

Zeitschrift: Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik : VPK = Mensuration, photogrammétrie, génie rural

Herausgeber: Schweizerischer Verein für Vermessung und Kulturtechnik (SVVK) = Société suisse des mensurations et améliorations foncières (SSMAF)

Band: 99 (2001)

Heft: 6

Artikel: Nouveaux développements sur la base d'étalonnage de CERN pour la mesure électronique des distances : application pratique : le TDA5005 de Leica

Autor: Poncet, Sara / Quesnel, J.P.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-235794>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 02.04.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Nouveaux développements sur la base d'étalonnage du CERN pour la mesure électronique des distances

Application pratique: le TDA5005 de Leica

L'étalonnage d'un instrument de mesure électronique des distances (EDM) consiste à déterminer des corrections pour les erreurs systématiques, dues au fonctionnement de l'instrument lui-même. Ces erreurs sont au nombre de trois: l'erreur de fréquence d'émission, la constante d'addition, et les erreurs cycliques pour les instruments à mesure de déphasage. Au CERN, les précisions exigées pour l'alignement des aimants sont très élevées et les étalonnages des EDM y sont donc fréquemment réalisés par le Groupe de Géodésie de Positionnement et de Topométrie, et automatisés. Or les étalonnages de nouveaux EDM ont mis en évidence des phénomènes inhabituels dans le fonctionnement pourtant connu de ce principe de mesure. Ce travail contient donc une étude des fonctionnalités de la base, avec une comparaison avec celles de l'Institut de Géodésie de Bonn (qui ne sera qu'évoqué dans cet article). Enfin, au travers de l'exemple du TDA5005 de Leica, le mode de détermination de chacune des corrections a été revu, et des méthodes de contrôle et de détermination ont été proposées.

Bei der Eichung eines elektronischen Distanzmessgerätes (EDM) geht es darum, Korrekturen für die systematischen Fehler zu bestimmen, die auf den Gang des Gerätes selbst zurückzuführen sind. Man unterscheidet drei Fehler: Fehler der Ausstrahlungsfrequenz, Additionskonstante und zyklische Fehler für Phasenverschiebungsmessinstrumente. Im CERN sind die Genauigkeitsanforderungen für die Ausrichtung der Magnete äusserst hoch und deswegen werden die Eichungen der EDM häufig von der Gruppe für Positionsgeodäsie und Topometrie vorgenommen und automatisiert. Nun aber sind bei Eichungen von neuen EDM ungewöhnliche Phänomene aufgetreten im Ablauf dieses doch bekannten Messprinzips. Diese Arbeit beinhaltet folglich eine Studie der Funktionalität der Basis im Vergleich mit jener des Institutes für Geodäsie in Bonn (die in diesem Artikel nur erwähnt wird). Schlussendlich ist am Beispiel des TDA 5005 von Leica die Bestimmungsart von jeder Korrektur revidiert worden und werden Kontroll- und Bestimmungsmethoden vorgeschlagen.

La taratura di uno strumento di misurazione elettronica delle distanze (EDM) consiste nella determinazione delle correzioni per gli errori sistematici, provocati dal funzionamento dello strumento stesso. Questi errori sono di tre generi: l'errore di frequenza d'emissione, la costante d'addizione e gli errori ciclici per gli strumenti di misurazione dello sfasamento. Al CERN si richiedono precisioni molto elevate per l'allineamento dei magneti e le tarature sono di frequente effettuate e automatizzate da parte del Gruppo di Geodesia di Posizionamento e Tipometria. Tuttavia, le tarature dei nuovi EDM hanno evidenziato dei fenomeni inconsueti nel funzionamento, ormai noto, di questo principio di misura. Questo lavoro contiene quindi uno studio delle funzionalità di base, messe anche a confronto con quelle dell'Istituto di geodesia di Bonn (elemento marginalmente trattato nell'articolo). Infine, partendo dall'esempio del TDA5005 della Leica si è riesaminato il modo di determinazione di ogni correzione e si sono proposti dei metodi di controllo e determinazione.

S. Poncet, J.P. Quesnel

Introduction/contexte

Méthode révolutionnaire il y a 30 ans, l'utilisation des ondes électromagnétiques pour mesurer des distances est aujourd'hui complètement intégrée à tous les travaux courants de géodésie. La technique est aujourd'hui en évolution permanente, et les instruments EDM sont de plus en plus automatisés et informatisés. Parallèlement, les techniques d'étalonnage de ces instruments ont dû être adaptées à cette évolution. Par contre, les méthodes mathématiques de détermination des corrections d'étalonnage sont restées les mêmes, comme si dans ce domaine rien n'avait changé. Sur une base d'étalonnage telle que celle du CERN, l'attention portée aux résultats obtenus est très grande et des comportements inhabituels ont été observés, différents de ce qui pouvait être obtenu avec des EDM plus anciens. Ces observations posent ainsi la question de savoir si, alors que la technologie avance, les certitudes que l'on a à propos du fonctionnement de ces instruments ne sont pas obsolètes. Ce travail s'attache à montrer, au travers de l'exemple des étalonnages effectués au CERN, comment fonctionne une base d'étalonnage et comment les EDM y sont calibrés. Par ailleurs, l'exemple du TDA5005 y est développé, afin de comprendre la nouvelle problématique posée, et permettre de déterminer des méthodes de contrôle et de détermination des facteurs correctifs de l'étalonnage.

Les principes de la mesure électronique des distances

Une onde électromagnétique se propageant dans un milieu quelconque à une vitesse c [m/s⁻¹] est caractérisée par l'équation fondamentale suivante:

$$\lambda = \frac{c_0}{f \cdot n} \quad \text{où } n = c_0/c \quad (1)$$

où λ est la longueur d'onde [m], f la fréquence [Hz], n l'indice de réfraction de

l'atmosphère et c_0 , la vitesse de la lumière dans le vide (environ égale à $3 \cdot 10^8$ m.s⁻¹) Dans le cas des EDM, l'unité de mesure dépend de λ , ou plus exactement de $\lambda/2$ (puisque l'onde parcourt deux fois la distance), qui est appelée alors Unité Fondamentale (UF) de l'EDM.

La distance mesurée par un tel procédé dépend donc directement de cette UF. En ce qui concerne les EDM à mesure de déphasage, c'est le résidu non entier de $\lambda/2$ qui est mesuré (fig. 1). Pour cela, l'instrument émet plusieurs ondes, de longueurs décroissantes, permettant à chaque fois de mesurer un déphasage de plus en plus fin, et détermine ainsi itérativement la distance au mètre près, au centimètre près, etc. La longueur d'onde la plus petite, appelée longueur d'onde principale va définir la précision finale de l'instrument, et c'est celle-ci qui est concernée par l'étalement. L'UF est donc la demi-longueur d'onde de ce signal.

Finalement, la formule théorique de calcul de la distance à partir de la mesure de déphasage est la suivante:

$$D = N \cdot \frac{\lambda}{2} + \frac{\phi}{2\pi} \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (2)$$

où N est le nombre d'unités fondamentales entières sur la distance, et ϕ est le déphasage en radian mesuré sur la longueur d'onde principale.

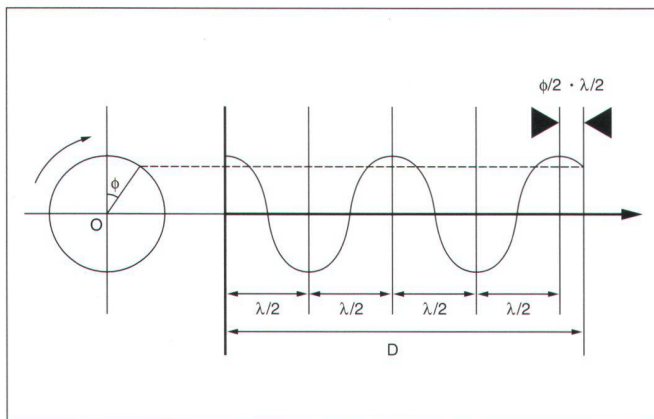


Fig. 1: Représentation graphique de la mesure de la distance D par la méthode de la phase. Le déphasage ϕ est mesuré; l'incertitude sur le nombre entier de demi-longueurs d'onde entières N qui figure dans l'équation est déterminé par l'emploi combiné de plusieurs longueurs d'onde.

Erreurs et corrections

Il faut distinguer les erreurs dues aux conditions atmosphériques des erreurs systématiques dues à l'instrument (les erreurs de manipulation ne sont pas traitées).

Corrections météo

Les conditions atmosphériques (température [°C], pression [mb] et humidité [%]) agissent directement sur la longueur d'onde comme l'a montré l'équation (1), au travers de l'indice de réfraction. Une erreur dans la détermination de la météo agira de manière proportionnelle sur la distance. C'est pourquoi la température, la pression et l'humidité doivent être déterminées à chaque mesure.

Il est important de savoir qu'en pratique, chaque fabricant implante dans l'instrument un indice de réfraction n_{REF} calculé à partir de conditions choisies pour être approximativement les conditions moyennes de mesure sur terrain. La correction finale de la météo est donc faite à partir de ce n_{REF} , avec la formule suivante:

$$d_{\text{corrigée}} [m] = \left(\frac{n_{\text{ref}}}{n_L} \right) d_{\text{brute}} [m]$$

Dans cette formule n_L , déterminé par la formule de Barrel & Sears (1939) [1], est

l'indice de réfraction de groupe, pour des conditions quelconques. Cet indice doit être calculé, sachant que l'onde de l'EDM est modulée à partir d'une porteuse qui n'est rien d'autre qu'une onde lumineuse, souvent infra-rouge, qui comporte plusieurs fréquences, donc plusieurs vitesses de propagation. L'influence des imprécisions sur l'un des facteurs météo, obtenue par propagation des erreurs, est résumée comme suit:

- une erreur de 1°C sur la mesure de la température équivaut à une erreur de 1 ppm sur la distance,
- une erreur de 1 mb sur la mesure de la pression équivaut à une erreur de 0.28 ppm sur la distance,
- une erreur de 1 mb sur la mesure de la pression partielle de vapeur d'eau équivaut à une erreur de 0.04 ppm sur la distance.

Erreurs instrumentales

En reprenant la formule (3), et en imaginant le type d'imprécisions possibles sur chaque paramètre, on obtient ce que l'on pourrait appeler les erreurs instrumentales:



Fig. 2: Vue générale de la base d'étalement du CERN.

- L'imprécision sur la fréquence cause une erreur proportionnelle, qui a le même effet qu'une imprécision sur n . Elle est aussi appelée facteur d'échelle dû à la fréquence. Elle peut être déterminée par l'intermédiaire d'un compteur de fréquence, avec une précision de 0.01 Hz.
- L'imprécision sur l'origine, c'est-à-dire l'écart entre le point de départ de l'onde et l'axe principal de l'instrument, est appelée constante d'addition. Elle s'ajoute sur chaque distance mesurée. Il existe plusieurs méthodes pour la déterminer, la plus connue étant celle de piliers, consistant à comparer des distances mesurées avec des distances connues et d'interpoler les écarts (en général, on fait une moyenne) [2]. Comme elle est déterminée pour un couple EDM – prisme, elle lui reste spécifique.
- L'imprécision sur la mesure de la phase produit une erreur qui va se répéter périodiquement toutes les UF sur la distance. Cette imprécision désigne les erreurs cycliques. Celles-ci sont déterminées par l'analyse de Fourier.

Toutes ces erreurs sont systématiques et il n'est pas possible de les corriger directement puisqu'elles sont dues à l'électronique de l'appareil. Il faut donc les déterminer, et les corriger sur chaque mesure. Pour pouvoir déterminer ces erreurs, le seul moyen est de pouvoir comparer ce qui peut être mesuré avec des valeurs vraies. C'est donc le but de la calibration.

Étalonnage d'EDM au CERN

Les techniques utilisées dans les différents laboratoires responsables de la réalisation des étalonnages ne sont pas toujours les mêmes. Pour pouvoir suivre la procédure théorique, il faut une grande quantité de matériel coûteux (compteur de fréquence, système interférométrique de mesure pour les distances étalon, donc laser...), et parfois beaucoup de place! Par exemple, à Bonn, la détermination de la constante d'addition se fait en extérieur,

sur des piliers alignés sur une distance d'environ 730 mètres.

Le groupe de Géodésie de Positionnement et de Topométrie du CERN dispose d'une base en sous-sol (fig. 2), qui permet d'étalonner les EDM pour les travaux métrologiques à effectuer. La constante d'échelle n'y est pas déterminée comme à Bonn. La base n'offre pas la possibilité de mesurer la fréquence. Par conséquent, les instruments qui y sont étalonnés ne devraient en principe servir que pour des distances inférieures à 56 mètres. Cependant, si des mesures plus longues doivent être effectuées, le CERN dispose aussi d'une base extérieure de 500 mètres de long, constituée de 11 piliers alignés.

Le laboratoire est donc équipé d'un rail d'environ 56 mètres de longueur utile, et d'un chariot, piloté automatiquement par un PC. Toute la procédure d'étalonnage peut d'ailleurs être contrôlée par ordinateur. L'EDM est placé à l'extrémité opposée du rail par rapport à l'interféromètre utilisé pour fournir les valeurs étalons. Lorsque toutes les procédures de préparation ont été exécutées (mise en station, mise à zéro de l'interféromètre...), le pas de la mesure peut être choisi, et la session de mesure lancée. En général, des intervalles de 10 ou 20 cm sont choisis, ce qui représente respectivement environ 250 à 500 points de mesure.

A la fin de cette session, le graphique des écarts en fonction des valeurs étalons est établi. La courbe obtenue est appelée courbe d'étalonnage. Il est donc important de constater que contrairement à Bonn, où chaque paramètre nécessite sa propre détermination [2], au CERN, une seule session de mesure suffit pour le calcul de tous les paramètres d'étalonnage.

Facteur d'échelle et constante d'addition

Ils sont représentés géométriquement par la pente de la courbe et la valeur en ordonnée à l'origine de l'abscisse. Ils sont tous deux déterminés par une régression linéaire.

Erreurs cycliques

Elles sont approchées par un polynôme

de Fourier. La période ne pouvant pas être déterminée précisément (l'UF ne peut être déterminée exactement puisqu'on ne connaît pas la fréquence), le calcul est effectué itérativement: un intervalle est choisi pour la période, ainsi qu'un intervalle pour le degré du polynôme. Toutes les possibilités sont alors calculées, et la solution choisie est celle qui minimise les résidus.

Avantages et Inconvénients

Toutes les données nécessaires sont obtenues en une seule session de mesure, ce qui représente un gain de temps certain, comparé au cas où chaque correction est déterminée différemment. La procédure complètement automatisée ne requiert pas la présence d'un opérateur et peut être effectuée de nuit. Le rendement est ainsi considérablement optimisé.

Enfin, compte tenu des précisions exigées pour les différents travaux à exécuter, un soin tout particulier est apporté à la maintenance de la base, comme le contrôle de l'alignement du rail et de l'interféromètre, la mesure des conditions atmosphériques, le contrôle du laser, etc.

Par contre, ne pas pouvoir déterminer la fréquence de l'instrument est limitatif: le facteur d'échelle déterminé n'a aucune réalité physique et est peu significatif, car établi sur une distance trop courte. Il ne devrait donc pas être appliqué tel quel à des distances dépassant la longueur utile de la base.

La problématique des erreurs cycliques

Jusqu'à présent, peu d'étalonnages ont réellement posé problème. Néanmoins, l'acquisition du TDA5005 de Leica a révélé des failles dans le comportement pourtant prévisible des EDM à l'étalonnage. Renseignements pris dans la littérature et auprès de l'Institut de Géodésie de Bonn lors d'une visite de la base, il semble que de plus en plus, l'étalonnage des nouveaux EDM fournit des courbes d'étalonnages qui ne comportent pratiquement plus de cycles. Serait-il possible que les erreurs cycliques y soient déjà cor-

rigées? Cela aurait deux impacts majeurs:

- la méthode d'approximation par polynôme de Fourier serait inutile et non avenue pour l'étalonnage des EDM destinés aux travaux de haute précision,
- les instruments de terrain, dont l'étalonnage n'aboutit pas forcément à la détermination des erreurs cycliques (généralement comprises dans un intervalle de ± 1 mm), seraient pratiquement capables d'atteindre les performances d'un instrument de haute précision.

Pour cela, l'étalonnage du TDA5005 a été passé en revue, et au travers de cet exemple des méthodes ont été développées pour pouvoir vérifier le comportement à l'étalonnage de n'importe quel instrument EDM.

Analyse de l'étalonnage du TDA5005 de Leica

Le TDA est une station totale motorisée, vendue comme un instrument réservé à

des applications métrologiques. Son EDM est coaxial, ce qui signifie que l'axe de propagation de l'onde est le même que l'axe de visée. La spécification indique une précision pour la mesure des distances d'1 mm + 2 ppm.

Des tests ont été effectués sur un premier instrument acheté par le CERN (il y en a maintenant trois). Ils ont montré une courbe d'étalonnage dont l'amplitude des cycles n'était pas constante. Face à cette «anomalie», la firme a effectué des modifications, et lorsqu'ensuite l'instrument a été testé une nouvelle fois sur la base du CERN, une courbe totalement différente a été observée (fig. 3).

Analyse de la répétabilité des étalonnages

Avant de tirer des conclusions trop hâtives, il faut vérifier que cet étalonnage est correct et reproductible. Sur la base de trois étalonnages, très proches dans le temps pour éviter la variation des paramètres de correction, des tests statistiques ont été effectués pour vérifier la constan-

ce du facteur d'échelle et de la constante. Pour cela deux tests ont été utilisés: le test de Student à deux échantillons, et le test de Student pour la pente d'une régression linéaire [3]. Les conclusions sont les suivantes:

- les constantes d'addition résultant de ces trois étalonnages ne sont pas significativement différentes.
- le mode de détermination du facteur d'échelle au CERN exige qu'on utilise le résultat avec prudence, étant donné la faible longueur du banc d'étalonnage. Par contre, pour une détermination rigoureuse de la fréquence, la méthode est parfaitement applicable.

Il n'est par contre pas nécessaire d'effectuer un contrôle statistique pour s'apercevoir que les coefficients des polynômes de Fourier calculés pour les trois étalonnages ne concordent pas entre eux.

Analyse spectrale

Le seul moyen de déterminer avec une bonne probabilité si oui ou non l'instrument comporte encore des erreurs cy-

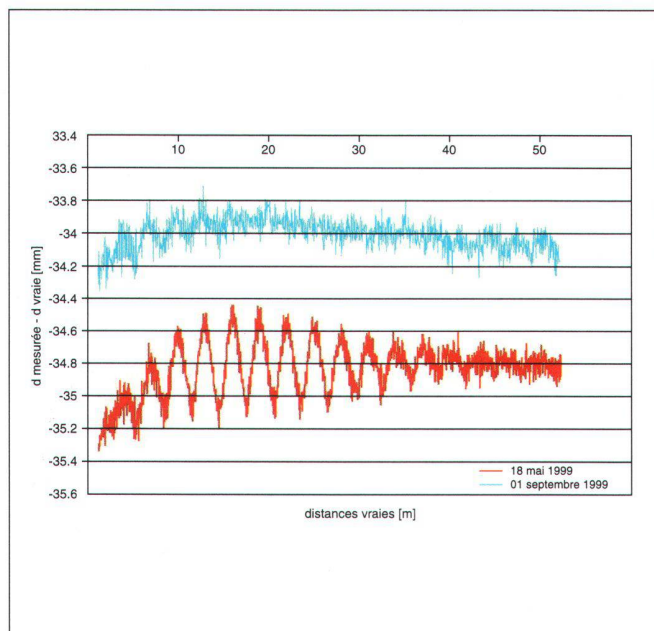


Fig. 3: Courbes d'étalonnage du TDA5005 n°438198 avant et après modification. Un décalage vertical de 1 mm a été introduit entre les deux courbes pour en faciliter la lecture: les cycles ont disparu après la modification en usine.

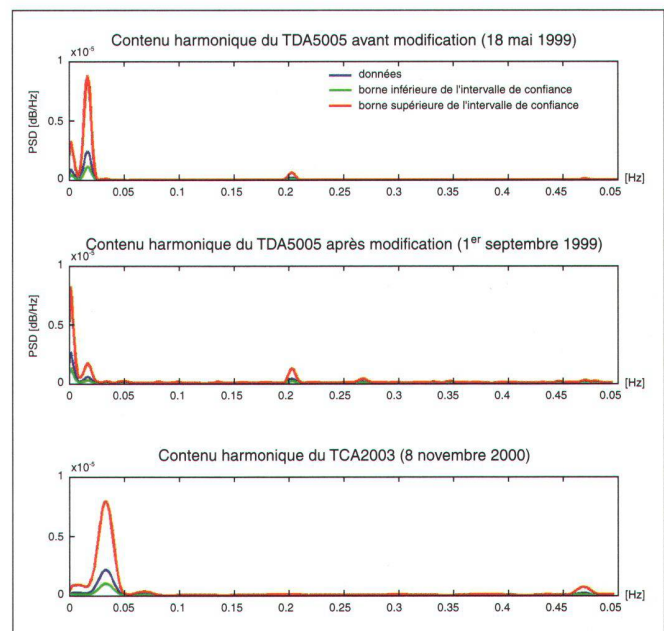


Fig. 4: Périodogrammes des étalonnages du TDA (avant et après modification) et du TCA: la disparition du pic entre les deux premiers périodogrammes apporte la preuve de la disparition d'erreurs cycliques dans le TDA5005. Il existe par contre une périodicité des résidus dans le TCA2003 (troisième périodogramme).

cliques, est de réaliser une analyse du contenu harmonique du signal. Cela revient à calculer la transformée de Fourier des données à disposition. Ces données sont constituées des écarts entre les mesures (corrigées de l'échelle et de la constante) et les valeurs étalons et sont considérées comme étant non périodiques. Par la méthode de FFT (Fast Fourier Transform), le signal est considéré comme étant formé d'une infinité de fonctions sinusoïdales de fréquences différentes. Il en résulte alors la relation entre les différentes amplitudes associées aux fonctions sinusoïdales, et la fréquence. La méthode de Welch a ensuite été utilisée pour établir le graphique de la Densité Spectrale de Puissance (DSP) en fonction de la fréquence, appelé périodogramme [3]. Toutes ces opérations ont été effectuées à l'aide de la Toolbox Signal Processing de Matlab®, et les explications nécessaires à la bonne compréhension du procédé se trouvent donc dans le HelpDesk du logiciel [4]. La figure 4 montre les résultats de ce traitement, appliqué aux données d'avant la modification, ainsi qu'aux données obtenues après la modification du TDA par le constructeur. La troisième courbe représente les résultats obtenus avec les données de l'étalonnage d'un TCA2003 de Leica, qui comporte lui des erreurs cycliques très nettes, de période égale à l'UF (3 m). La disparition du pic correspondant à la fréquence dominante est bien visible entre les deux DSP du TDA5005. Par ailleurs, le pic dominant sur le périodogramme du TCA montre l'emplacement de la fréquence dominante sur le graphique, correspondant à 3 m. Cette méthode a également été appli-

quée aux deux autres TDA5005, et a montré qu'aucun des EDM testés ne comportait réellement d'erreurs cycliques de premier ordre.

Analyse des résidus

Avant de déterminer quel type de traitement il faut alors appliquer aux mesures d'étalonnage, la distribution des résidus à chaque étape a été étudiée. Leur normalité a été déterminée au moyen de 2 méthodes: le test khi-deux de Pearson, complété du diagramme des quantiles [3]. Cette analyse a montré qu'après la régression linéaire, les résidus obtenus sont distribués normalement autour de la valeur zéro, ce qui signifie donc que la régression linéaire suffit à modéliser les données. La précision finale obtenue à ce moment est d'environ 0.08 mm (moyenne effectuée à partir des moyennes quadratiques des résidus après régression linéaire pour tous les étalonnages étudiés du TDA5005). Or l'écart-type des écarts mesures – étalon avant toute interpolation étant de 0.1 mm, le gain obtenu ici n'est que de 0.02 mm. Il ne faut pourtant pas en conclure que même la régression linéaire est inutile dans tous les cas d'utilisation du TDA. En effet, si des distances supérieures à 56 mètre doivent être mesurées, et que la possibilité d'effectuer une vraie détermination de fréquence existe, à ce moment-là le gain de précision sera beaucoup plus conséquent.

Conclusion

Il serait dangereux de conclure à partir des résultats précédents que le TDA5005, ain-

si que tous les instruments se comportant de manière similaire, sont affranchis de la contrainte d'un étalonnage régulier, sous prétexte d'une précision suffisante avant toute interpolation. Ne sachant plus bien de quoi sont constituées l'erreur instrumentale et la correction interne, le géomètre devra au contraire redoubler d'attention au niveau de l'analyse des résultats pour éviter le risque d'effectuer une modélisation inappropriée.

Références:

- [1] Rueger, J.M. (1996) Electronic Distance Measurement An Introduction, 4ème éd., Springer (Berlin, Heidelberg).
- [2] Schauerte, W. & Witte, B. (1/03/2000) Die Prüfung Elektrooptischer Distanzmesser (EDM) am Geodätischen Institut der Universität Bonn.
- [3] Morgenthaler, S. (1997) Introduction à la Statistique, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.
- [4] HelpDesk Matlab®, Signal Processing Toolbox, Mathwork.

Sara Poncet
Géomatique – Topométrie
EPFL – DGR
CH-1015 Lausanne

J.P. Quesnel
Groupe de Métrologie de Positionnement
& Topométrie
Division EST
Site de Prévessin
F-01631 CERN Cedex, France