

Plus de détails concernant ces transformations peuvent être retrouvées dans l'annexe N_9_2_Points stables. Il est intéressant de constater qu'avec les visées brutes, la même précision relative a pu être atteinte. Même si ces mesures se différencient de 0.5 mm à 0.7 mm par rapport

aux mesures calibrées. Cela vient du fait qu'il s'agit uniquement de correctifs constants et que les deux stations se trouvent plus ou moins au même endroit. S'il s'agit d'une pièce industrielle ayant une forme simple et qui peut être contrôlée avec une seule station, l'utilisation d'une station totale non-calibrée peut être envisagée.

L'évolution des résidus n'a pas été contrôlée à l'aide des canevas plus complexes.

La précision relative calculée au tableau 23, coïncide avec celle trouvée au chapitre 8.3 (tableau 22), où les mouvements à partir de 0.20 mm sont détectables à un niveau de confiance de 95 %.

10. Perspective

Comme évoqué précédemment, l'AT401 comporte probablement aussi une erreur systématique de l'ATR. Celle-ci pourrait être vérifiée avec le test schématisé à la figure 28. S'il s'agit d'un systématisme de l'ATR, et devrait être corrigé avant de calibrer la station totale. La constante d'addition du TM50 peut être trouvée de manière plus simple, et uniquement à l'aide d'une station totale (donc sans AT401). Cela en faisant des mesures sur des points alignés (cf. figure 29). Il serait intéressant de demander un certificat de calibration (pas d'étalonnage) par Leica Geosystems afin de pouvoir comparer les deux calibrations. Le même processus de calibration pourrait également être fait avec une autre station totale afin de pouvoir analyser la différence des valeurs trouvées.

Une autre question qui n'a pas pu être résolue est de savoir si la référence verticale « zéro » de l'AT401 correspond à celle du TM50.

La précision du TM50 calibré peut correspondre à la précision (selon constructeur) d'une station totale Leica de type TDRA6000, qui est de ± 0.25 mm (1.5σ). Il faut dire que le TM50 est initialement un instrument de monitoring et le TDRA6000 a été spécialement développé pour la métrologie, mais la calibration du TM50 permet également une utilisation pour certaines tâches de métrologie.

Dernièrement, il faudrait tester l'aptitude d'une station totale calibrée à mesurer une pièce industrielle plus complexe, qui nécessiterait plusieurs stations.

11. Conclusion

Grâce à la calibration d'une station totale, une amélioration considérable de la précision absolue est obtenue. En plus, pour le TM50 utilisé, il s'agit de correctifs constants. La calibration est donc simple à déterminer. Les constructeurs d'aujourd'hui ont fortement minimisé de nombreuses erreurs instrumentales qui touchaient encore les stations totales d'hier. Cela a d'ailleurs pu être remarqué lors de plusieurs mesures expérimentales. Par exemple aucune erreur cyclique n'a pu être déterminée dans un environnement de 50 mètres.

Néanmoins, deux valeurs de calibrations ont pu être déterminées : une erreur constante du distancemètre et une erreur i_{ATR} . Ces valeurs n'ont ni évoluées dans le temps, ni sous des conditions extrêmes. Cela est un élément déterminant pour une entreprise possédant un nombre limité de stations totales, où un instrument calibré pourrait être utilisé dans diverses conditions sans devoir le recalibrer à chaque fois. Souvent un intervalle de calibration d'un an est suffisant.

L'Absolute Tracker AT401 peut être utilisé comme moyen de calibration d'une station totale, mais n'est pas l'idéal au niveau économique et au niveau de la précision. Le distancemètre d'une station totale est plus simple à calibrer à l'aide d'une base d'étalonnage, comme cela est souvent fait. S'il s'agit uniquement d'une constante d'addition, elle peut être déterminée par la station totale elle-même. Concernant l'erreur i_{ATR} , une erreur constante entre les visées manuelles du TM50 et les mesures par l'AT401 a été trouvée. Cela indique l'existence d'une erreur systématique concernant les angles verticaux de l'AT401.

Finalement, si un opérateur doit contrôler une pièce industrielle simple qui peut être déterminé depuis une seule station, il n'est pas obligé de calibrer sa station totale si elle comporte uniquement des erreurs constantes, vu qu'il faudrait uniquement détecter des déplacements relatifs.

Il est possible d'apercevoir des mouvements de 0.20 mm avec un TM50 après calibration. La composante majeure influant la précision absolue, est la résolution du distancemètre, qui est de 0.10 mm.

En calibrant le TM50, des améliorations de précision d'un facteur trois ont pu être atteinte par rapport aux spécifications techniques, ce qui reflète l'intérêt d'une telle calibration.

V. Bibliographie

Par ordre alphabétique :

Association Française de Normalisation. 2014. ISO Guide 98-3. *Incertitude de mesure - Partie 3: Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure*. Juillet 2014.

BARRAS, Vincent. 2010. *La mesure des distances (directe et MED)*. 2010.

—. 2007. Les mensurations industrielles. 2007. p. 18.

—. 2013. *Les théodolites et stations totales*. 2013. p. 46.

Commissions romandes de mathématique, de physique et de chimie. 2010. *Formulaires et tables*. s.l. : G d'Encre, 2010.

CONCETT Stefan, VOGT Michael. 2011. *Ausrichtung grosser Maschinen mit dem Absolut Tracker AT401*. s.l. : FHNW, 2011. p. 75.

Hexagon Metrology. 2010. Leica Absolute Tracker AT401 White Paper. *Leica Geosystems*. [En ligne] 2010. [consulté : 23.06.2015.]
http://metrology.leica-geosystems.com/en/Downloads_6843.htm?cid=14602.

HexagonMetrology. 2012. Leica Absolute Tracker AT401 brochure. *Leica Geosystems*. [En ligne] 2012. [consulté : 23.06.2015.] http://metrology.leica-geosystems.com/downloads123/m1/metrology/AT401/brochures/Leica%20Absolute%20Tracker%20AT401_fr.pdf.

JOECKEL Rainer, STOBBER Manfred, HUEP Wolfgang. 2008. *Elektronische Entfernungs- und Richtungsmessung und Ihre Integration in aktuelle Positionierungsverfahren*. 5. s.l. : Wichmann, 2008. S. 525.

Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM). 2008. Vocabulaire international de métrologie (VIM). 2012. 2008. p. 108.

LEHNING Sophie. 2010. *Untersuchung des Leica Tm30 für Monitoring-Anwendungen*. ETH Zurich. 2010. p. 31, Masterarbeit.

Leica Geosystems. 2013. Calibration Certificates White Paper. [En ligne] 2013. [consulté : 23. 07.2015.]
http://www.leicageosystems.com/media/new/product_solution/Certificates_en_GZD6.pdf.

—. 2013. Leica MS50 / TS50 / TM50 – User Manual. [En ligne] 2013. [consulté: 23.06.2015.]
<http://surveyequipment.com/assets/index/download/id/219/>.

—. 2013. Leica Nova TM50 - Caractéristiques Techniques. [En ligne] 2013. [consulté: 23.06.2015.]
http://www.leica-geosystems.com/downloads123/zz/tps/nova_tm50/brochures-datasheet/Leica_Nova_TM50_DAT_fr.pdf.

—. 2009. TS30 - White Paper. [En ligne] 28 04 2009. [consulté: 01.07.2015.]
http://www.leica-geosystems.com/en/page_catalog.htm?cid=11227.

MOESER Michael, MUELLER Gerhard, SCHLEMMER Harald. 2012. *Handbuch Ingenieurgeodäsie – Grundlagen*. 4. s.l. : Wichmann, 2012. S. 627.

Organisation internationale de normalisation. 2001. Optique et instruments d'optique - Méthodes d'essai sur site des instruments géodésiques et d'observation - Partie 3: Théodolites. *ISO 17123-3:2001*. 2001.

—. 2012. Optique et instruments d'optique - Méthodes d'essai sur site des instruments géodésiques et d'observation - Partie 4: Télémètres électro-optiques. *ISO 17123-4:2012 (E)*. 2012.

Organisation internationale de normalisation. 2007. Statistique – Vocabulaire et symboles – Partie 1 : Termes statistiques généraux et termes utilisés en calcul des probabilités. *ISO 3534-1*. 2007.

XYZ, Revue. 2012. AFT. [En ligne] 135bis, 2012. [consulté: 01.07.2015.]
<http://www.aftopo.org/FR/REVUES/revue-4-136.html>.

VI. Annexes

La numérotation des annexes correspond aux chapitres du rapport.

Nom annexe « papier »	Description
5_0_Accessoires	Présentation des accessoires (sphères, supports, etc.)
5_1_Supports	Evaluation de la précision des supports de sphères / prismes
5_2_GPH1P	Test de précision des prismes de précision GPH1P
6_3_Mesures_de_séries	Evaluation du nombre de séries nécessaires en mode ATR
7_2a_Pilotage_AT401	Test de différents modes de pilotage de l'AT401
7_2b_Mesure_2pos_AT401	Tests de différence de précision 1 pos / 2 pos avec l'AT401
7_3_Centrage	Evaluation de la précision de centrage AT401 – TM50
7_4_Distancemètre	Calibration du distancemètre du TM50 (points alignés)
7_5_ATR	Calibration de l'ATR du TM50
8_2_Visées inclinées	Test de la précision de la calibration pour des visées inclinées
Processus de calibration	Explication d'une calibration à l'aide de l'AT401

Les annexes numériques comportent le préfixe « N » :

Nom annexe numérique	Description
N_0_Planning	Planning du travail de Bachelor
N_1_1_Cahier des charges	Cahier des charges du travail de Bachelor
N_5_1_Supports	Comparaison des mesures AT401 des différents supports
N_5_2_GPH1P	Mesures et calculs concernant le contrôle des prismes GPH1P
N_6_2_Résolution	Traitement pour définir la résolution du TM50 (1 et 2 pos)
N_6_3_Mesures de séries	Moyennes de différents nombres de mesures de séries
N_7_2a_Pilotage AT401 Test 1	Comparaison des coordonnées des groupes SA (Test 1)
N_7_2a_Pilotage AT401 Test 2	Comparaison des coordonnées des groupes SA (Test 2)
N_7_2a_Pilotage TM50	Pilotage du TM50 par connexion radio
N_7_2b_Mesure 2pos AT401	Différence des mesures en 1 pos / 2 pos AT401
N_7_4_Distancemètre	Calibration du distancemètre
N_7_5_ATR	Calibration de l'ATR, résultats de différentes mesures test
N_7_6_Constante TM50	Détermination de la constante d'addition du TM50
N_8_1_Stabilité	Stabilité des valeurs de calibration
N_8_2_Visées inclinées calibration	Calculs des valeurs de calibration par visées inclinées
N_8_2_Visées inclinées SA	Transformation de coord. par SA des mesures inclinées
N_8_3_a_Précision calibration	Best-Fit des mesures initiales / corrigées (D01)
N_8_3_b_Précision calibration	Best-Fit des mesures initiales / corrigées (D01) après échauffement du TM50
N_8_3_c_Précision calibration	Best-Fit des mesures initiales / corrigées (D01) après refroidissement du TM50
N_8_3_d_Précision calibration	Best-Fit des mesures initiales / corrigées (hall niveau F)
N_9_2_Points stables	Best-Fit des mesures initiales / corrigées d'un réseau de points stables (D01)
N_Processus simplifié	Fichier de calcul pour une calibration par le processus simplifié
N_Processus complet	Fichier de calcul pour une calibration par le processus complet