

Etalonnages de mires de nivellement

Travail de Bachelor

Bolzon Nicolas

28 juillet 2017

Professeur responsable : M. Thomas Touzé

Expert : M. Jean-Frederic Fuchs

Avant-propos

Ce rapport est le résultat d'un travail de dix semaines dans le cadre du travail de Bachelor. Il est le fruit de trois années d'étude et d'apprentissage au sein de la Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du canton de Vaud (HEIG-VD). Ce travail pratique permet de vérifier les connaissances qu'un diplômé doit avoir acquises pour valider sa qualité d'ingénieur.

Ce travail est également une opportunité pour développer un protocole de recherche sur un sujet donné, ce qui est beaucoup plus compliqué dans la vie active d'un bureau.

Ce travail s'est déroulé du 22 mai au 28 juillet 2017, il contient les éléments de rendu suivant :

- Le présent rapport
- Les diverses annexes
- Un CD-Rom contenant les versions informatiques des précédentes pièces
- Un poster de présentation synthétisant le travail

Remerciements

Je tiens particulièrement à remercier, pour le suivi et l'aide dans ce travail, les personnes suivantes :

M. Thomas Touzé, professeur à la HEIG-VD et responsable du suivi de ce travail, pour sa disponibilité permanente et le temps qu'il a consacré aux questions et problèmes que j'ai rencontrés.

M. Jean-Frederic Fuchs, ingénieur géomètre au CERN et expert de ce travail, de m'avoir accordé du temps et de m'avoir aiguillé dans certaines directions lors de la séance intermédiaire. Je le remercie également pour le prêt des mires de précisions appartenant au CERN.

M. Michel Kasser, professeur à la HEIG-VD, pour la réalisation du script permettant de contrôler le niveau numérique depuis l'ordinateur.

M. Jean-Claude Volery, chef technique du département EC+G de la HEIG-VD, pour le temps qu'il a passé à m'aider sur mes problèmes techniques avec le banc en marbre, mais également pour son aide dans les montages du prisme de Dove.

Mes camarades de classe, pour leur présence lors des moments de détente, mais aussi et surtout pour les réponses qu'ils ont su m'apporter.

M. Chevallier Nicolas, diplômé et camarade classe, pour le temps qu'il a consacré à la relecture technique de ce travail.

Sabrina Maeder, ma compagne, pour l'œil critique extérieur qu'elle a su m'apporter lors de la relecture de ce travail.

Résumé

Le nivellement de précision est très utilisé dans la vie professionnelle des géomètres. Il exige un protocole de mesure minutieux et long pour donner de bons résultats. Pour arriver aux précisions souhaitées (en général quelques dixièmes de millimètre) il faut pouvoir s'assurer que le matériel est en parfait état, ou au moins connaître la valeur de son usure.

Ce travail tente de mettre en place une méthode de contrôle du système de nivellement de précision, afin de garantir à l'opérateur un matériel de qualité et fiable. Cette méthode est basée sur le prisme de Dove, qui permet d'effectuer une rotation sur l'image d'un objet. De cette manière, en tournant l'image à 45° , il est possible de faire du nivellement avec une mire couchée à l'horizontale. Ceci présente l'avantage de pouvoir éliminer la contrainte de hauteur sous plafond, souvent problématique avec de grandes mires. De plus, l'école possède un interféromètre, capable de mesurer le déplacement horizontal d'un chariot, il est donc possible de mettre en relation des mesures interférométriques horizontales avec des mesures de nivellement, théoriquement verticales.

Cependant, le placement d'une mire à l'horizontal n'est pas naturel, des questions se posent alors quant à la viabilité de cette méthode de mesure. De plus, la visée est effectuée à travers un prisme, il faut alors pouvoir être sûr que celui-ci n'altère pas la précision.

Le premier point de ce travail est de vérifier la neutralité du prisme quant à la visée. Plusieurs tests sont donc effectués, ils consistent à traduire et tourner le prisme autour d'un repère fixe à 6 degrés de liberté. Ces premiers tests montrent que les trois translations (x, y, z) et rotations (x, y, z), n'ont pas d'influence sur les mesures. En effet toutes les mesures effectuées selon les différentes orientations sont comprises dans les intervalles de confiance des mesures de référence.

Une deuxième source d'erreur possible est la perpendicularité entre la visée du niveau et la mire. En position verticale, le lien pour assurer l'orthogonalité est fait par le positionnement du matériel à la nivelle sphérique. Ici, pas de gravité pour lier les mesures, il faut donc positionner les instruments de telle sorte à simuler la nivelle et assurer une visée normale à la mire. Des mesures ont ainsi été effectuées pour calculer le défaut de perpendicularité, ce défaut s'élève à 0.5 ppm au maximum, ce qui est négligeable dans le résultat des mesures d'étalonnage.

Une dernière possibilité d'erreur est la position du ruban de mesure, qui se voit placer dans une position non conventionnelle, à l'horizontale. Habituellement il est tendu par un ressort pour assurer sa position, ici, le ressort n'exerce pas sa force dans la même direction que la pesanteur. Des calculs vectoriels ainsi que des mesures avec la mire à la verticale (position classique) ont donc été effectués pour s'assurer que cette position de mire ne déforme pas le ruban. Les résultats obtenus donnent des valeurs comprises dans les intervalles de confiance des mesures de référence. Ce qui signifie que l'impact est négligeable. De plus, une valeur de 0.13ppm est calculée en fonction du jeu du ruban dans le support en aluminium. Cette valeur est l'écart entre une mire à la verticale et une mire à l'horizontale. Cette position n'engendre donc pas de soucis dans les mesures.

Une fois toutes les sources d'erreur écartées, il est possible de mettre en place un protocole de mesure d'étalonnage du système de nivellement, notamment pour évaluer l'erreur de facteur d'échelle ainsi que l'erreur de talon de la mire. Cette mise en place passe par des pré-analyses qui permettent de quantifier le nombre de mesures à effectuer ainsi que leur précision associée. Pour le facteur d'échelle, les pré-analyses montrent qu'il faut environ 186 mesures d'une précision de 0.7 centième de millimètre pour arriver à une précision sur le facteur d'échelle de 1 ppm. Finalement, la précision atteignable dans la pratique tourne autour de 2ppm, donc plus que prévus.

En revanche, les mesures effectuées sur le talon de la mire ont permis de mettre en évidence que les instruments de mesure utilisés (AT401 et niveau) pour la méthode de détermination n'ont pas une précision suffisante. Il faut donc réfléchir à la mise en place d'un nouveau protocole faisant probablement intervenir des mesures angulaires couplées à des distances interférométriques.

Cahier des charges

La finalité de ce travail doit remplir les points suivants :

- Valider la métrologie du prisme de Dove et prouver l'indépendance entre le facteur d'échelle mesuré et l'orientation du prisme
- Valider la métrologie de l'installation de la mire à l'horizontale sur le banc d'étalonnage
- Mettre en place une méthode pour la détermination du facteur d'échelle de la mire
- Mettre en place une méthode pour la détermination de l'erreur de talon de la mire
- Vérifier si les mesures interférométriques ne peuvent pas être remplacées par des mesures AT401.

Il est à noter que le cahier des charges complet se trouve en annexe 1, page 50.

Table des matières

Avant-propos.....	1
Remerciements	2
Résumé.....	3
Cahier des charges.....	5
Table des matières	6
Table des illustrations.....	8
Bibliographie.....	9
Introduction.....	10
1 Le système de nivellement.....	11
1.1 Erreur de facteur d'échelle.....	11
1.2 Erreur du talon de la mire	12
2 Outils de mesure	13
2.1 Niveau de précision Leica DNA03.....	13
2.2 Banc en marbre et interféromètre	13
2.3 Prisme de Dove.....	14
2.4 Leica AT401.....	15
3 Contrôle du positionnement du système de mesure.....	16
3.1 Positionnement de la mire	16
3.2 Positionnement du niveau	19
4 Horizontalité du ruban	20
4.1 Jeu du ruban	22
5 Contrôle du prisme de Dove.....	23
5.1 Effets de translations.....	23
5.1.1 Translation transversale (axe x)	25
5.1.2 Translation en hauteur (axe z).....	26
5.1.3 Translation longitudinale (axe y)	26
5.2 Effets de rotations	27
5.2.1 Rotation selon l'axe x	27
5.2.2 Rotation selon l'axe « z ».....	28
5.2.3 Rotation selon l'axe « y »	28
5.3 Conclusion des résultats.....	29
5.4 Nouvelles mesures pour contrôle	30
5.4.1 Choix des mesures de référence	31
5.4.2 Résultats	32
5.5 Conclusion des tests sur le prisme de Dove	33

6	Etalonnage du facteur d'échelle du système de mesure	34
6.1	Pré-analyse	34
6.1.1	Ecart-type	34
6.1.2	Fiabilité interne	35
6.1.3	Fiabilité externe.....	35
6.1.4	Résultats	36
6.2	Protocole de mesure	38
6.3	Mesure selon pré-analyse	38
6.4	Approximation de la précision de la méthode de mesure	39
6.4.1	Reprise de la pré-analyse	40
6.5	Test des mires du CERN.....	40
6.6	Conclusion de la méthode d'étalonnage du facteur d'échelle.....	41
7	Etalonnage du talon de la mire	42
7.1	Protocole de mesure	42
7.2	Répétabilité des mesures	43
7.2.1	Détermination à l'AT401	43
7.2.2	Détermination au niveau numérique DNA03.....	44
7.3	Détermination des erreurs de talon.....	44
7.3.1	Détermination du zéro de la mire	44
7.3.2	Détermination de la planéité du talon de la mire	45
7.4	Conclusion de la méthode d'étalonnage du talon de la mire	45
8	Problèmes rencontrés	46
8.1	Panne du banc d'étalonnage.....	46
8.2	Montage du prisme de Dove	47
8.3	Fragilité du script de commande du niveau	47
9	Conclusion	48
10	Annexes	49

Table des illustrations

Figure 1 : Illustration du code barre Leica (Leica Geosystems AG, 2007)	11
Figure 2 : Illustration du talon de la mire Leica (Leica Geosystems AG, 2007)	12
Figure 3 : Fonctionnement de l'interféromètre (Renishaw, 2016)	13
Figure 4 : Mire installée sur le banc en marbre pour être calibrée à l'interféromètre	14
Figure 5 : Schématisation du prisme de Dove	14
Figure 6 : Schématisation de la visée à travers le prisme de Dove	15
Figure 7 : Visualisation 3D des mesures dans SpatialAnalyzer®	15
Figure 8 : Schéma du défaut de perpendicularité de la mire	16
Figure 9 : Schéma de mesure du parallélisme de la mire	17
Figure 10 : Tableau de résultats du défaut de parallélisme de la mire et du banc	18
Figure 11 : Schéma du positionnement du niveau par rapport au banc d'étalonnage	19
Figure 12 : Schéma de mesure du facteur d'échelle à la verticale	20
Figure 13 : Photo du protocole de mesure de la mire à la verticale	21
Figure 14 : Tableau des précisions de mesure à l'AT401 avec la mire verticale	21
Figure 15 : Tableau de comparaison des facteurs d'échelle et écart-type entre mire verticale et horizontale	22
Figure 16 : Comparaison des facteurs d'échelle et intervalle de confiance entre mire verticale et horizontale	22
Figure 17 : Choix des axes du prisme de Dove	23
Figure 18 : Vecteur de déplacement pour translation du prisme transversale	25
Figure 19 : Valeur de facteur d'échelle pour translation en x	25
Figure 20 : Vecteur de déplacement pour translation du prisme en hauteur	26
Figure 21 : Valeur de facteur d'échelle pour translation en z	26
Figure 22 : Vecteur de déplacement pour translation du prisme longitudinale	26
Figure 23 : Valeur de facteur d'échelle pour translation en y	27
Figure 24 : Schéma de rotation du prisme	27
Figure 25 : Valeur de facteur d'échelle pour rotation en x	27
Figure 26 : Rotation du prisme en fonction de celle du niveau	28
Figure 27 : Vecteur de déplacement pour rotation du prisme selon l'axe z	28
Figure 28 : Valeur de facteur d'échelle pour rotation en z	28
Figure 29 : Valeur de facteur d'échelle pour rotation en y	29
Figure 30 : Graphique de dispersion et intervalles de confiance	29
Figure 31 : Photo du nouveau montage du prisme	30
Figure 32 : Choix des mesures de référence	31
Figure 33 : Tableau des valeurs d'influence sur la visée des mouvements du prisme	32
Figure 34 : Influence sur la visée des mouvements du prisme	33
Figure 35 : Schéma du modèle rejeté des plus grandes fautes acceptables (Touzé, Géodésie & ajustements 2 Théorie sur la fiabilité, 2017)	35
Figure 36 : Tableau des mesures nécessaires pour atteindre les objectifs de pré-analyse	36
Figure 37 : répartition des plus grandes fautes possible selon les observations (en m)	37
Figure 38 : répartition de la fiabilité interne selon les observations	37
Figure 39 : Schéma de mesure pour facteur d'échelle de la mire	38
Figure 40 : Tableau des observations éliminées	38
Figure 41 : Erreurs résiduelles en fonction de la position de la mire	39
Figure 42 : Tableau des facteurs d'échelle des mires du CERN	40
Figure 43 : Erreurs résiduelles des mires 1 (gauche) et 2 (droite) du CERN	40

Figure 44 : Illustration de l'erreur possible de la pente de la droite en fonction de l'éloignement des mesures	41
Figure 45 : Schéma d'une mesure de dénivelée avec mire en calotte.....	42
Figure 46 : Schéma de mesure du talon de la mire à l'horizontal	42
Figure 47 : Erreur de positionnement de la mire sur le support mesurée à l'AT401	43
Figure 48 : Tableau de valeur de l'erreur de talon de la mire	44
Figure 49 : Tableau des résultats de l'erreur de planéité du talon	45
Figure 50 : système D du générateur pour faire avancer le chariot	46

Bibliographie

Agilent Technologies. (2001). Agilent 5529A Dynamic Calibrator. USA.

Dove prism. (2016, Mars 5). Récupéré sur wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Dove_prism

Hecht, E. (2003). *Optics*.

Hexagon Metrology. (2012). Leica absolute tracker AT401. *Brochure produit*.

Leica Geosystems AG. (2006). Niveaux numériques Leica DNA, Des avancées qui vous mènent plus loin. *Brochure Leica*.

Leica Geosystems AG. (2007). Mode d'emploi. *GPLE2N/GPLE3N GPCL2/GPCL3*. Suisse.

Padgett, M. J., & Lesso, J. (1998, Septembre 3). Dove prisms and polarized light. St Andrew, Ecosse.

Renishaw. (2016). *Renishaw.fr*. Récupéré sur Renishaw apply innovation: <http://www.renishaw.fr/fr/explication-de-linterferometrie--7854>

Touzé, T. (2014, 12 08). Méthodes d'estimation — Chapitre 5.

Touzé, T. (2017, Juillet).

Touzé, T. (2017, mai 23). Géodésie & ajustements 2 Théorie sur la fiabilité.

Wikipedia. (2017, mars 2). *Invar*. Récupéré sur Wikipedia: <https://fr.wikipedia.org/wiki/Invar>

Introduction

Le nivellement est une technique bien connue des géomètres, et ce depuis longtemps. Il est probablement considéré comme le travail d'acquisition topographique le plus simple. Ce procédé, la comparaison d'altitudes à l'aide d'un plan horizontal, est utilisé depuis plusieurs siècles, notamment via la dioptré, qui se sert du plan de l'eau comme référence.

Plus récemment, au 19^e siècle, le niveau optique a été développé et largement utilisé dans le monde de la géomatique. Ses erreurs sont connues et maîtrisées mais restent cependant difficile à quantifier précisément.

Dernièrement, en 1990, l'apparition des niveaux numériques a apporté son lot d'erreurs supplémentaires, encore une fois, celles-ci ont vite été maîtrisées mais continuent à poser problème aux déterminations de haute qualité.

Dans ce travail, on va s'intéresser à ces erreurs en proposant un protocole de mesure permettant d'étalonner le système de nivellement de deux manières différentes : via l'erreur de talon de la mire et via l'erreur de facteur d'échelle sur la lecture.

L'école dispose d'un banc en marbre munie d'un chariot et d'un interféromètre capable de mesurer des distances très finement. C'est en se basant sur ces mesures interférométriques que l'étalonnage des mires de nivellement devrait être possible.

Plusieurs acteurs de la géomatique Suisse se sont montrés intéressés par un tel système d'étalonnage, c'est pourquoi ce travail va s'atteler à en déceler l'éventuelle faisabilité et la précision qu'il est capable d'atteindre.

Dans un premier temps, il faudra prouver que le prisme de Dove, facteur clef du sujet, n'engendre pas de biais dans les mesures et donc qu'il est utilisable.

Ensuite, il faudra prouver que la position de la mire en position horizontale ne pose pas de problème par rapport à sa position normale, à la verticale.

Enfin, au travers de tests et de pré-analyses, il faudra pouvoir proposer un protocole de mesure viable pour étalonner avec précision le système de nivellement.

1 Le système de nivellement

Le système de nivellement comprend l'ensemble niveau-mire. On parle de système de nivellement car sur certaines erreurs il est difficile de différencier d'un côté le niveau, et de l'autre la mire. C'est notamment le cas de l'erreur de facteur d'échelle sur la lecture.

La précision des mesures est donnée à 0.01mm (Leica Geosystems AG, 2006), ce qui signifie que l'appréciation des erreurs devra être faite avec des appareils ayant une précision au moins égale à celle-ci. Un appareil de précision inférieure ne pourra pas être utilisé dans l'étalonnage des systèmes de nivellement de précision.

1.1 Erreur de facteur d'échelle

Les lectures effectuées par le niveau numérique sur la mire se font grâce à un système de code barre. L'appareil prend une photo de la mire à l'endroit visé et la compare par corrélation à la mire type implémentée. Une fois la comparaison effectuée, le niveau est à même de savoir quelle partie de la mire est visée, et ainsi de savoir quelle est la hauteur de lecture.

Le code barre est composé d'un ensemble de graduation d'une certaine largeur (2.025mm chez Leica). La disposition de ces graduations permet de créer un codage, unique en tout point sur la mire. C'est donc l'image du code barre de la mire et celle du code « type » qui sont corrélées pour donner la lecture.

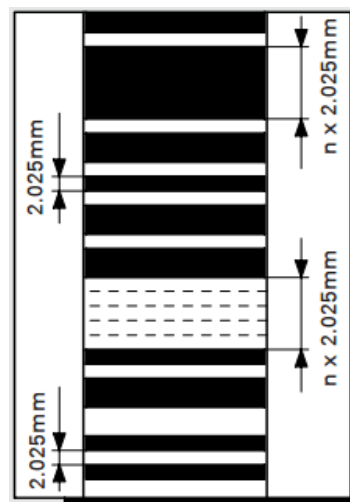


Figure 1 : Illustration du code barre Leica (Leica Geosystems AG, 2007)

Les codes-barres en eux-mêmes ou leur lecture faite par le niveau peuvent ne pas être parfaits. Ce sont ces imperfections qui devront être détectées et modélisées par des facteurs d'échelles locaux ou globaux.

1.2 Erreur du talon de la mire

Le talon de la mire est l'endroit où celle-ci est posée pour effectuer les mesures. Il représente le « zéro » de la mesure, s'il est faux, la valeur lue sera faussée. Les erreurs de ce type proviennent principalement de l'usure due à l'utilisation du matériel.

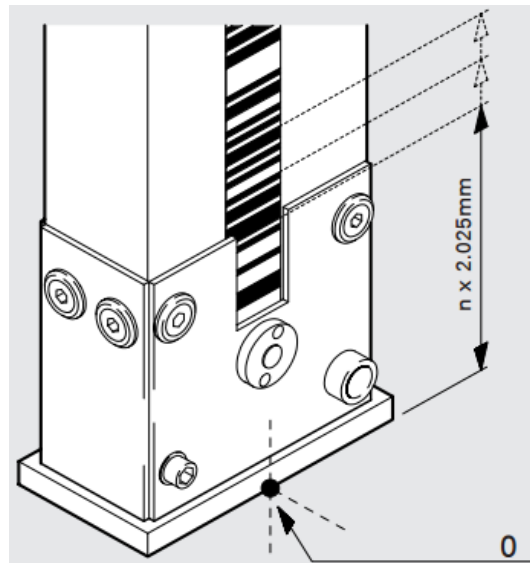


Figure 2 : Illustration du talon de la mire Leica (Leica Geosystems AG, 2007)

Si une seule mire est utilisée, cette erreur ne pose pas de problème, cependant, en nivellement de précision, deux mires sont souvent utilisées, avec deux erreurs de talon différentes. Dans ce cas-là, il y a une erreur systématique qui persiste dans le calcul.

$$\Delta H = (AR - \varepsilon_1) - (AV - \varepsilon_2)$$

$$\rightarrow \Delta H = AR - AV - (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)$$

Avec :

ΔH : dénivelé

AR : lecture sur la mire arrière (mire 1)

AV : lecture sur la mire avant (mire 2)

ε_1 : erreur de talon sur la mire 1

ε_2 : erreur de talon sur la mire 2

Avec cette formule, il est possible de voir que l'erreur de talon n'a pas d'influence si la mire 1 est la même que la mire 2. Cependant, avec deux mires différentes, il y a une erreur de talon persistante de :

$$\varepsilon_{\text{Talon}} = \varepsilon_1 - \varepsilon_2$$

C'est donc cette erreur de talon qui devra être déterminée dans ce travail.

Il y a une seconde erreur liée au talon de la mire, c'est sa planéité. Avec un talon non plat, les dénivelées mesurées seront fausses si la mire n'est pas toujours posée au même endroit. En connaissant cette erreur de planéité, il est possible de corriger les mesures effectuées en fonction du positionnement de la mire sur le point. Il est cependant très délicat d'enregistrer cette position pour chaque mesure, quantifier cette erreur servirait donc plutôt à déterminer si la mire est encore utilisable ou non.

2 Outils de mesure

La HEIG-VD dispose d'un parc de matériel permettant de réaliser des mesures de haute précision. Celui-ci va permettre de réaliser des tests dans de bonnes conditions et capables d'atteindre les précisions requises pour étalonner les systèmes de nivellement.

2.1 Niveau de précision Leica DNA03

C'est l'outil de base pour la mesure de dénivelées de précision. Il permet d'exécuter des mesures numériques sur des mires à code barre. Dans de bonnes conditions de mesures, il a une précision donnée de 0.01mm sur une visée, ou 0.3mm pour un kilomètre de nivellement double (Leica Geosystems AG, 2006).

Ici, il est sujet à l'étalonnage pour ce qui est du facteur d'échelle du système de nivellement. Pour la détermination de l'erreur de talon de la mire, il sera utilisé en tant qu'appareil de mesure.

Pour effectuer les mesures au niveau, un script informatique a été développé par monsieur M. Kasser (annexe 2, page 52). Ce script permet de lancer la mesure depuis un ordinateur en le reliant par câble. Ce procédé permet de ne pas avoir à se déplacer entre le niveau numérique et l'ordinateur à chaque mesure.

2.2 Banc en marbre et interféromètre

L'interféromètre est un appareil de mesure de distance ultra précise. Il utilise le phénomène d'interférence des ondes lumineuses pour donner des résultats à 10 nanomètres (soit 10^{-6} mm (Agilent Technologies, 2001)). L'interférence des ondes consiste à comparer deux signaux de même longueur d'onde, la différence constatée permet de déterminer la distance. Pour être sûr de comparer des signaux de la même longueur d'onde, un seul faisceau laser est utilisé, il est ensuite séparé par un jeu de miroir. (Renishaw, 2016)

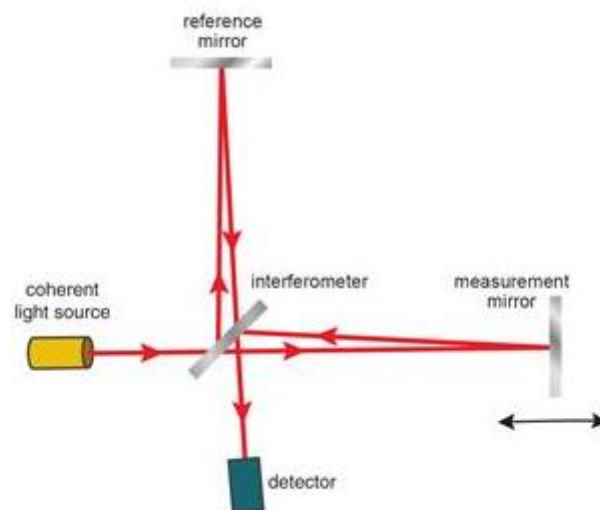


Figure 3 : Fonctionnement de l'interféromètre (Renishaw, 2016)

Le rayon laser est divisé en deux par un miroir semi-réfléchissant (interferometer sur la figure 3). La moitié du faisceau est dirigé vers le miroir de référence (reference mirror), le reste traverse et se dirige vers le miroir à mesurer (measurement mirror). Les deux retours de faisceau reviennent au même endroit en étant déphasés. Ce déphasage est quantifié pour déterminer la distance. En déplaçant le

miroir de mesure, on peut déterminer des mesures de distances ultras précises selon un axe. Les mesures effectuées sont ainsi toutes relatives, si le rayon est coupé, les mesures reprennent à zéro.

Le déplacement de ce miroir se fait à l'aide d'un chariot hydraulique monté sur un banc en marbre. Le chariot peut ainsi être déplacé le long du banc en marbre, dans l'axe de l'interféromètre.



Figure 4 : Mire installée sur le banc en marbre pour être calibrée à l'interféromètre

Cette configuration de mesures précises sera utilisée comme mesure de référence pour étalonner les systèmes de nivellement.

L'interféromètre est contrôlé depuis un ordinateur. Il est possible d'y intégrer les paramètres météo, le mode ou le nombre de mesures, de visualiser et d'exporter les résultats.

2.3 Prisme de Dove

Le prisme de Dove est un prisme formé à partir d'un prisme à angle droit tronqué (Hecht, 2003). Il est beaucoup utilisé en tant qu'inverseur d'image dans les travaux optiques (Dove prism, 2016).

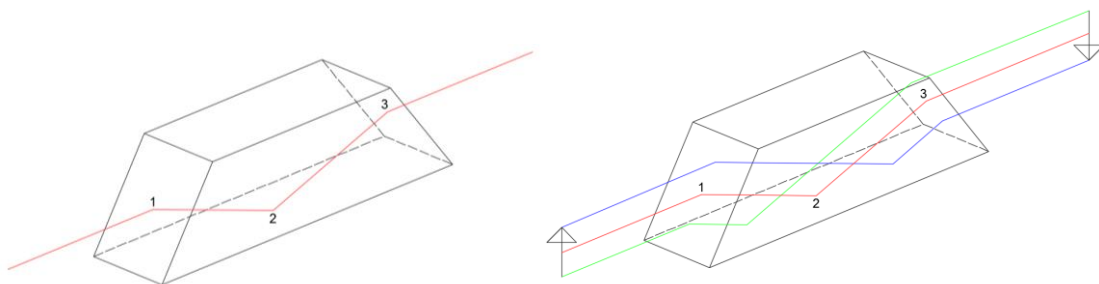


Figure 5 : Schématisation du prisme de Dove

Le fonctionnement du prisme est schématisé sur la figure 5 (à gauche), le rayon pénètre le prisme en 1, est réfracté pour être réfléchi en 2 et ressortir en 3, parallèlement à l'entrée. A droite, les trajets des rayons lumineux d'un objet (ici une flèche) sont représentés, il est ainsi possible de se rendre compte de l'inversion de l'image.

Ce prisme possède une caractéristique supplémentaire, lorsqu'il est tourné d'un angle α , l'image renvoyée est tournée de 2α (Padgett & Lesso, 1998). Dans ce travail, c'est cette caractéristique qui sera utilisée. Comme vu précédemment dans la présentation du banc en marbre, la mire est en position horizontale. Le prisme de Dove permet ainsi de redresser l'image pour la rendre verticale et lisible par le niveau numérique. Le prisme est placé à 45° de manière à ce que l'image renvoyée soit tournée de 90° .

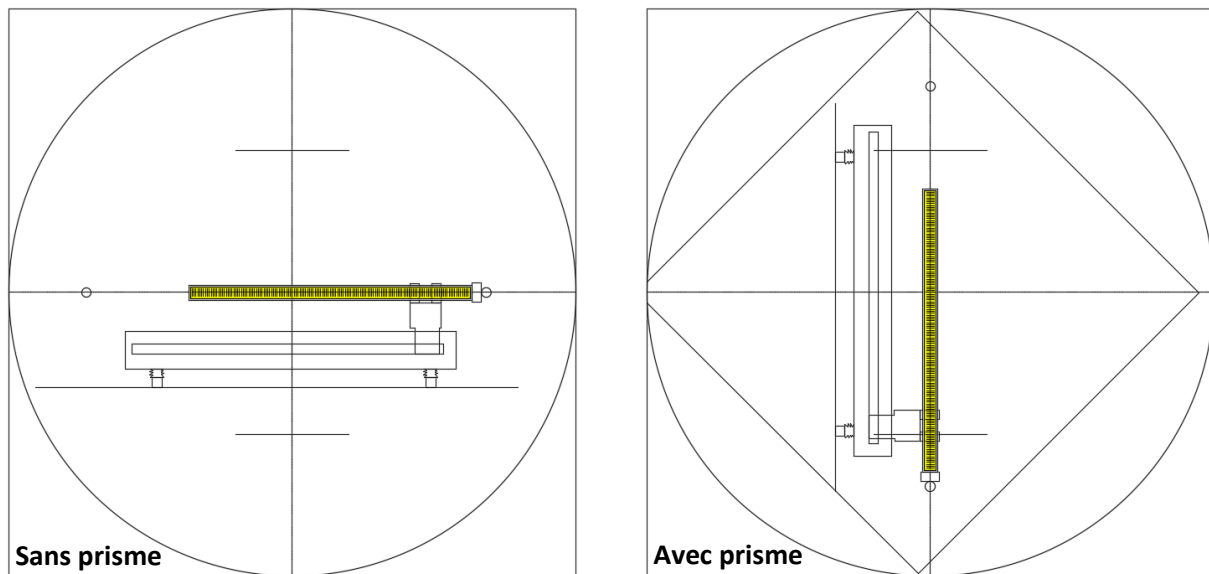


Figure 6 : Schématisation de la visée à travers le prisme de Dove

2.4 Leica AT401

L'AT401 est une station totale munie d'un distance-mètre très précis. Il est capable de mesurer des distances à 0.01mm (Hexagon Metrology, 2012). Sachant que le niveau électronique est capable de déterminer des dénivelés au centième de millimètre, la précision de l'AT401 est suffisante à l'étalonnage de système de nivellement de précision. Il faudra cependant faire attention à prendre deux séries de mesures pour avoir une précision supérieure à celle des appareils à étalonner.

Le but est de pouvoir utiliser l'AT401 en remplacement de l'interféromètre et du banc en marbre. Il assure une moins grande précision, mais il a le mérite d'être un appareil plus accessible. Il pourrait donc faire un bon remplaçant dans le protocole d'étalonnage de système de nivellement. Il sera cependant utilisé pour l'étalonnage du talon de la mire. En effet, les mesures de distance à l'horizontale de l'interféromètre ne peuvent que difficilement s'associer aux mesures du niveau de précision pour cette configuration.

L'appareil est contrôlé à distance par ordinateur via le logiciel SpatialAnalyzer®. Ce logiciel permet une visualisation 3D en temps réel des mesures effectuées.

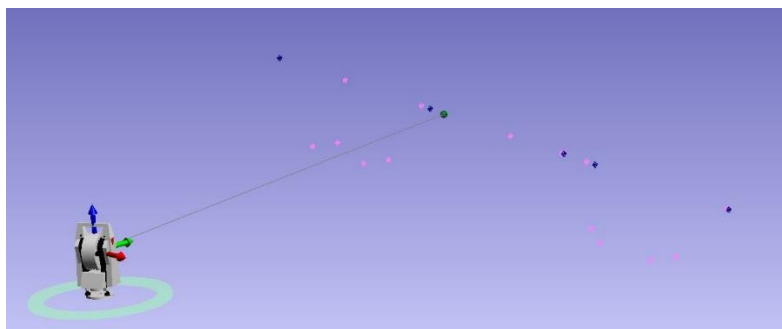


Figure 7 : Visualisation 3D des mesures dans SpatialAnalyzer®

3 Contrôle du positionnement du système de mesure

Le positionnement des éléments de mesure est important dans le contrôle de qualité de l'étalonnage. Il faut pouvoir certifier que chaque maillon de la chaîne n'entraîne pas d'erreur dans le processus. Le positionnement de la mire par rapport au niveau est donc très important. Il faut que la mire soit perpendiculaire à l'axe de visée du niveau, cette configuration permet de simuler le référentiel habituel qui est la gravité.

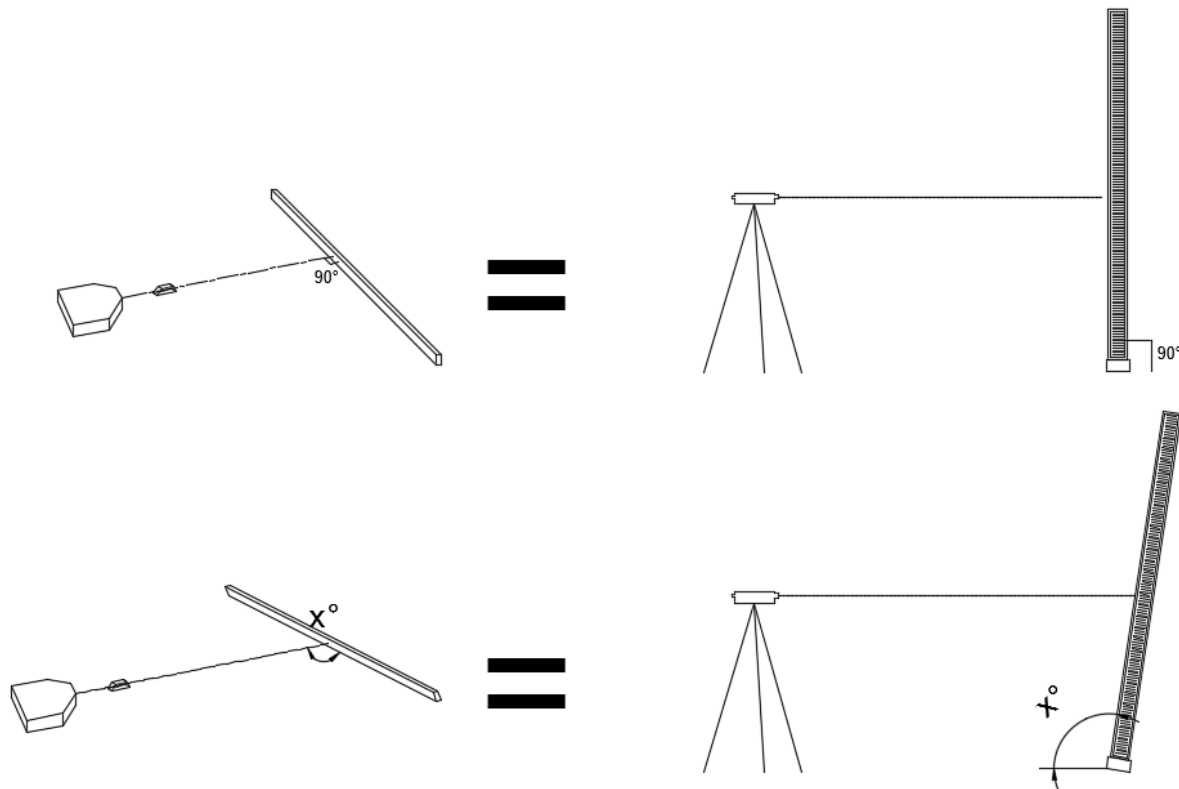


Figure 8 : Schéma du défaut de perpendicularité de la mire

Sur le schéma ci-dessus on peut voir l'effet qu'a un défaut de perpendicularité entre l'axe de visée et la mire : il simule un problème de verticalité de la mire lors d'un nivellement classique. Ce genre de biais entraîne une faute dans les mesures, il faut donc s'assurer du bon positionnement des éléments les uns par rapport aux autres. Si le positionnement n'est pas possible, la détermination de l'angle doit être faite pour en tenir compte dans les calculs.

Le positionnement du système de mesure se fait en deux étapes, le parallélisme de la mire avec le marbre, et l'orthogonalité de la visée du niveau avec le marbre. Tout se fait par rapport au banc car c'est l'élément fixe du protocole de mesure.

3.1 Positionnement de la mire

Le positionnement de la mire parallèle au marbre est d'abord effectué grossièrement, au double mètre. On prend une cote entre la mire et un point fixe du banc, on avance ensuite la mire et on reprend une cote sur le même point fixe. Les deux doivent être les mêmes, si ce n'est pas le cas, il faut régler le système pour que la mire soit parallèle au banc. La précision de ce positionnement est millimétrique.

Afin de déterminer plus précisément le défaut de parallélisme, des mesures à l'AT401 sont effectuées. Ces mesures ne serviront pas à repositionner la mire, mais plutôt à quantifier l'erreur due au défaut

de parallélisme. Pour ce faire, le marbre et la mire sont modélisés par une droite, le défaut angulaire entre ces deux droites est ensuite calculé pour être exprimé en facteur d'échelle.

Le marbre possède deux rainures parallèles qui sont mesurées en y positionnant des mini prismes sphériques. Pour la mire, deux mini prismes sphériques sont fixés sur son flanc, aux deux extrémités.

La mire est ainsi mesurée à trois positions différentes, début, milieu et fin de marbre. Elle est ensuite retirée du support puis repositionnée, de telle sorte à tester la répétabilité du positionnement de la mire.

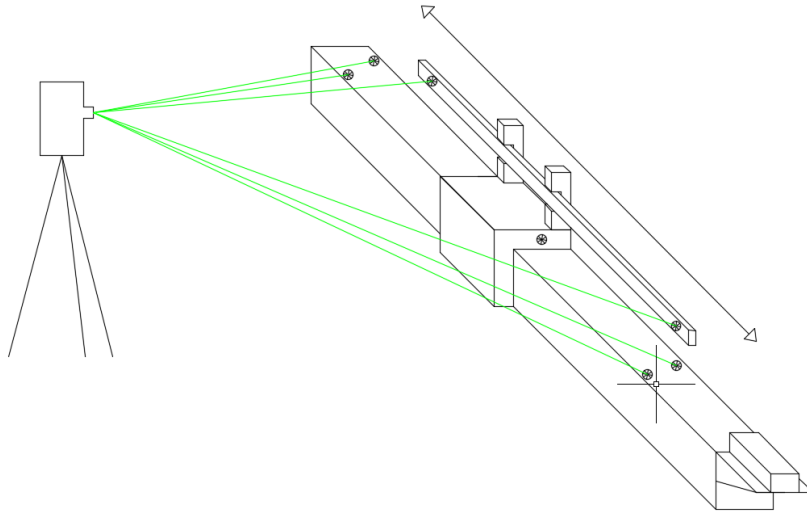


Figure 9 : Schéma de mesure du parallélisme de la mire

A partir des angles et longueurs mesurés, l'AT401 fournit des coordonnées calculées. A partir de ces celles-ci, il est possible de déterminer le vecteur formé par la droite, puis les vecteurs unitaires :

Vecteur :

$$\vec{m} = \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{M2} - x_{M1} \\ y_{M2} - y_{M1} \end{pmatrix}$$

Où M1 et M2 sont les points aux extrémités de la mire. On en fait de même pour les rainures du banc en marbre (\vec{b}).

Vecteur unitaire :

$$\vec{M} = \begin{pmatrix} \frac{X}{\|\vec{m}\|} \\ \frac{Y}{\|\vec{m}\|} \end{pmatrix}$$

Le défaut de parallélisme est déterminé en effectuant le produit scalaire des vecteurs unitaires de la mire et du banc en marbre :

$$\vec{M} \cdot \vec{B} = X_M \times X_B + Y_M \times Y_B$$

Sachant que l'on utilise des vecteurs unitaires, leur produit scalaire doit être égal à 1, car les droites sont parallèles. En faisant la différence entre les produits scalaires calculés et le produit scalaire théorique, on obtient un facteur d'échelle que l'on peut exprimer en ppm.

$$\text{Facteur d'échelle [ppm]} = (1 - \vec{M} \cdot \vec{B}) \times 10^6$$

Il est également possible de déterminer l'angle formé entre les deux droites dû au défaut de parallélisme.

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{\vec{M} \cdot \vec{B}}{\|\vec{M}\| \times \|\vec{B}\|} \right)$$

Position de la mire		Facteur d'échelle [ppm]	Angle [gon]
Premier placement de mire	Début	0.0	0.0097
	Milieu	0.0	0.0092
	Fin	0.0	0.0127
Repositionnement de la mire	Début	0.5	0.0606
	Milieu	0.5	0.0643
	Fin	0.5	0.0647

Figure 10 : Tableau de résultats du défaut de parallélisme de la mire et du banc

Dans ce tableau il est possible de voir l'influence du défaut de parallélisme entre la mire et le marbre. Dans le premier cas, le facteur d'échelle est nul. Ce qui signifie que le défaut de parallélisme associé est assez faible pour ne pas impacter les mesures. En revanche, après le repositionnement de la mire, il y a un facteur d'échelle résiduel de 0.5 ppm. Cette valeur est vraiment petite et peut être négligée dans les calculs d'étalonnage du facteur d'échelle du système de nivellement.

3.2 Positionnement du niveau

Le positionnement du niveau se fait de telle sorte à être perpendiculaire au marbre de mesure. Pour ce faire, la mesure de deux points sur le marbre est faite à l'aide d'un tachéomètre Leica MS60. Une ligne parallèle à ces deux points est ensuite implantée, à 4m du marbre. Le stationnement du niveau pourra ainsi se faire n'importe où sur cette ligne. Pour assurer la perpendicularité au banc, il suffit de viser un des côtés de la ligne et de tourner de 90° en utilisant le cercle du niveau Leica DNA03.

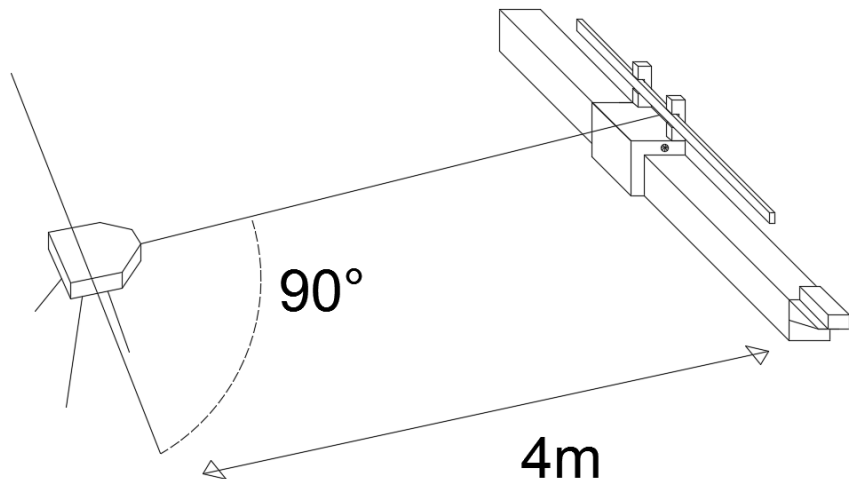


Figure 11 : Schéma du positionnement du niveau par rapport au banc d'étalonnage

De la même façon que précédemment, il est possible de déterminer l'influence de l'erreur de positionnement du niveau sur les lectures.

$$1 - (\overrightarrow{Marbre} \times \overrightarrow{Ligne}) = 1 \times 10^{-10} ppm$$

Il y a donc un facteur d'échelle quasi inexistant dans le positionnement du niveau. Cette précision peut être atteinte avec un théodolite « classique » car la longueur de la ligne implantée (d'un bout à l'autre de la salle, environ 11.5m) est assez grande pour minimiser le défaut d'implantation.

4 Horizontalité du ruban

La mire de nivellement est pensée pour être utilisée en position verticale, pour faire des mesures de dénivelées entre différents points. Ici, elle est positionnée de manière horizontale afin de pouvoir l'étalonner en utilisant l'interféromètre. Cette configuration peut s'avérer problématique au niveau du ruban de la mire.

Le ruban est la partie sur laquelle les graduations (le code barre) sont imprimées. Il est en invar, un alliage de fer (64%) et de nickel (36%) possédant un coefficient de dilatation très faible ($\sim 2.0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) (Wikipedia, 2017). Cette propriété lui permet de rester stable malgré de grandes variations de températures, et donc offre l'avantage de ne pas être influencé par les conditions météorologiques. Le ruban est logé dans un cadre en aluminium (pour assurer une certaine légèreté), le tout forme la mire de nivellement. Le logement est fait de manière à ce que le ruban ne soit pas contraint, afin de ne pas suivre les dilatations de l'aluminium. Il est ainsi fixé uniquement en deux points, en haut et en bas. Le point du bas est un ressort, afin de s'assurer que le ruban reste tendu.

C'est donc à partir de là que des problèmes peuvent intervenir en position horizontale. En effet, la tension du ressort est calculée dans le sens de la gravité, hors ici, la force de gravité est orthogonale à la force de tension du ressort.

Un système de mesure est donc mis en place afin de déterminer le facteur d'échelle d'un ruban placé à la verticale, en position normale de nivellement. Comme avec l'interféromètre, il s'agit de prendre des mesures régulières le long du ruban, en comparant des mesures faites au niveau numérique et des mesures AT401. Pour ce faire, on utilise simplement les marches d'un escalier, en positionnant successivement la mire sur chaque marche. Les mesures au niveau sont lues sur le code barre de la mire, les mesures AT401 sont effectuées sur un mini prisme sphérique sur lequel la mire repose.

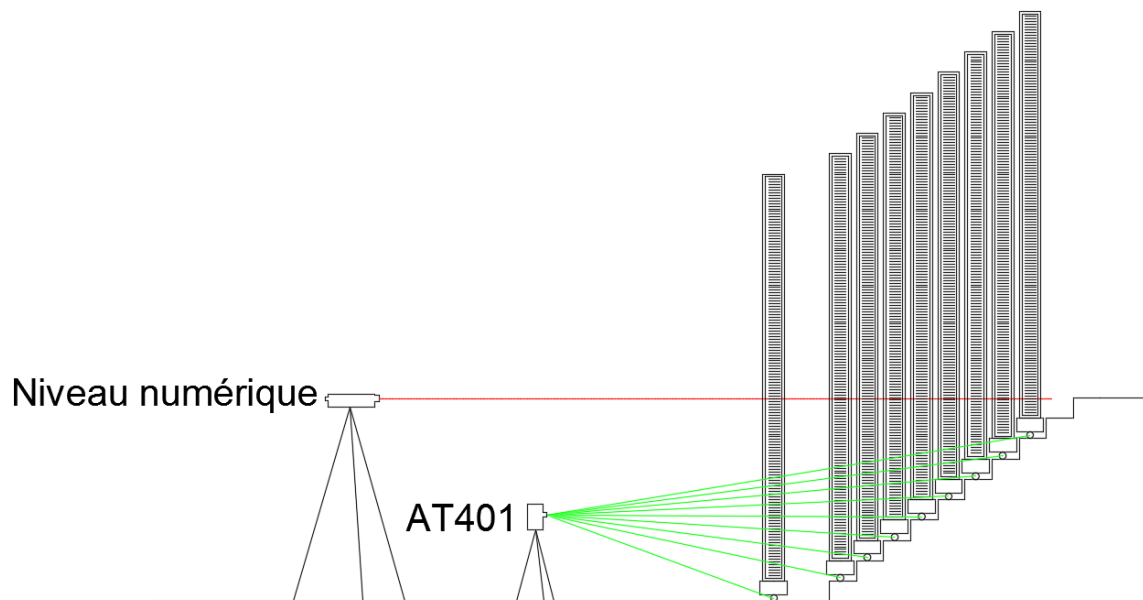


Figure 12 : Schéma de mesure du facteur d'échelle à la verticale



Figure 13 : Photo du protocole de mesure de la mire à la verticale

Dans mon cas, 11 mesures ont pu être effectuées, de 0.24 à 1.89m de la mire, tous les 17 cm environ. La précision d'une visée au niveau est donnée, comme vu précédemment, au centième de millimètre. L'AT401 affiche une résolution de même grandeur, pour pouvoir prétendre être une mesure de référence, il faut avoir une détermination supérieure à celle du niveau. J'ai donc fait des mesures de série avec l'AT401, 9 mesures par point, afin de multiplier la précision d'un facteur 3. Le tableau suivant présente les écarts-types et précision des altitudes calculées par l'AT401.

Points	Ecart-type [mm]	Précision de la moyenne [mm]
1	0.008	0.003
2	0.007	0.002
3	0.008	0.003
4	0.013	0.004
5	0.004	0.001
6	0.010	0.003
7	0.006	0.002
8	0.014	0.005
9	0.017	0.006
10	0.018	0.006
11	0.024	0.008

Figure 14 : Tableau des précisions de mesure à l'AT401 avec la mire verticale

La précision sur la moyenne de chaque point varie entre 1 et 6 microns, et 8 pour la dernière mesure. Cette précision est suffisante pour calculer un facteur d'échelle sur la mire.

Le résultat du calcul donne un facteur d'échelle à **1.000039** pour un écart-type de 1.0×10^{-5} . La précision correspond aux précisions données pour chacun des deux instruments. Le détail du calcul est présent plus loin dans le rapport, au chapitre 5.1.

Cette valeur est très proche des valeurs obtenues à l'horizontale à travers le prisme de Dove :

Configuration de mesure	Facteur d'échelle	Ecart-type
1 Mire verticale	1.000039	9.7×10^{-6}
2 Mire horizontale 24.05.17	1.000032	4.9×10^{-6}
3 Mire horizontale 09.06.17	1.000032	3.4×10^{-6}
4 Mire horizontale 03.07.17 I	1.000017	8.1×10^{-6}
5 Mire horizontale 03.07.17 II	0.999993	12.0×10^{-6}

Figure 15 : Tableau de comparaison des facteurs d'échelle et écart-type entre mire verticale et horizontale

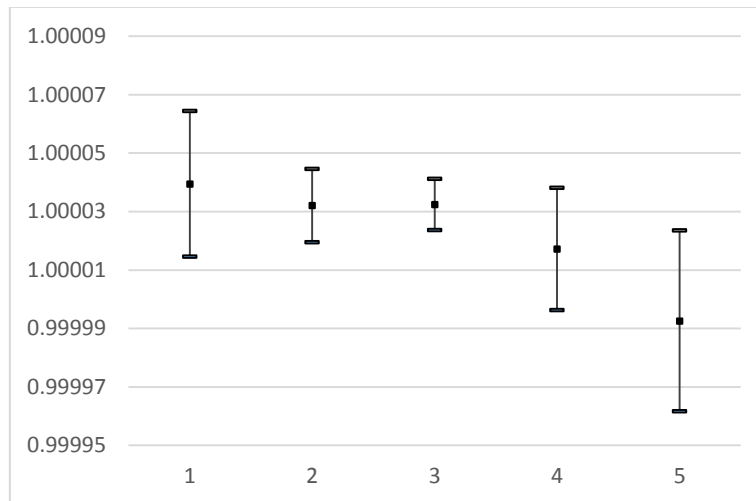


Figure 16 : Comparaison des facteurs d'échelle et intervalle de confiance entre mire verticale et horizontale

On remarque de ces résultats que la position horizontale de la mire ne semble pas impacter les mesures. De même que la visée à travers le prisme ne semble pas influencer les valeurs de facteur d'échelle ou de précision à partir du moment où celui est bien positionné.

L'utilisation de la mire à l'horizontale avec le prisme de Dove semble exclure les problèmes de force de gravité s'exerçant sur le ruban.

4.1 Jeu du ruban

Comme dit précédemment, le ruban en invar est logé sans contrainte dans la mire, il possède donc un petit jeu de déplacement. En position verticale, il vient donc s'appuyer sur le côté du cadre aluminium, ce déplacement est de l'ordre de grandeur du demi-millimètre au milieu de la mire. Il y a donc un défaut d'horizontalité persistant très léger.

Au même titre que le défaut de parallélisme de la mire avec le banc, il est possible de calculer l'erreur associé en ppm en utilisant les produits scalaires.

En prenant 0.5mm de mouvement de ruban au centre de la mire, l'influence est de 0.13 ppm. L'influence négligeable de la position horizontale de la mire est encore une fois confirmée.

5 Contrôle du prisme de Dove

Le prisme de Dove est un facteur clé dans la conception des expériences présentées ici. Il permet d'associer des mesures de niveau électronique, qui sont normalement verticales, à des mesures d'interféromètre, horizontales. Le choix d'accorder les mesures du niveau à celles de l'interféromètre plutôt que l'inverse est fait pour gagner en praticité. En effet, il est plus simple de trouver des espaces suffisants à l'étalonnage de grandes mires en horizontal qu'en vertical. Les hauteurs de plafonds peuvent rapidement limiter la souplesse d'un travail vertical.

Le prisme de Dove permet donc d'effectuer les mesures dans de meilleures conditions pratiques. Cependant, avant de pouvoir l'utiliser dans de tels travaux de précision, il faut s'assurer de sa capacité à transmettre les données sans les déformer. Plusieurs tests ont ainsi été effectués pour prouver que le prisme ne montre aucun défaut. D'abord par des observations peu précises qui permettent de comprendre son fonctionnement et son influence sur des visées. Ensuite, des mesures de précisions, capables de mettre en évidence une éventuelle faute de facteur d'échelle.

5.1 Effets de translations

Les premiers tests consistent à tradater le prisme dans les trois directions, transversale, longitudinale et verticale, et observer les effets. Pour assurer des déplacements orthogonaux, un plateau croisé et un trépied à manivelle ont été utilisés.

Un certain déplacement est effectué sur le prisme et on en observe les effets à travers le niveau. Pour quantifier le déplacement à travers le niveau, une mesure sur la mire est effectuée, il est ainsi possible de noter les valeurs avant et après translation. Cette mesure permet d'identifier grossièrement le vecteur de déplacement du rayon dû au déplacement du prisme. La mesure est grossière car la précision de déplacement du plateau croisé n'est pas aussi précise que celle que le niveau peut offrir.

Pour obtenir le sens de déplacement, une feuille de papier millimétré est placée sur le mur face au niveau, la position sans prisme est notée, puis chaque nouvelle position pour chaque déplacement est notée. Il est ensuite possible de donner le sens de déplacement global. Ce procédé n'est pas précis mais permet de comprendre le déplacement du rayon optique en fonction du déplacement du prisme.

Par ces tests, il s'agit donc d'assimiler et de comprendre les effets subis par le rayon lorsqu'il traverse le prisme.



Figure 17 : Choix des axes du prisme de Dove

Il s'agit ensuite de définir si le facteur d'échelle le long de la mire varie en fonction de la position du prisme. Pour ce faire, des mesures sont prises tous les 10 centimètres, entre 0.50 et 1.5 m de la mire. Les extrémités basses et hautes sont exclues car c'est souvent à ces endroits que les mires subissent le plus de déformations (chocs, rayures...). La mise en relation de la mesure interféromètre avec celle du niveau permet de définir une droite dont la pente représente le facteur d'échelle à calculer, calculé par moindres carrés. On a :

$$\begin{bmatrix} N_1 \\ \vdots \\ N_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ I_1 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}$$

Où :

$$\begin{bmatrix} N_1 \\ \vdots \\ N_i \end{bmatrix} = \text{matrice des mesures au niveau appelée « L »}$$

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_i \end{bmatrix} = \text{matrice des résidus de mesure appelée « V »}$$

$$\begin{bmatrix} I_1 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ I_1 & 1 \end{bmatrix} = \text{matrice des mesures interférométriques appelée « A »}$$

$\begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}$ = « a » est la pente de la droite, « b » la constante à l'origine, celle-ci n'a pas d'importance, elle représente l'écart entre la première mesure niveau et la première mesure interférométrique. Cette matrice est appelée « X », « a » et « b » sont les inconnues à calculer.

Ce qui donne : $L + V = AX$

Les étapes de résolution sont les suivantes (Touzé, Méthodes d'estimation — Chapitre 5, 2014) :

Calcul de la matrice des poids :

$$P = \begin{bmatrix} \ddots & & 0 \\ & P_i & \\ 0 & & \ddots \end{bmatrix} \text{ avec } P_i = \frac{\sigma_0^2}{\sigma_i^2}$$

où σ_0 : erreur moyenne à priori et σ_i : erreur à priori sur une observation

$$N = A^T P A \quad \& \quad C = A^T P L$$

$$X = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = N^{-1} C$$

A partir de là, les inconnues « a » et « b » sont connues, il est maintenant possible de calculer leur précision :

$$V = AX - B$$

$$Q_{xx} = (A^T P A)^{-1} = N^{-1}$$

$$\hat{s}_0^2 = \frac{V^T P V}{n - u}$$

Avec « n » : nombre d'observation et « u » nombre d'inconnues.

$$q_{xx} = \begin{bmatrix} q_{x_1x_1} & & \\ & \ddots & \\ & & q_{x_ix_i} \end{bmatrix} = \hat{s}_0^2 \times Q_{xx}$$

$$\hat{s}_{x_j} = \sqrt{q_{x_jx_j}}$$

Où \hat{s}_{x_j} est l'écart-type a posteriori du j^e paramètre.

$$\text{Ici, } \hat{s}_{x_j} = \begin{bmatrix} \hat{s}_{x_a} & \\ & \hat{s}_{x_b} \end{bmatrix}$$

Où \hat{s}_{x_a} et \hat{s}_{x_b} écart-type de « a » et « b » ajustés. Il représente leur précision a posteriori.

Toutes les étapes de résolution ont été automatisées à travers un script Scilab® (annexe 3, page 53). Il suffit alors d'avoir les fichiers en entrée bien formatés (exemple en annexe 4, page 54) pour exécuter tout le processus.

5.1.1 Translation transversale (axe x)

La première translation testée est celle selon l'axe « x » (voir figure 17). Elle permet d'observer le comportement du prisme dans le cas où celui-ci n'est pas parfaitement centré sur le trajet optique du niveau.

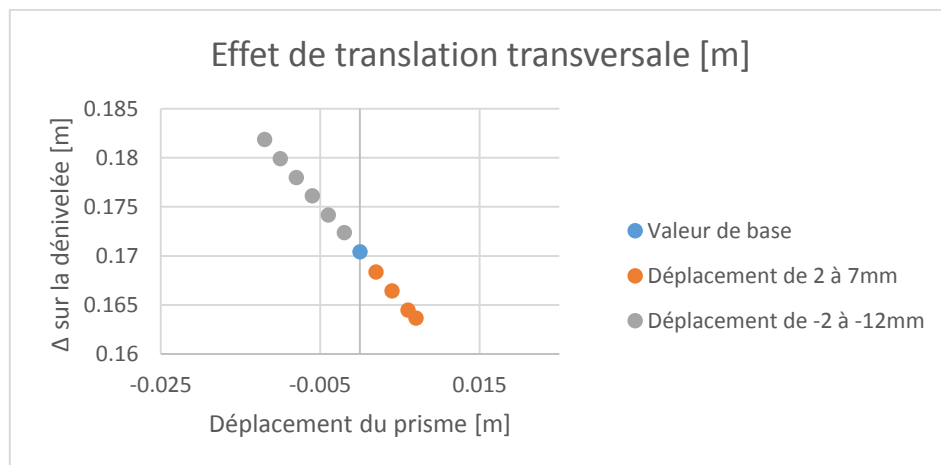


Figure 18 : Vecteur de déplacement pour translation du prisme transversale

Sur le graphique ci-dessus, il est possible de voir les visées effectuées en fonction du déplacement du prisme. L'influence sur la lecture semble linéaire, on aurait :

$$\Delta \text{Déplacement} = -\Delta \text{Lecture}$$

A la précision du plateau croisé, le prisme ne semble pas poser de souci, il faut cependant le contrôler à la précision de l'interféromètre. Pour ce faire, 11 mesures sont comparées selon 3 positions du prisme : 11 au centre, et 11 à chaque translation maximale, en positif et négatif. Ces mesures sont effectuées tous les 10 centimètres de 0.5 à 1.5m de la mire.

Position	Facteur d'échelle	Précision du facteur d'échelle
Centre du prisme	1.000032	3.41E-06
Translation de -4mm	1.000005	5.57E-06
Translation de +10mm	0.999996	3.67E-06

Figure 19 : Valeur de facteur d'échelle pour translation en x

5.1.2 Translation en hauteur (axe z)

Cette deuxième translation permet également de tester le comportement du prisme quand celui-ci n'est pas centré.

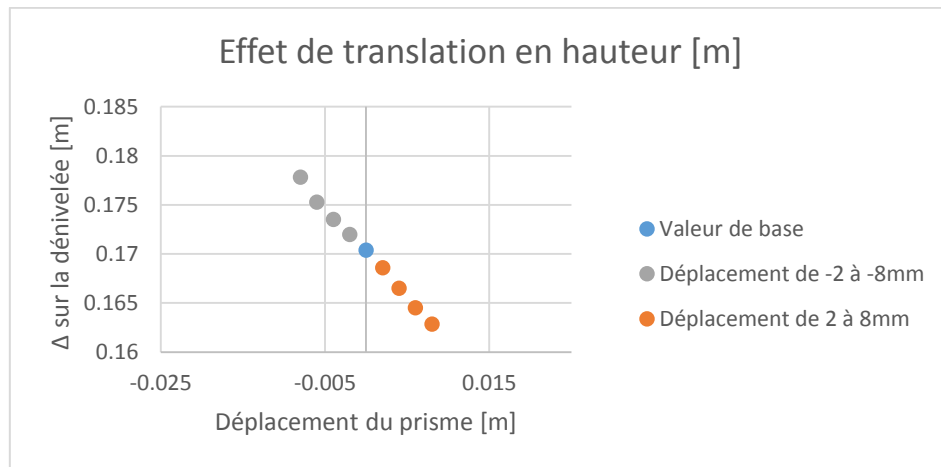


Figure 20 : Vecteur de déplacement pour translation du prisme en hauteur

Sur le graphique ci-dessus, les visées en fonction du déplacement en hauteur du prisme sont représentées. Là encore, l'influence semble linéaire, on aurait donc :

$$\Delta \text{Déplacement} = -\Delta \text{Lecture}$$

Le contrôle via l'interféromètre donne les résultats suivants :

Position	Facteur d'échelle	Précision du facteur d'échelle
Centre du prisme	1.000032	3.41E-06
Translation de -12.5mm	0.999977	1.63E-05
Translation de +7.5mm	1.000021	1.06E-05

Figure 21 : Valeur de facteur d'échelle pour translation en z

5.1.3 Translation longitudinale (axe y)

Cette dernière translation permet de voir les effets sur la visée selon l'éloignement du prisme au niveau.

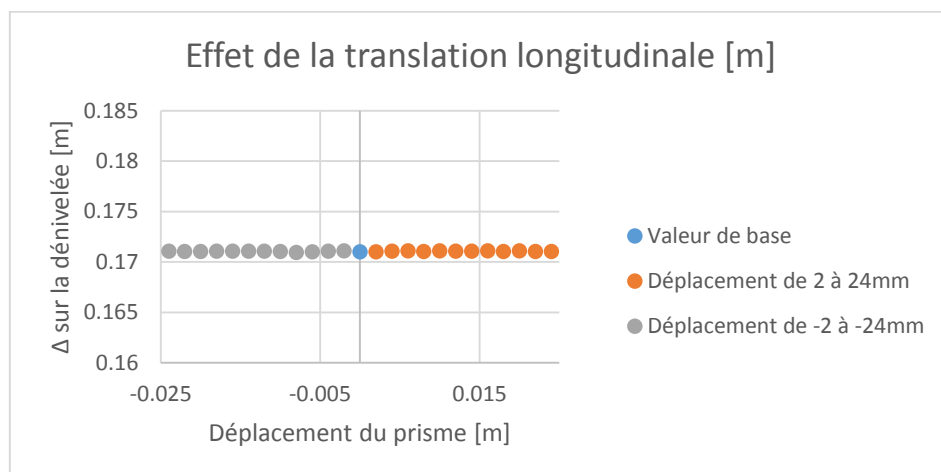


Figure 22 : Vecteur de déplacement pour translation du prisme longitudinale

On peut voir sur le graphique ci-dessus que la translation selon l'axe « y » du prisme ne semble pas avoir d'effet sur la visée. Les résultats de cette translation sont retranscrits dans le tableau suivant :

Position	Facteur d'échelle	Précision du facteur d'échelle
Centre du prisme	1.000032	3.41E-06
Translation de -45mm	1.000023	4.41E-06
Translation de 45mm	0.999964	1.98E-05

Figure 23 : Valeur de facteur d'échelle pour translation en y

5.2 Effets de rotations

Au même titre que les translations, les rotations du prisme sont testées. Ces tests servent à certifier qu'il est possible d'étalonner les systèmes de nivellement, quelle que soit la position du prisme devant le niveau.

Les rotations selon les trois axes de la figure 17 sont testées.

5.2.1 Rotation selon l'axe x

Pour cette rotation, il n'y a malheureusement pas de vecteur de déplacement, car le matériel à disposition ne permet pas de contrôler une rotation continue et toujours coaxiale. Les rotations ont été effectuées en surélevant un côté du prisme. Cette procédure permet donc d'incliner le prisme sans pour autant en contrôler parfaitement le mouvement.

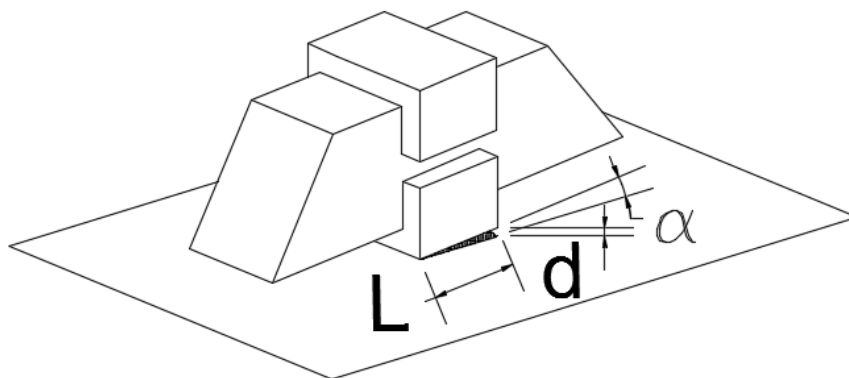


Figure 24 : Schéma de rotation du prisme

L'angle alpha est déterminé grâce à la taille du socle « L » et la hauteur de surélévation « d » selon la formule :

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{d}{L} \right)$$

Les longueurs « L » et « d » sont déterminées au pied à coulisse. Leur précision et fiabilité ne sont donc pas optimales et n'égale pas celle des autres outils de mesure tels que l'interféromètre ou le niveau électronique. Le tableau suivant reprend les facteurs d'échelle calculés selon deux rotations :

Position	Facteur d'échelle	Précision du facteur d'échelle
Centre du prisme	1.000032	3.41E-06
Rotation -2°	0.999895	7.38E-06
Rotation 2.4°	1.000254	6.07E-06

Figure 25 : Valeur de facteur d'échelle pour rotation en x

5.2.2 Rotation selon l'axe « z »

Cette rotation consiste à tourner le prisme sur un plan horizontal, autour de son axe « z ». Pour la simplifier et mieux la contrôler, c'est le niveau qui est tourné selon son axe « z » à la place du prisme. De cette manière, il est possible d'utiliser les graduations du cercle de l'appareil. La relation liant les deux angles se fait selon la figure suivante :

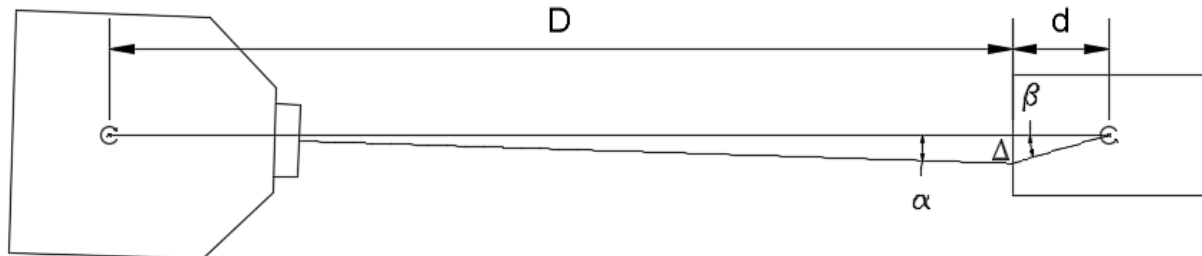


Figure 26 : Rotation du prisme en fonction de celle du niveau

$$\beta = -\tan^{-1}\left(\frac{D * \tan \alpha}{d}\right)$$

Les effets dus à cette rotation sont illustrés dans le graphe ci-dessous :

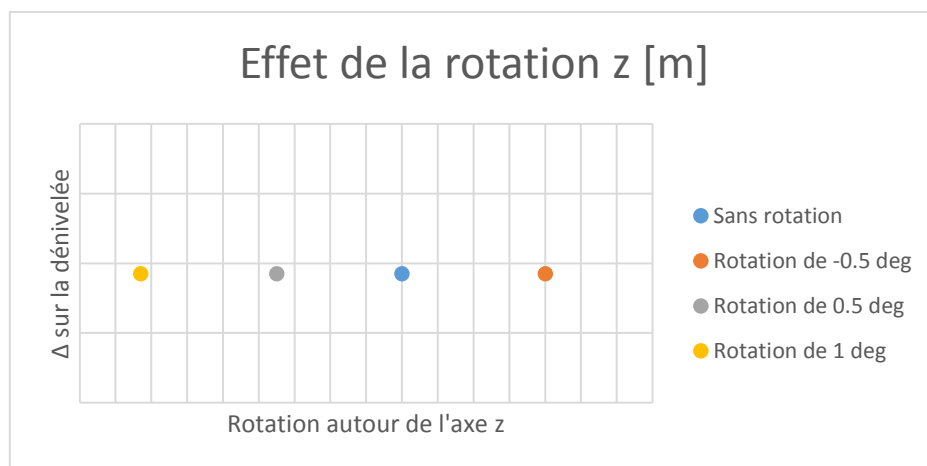


Figure 27 : Vecteur de déplacement pour rotation du prisme selon l'axe z

La rotation ne semble pas avoir d'effet sur la visée. Cependant, les tests sont uniquement effectués dans une petite plage angulaire. Au-delà, les mesures au niveau devenaient impossibles car une trop petite portion de mire était visible.

Position	Facteur d'échelle	Précision du facteur d'échelle
Centre du prisme	1.000032	3.41E-06
Rotation niveau 0.2° = rotation prisme -0.94°	1.000019	6.64E-06

Figure 28 : Valeur de facteur d'échelle pour rotation en z

5.2.3 Rotation selon l'axe « y »

Cette rotation pose le même problème que la rotation sur l'axe « x » pour quant à sa mise en place. Le système de rotation est le même qu'à la figure 24. Encore une fois la précision du déplacement n'est pas maîtrisée et est seulement à titre indicative.

Position	Facteur d'échelle	Précision du facteur d'échelle
Centre du prisme	1.000032	3.41E-06
Rotation -1.4°	1.000000	1.07E-05
Rotation 1.5°	0.999980	7.71E-06

Figure 29 : Valeur de facteur d'échelle pour rotation en y

5.3 Conclusion des résultats

En prenant l'intervalle de confiance à 99% de chaque test, comparé à la position initiale, il est possible de tirer des conclusions sur les effets de mouvement du prisme. L'intervalle de confiance se calcule comme suit :

$$a - 2.58 \times \sigma \leq a \leq a + 2.58 \times \sigma$$

Où :

a : facteur d'échelle

σ : écart-type

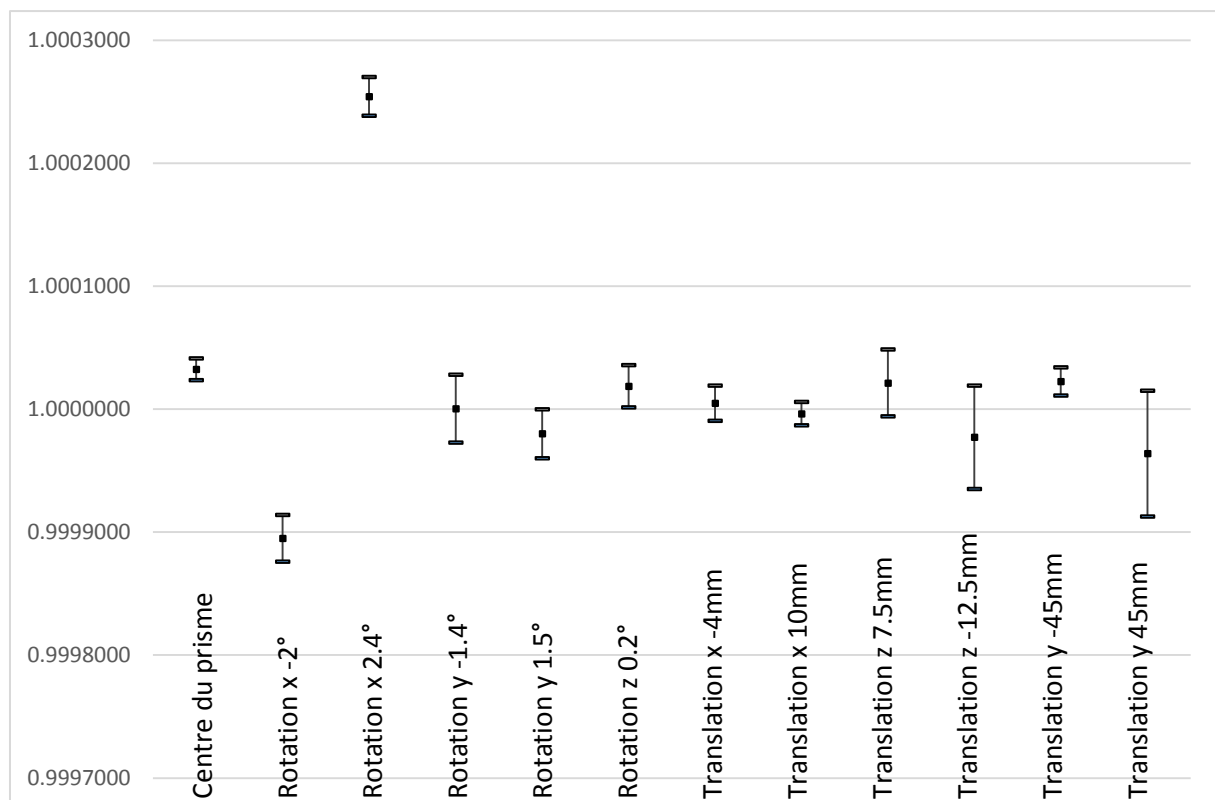


Figure 30 : Graphique de dispersion et intervalles de confiance

Sur le graphique ci-dessus il est possible de voir les facteurs d'échelle selon chaque position du prisme, ainsi que les intervalles de confiance associés.

On remarque que la plupart des mouvements se rapproche de l'intervalle de confiance de la mesure de référence. Il n'y a cependant que quatre déplacements qui l'intersectent. Hors, il faudrait que tous les intervalles de confiance aient une plage commune pour affirmer que le prisme n'engendre pas de problème sur la visée.

Les deux rotations selon l'axe « x » sont problématiques. Des tests supplémentaires seront donc nécessaires pour mieux appréhender l'influence de cette rotation.

Ces premiers tests ont été effectués dans le but de mettre en évidence d'éventuels problèmes sur le prisme. Il a ainsi pu être constaté que certains déplacements ne semblaient pas optimaux. Les mesures vont alors être réitérées pour améliorer les résultats. Le montage utilisé sera cependant plus robuste pour assurer une plus grande fiabilité et un meilleur contrôle des déplacements.

5.4 Nouvelles mesures pour contrôle

Comme dit précédemment, pour assurer une plus grande fiabilité dans les résultats, il était nécessaire de concevoir un montage plus robuste. Celui-ci est représenté sur la photo suivante :



Figure 31 : Photo du nouveau montage du prisme

Il possède six degrés de liberté, 3 translations et 3 rotations, contrôlés par des vis graduées de déplacement. Contrairement au montage précédent, où les rotations étaient effectuées de manière plus approximative en surélevant le prisme, ce montage permet de contrôler finement les mouvements et de pouvoir revenir en tout temps à la position initiale de mesure.

Le premier plateau croisé (le grand bleu sur la photo) permet d'effectuer des translations selon les axes x et y de 1.75mm par tour de vis.

Le second plateau (le petit noir sur la photo) permet d'effectuer des rotations autour des axes « x » et « y ». Il fonctionne en faisant avancer ou reculer une bille qui va faire monter ou descendre un côté du plateau. Pour 1mm d'avancée de bille, le plateau monte de 0.07 mm, ce qui correspond à une rotation de 0.07° en « x » et 0.12° en « y » sur ce plateau.

La rotation sur l'axe « z » est assurée par la rotation du support du premier plateau, elle est contrôlée par des graduations en degrés, mais elle est effectuée manuellement, ce qui lui confère une précision assez faible. Cependant, comme précédemment, la rotation sur cette axe est très limitée car très vite la visée s'éloigne de la mire et il n'y a plus assez de longueur de code barre pour permettre au niveau d'effectuer une lecture.

La translation sur l'axe « z » se fait par le trépied à manivelle. Cet axe ne possède malheureusement pas de graduations, il est donc difficile de contrôler précisément ce mouvement. Cette translation ne sera donc pas re-testée de peur d'influencer les autres mouvements.

Toutes les mesures sont effectuées de 50 à 150cm de la mire, tous les 10 cm. L'intervalle choisi de 10 cm ne permet d'avoir que 11 mesures. Ce choix a été fait dans un souci de gain de temps pour réaliser

un maximum de tests, cependant, il serait préférable d'effectuer plus de mesures pour fiabiliser les résultats obtenus.

5.4.1 Choix des mesures de référence

Cinq mesures de référence ont été effectuées au centre du prisme. Quatre d'entre elles (2 à 5 sur la figure 32) sont faites dans les mêmes conditions que tous les autres tests. La dernière (1 sur la figure 32) est faite de manière à fiabiliser les résultats, avec une mesure tous les centimètres.

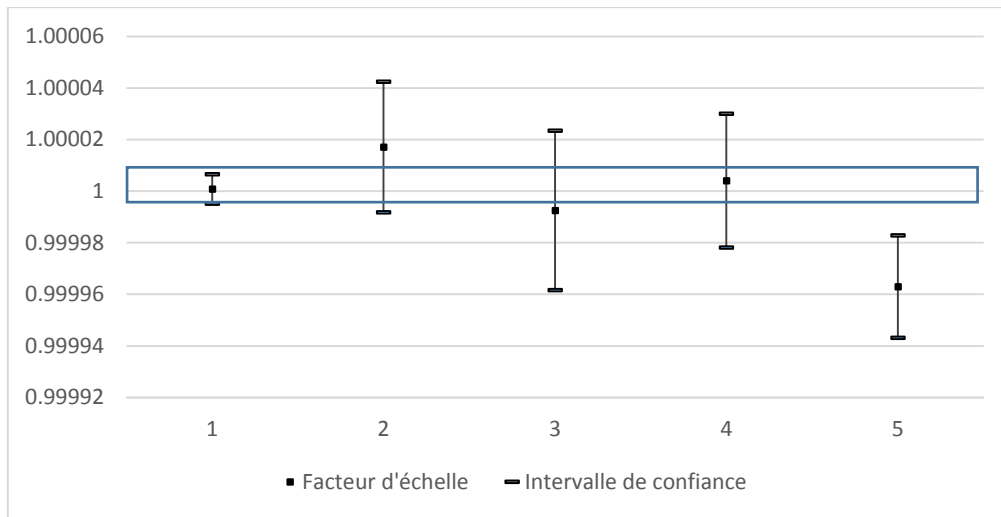


Figure 32 : Choix des mesures de référence

Le choix des mesures de référence se fait donc en fonction de cette mesure plus précise (la 1), si leur intervalle de confiance intersecte celui de la mesure la plus précise (cadre bleu), elle est conservée, sinon, elle est exclue. Ici, la 5 est exclue et les mesures 2 à 4 conservées.

Le choix est fait d'utiliser des mesures de références moins précises afin d'avoir une certaine logique entre les mesures de référence et les tests effectués.

5.4.2 Résultats

En connaissant la valeur des mesures de référence, il est maintenant possible d'apprécier si les tests effectués sur les mouvements du prisme influent ou pas les visées. Les rotations « x » et « y » ainsi que les translations « x » et « y » sont testées :

	Position	Facteur d'échelle	Ecart-type
1	ini_cm	0.999999	2.40E-06
2	ini1	1.000017	9.83E-06
3	ini2	0.999993	1.20E-05
4	ini3	1.000004	1.01E-05
5	ini4	0.999963	7.69E-06
6	-rotx 0.52°	1.000003	1.07E-05
7	-rotx 0.34°	0.999988	1.10E-05
8	-rotx 0.17°	1.000003	1.51E-05
9	rotx 0.17°	1.000038	9.38E-06
10	rotx 0.34°	1.000036	1.00E-05
11	rotx 0.52°	1.000022	9.94E-06
12	rotx 0.69°	1.000025	1.05E-05
13	rotx 0.86°	1.000028	1.23E-05
14	rotx 1.03°	1.000023	1.19E-05
15	rotx 1.20°	1.000028	9.79E-06
16	rotx 1.38°	1.000026	1.20E-05
17	rotx 1.55°	1.000032	1.01E-05
18	rotx 1.72°	1.000048	9.19E-06
19	rotx 1.72°	1.000043	2.14E-06
20	-roty 0.59°	1.000016	8.22E-06
21	-roty 0.29°	1.000012	8.77E-06
22	roty 0.29°	1.000022	3.29E-06
23	roty 0.59°	1.000017	5.91E-06
24	roty 0.88°	1.000026	6.43E-06
25	-Transx 10.00 mm	1.000047	8.29E-06
26	-Transx 8.00 mm	0.999998	1.30E-05
27	-Transx 6.00 mm	1.000012	1.03E-05
28	-Transx 4.00 mm	1.000003	7.10E-06
29	-Transx 2.00 mm	1.000021	7.61E-06
30	Transx 2.00 mm	1.000016	5.42E-06
31	Transx 4.00 mm	1.000016	8.08E-06
32	Transx 6.00 mm	0.999991	9.76E-06
33	Transx 8.00 mm	1.000039	1.36E-05
34	Transx 10.00 mm	0.999995	1.81E-05
35	-Transy 10.00 mm	0.999993	1.14E-05
36	Transy 10.00 mm	1.000016	4.05E-06

Figure 33 : Tableau des valeurs d'influence sur la visée des mouvements du prisme

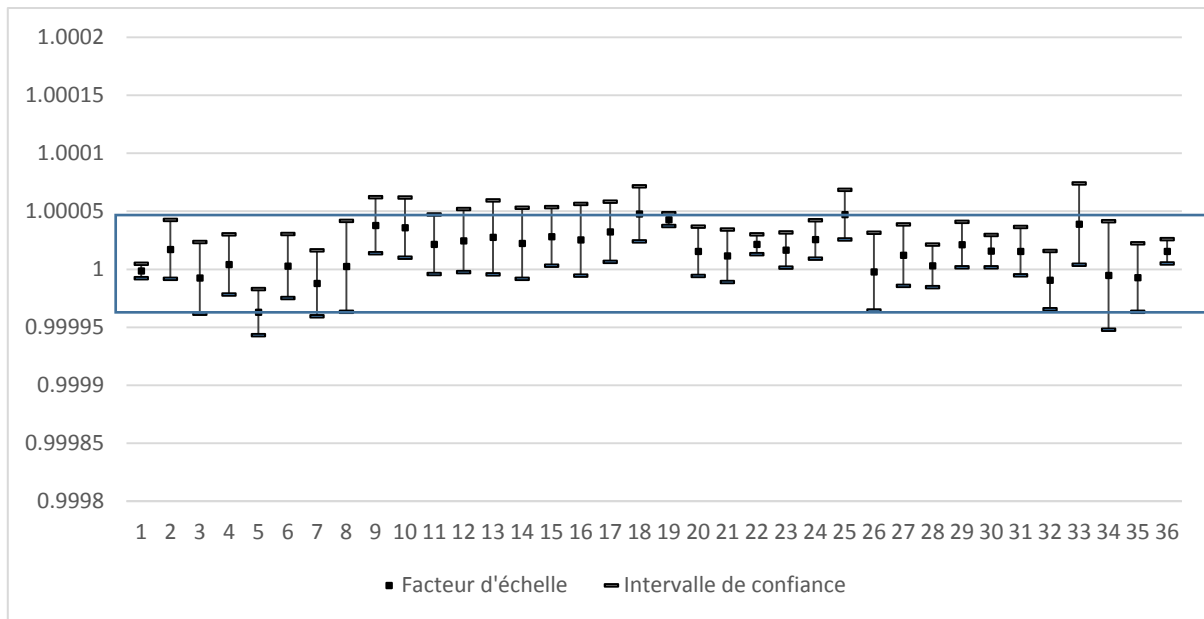


Figure 34 : Influence sur la visée des mouvements du prisme

Dans les figures 33 et 34, on retrouve les résultats des tests effectués.

Le rectangle bleu de la figure 34 représente l'intervalle de confiance des mesures de référence choisies au chapitre précédent. On remarque ainsi que tous les tests effectués se situent dans l'intervalle, ce qui signifie que les mouvements du prisme n'ont pas d'influence sur la visée.

5.5 Conclusion des tests sur le prisme de Dove

Les tests effectués sur le prisme de Dove représentent la plus grosse partie du travail. En effet, toute la méthode d'étalonnage repose sur ce prisme. Dans le cas où celui-ci influe les mesures, il serait inutilisable. Il était donc nécessaire d'investir du temps pour s'assurer de la justesse des visées au travers du prisme.

Après des dizaines de tests effectués avec deux montages différents, il est enfin possible de dire que le prisme n'a pas d'influence sur les résultats des mesures effectuées au niveau numérique.

6 Etalonnage du facteur d'échelle du système de mesure

Le facteur d'échelle du système de nivellement se caractérise par une erreur de proportion dans les mesures. C'est-à-dire qu'une mesure individuelle peut être juste alors qu'une dénivelée calculée à partir de deux mesures peut être fautive. Ce facteur peut être différent selon les endroits de la mire, par exemple, le bas de la mire peut subir plus de chocs lors de l'utilisation et donc subir une plus forte déformation.

Le but de cette partie est de mettre en place une méthode de mesure efficace, capable de détecter des erreurs sur des facteurs d'échelles locaux mais également sur le facteur d'échelle moyen de la mire.

6.1 Pré-analyse

6.1.1 Ecart-type

La pré-analyse permet d'identifier les conditions de mesures nécessaires pour atteindre un objectif donné. Notamment une précision sur une détermination. Dans ce cas, les calculs sont faits pour estimer le nombre de mesures et leur précision associée, pour essayer d'atteindre un écart-type sur le facteur d'échelle de 1 ppm maximum.

Les formules de pré-analyse n'utilisent pas les mesures du niveau, uniquement les mesures « droits » fournies par l'interféromètre. Elles sont aléatoires et n'affectent pas le calcul, seul leur nombre dans le fichier d'entrée est déterminant.

Les formules utilisées sont les suivantes :

Calcul de la matrice des poids :

$$P = \begin{bmatrix} \ddots & & 0 \\ & P_i & \\ 0 & & \ddots \end{bmatrix} \text{ avec } P_i = \frac{\sigma_0^2}{\sigma_i^2}$$

Calcul de la matrice des cofacteurs :

$$Q_{xx} = (A^T P A)^{-1}$$

Avec A la matrice des mesures interféromètre « droits ».

Matrice de variance-covariance des paramètres :

$$C_{xx} = s_0^2 \times Q_{xx}$$

Avec s_0 erreur moyenne à atteindre.

Ecart-type des paramètres a et b :

$$\hat{s}_{x_j} = \hat{s}_0 \times \sqrt{C_{x_j x_j}}$$

$$\hat{s}_{x_j} = \begin{bmatrix} \hat{s}_{x_a} \\ \hat{s}_{x_b} \end{bmatrix}$$

6.1.2 Fiabilité interne

La pré-analyse permet également de calculer des paramètres de fiabilité. C'est-à-dire savoir si la configuration et la surabondance des mesures permettent d'assurer un résultat sans faute. La fiabilité interne est calculée comme suit (Touzé, Géodésie & ajustements 2 Théorie sur la fiabilité, 2017) :

$$Z = I - AN^{-1}A^T P$$

Où la diagonale de « Z » est la fiabilité interne « zi » associée aux mesures « i » correspondantes.

La fiabilité interne est un nombre compris entre 0 et 1. Plus elle est proche de 1, plus la mesure a des chances de ne pas être entachée de faute. Une fiabilité idéale se situe entre 0.25 et 0.6, 0.25 pour être suffisamment fiable, et 0.6 pour éviter une surabondance de mesures inutiles. Ces valeurs peuvent cependant être contradictoires aux objectifs de précision. En effet, pour diminuer l'écart-type, il faut souvent multiplier le nombre d'observations. Hors cela a également pour effet d'augmenter la fiabilité des mesures. Ici, les valeurs de fiabilité interne tourneront plus entre 0.9 et 1 que 0.25 et 0.6.

Les calculs de pré-analyse ont été automatisés par un script Scilab® présenté dans l'annexe 7, p. 58.

6.1.3 Fiabilité externe

La fiabilité externe s'applique à détecter les plus grandes fautes non détectables et leur influence sur le résultat.

Une faute non détectable suit un modèle de mesure qui n'est pas centré sur le modèle accepté :

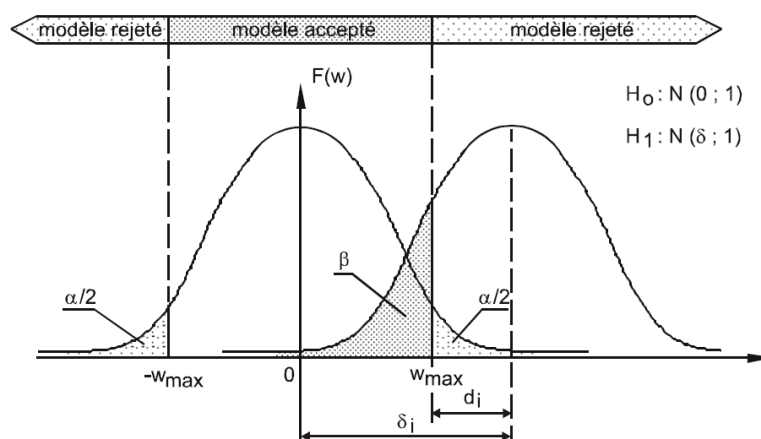


Figure 35 : Schéma du modèle rejeté des plus grandes fautes acceptables (Touzé, Géodésie & ajustements 2 Théorie sur la fiabilité, 2017)

On peut calculer ∇l_i , les valeurs de plus grande faute non détectable pour chaque observation :

$$\nabla l_i = \delta \times \frac{\sigma_i}{\sqrt{z_i}}$$

Où δ est calculé selon la loi normale, ici 99%, donc $\delta = 4.1$.

On calcule ensuite l'influence de la faute sur le résultat pour chaque observation :

$$\nabla x_i = Q_{xx} \times A^T \times P \times \nabla l_i$$

On retient ensuite la plus grande faute non détectable :

$$\nabla a = \max(\nabla x_i)$$

Généralement, on tolère cette faute jusqu'à $\nabla a \leq 3EMA$.

6.1.4 Résultats

Les conditions à respecter lors de la pré-analyse sont donc les suivantes :

Ecart-type : 1×10^{-6} m

Fiabilité interne : 0.25 à 0.6 pour chaque observation

Fiabilité externe : $3 \times 1 \times 10^{-6} = 3 \times 10^{-6}$ m

A l'aide de tests successifs et itératifs qui se basent sur les formules décrites précédemment, on essaie de s'approcher de ces résultats. Finalement, les mesures nécessaires pour atteindre ces précisions sont les suivantes : 186 mesures précises à 7 micromètres, prises tous les centimètres le long de la mire. A noter que le nombre 186 n'est pas pris au hasard, c'est approximativement la longueur de code barre mesurable sur une mire de 2m (les extrémités ne l'étant pas).

De cette manière, les résultats suivants sont obtenus :

Ecart-type : 0.96×10^{-6} m

Fiabilité interne : 0.979 à 0.995 pour chaque observation

Fiabilité externe : 0.5×10^{-6} m

Cette configuration (186 mesures à 7 micromètres) exige beaucoup de temps et une grande précision dans les mesures, ce qui laisse penser qu'obtenir 1×10^{-6} m d'écart-type est assez prétentieux. En effet, la précision de mesure donnée pour le niveau numérique Leica est de 10×10^{-6} m sur une visée, ce qui signifie qu'il faudrait réaliser deux séries de mesure pour atteindre la précision de 7×10^{-6} m. Ce procédé exigerait beaucoup trop de temps pour la réalisation d'un étalonnage de mire.

On remarque ici que la valeur limitante est l'écart-type. En effet, les exigences de fiabilité sont amplement remplies. Pour simplement se limiter aux valeurs voulues de fiabilité, 40 mesures tous les 5 cm et précises à 10 micromètres suffiraient à satisfaire une fiabilité externe à 3×10^{-6} m. L'écart-type sur le facteur d'échelle ne serait cependant que de 2.74×10^{-6} m.

Pour ce qui est de la fiabilité interne, seules 4 mesures, de précision 10 micromètres, régulières le long de la mire, suffisent à assurer la valeur de 0.25 à 0.6 pour chaque observation.

	Ecart-type	Fiabilité interne	Fiabilité externe
Nombre de mesures	186	40	4
Précision des mesures	7 micromètres	10 micromètres	10 micromètres
Intervalle entre les mesures	1 cm	5 cm	60 cm

Figure 36 : Tableau des mesures nécessaires pour atteindre les objectifs de pré-analyse

Afin d'éviter les mesures de séries sur les observations faites au niveau numérique, on acceptera 10 micromètres sur la précision des mesures. Ce qui a pour effet de porter l'écart-type final à 1.37×10^{-6} mm.

L'objectif final est donc le suivant :

Ecart-type : 1.37×10^{-6} mm

Fiabilité interne : 0.25 à 0.6 pour chaque observation

Fiabilité externe : $3 \times 1 \times 10^{-6} = 3 \times 10^{-6}$ mm

Réalisable par 186 mesures précises à 1 micromètre, effectuées tous les centimètres le long de la mire.

Dans ce cas-là, la fiabilité externe s'élève à 7×10^{-7} et est déterminée par les premières et dernières observations :

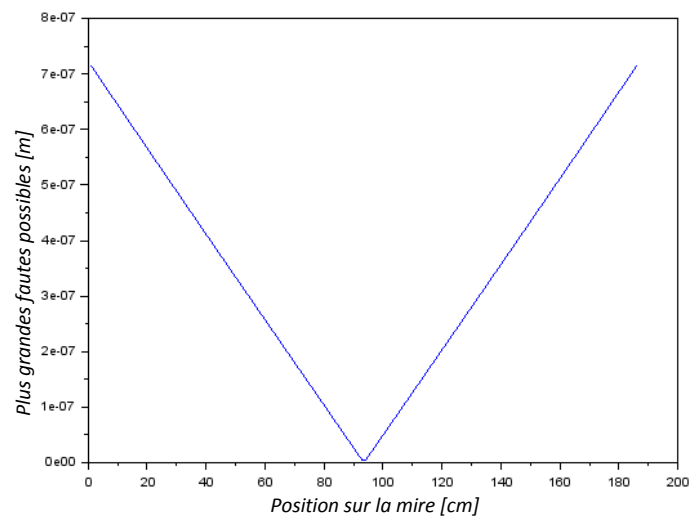


Figure 37 : répartition des plus grandes fautes possible selon les observations (en m)

Les fiabilités internes se situent toutes entre 0.979 et 0.995 :

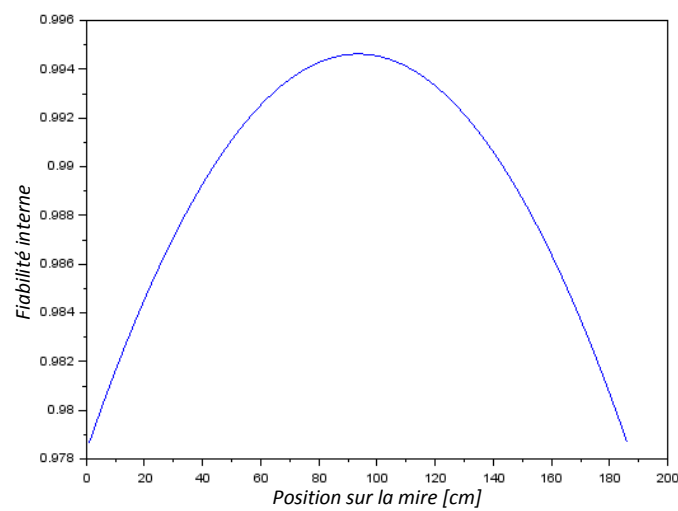


Figure 38 : répartition de la fiabilité interne selon les observations

6.2 Protocole de mesure

La mise en évidence de l'erreur de facteur d'échelle se fait via l'utilisation de l'interféromètre. Ce dernier sert de mesure de référence par rapport à la mesure faite via le système de nivellement.

Un déplacement est effectué à l'aide du chariot du banc en marbre, puis deux mesures sont prises, une à l'interféromètre et l'autre au niveau numérique. Grâce à la pré-analyse il est possible de connaître l'intervalle à effectuer entre chaque mesure, donc 186 mesures tous les cm sur une mire de 2m.

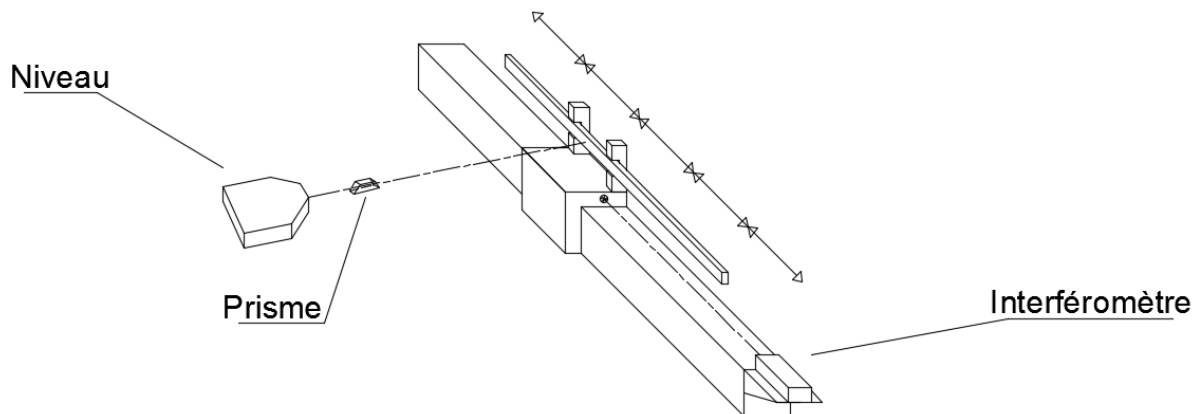


Figure 39 : Schéma de mesure pour facteur d'échelle de la mire

Ce déplacement régulier est ainsi effectué sur tout le long de la mire, avec à chaque arrêt deux mesures. Les mesures sont ensuite mises en relation afin d'effectuer une comparaison du facteur d'échelle.

6.3 Mesure selon pré-analyse

Conformément aux résultats de la pré-analyse, 186 mesures tous les centimètres sont effectuées sur une mire de deux mètres.

Le calcul du résultat se fait en utilisant le script Scilab décrit au chapitre 5.1. Des fonctions supplémentaires lui ont cependant été ajoutées entre temps. Notamment la visualisation de l'observation avec le plus grand résidu ou encore l'affichage du résultat du test statistique du \hat{Q} . Cette nouvelle version du script est disponible en annexe 5, page 55.

Un premier test révèle un facteur d'échelle de -1.3 ± 2.4 ppm. Quatre observations sont cependant hors tolérance et sortent de l'intervalle de confiance à $\pm 2.58\sigma$. Elles sont donc dépondérées de manière à ne plus influencer le calcul.

N° observation	Wi	Résidu [μm]
176	3.52	61.8
58	2.94	-50.2
12	2.69	-44.6
59	2.71	-44.4

Figure 40 : Tableau des observations éliminées

Le second calcul, dépourvu d'observation hors tolérance, affiche le résultat suivant : 0.9 ± 2.2 ppm.

Il est possible de représenter les erreurs résiduelles présentes le long de la mire :

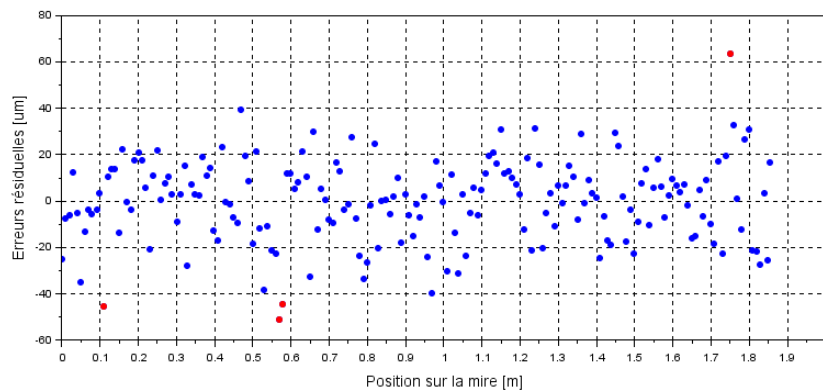


Figure 41 : Erreurs résiduelles en fonction de la position de la mire

Sur ce graphique (figure 41), on remarque certains points excentrés (en rouges), ce sont les mesures qui ont dûes être dépondérées dans le calcul.

On remarque que les 1.37ppm de précision prévue ne sont pas atteints. Ceci peut venir du fait que la précision à priori du dispositif n'est pas réellement connue. En reprenant toutes les mesures effectuées il est possible d'approximer cette valeur.

D'autres problèmes peuvent également entrer en compte, notamment la maîtrise de l'environnement qui n'est pas parfaite, avec une précision sur la connaissance de la température et de la pression probablement non suffisante.

6.4 Approximation de la précision de la méthode de mesure

L'approximation de la précision de la méthode de mesure mise en place pour étalonner le facteur d'échelle des mires de nivellement se base sur le test du \hat{Q} calculé comme suit :

$$\hat{Q} = \hat{s}_0^2 / \sigma_0^2$$

Où :

\hat{s}_0 = erreur moyenne à posteriori

σ_0 = erreur moyenne à priori

Le résultat de ce test doit tendre vers 1. Lorsque c'est le cas, c'est que la précision à priori est égale à la précision à posteriori. En connaissant la précision à posteriori d'un grand nombre de mesures, il est possible de déduire une précision à priori du système. Plus le nombre de test est grand, plus la précision de la détermination sera grande également. En reprenant donc toutes les mesures effectuées jusqu'à présent, il est possible d'obtenir une précision à priori proche de la réalité.

Pour chacune des sessions de mesures effectuées, le test du \hat{Q} est réalisé. Au total, ce sont 64 tests qui ont été entrepris, avec plus ou moins de mesures effectuées à chaque fois. Une moyenne pondérée est donc faite pour donner d'avantage d'importance aux sessions de mesures avec une plus grande redondance.

$$Moy \sigma_0 = \frac{\sum [\hat{s}_i^2 \times (n_i - u)]}{\sum [n_i - u]}$$

Où :

\hat{s}_i = erreur moyenne à posteriori du $i^{\text{ème}}$ test

n_i = nombre d'observation du $i^{\text{ème}}$ test

u = nombre d'inconnue de test, ici, toujours égale à 2.

Au final, en reprenant les 64 tests représentés par 1342 mesures différentes, on obtient une approximation de l'erreur moyenne à priori de $14.4\mu\text{m}$. Cette valeur se trouve donc un peu au-dessus des $10\mu\text{m}$ utilisés dans la pré-analyse, mais reste assez fine pour déterminer la précision du facteur d'échelle d'un système de nivellement.

6.4.1 Reprise de la pré-analyse

En reprenant le calcul de pré-analyse du chapitre 6.1, et en modifiant uniquement la précision des mesures de 10 à $14.4\mu\text{m}$, on obtient un écart-type de 1.97ppm au lieu de 1.37 auparavant.

Sachant que les mesures effectuées selon cette pré-analyse ont un écart-type de 2.2ppm , il est possible de considérer leur résultat comme très satisfaisant.

6.5 Test des mires du CERN

L'organisation européenne pour la recherche nucléaire (CERN) m'a prêté des mires pour que je puisse en étalonner le facteur d'échelle. Ce sont des mires « faites maison » dont il est intéressant de voir avec quelle précision elles ont été fabriquées. Pour en déterminer le facteur d'échelle, des mesures tous les centimètres sont réalisées et passées au même procédé de calcul que toutes les observations jusqu'à présent.

N° mire	Facteur d'échelle [ppm]	Précision [ppm]
1	29.7	5.0
2	112.5	6.1

Figure 42 : Tableau des facteurs d'échelle des mires du CERN

Les erreurs résiduelles sont disposées comme suit :

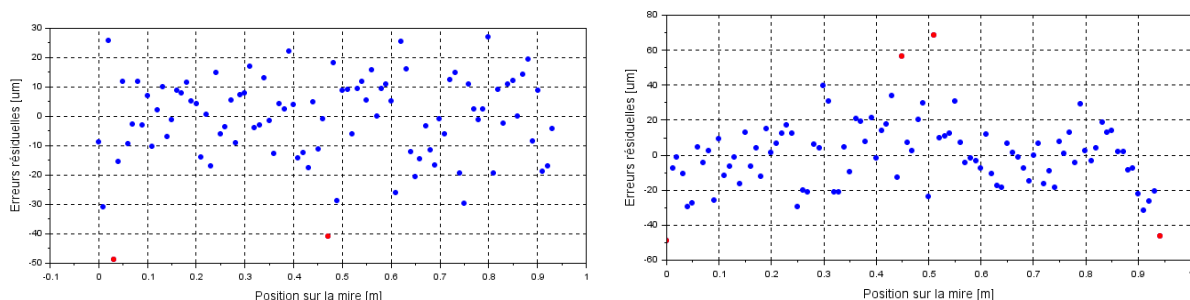


Figure 43 : Erreurs résiduelles des mires 1 (gauche) et 2 (droite) du CERN

La précision obtenue sur les facteurs d'échelle est satisfaisante. En effet, les précisions trouvées en pré-analyse ne peuvent s'appliquer ici, puisque ces mires ne mesurent que 1m au lieu des 2m de la mire utilisée pour les autres tests. Plus la longueur totale de mesure sera petite, et plus l'incertitude sur la pente de la droite sera grande pour une même précision de mesure (Touzé, 2017).

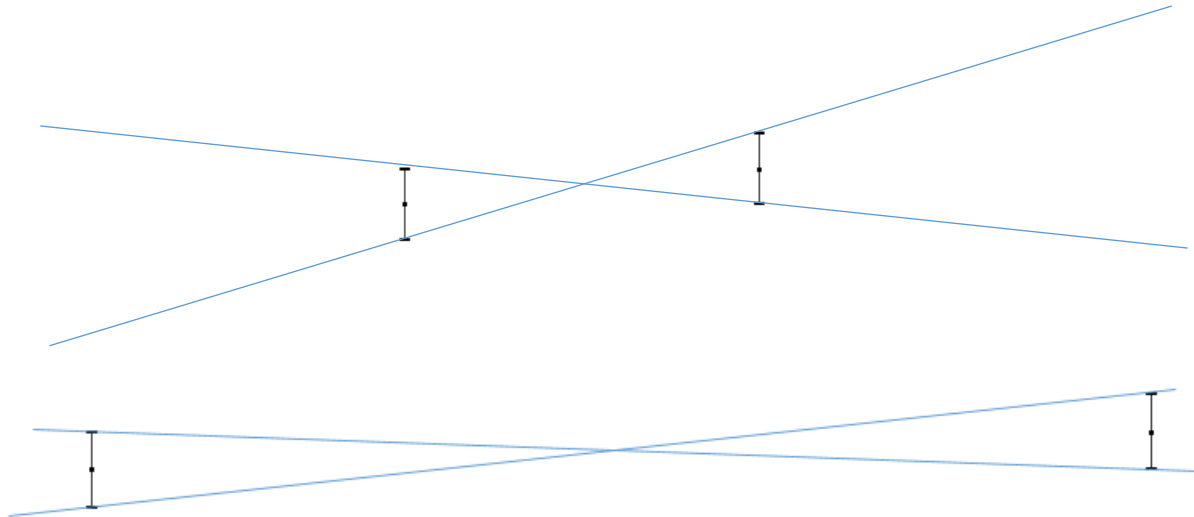


Figure 44 : Illustration de l'erreur possible de la pente de la droite en fonction de l'éloignement des mesures

Sur la figure ci-dessus (figure 44), l'erreur sur la pente de la droite en fonction de l'éloignement des mesures est illustrée. Il est possible de voir que malgré des précisions de mesure égales entre les deux graphiques, l'incertitude sur la pente (intervalle entre les lignes bleues) est bien plus grande lorsque les mesures sont proches. Il est donc plus difficile d'obtenir une grande précision sur le facteur d'échelle lorsque la mire est plus petite.

Les facteurs d'échelles obtenus (29.7 ± 5.0 ppm et 112.5 ± 6.1 ppm) ne sont pas négligeables, en particulier pour la mire numéro 2. Cela signifie qu'une mesure de dénivelée d'un mètre effectuée avec cette mire sera en réalité mesurée à 1.0001125m, soit un centième de millimètre de faute. En fonction des précisions de mandats recherchées, cette erreur peut engendrer de gros problèmes dans les résultats.

6.6 Conclusion de la méthode d'étalonnage du facteur d'échelle

La méthode d'étalonnage du facteur d'échelle mise au point ici permet d'obtenir des résultats très satisfaisants avec des précisions suffisantes aux instruments étalonnés.

Cette méthode n'est cependant pas à la portée de tout le monde car elle requiert des appareils de mesure très spécifiques avec une mise en place assez complexe (interféromètre et chariot déplaçable sur un banc).

Le temps de mesure pour effectuer l'étalonnage est également un facteur péjoratif de la méthode. En effet, elle nécessite une personne pendant environ 2h de travail sans interruption et une concentration élevée pour ne pas commettre d'erreur.

L'automatisation du traitement des mesures permet en revanche un gain de temps. Il suffit de connaître le formatage des fichiers en entrée pour assurer un calcul sans faute en seulement un clic.

Une procédure des tâches à effectuer pour les mesures d'étalonnage et le calcul des acquisitions sont présentés en annexe 8, page 59.

7 Etalonnage du talon de la mire

Le talon de la mire est souvent maltraité par les utilisateurs. Parfois tapé, parfois rayé, il perd petit à petit en planéité. Ce défaut de planéité peut être très handicapant lors de mesures de nivellement de précision. Connaître le défaut de talon de la mire utilisée permet de garantir de meilleures précisions.

Le but de cette partie est donc de mettre en place une méthode qui permette de modéliser le défaut de planéité du talon d'une mire.

Le but est également de définir le zéro de la mire, c'est-à-dire l'erreur de talon due à l'usure de celui-ci. La connaissance de cette erreur permet de pouvoir utiliser plusieurs mires dans un même nivellement tout en corrigeant les mesures pour obtenir une meilleure précision finale.

L'idéale est de réussir à déterminer ces valeurs à une précision proche du centième de millimètre

7.1 Protocole de mesure

Pour déterminer l'erreur de talon de la mire, on utilise la propriété de la mesure en calotte, qui double l'erreur de talon.

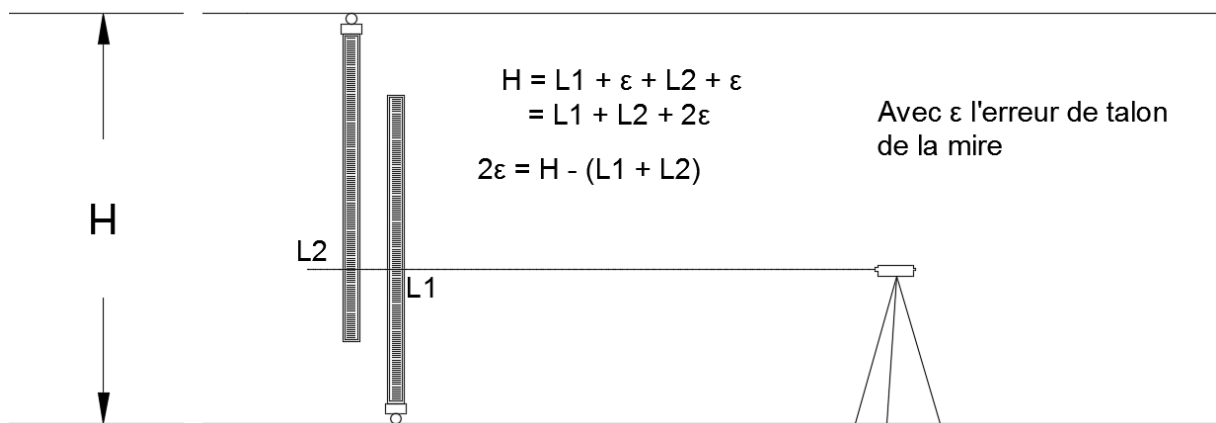


Figure 45 : Schéma d'une mesure de dénivellée avec mire en calotte

Pour gagner en simplicité sur l'expérience, le schéma est placé à l'horizontal :

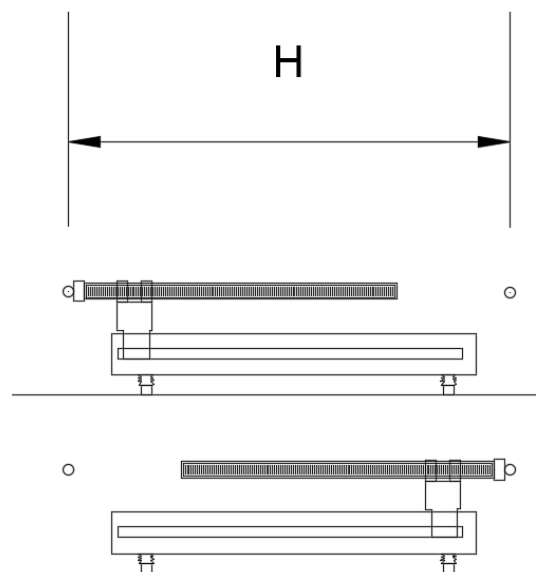


Figure 46 : Schéma de mesure du talon de la mire à l'horizontal

Mesurer de cette manière apporte deux avantages : avoir une longueur H sans contrainte de hauteur de plafond et ne pas avoir à porter en calotte, position souvent instable.

La valeur de référence est mesurée à l'aide de l'AT401, alors que les visées L1 et L2 qui déterminent le talon sont faites au niveau électronique.

La longueur H est matérialisée par deux plaques en acier, fixées au mur, sur lesquelles il est possible de venir appuyer la mire lorsque celle-ci est installée sur le banc d'étalonnage. Ces plaques ont spécialement été fabriquées pour cette expérience, leur schéma se trouve en annexe 9, page 64. Sur ces plaques, il est possible d'aimanter des mini prismes sphériques Leica Ø1.5" (précis à 3µm). C'est en réalité sur ces sphères que les mires sont appuyées, ceci permet de déterminer facilement la longueur entre les deux côtés avec l'AT401, tout en garantissant un appui ponctuel précis.

Le processus de mesures est fait comme suit :

- Appuis de la mire contre le prisme 1
- Mesure du prisme à l'AT401
- Mesure de la mire au niveau électronique
- Retournement de la mire et appuis contre le prisme 2
- Mesure du prisme à l'AT401
- Mesure de la mire au niveau électronique

Processus à répéter sur 5 points du talon, au quatre coins et au centre, afin de déterminer une déformation globale de celui-ci et ainsi pouvoir estimer la planéité du talon de la mire.

Avec un tel cheminement, le paramètre de déformation des supports de prisme n'entre pas dans le calcul. En effet, les mesures sont effectuées à chaque nouveau positionnement de la mire.

Ce processus de mesure permet également d'éliminer les erreurs de centrage du prisme car toutes les mesures sont relatives et réitérées pour chaque détermination de talon.

7.2 Répétabilité des mesures

Comme il est dit précédemment, le protocole de mesure mis en place permet d'exclure les paramètres de centrage de prisme et de flexion des plaques.

Cependant, pour confirmer le besoin de réaliser ce protocole de mesure, il est nécessaire de connaître l'écart-type de positionnement de la mire contre le support. Pour ce faire, la mire a été appuyée 100 fois contre le support, avec à chaque fois deux mesures, une à l'AT401 et l'autre au DN03. De cette manière, il est possible de connaître le comportement des matériaux à la mise en place de la mire sur le banc d'étalonnage.

7.2.1 Détermination à l'AT401

L'AT401 est un théodolite, il peut donc fournir des coordonnées calculées sur la base d'angles et distances. En prenant l'erreur de chaque coordonnée il est possible de déterminer la précision moyenne du positionnement de la mire contre le support.

$$\varepsilon = \sqrt{\varepsilon_X^2 + \varepsilon_Y^2 + \varepsilon_Z^2}$$

Erreur X	Erreur Y	Erreur Z	Erreur globale
0.071 mm	0.047 mm	0.010 mm	0.086 mm

Figure 47 : Erreur de positionnement de la mire sur le support mesurée à l'AT401

Ce jeu de coordonnées XYZ est donné à une précision de $15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m}/\text{m}$ (Hexagon Metrology, 2012). En sachant que 100 mesures ont été prises, il est possible de déterminer la précision de la distance qui se trouve entre l'AT401 et le prisme mesuré.

$$\sigma = \frac{15 + 6 \times D}{\sqrt{100}} = 3.7 \mu\text{m}$$

Selon les mesures effectuées à l'AT401, le positionnement de la mire contre le support mural est possible à $86 \pm 3.7 \mu\text{m}$.

7.2.2 Détermination au niveau numérique DNA03

La mesure au DN03 est différente de celle à l'AT401 car elle ne prend en compte qu'une seule dimension dans le placement de la mire. Cette erreur s'élève à $74 \mu\text{m}$ lorsque l'on tient compte des 100 mesures effectuées au niveau numérique.

La précision donnée pour la résolution d'une mesure altimétrique au Leica DNA03 est de 0.01mm (Leica Geosystems AG, 2006). Ici, la précision finale du positionnement de la mire est la suivante :

$$\sigma = \frac{0.01}{\sqrt{100}} = 1 \mu\text{m}$$

Donc selon les mesures effectuées au niveau numérique Leica DNA03, le positionnement de la mire contre le support s'effectue à $74 \pm 1 \mu\text{m}$.

Les deux déterminations, AT401 et DNA03 sont très proches l'une de l'autre et s'élèvent à environ $80 \mu\text{m}$. Cette valeur est assez conséquente lorsque l'on cherche à déterminer le talon de la mire à une précision de l'ordre du centième de millimètre. Lors de la détermination de cette erreur, il est donc nécessaire de suivre le protocole cité précédemment. De cette manière, un seul placement de mire est effectué et il n'y a pas de paramètres de répétabilité qui rentrent en compte.

7.3 Détermination des erreurs de talon

7.3.1 Détermination du zéro de la mire

Comme expliqué au chapitre 1.2, le zéro de la mire représente la base de la mesure. Si celui-ci présente une erreur, il y aura une faute à corriger lors de nivellements qui utilisent deux mires différentes.

Des mesures ont ainsi été effectuées sur une mire, conformément au protocole énoncé au chapitre 7.1. Afin d'améliorer la précision sur la détermination de cette erreur, des séries de 10 mesures ont été effectuées. A chaque point, 10 mesures AT401 et 10 mesures DNA03 sont acquises. Pour déterminer l'erreur de talon, on considérera le zéro de la mire au centre du talon.

Ces mesures ont été traitées comme expliqué au chapitre 7.1 :

$$\varepsilon = \frac{H - (L1 + L2)}{2}$$

Mesure AT401 (longueur en mm)	Mesure DNA (longueur en mm)	ε [mm]	σ [mm]
5368.414	5368.350	0.032	0.019

Figure 48 : Tableau de valeur de l'erreur de talon de la mire

La précision sur la détermination est obtenue comme suit :

$$\sigma [\mu m] = \sqrt{\underbrace{\left(\sqrt{\left(\frac{15 + 6 \times d1}{\sqrt{10}} \right)^2 + \left(\frac{15 + 6 \times d2}{\sqrt{10}} \right)^2} \right)^2}_{\text{Précision AT401}} + \underbrace{\left(\sqrt{2 \times \left(\frac{10}{\sqrt{10}} \right)^2} \right)^2}_{\text{Précision DNA03}}}$$

7.3.2 Détermination de la planéité du talon de la mire

La planéité du talon dépend du fait d'une usure égale ou non en tout point. Dans le cas où de trop grandes différences sont détectées, la mire pourrait devenir inutilisable car exigerait une correction sur les mesures complexes à quantifier. Ce test est donc rédhibitoire pour l'utilisation ou non d'une mire dans des travaux de précision.

Pour déterminer la planéité du talon, le protocole de mesure cité au paragraphe 7.1 est utilisé. Cinq déterminations différentes sont cependant effectuées, aux quatre coins ainsi qu'au centre. Il y a donc cinq calculs distincts dont les résultats sont comparés. Leur précision est la même qu'au chapitre 7.3.1.

Point	Erreur de talon (ε) [mm]	Δ à la moyenne [mm]
Avant gauche	-0.024	-0.052
Avant droit	0.046	0.018
Arrière gauche	-0.023	-0.051
Arrière droit	0.072	0.044
Centre	0.032	0.004

Figure 49 : Tableau des résultats de l'erreur de planéité du talon

Certains résultats obtenus sont négatifs, ce qui signifie une augmentation de la matière plutôt qu'une diminution due à l'usure. Ce n'est pas cohérent mais cela s'explique par une précision de mesure probablement insuffisante de 1.9 centièmes de millimètre. Ou tout simplement par des poussières présentes lors des mesures.

7.4 Conclusion de la méthode d'étalonnage du talon de la mire

La méthode utilisée pour déterminer les erreurs sur le talon de la mire est bonne, cependant elle ne présente pas une précision assez fine pour pouvoir tirer des conclusions sur l'utilisabilité d'une mire dans des travaux de précision.

Comme pour le facteur d'échelle, il serait idéal d'avoir une mesure de distance plus précise qu'une lecture de dénivelée au niveau électronique, afin d'obtenir des précisions suffisantes.

La solution d'utiliser des mesures angulaires (souvent très fines sur les appareils actuels) couplées à une distance interférométrique pourrait être adoptée. De cette manière, les instruments utilisés pour la détermination d'erreur seraient plus précis que les instruments à étalonner. L'utilisation du Daedalus, qui a une résolution de pointé angulaire extrêmement fine, permettrait encore d'augmenter la précision de la méthode.

Une procédure de mesures angulaires, basée sur celle présentée ici, serait à créer pour améliorer la qualité de la détermination de l'erreur de talon.

8 Problèmes rencontrés

Ce travail ne s'est pas effectué sans encombre, il a été ponctué de différents problèmes qui sont venus perturber l'avancée des tests.

8.1 Panne du banc d'étalonnage

Pour effectuer les mesures requises à l'étalonnage du facteur d'échelle, l'avancée d'un chariot est nécessaire pour prendre des informations régulières le long de la mire. Ce chariot est posé sur le banc en marbre et se déplace dans la ligne de l'interféromètre. Pour le soulever, de l'air comprimé est utilisé pendant qu'un moteur le déplace dans un sens ou dans l'autre. Un boîtier de commande se charge d'envoyer l'air sous le chariot en même temps qu'une impulsion électrique est envoyée au moteur. Ce boîtier permet de choisir la direction d'avancement, ainsi que la vitesse de celui-ci.

Cependant, entre deux jours de mesure, le système de déplacement du chariot est tombé en panne. De multiples tests ont donc été effectués pour localiser le problème et tenter de le résoudre. Après une journée infructueuse, il s'avérait que le problème venait du variateur de vitesse, qui peut aussi faire office d'interrupteur... Celui-ci avait inopinément été placé sur off.

Le lendemain, une odeur de chaud a commencé à se faire sentir, celle-ci provenait du boîtier de commande du banc. Les multiples tests effectués la veille ont engendré un nouveau problème. Le boîtier de commande a donc été débranché et enlevé. Il a été remplacé par un générateur directement branché au moteur. L'air arrive donc maintenant en continue sous le chariot et l'électricité arrive au moteur lorsque le générateur est allumé.

Pour faire avancer le chariot, il est nécessaire de se trouver à côté de celui-ci pour actionner le générateur. Il impose donc des allers-retours très fréquents entre le chariot et l'ordinateur.

Malgré cela, le nouveau dispositif présente quand même des avantages, notamment le fait de pouvoir effectuer des déplacements beaucoup plus finement qu'avec l'ancien variateur. Il a également l'avantage d'être silencieux, contrairement à l'ancien système qui faisait un bruit d'air soufflé à chaque mise en marche.

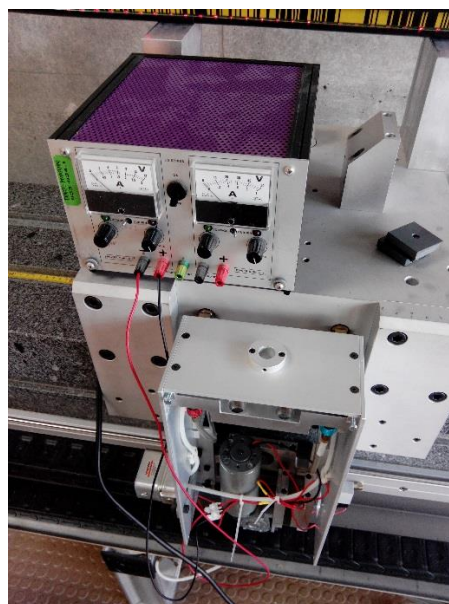


Figure 50 : système D du générateur pour faire avancer le chariot

8.2 Montage du prisme de Dove

Réaliser un montage rigoureux qui permet de positionner le prisme de Dove est plus difficile qu'il n'y paraît. En effet, il était obligatoire de trouver un positionnement permettant assez de degrés de liberté tout en permettant un retour à la position initiale en tout temps. Beaucoup de temps a alors été consacré à réfléchir à une possibilité en utilisant les pièces mécaniques à dispositions. Après de multiples allers-retours entre l'atelier et la salle de mesures, il a finalement été possible de trouver un montage assez satisfaisant utilisant deux plateaux à molettes (décrit en paragraphe 5.4).

Cependant, pour avancer plus rapidement dans les mesures, le montage a été réalisé au ruban adhésif double face. Si cette méthode d'étalonnage impliquant le prisme de Dove devait se généraliser, il serait nécessaire de créer un montage plus robuste et plus fiable.

8.3 Fragilité du script de commande du niveau

Monsieur Kasser a développé un script capable de commander le niveau à distance et d'enregistrer les lectures directement dans un fichier .txt. Bien que très utile, voire indispensable pour gagner un temps considérable, ce script est très sensible à la casse. En réalité, dès qu'un problème intervient dans la mesure, le script plante et les données acquises ne peuvent plus être enregistrées. Des sauvegardes régulières pendant les séances de mesures sont conseillées, afin de ne pas perdre les données en cas de problème. Ceci provient également du fait que l'ordinateur de mesure fonctionne encore sous Windows 2000.

9 Conclusion

Le nivellement de précision respecte les principes de base du nivellement géométrique, en apportant toutefois une multitude de micro erreur, qui semblent négligeables dans la majorité des cas, mais qui peuvent s'avérer vraiment handicapantes dans la recherche de l'extrême précision.

Ce travail a permis de mettre en place une méthode de mesure simplifiée, pouvant révéler une erreur de facteur d'échelle du ruban. Cependant, la tâche n'a pas été aussi facile qu'elle paraissait. En effet, de multiples tests ont dû être mis en œuvre pour prouver que le protocole de mesure n'engendre pas de faute supplémentaire. Tout un travail de métrologie sur les accessoires de mesure a dû être effectué, notamment pour prouver que le prisme de Dove, clef de voûte du sujet, n'impliquait pas de biais de mesure. Ou encore prouver que le fait de placer la mire à l'horizontale lors de l'étalonnage n'engendre pas de comportement non voulu. Nous avons donc à faire à un sujet minutieux, qui demande de la réflexion, de la rigueur et de la concentration.

La seconde partie, la mise en place d'une méthode de détermination de l'erreur de talon de la mire, n'est que partiellement réussie. En effet, le protocole appliqué permet bel et bien de déduire une erreur de talon, mais à une précision trop faible pour que la méthode puisse être appliquée lors d'étalonnage. La solution au problème est de trouver un moyen de mesurer la distance de référence de manière beaucoup plus précise, notamment en passant par l'utilisation de mesures angulaires, dont les hautes précisions sont plus facilement atteignables avec des appareils classiques. Ceci nécessitera cependant une valeur de distances très précise, probablement fournie à l'interféromètre.

L'inconvénient majeur se trouve donc bien là, dans la mesure de distance. L'interféromètre semble indispensable en tant qu'appareil étalon. Les méthodes présentées ici nécessitent un matériel spécifique et coûteux et ne sont donc pas accessibles à tous.

De mon point de vue, travailler ce sujet m'a permis d'appréhender un autre aspect de la mission d'un géomètre, l'extrême précision. En effet, devoir valider la métrologie de chaque étape de mesure et certifier l'exactitude de ses propres résultats, nécessite une grande implication dans la connaissance du problème posé et apporte une réelle satisfaction personnelle.

Je suis satisfait du travail accompli et des résultats obtenus, même s'ils ne sont pas parfaits et demanderaient encore des mesures pour fiabiliser les résultats, ils permettent d'ouvrir la porte à de nouvelles perspectives sur l'étalonnage des mires de nivellement.

Yverdon-les-Bains, le 28 Juillet 2017

Bolzon Nicolas

10 Annexes

1. Cahier des charges
2. Script de commande à distance du niveau électronique, réalisé par M. Kasser.
3. Premier script Scilab® permettant de traiter les mesures
4. Formatage des fichiers en entrée du premier script Scilab®
5. Nouveau script Scilab® plus complet
6. Formatage des fichiers en entrée du nouveau script Scilab®
7. Script Scilab® permettant de réaliser la pré-analyse
8. Procédure d'étalonnage du facteur d'échelle d'une mire
9. Schéma des supports métalliques pour mesurer le talon de la mire

Annexes

1. Cahier des charges



Département ECG
Filière **Géomatique**
Orientation **Géomatique et gestion du territoire**
Candidat **Bolzon Nicolas**
Responsable **Touzé Thomas**

TRAVAIL DE BACHELOR 2016 - 2017

Etalonnages de mires de nivellement

Domaine de recherche : Topométrie, instrumentation

Institut INSIT

Énoncé

Le laboratoire de topométrie du département G2C de la HEIG-VD dispose d'un système de mesure interférométrique monté sur un marbre de 3 m de longueur. Cet équipement a été récemment adapté pour pouvoir étalonner le facteur d'échelle de mires de nivellement géométrique, grâce à l'apport d'un prisme de Dove qui permet de déplacer la mire horizontalement. Plusieurs acteurs de la géomatique en Suisse se sont montrés intéressés par ce banc d'étalonnage, à la condition de pouvoir également définir la constante du talon de la mire.

La première étape de ce travail de Bachelor consistera à valider la métrologie du prisme de Dove, notamment en prouvant que le facteur d'échelle ajusté de la mire est indépendant de l'orientation de ce prisme.

Dans un premier temps, il s'agira de réfléchir à l'adaptation du banc d'étalonnage pour la calibration du talon des mires, notamment par l'utilisation de l'AT401. L'étudiant-e devra effectuer les calculs de pré-analyses afin de déterminer la configuration et le nombre de mesures du niveau, de l'AT401, et de l'interféromètre en vue d'obtenir des écarts-types de 1 ppm sur le facteur d'échelle et de 10 μ m sur le talon de la mire. Les fiabilités externes de ces paramètres devront être inférieures à trois fois leurs écarts-types respectifs.

Dans un troisième temps, il s'agira d'étudier si les mesures interférométriques peuvent être remplacées par des observations AT401.

Cahier des charges

Dans le cadre de ce travail de Bachelor, l'étudiant devra :

- Constituer une bibliographie sur l'étalonnage des systèmes de mesures de nivellement, ainsi que sur l'optique du prisme de Dove et de l'interférométrie ;
- Proposer une solution mécanique simple pour la détermination du talon de la mire ;
- Concevoir et réaliser des expériences en vue de valider l'utilisation du prisme de Dove ;
- Effectuer des pré-analyses en vue de définir la configuration des mesures et leur nombre



- strictement nécessaires pour atteindre les objectifs de précision et de fiabilité ;
- Réaliser et répéter des étalonnages.

Résumé publiable

L'étalonnage des mires de nivellement géométrique de précision se fait généralement par l'utilisation d'un cathétomètre sur lequel la mire ou le niveau se déplace verticalement. Les lectures sont alors contrôlées par la mesure interférométrique des déplacements du cathétomètre.

La méthode proposée par le laboratoire Insit de la HEIG-VD repose sur le prisme de Dove qui permet un déplacement horizontal de la mire. Cependant, il s'agit de prouver que ce prisme n'engendre pas de biais dans le facteur d'échelle.

Enfin, il s'agit de proposer une solution pour pouvoir rattacher le talon de la mire avec une précision de 10 micromètres. Des pré-analyses seront effectuées de manière à atteindre les objectifs de précision et de fiabilité avec un canevas optimal.

Bibliographie

Cf biblio de :

<https://edms.cern.ch/ui/file/605045/1/Memoire.pdf>

Candidat

Bolzon Nicolas Date: 12/07/17 Signature: 

Responsable

Touzé Thomas Date: 12/07/17 Signature: 

Chef du département ECG

Oribasi André Date: Yverdon-les-Bains, le 12.07.2017 Signature: 

2. Script de commande à distance du niveau électronique, réalisé par M. Kasser.

Le script ne peut être lu que par le logiciel BASIC Stamp.

The screenshot shows the BASIC Stamp IDE interface. The title bar reads "BASIC Stamp - C:\QB45\DNA.BAS". The menu bar includes "File", "Edit", "Directive", "Run", and "Help". The toolbar contains various icons for file operations, editing, and execution. The left sidebar shows a file explorer with a tree view containing folders like "National Instruments", "NetMeeting", "Netscape", "Network Associates", "Outlook Express", "Parallax Inc", "Stamp Editor v2.2", "Snapshot Viewer", "VIA Technologies, Inc", "Windows Media Player", "Windows NT", "WindowsUpdate", "X:Setup Pro", and a file named "QB45". The main text area displays a BASIC script for a DNA measurement device. The script includes comments in French and uses standard BASIC syntax for file operations, loops, and conditional execution. The status bar at the bottom indicates "BASIC Stamp files (*.bs1;*.bas;*.bs2;*.bse;*.bsx;*)".

```

10 CLS
20 B = 0
50 OPEN "C:\QB45\MesurDN.txt" FOR OUTPUT AS #2

100 OPEN "COM1:19200,N,8,1,LF,RS,CS,DS,CD" FOR RANDOM AS #1: 'commande DNA
110 PRINT #1, "a": 'allumage
120 CLOSE #1: OPEN "COM1:19200,N,8,1,LF,RS,CS,DS,CD" FOR RANDOM AS #1
122 T2 = TIMER
123 IF TIMER - T2 < 5 THEN 123
125 INPUT "Taper c pour une nouvelle mesure, et f pour terminer ", D$: IF D$ = "f" THEN GOTO 225: IF D$ = "c" THEN GOTO 1
127 IF D$ <> "c" THEN PRINT "pas compris": GOTO 125

130 B = B + 1
140 PRINT #1, "GET/M/WI330" 'ordre de mesure
145 T1 = TIMER
147 IF TIMER - T1 < 2 THEN 147
150 INPUT #1, A$: A = VAL(RIGHT$(A$, 6)): IF A = 0 THEN 145
160 PRINT B; A: PRINT #2, B; A

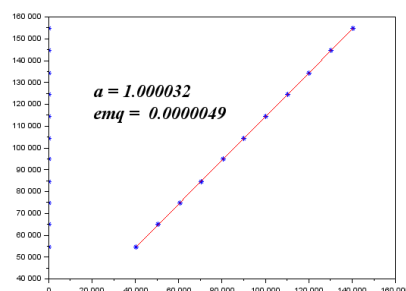
220 GOTO 125

225 CLOSE #2: PRINT #1, "b": END
  
```

3. Premier script Scilab® permettant de traiter les mesures

<pre> 1. clear 2. clc 3. xdel(winsid()) 4. 5. // Import et traitement des lectures du niveau 6. 7. //Decode ole file, extract and open Excel stream 8. [fd,SST,Sheetnames,Sheetpos] = xls_open('DNA.xls') 9. //Read first data sheet 10. [dnabrut,TextInd] = xls_read(fd,Sheetpos(1)) 11. //close the spreadsheet stream 12. mclose(fd) 13. 14. //DNA 15. 16. dna(:,1) = dnabrut(:,2) 17. maxi=max(dnabrut(:,1)) 18. 19. // Import et traitement des lectures de l'interféromètre 20. 21. //Decode ole file, extract and open Excel stream 22. [fd,SST,Sheetnames,Sheetpos] = xls_open('interf.xls') 23. //Read first data sheet 24. [interfbrut,TextInd] = xls_read(fd,Sheetpos(1)) 25. //close the spreadsheet stream 26. mclose(fd) 27. 28. //interf 29. interf(:,1) = interfbrut(:,2) 30. interf(:,2) = 1 31. 32. //calculs matriciels 33. 34. L=dna 35. A0(1:maxi,1)=0 36. A=interf 37. 38. sigmai(1:maxi,1)=1 39. sigma0(1:maxi,1)=0.7 40. 41. CII=diag(sigmai) 42. CIIinv=inv(CII) 43. Pli=CIIinv*sigma0.^2 44. P=diag(Pli) 45. 46. B=L-A0 47. N=A'*P*A 48. C=A'*P*B </pre>	<pre> 49. X=inv(N)*C 50. V=A*X-B 51. 52. Qxx=inv(A'*P*A) 53. 54. sigma0carre=(V'*P*V)/(maxi-2) 55. sigmaajust=sqrt(sigma0carre) 56. 57. qxx=sigma0carre*Qxx 58. emq=sigmaajust*sqr(qxx) 59. emqa=emq(1,1) 60. emqb=emq(2,2) 61. 62. a=X(1,1) 63. b=X(2,1) 64. 65. // création du graphique [Interf;DNA] 66. 67. plot(interf,dna,"*b") 68. 69. // création de la droite de régression linéaire 70. 71. function y=f(x) 72. y=a*x+b 73. endfunction 74. 75. x=interf(:,1); 76. 77. plot(x,f,"r") 78. 79. // écriture sur le graphique 80. 81. xstring(20000,120000,"a = "+string(a),0,0) 82. 83. t=get("hdl") //get the handle of the newly created object 84. 85. t.font_foreground=1; // change font properties 86. t.font_size=5; 87. t.font_style=5; 88. 89. xstring(20000,110000,"emq "+string(emqa),0,0) 90. 91. t=get("hdl") //get the handle of the newly created object 92. 93. t.font_foreground=1; // change font properties 94. t.font_size=5; 95. t.font_style=5; </pre>
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Cette première version permet de calculer les paramètres « a » et « b » de la droite. Il fournit également leur écart-type associé. Le résultat final est affiché dans un graphique de cette forme :



4. Formatage des fichiers en entrée du premier script Scilab®

Mesures du niveau :

Fichier obligatoirement nommé DNA.xls pour correspondre au script :

	A	B
1	1	54729
2	2	64918
3	3	74945
4	4	84661
5	5	94850
6	6	104466
7	7	114580
8	8	124444
9	9	134418
10	10	144662
11	11	154835

Ce fichier .xls est créé à partir du fichier .txt fourni par le script de M. Kasser présent en annexe 2. Il demande une petite remise en page au moment du passage sur excel.

Mesures de l'interféromètre :

Fichier obligatoirement nommé interf.xls pour correspondre au script :

	A	B
1	1	40372.8640
2	2	50560.2720
3	3	60587.8910
4	4	70303.7110
5	5	80491.6380
6	6	90107.5930
7	7	100221.4600
8	8	110085.3300
9	9	120057.0300
10	10	130301.9700
11	11	140476.5700

Ce fichier .xls est créé à partir du fichier .txt fourni par l'export du logiciel gérant l'interféromètre. Il demande une grosse remise en page ainsi qu'une transformation des mesures en centième de millimètre, auparavant au millimètre. La version suivante du script Scilab® permet un travail moins grand sur le formatage de fichier.

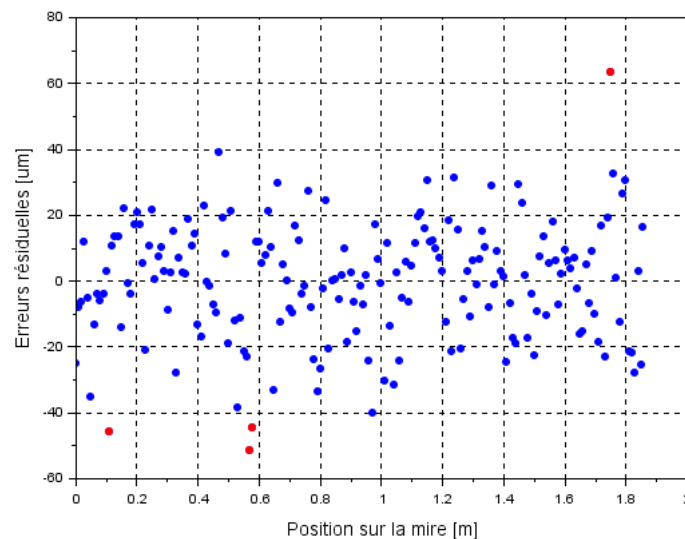
5. Nouveau script Scilab® plus complet

<pre> 1. clear 2. clc 3. xdel(winsid()) 4. 5. // Import et traitement des lectures du niveau 6. 7. //Decode ole file, extract and open Excel stream 8. [fd,SST,Sheetnames,Sheetpos] = xls_open('DNA.xls') 9. //Read first data sheet 10. [dnabrut,TextInd] = xls_read(fd,Sheetpos(1)) 11. //close the spreadsheet stream 12. mclose(fd) 13. 14. //DNA 15. 16. dna(:,1) = dnabrut(:,2)/100000 17. maxi=max(dnabrut(:,1)) 18. 19. // Import et traitement des lectures de l'interféromètre 20. 21. //Decode ole file, extract and open Excel stream 22. [fd,SST,Sheetnames,Sheetpos] = xls_open('interf.xls') 23. //Read first data sheet 24. [interfbrut,TextInd] = xls_read(fd,Sheetpos(1)) 25. //close the spreadsheet stream 26. mclose(fd) 27. 28. //interf 29. interf(:,1) = 100*interfbrut(22:maxi+21,4)/100000 30. interf(:,2) = 1 31. 32. // modèle stochastique 33. sigmai(1:maxi,1)=14.4/1000000 34. sigma0=1/100000 35. 36. //dépondération observations 37. sigmai(176,1) = 0.0001 38. 39. //calculs matriciels pour trouver les paramètres de la droite 40. 41. L=dna 42. A0(1:maxi,1)=0 43. A=interf 44. 45. pi = (sigma0^2)*(sigmai.^-2) 46. P = diag(pi) </pre>	<pre> 47. Qll = (1/sigma0)^2 * diag(sigmai.^2) 48. 49. B=L-A0 50. N=A'*P*A 51. C=A'*P*B 52. X=inv(N)*C 53. V=A*X-B 54. 55. Qxx=inv(A'*P*A) 56. 57. sigma0carre=(V'*P*V)/(maxi-2) 58. sigmaajust=sqrt(sigma0carre) 59. 60. Cxx=sigma0carre*Qxx 61. emq=sqrt(Cxx) 62. emqa=emq(1,1) 63. emqb=emq(2,2) 64. 65. a=X(1,1) 66. b=X(2,1) 67. 68. //représentation des erreurs résiduelles le long de la mire 69. plot(interf(:,1),1000000*V,') 70. //représentation en rouge des observations éliminées 71. plot(interf(176,1),1000000*V(176,1),'. red') 72. 73. //format graphique 74. set(gca(),'grid',[1 1]) 75. xlabel('Position sur la mire [m]','fontsize',3) 76. ylabel('Erreurs résiduelles [um]','fontsize',3) 77. 78. //matrice des variance covariance 79. Qvv = Qll - A*Qxx*A' 80. Cvv = sigma0carre*Qvv 81. 82. //calcul des wi 83. w = V. /sqrt(diag(Cvv)) 84. 85. // test du Q^ 86. disp('Q^') 87. disp(sigmaajust/sigma0) 88. 89. [wm,im] = max(abs(w)) 90. disp('Plus grand résidus normé et V en microns') 91. disp([im,wm,1000000*V(im,1)]) 92. 93. disp('facteur d"echelle en ppm') 94. disp([1000000*(a-1),1000000*emqa]) </pre>
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Cette nouvelle version, dont le but final est toujours de fournir les paramètres « a » et « b » de la droite, offre plus de possibilités :

- calcul des w_i , avec affichage de sa valeur ainsi que de la valeur du résidu associé
- Test du \hat{Q} , qui s'est révélé utile pour trouver une valeur de précision qui s'approche de la précision à priori du système de mesure (chap. 6.4)
- Élimination des observations en fonction des résultats du calcul des w_i

La représentation des données se fait cette fois ci à travers les erreurs résiduelles sur les observations :



Cette visualisation permet de voir si le facteur d'échelle calculé est cohérent sur l'entièreté de la mire ou s'il est possible d'observer des comportements différents en fonction de la position de mesure.

En rouge, ce sont les observations éliminées.

6. Formatage des fichiers en entrée du nouveau script Scilab®

Mesures du niveau :

Fichier obligatoirement nommé DNA.xls pour correspondre au script :

	A	B
1	1	54729
2	2	64918
3	3	74945
4	4	84661
5	5	94850
6	6	104466
7	7	114580
8	8	124444
9	9	134418
10	10	144662
11	11	154835

On remarquera que ce fichier est exactement le même que lors du premier script.

Mesures à l'interféromètre :

	A	B	C	D	E
1	HP 5529A:	Tracé erreur linéaire - Axe X			
2	Fichier:				
3	Date d'acqui	#####			
4	Date actuelle	#####			
5	Type de mes LINEAIRE / Convention de signe Algébrique				
6	Mode:	Unidirectionnel			
7	Nombre de p	205			
8	Nombre tota	205			
9	Nombre tota	1			
10	Coefficient c 1.0 PPM/°C				
11	Unités de po millimètres				
12	Unités d'err millimètres				
13					
14					
15	Données environnement- MIN MAX MOY				
16	Temp air (C)	20	25.5	25.4	
17	Prs air (mm)	720.51	760.73	721.52	
18	Hmd air (%)	50	55	54.88	
19					
20	Classé par	point			
21	Passe	Point	Valeur cible	Valeur err.	Hors spéc.
22	1	1	0.00E+00	1.03E-04	
23	1	2	0.00E+00	1.01E+01 *	
24	1	3	0.00E+00	2.02E+01 *	
25	1	4	0.00E+00	2.94E+01 *	
26	1	5	0.00E+00	4.25E+01 *	
27	1	6	0.00E+00	5.09E+01 *	
28	1	7	0.00E+00	6.09E+01 *	
29	1	8	0.00E+00	7.08E+01 *	
30	1	9	0.00E+00	7.91E+01 *	
31	1	10	0.00E+00	9.29E+01 *	
32	1	11	0.00E+00	1.00E+02 *	

Ce formatage de fichier n'est autre que le fichier .txt fourni par le logiciel interféromètre transformé en .xls. L'utilisation de ce fichier est donc beaucoup plus simple et rapide que la précédente version qui nécessitait passablement de transformations.

7. Script Scilab® permettant de réaliser la pré-analyse

<pre> 1. clear 2. clc 3. xdel(winsid()) 4. // Import et traitement des lectures de l'interféromètre 5. //Decode ole file, extract and open Excel stream 6. [fd,SST,Sheetnames,Sheetpos] = xls_open('interf.xls') 7. //Read first data sheet 8. [interfbrut,TextInd] = xls_read(fd,Sheetpos(1)) 9. //close the spreadsheet stream 10. mclose(fd) 11. //interf 12. interf(:,1) = interfbrut(:,2)/100000 13. interf(:,2) = 1 14. maxi=max(interfbrut(:,1)) 15. //calculs matriciels 16. A0(1:maxi,1)=0 17. A=interf 18. sigma0=0.0000144 19. sigmai(1:maxi,1)=sigma0 20. sigmaicarre=sigmai.^2 21. CII=diag(sigmaicarre) 22. CIIinv=inv(CII) 23. P=CIIinv*sigma0.^2 24. N=A'*P*A </pre>	<pre> 25. Qxx=inv(A'*P*A) 26. n=maxi 27. u=2 28. s02=sigma0.^2 29. v=sqrt((s02*(n-u))/maxi) 30. V(1:maxi,1)=v 31. Cxx=s02*Qxx 32. ecarttype=sqrt(diag(Cxx)) 33. ecartypea=ecartype(1:1) 34. //fiabilité interne 35. I=eye(maxi,maxi) 36. Z=I-A*Qxx*A'*P 37. zi=diag(Z) 38. //fiabilité externe 39. delta=4.1 40. NLi=delta*(sigmai.*(zi.^(-1/2))) 41. Na=[] 42. for mes=1:n 43. NL=zeros(n,1) 44. NL(mes,1)=NLi(mes,1) 45. Nx=Qxx*A'*P*NL 46. Na=[Na;Nx(1,1)] 47. end 48. nablaA=max(abs(Na)) 49. [nablaA,obsA]=max(abs(Na)) 50. Naabs=abs(Na) </pre>
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

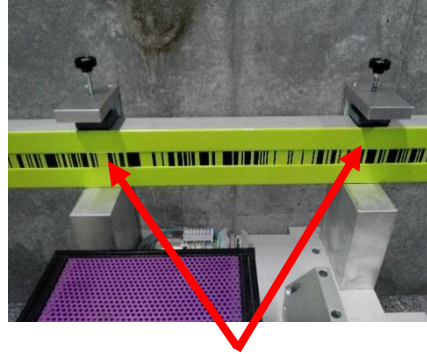
Ce script permet de calculer les paramètres de fiabilité et de précision en fonction de mesures prévues.

8. Procédure d'étalonnage du facteur d'échelle d'une mire

Le document suivant liste les étapes nécessaires à la réalisation de l'étalonnage du facteur d'échelle du système de nivellement. Il peut servir de mode d'emploi pour les étalonnages futurs de mires.

PHASE 1 : AQUISITION DES MESURES

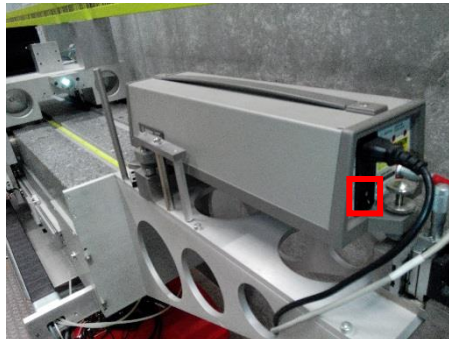
1/ Placer la mire à l'horizontale sur les supports prévus à cette effet. Bien faire attention de la placer en butée au fond puis visser les calles pour la maintenir en position.



Placer en butée

2/ Allumer les instruments nécessaires :

- Ordinateur
- Interféromètre



- Air comprimé



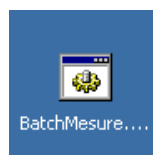
3/ Placer le niveau électronique Leica DN03 sur le plugin situé face au marbre de mesure et le relier à l'ordinateur à l'aide d'un câble VGA.



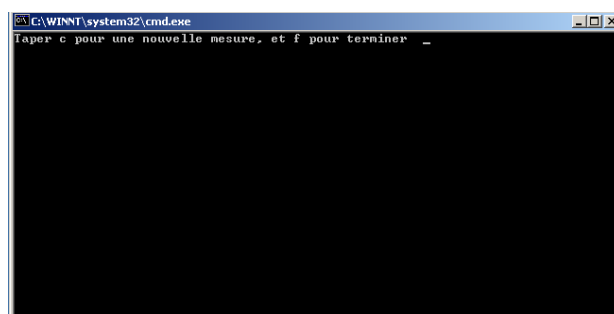
4/ Placer le montage du prisme entre le niveau et le marbre, de telle sorte à ce que la visée passe au centre du prisme.



5/ Ouvrir les deux logiciels suivant, présents sur le bureau :

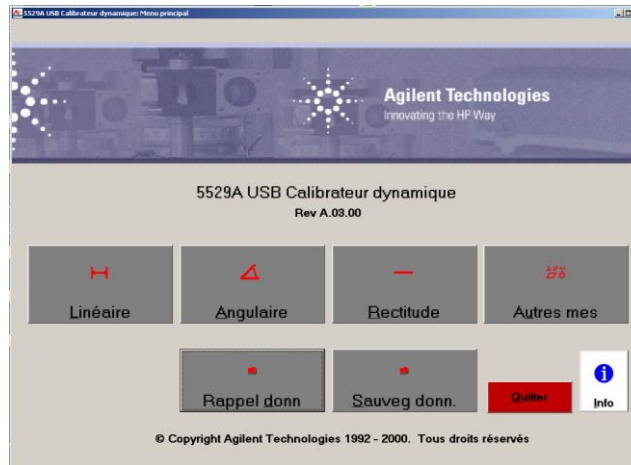


Le premier permet de commander le niveau à distance :

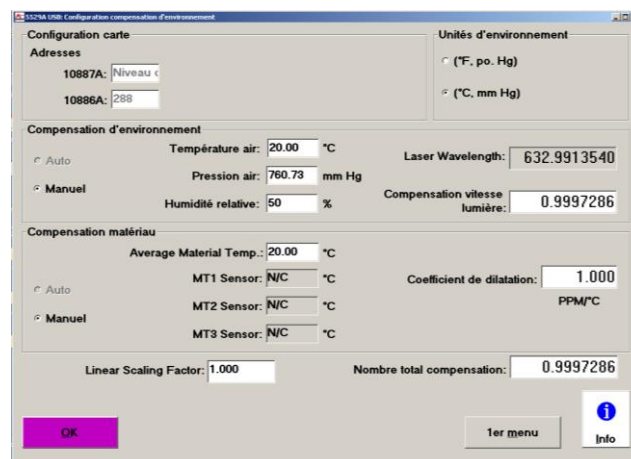


Le second permet de commander l'interféromètre :

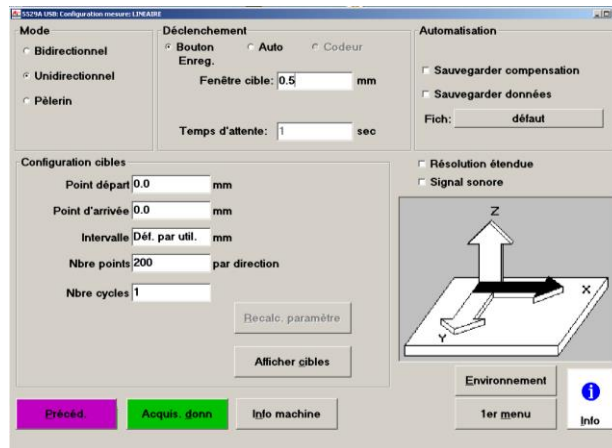
- Choisir mesure linéaire :



- Régler l'environnement de mesure, température, pression, humidité. Placer le coefficient de dilatation à 1 :

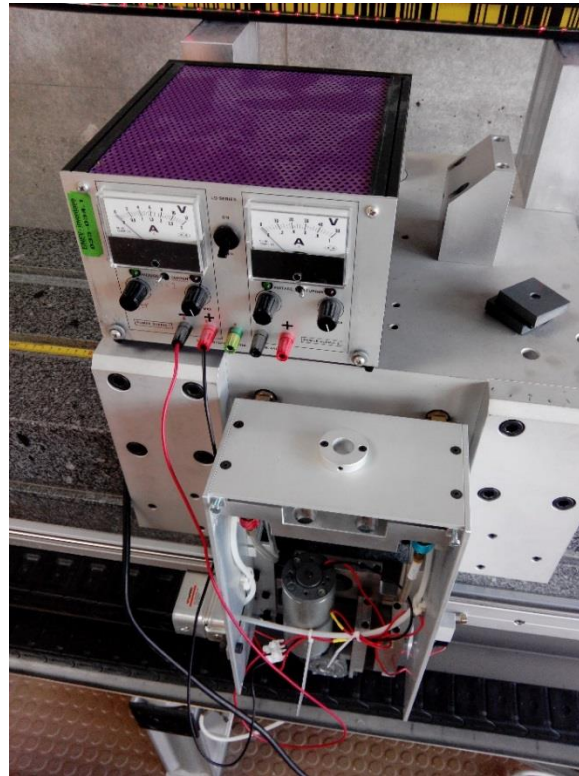


- Réglé la configuration de mesure :
 - Unidirectionnel
 - Point de départ : 0
 - Point d'arrivée : 0
 - Intervalle : 0
 - Nombre de points : assez pour couvrir la mire tous les centimètres (environ 200 pour une mire de 2m)
 - Nombre de cycle : 1



5/ Commencer l'acquisition des mesures :

- Appuyer sur « C » puis « Entrer » pour prendre une mesure au niveau
- Appuyer sur enregistrer pour prendre une mesure à l'interféromètre
- Faire avancer la mire de la distance voulue en utilisant le générateur :



Fil rouge sur bouton noir : avancée de droite à gauche

Fil rouge sur bouton rouge : avancée de gauche à droite

On/off pour avancer/arrêter

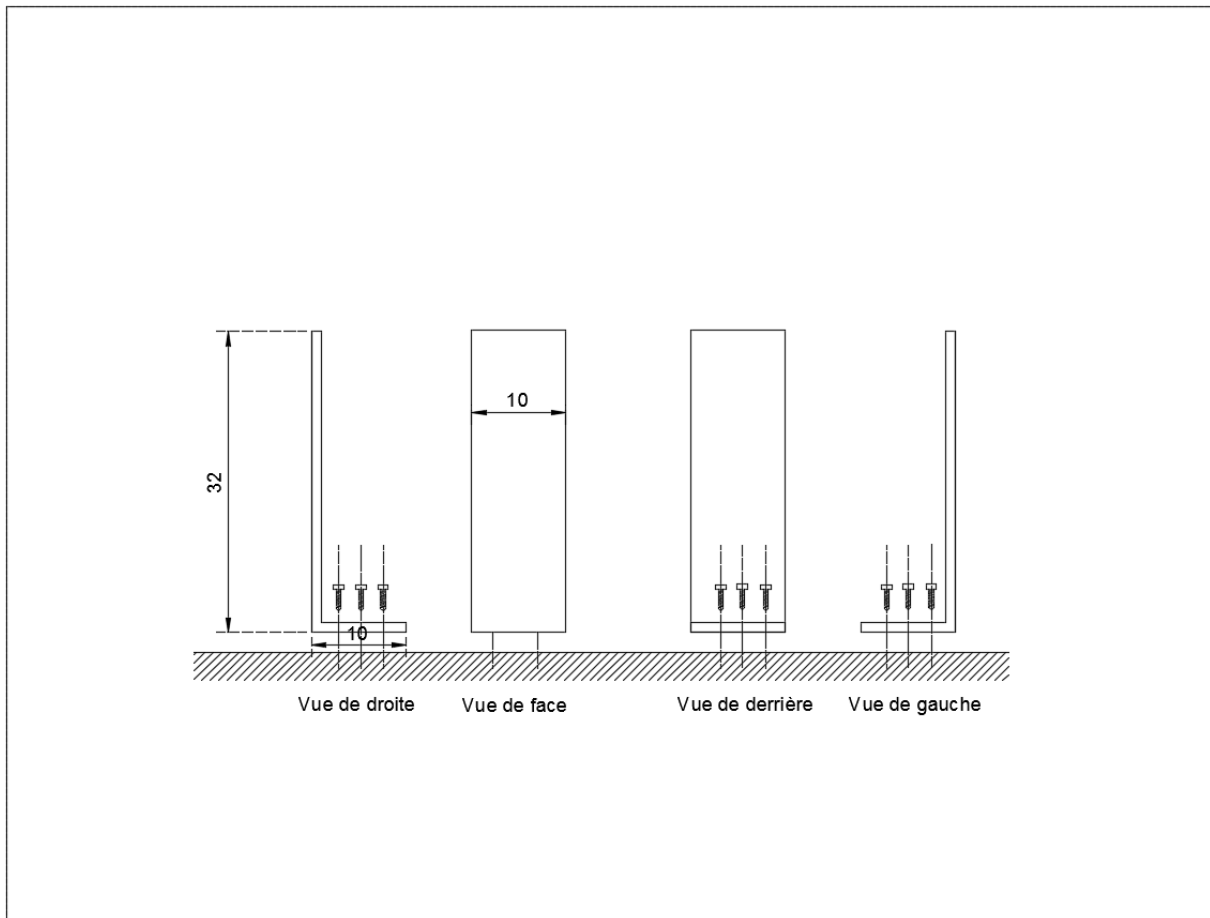
- Répéter le processus autant de fois que voulu
- Enregistrer les mesures du niveau en appuyant sur « f »
- Enregistrer les mesures de l'interféromètre dans : analyse données → visualisation des données → envoi sur fichier

L'acquisition des mesures est maintenant terminée. Il faut passer au calcul.

PHASE 2 : CALCUL DES DONNEES

- 1/ Formater les fichiers de mesures comme indiqué dans l'annexe 6 de ce document.
- 2/ Copier/coller le script de l'annexe 5 de ce document dans un nouveau fichier Scilab®.
- 3/ Lancer le calcul
- 4/ Eliminer les éventuelles observations hors tolérance.

9. Schéma des supports métalliques pour mesurer le talon de la mire



Deux plaques métalliques comme celle-ci ont été spécialement fabriquées afin de pouvoir y aimanter un mini prisme de précision. Ces plaques sont fixées au mur à chaque extrémité du banc d'étalonnage en marbre.



La mire peut ainsi être appuyée contre le prisme pour en déterminer l'erreur de talon.