



Arpent : un prototype de haute exactitude pour les mesures de grande distance

Maylis Teyssendier de la Serve, Jean-Pierre Wallerand, Joffray Guillory, Daniel Truong, Christophe Alexandre, José Cali, Stéphane Durand

► To cite this version:

Maylis Teyssendier de la Serve, Jean-Pierre Wallerand, Joffray Guillory, Daniel Truong, Christophe Alexandre, et al.. Arpent : un prototype de haute exactitude pour les mesures de grande distance. Revue XYZ, Association Française de Topographie, 2018. hal-02460050

HAL Id: hal-02460050

<https://hal-cnam.archives-ouvertes.fr/hal-02460050>

Submitted on 31 Jan 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Arpent : un prototype de haute exactitude pour les mesures de grande distance

Maylis TEYSSENDIER DE LA SERVE^{1,2} - Jean-Pierre WALLERAND¹ - Joffray GUILLORY¹ - Daniel TRUONG¹
Christophe ALEXANDRE³ - José CALI⁴ - Stéphane DURAND⁴

¹Laboratoire Commun de Métrologie LNE-Cnam, LNE, 1 rue Gaston Boissier, 75015 Paris.

²Institut National de l'information Géographique et forestière, 73 avenue de Paris, 94165 Saint-Mandé.

³Centre d'études et de recherche en Informatique et Communications, Cnam, 292 rue Saint-Martin, 75003 Paris.

⁴Laboratoire Géomatique et Foncier, Cnam, ESGT, 1 Boulevard Pythagore, 72000 Le Mans.

Résumé. L'équipe de métrologie dimensionnelle du Laboratoire Commun de Métrologie LNE-Cnam (LCM) travaille sur le développement de distance-mètres absolus, basés sur la mesure du déphasage accumulé par une onde radiofréquence durant sa propagation dans l'air à l'aide d'une porteuse optique.

Cet article présente un télémètre à 1550 nm développé au LCM et détaille sa caractérisation au Laboratoire National de métrologie et d'Essais (LNE) et à l'École Supérieure des Géomètres et Topographes (ESGT).

Mots-clés : Distance-mètre absolu, télémétrie, longue distance, modulation Radiofréquence.



Fig. 1 Arpent

Abstract. The dimensional metrology team of the "Laboratoire Commun de Métrologie" (LCM) is developing optical absolute distance meters based on the measurement of the phase accumulated by a Radio Frequency wave carried by a laser beam during its propagation in the air. This article introduces a 1550 nm telemeter developed at LCM and describes its characterization at the "Laboratoire National de métrologie et d'Essais" (LNE) and at the "École Supérieure des Géomètres et Topographes" (ESGT).

Keywords: Absolute distance meter, telemetry, kilometric distance, Radio Frequency modulation.

Introduction

Les télémètres mesurant de grandes distances absolues sont intéressants pour les travaux topographiques à grande échelle (construction de tunnels, surveillance de failles géologiques, de digues ou de barrages, ...). Actuellement, pour ces applications extérieures, les meilleurs instruments commerciaux ont une exactitude de 1,6 mm à 1 km [Leica Geosystems (2013)]. Dans le passé, le Mekometer ME5000, de l'ancienne entreprise Kern, offrait quant à lui une exactitude de 0,2 mm + 0,2 ppm [Rüeger (1996)]. Même s'il n'est plus commercialisé depuis les années 90, cet instrument est toujours utilisé par plusieurs instituts géodésiques car ses performances restent encore inégalées. Cependant ces exactitudes ne prennent pas en compte les paramètres atmosphériques. L'opérateur doit donc estimer l'indice de réfraction de l'air, typiquement en utilisant les formules d'Edlén [Edlén (1996)], pour corriger les mesures de distance. Or, une erreur de 0,1°C sur la température induit une erreur de 100 µm sur la mesure d'une distance de 1 km. Pour atteindre cette incertitude relative de 10⁻⁷, une approche à deux longueurs d'onde, comme déjà expérimentée dans les années 70, peut être la solution. Par exemple, lors de la construction du grand collisionneur de hadrons (LHC) de l'Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire (CERN), un distance-mètre absolu à deux longueurs d'onde, le Terrameter [Earnshaw (1972); Gervaise (1983); Beutler (1985)], a été utilisé. De même, un distance mètre électronique à deux longueurs d'onde a été utilisé

jusqu'en 2005 par l'organisation de surveillance géologique des Etats-Unis (USGS) pour étudier des déformations comme celles de la faille de San Andreas [USGS]. Ces instruments étaient capables de compenser en partie les fluctuations de l'indice de réfraction de l'air sans mesure de la température et de la pression atmosphérique, grâce à la connaissance de la dépendance de la dispersion de l'indice de l'air avec les paramètres atmosphériques [Earnshaw (1972); Meiners-Hagen (2008)]. Aujourd'hui, ils ne sont plus utilisés à cause d'un maniement difficile et d'une maintenance complexe. Cependant, la recherche en géodésie comme les travaux topométriques classiques pourraient tirer avantage de ce genre d'instruments optiques. Un tel système aurait donc un grand intérêt à être de nouveau développé sur la base de technologies nouvelles. Par exemple en utilisant des composants à fibre optique pour obtenir un système compact et robuste qui ne nécessiterait pas d'alignement optique, de l'électronique numérique pour un traitement du signal rapide et une interface facile d'utilisation.

En pratique, dans un système à deux longueurs d'ondes, la distance est mesurée par chacune des porteuses optiques : on appelle L_1 et L_2 ces deux distances obtenues, pour lesquelles on fixe l'indice de l'air à 1. On montre aisément que la distance corrigée s'écrit $L = L_1 - A \times (L_2 - L_1)$, avec $A = \frac{n_1 - 1}{n_2 - n_1}$, n_1 et n_2 étant les indices de réfraction de l'air respectivement aux deux longueurs d'onde. En écrivant n_1 et n_2 sous une forme factorisée [Bönsch (1998)], on montre que A est indépendant de la température et de la pression atmosphérique. La distance

corrigée peut donc se déduire des valeurs de L_1 et L_2 sans connaissance de la température et de la pression.

Le prix à payer est la multiplication par le facteur A de l'incertitude sur la mesure de la différence des distances. Ce facteur A vaut 21 pour le couple de longueur d'onde 532 nm/1064 nm, c'est-à-dire que pour obtenir une incertitude submillimétrique sur la valeur de la distance corrigée, l'incertitude-type sur chacune des distances devra être meilleure que 50 μ m. La première étape vers la réalisation d'un système à compensation d'indice est donc la mise au point d'un prototype de télémètre à une longueur d'onde, compact et simple d'utilisation, afin d'atteindre l'incertitude la plus faible possible, meilleure que 50 μ m. L'objet de l'article est de présenter le principe de fonctionnement de ce télémètre baptisé Arpent ainsi que ses principales caractéristiques.

Présentation du télémètre Arpent

La distance mesurée par Arpent est déterminée à partir du déphasage accumulé par une onde sinusoïdale radiofréquence (RF) se propageant le long du trajet au moyen d'une porteuse optique. Comme décrit sur la *figure 2*, un synthétiseur de fréquence génère un signal RF afin de moduler l'intensité d'une diode laser. Cette porteuse optique se propage alors jusqu'à un coin de cube où elle se réfléchit, puis elle revient vers le télémètre où elle est détectée par une photodiode (PD).

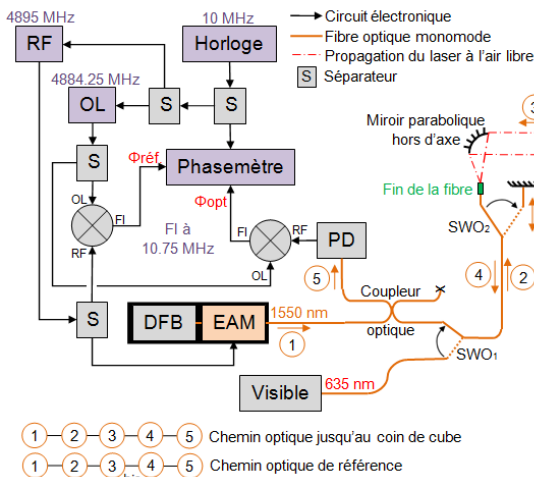


Fig. 2 Schéma fonctionnel du montage du télémètre

Le déphasage $\Delta\Phi$ de la modulation est défini comme la différence entre la phase de l'onde sinusoïdale photo détectée ($\Phi_{optique}$) et celle d'une onde sinusoïdale de référence provenant directement du synthétiseur de fréquence ($\Phi_{ref. électrique}$). La distance mesurée est alors égale à :

$$2 \times L(n) = \left(\frac{\Delta\Phi}{2\pi} + k \right) \times \frac{c}{n \times f_{RF}} \quad \{1\}$$

où $L(n)$ est la distance entre le télémètre et le coin de cube, le facteur 2 venant du fait que le télémètre mesure un aller-retour, c est la vitesse de la lumière dans le vide, n l'indice de réfraction de groupe de l'air, f_{RF} la fréquence

de modulation et k un nombre entier correspondant au nombre de longueurs d'onde synthétiques contenues dans la distance à mesurer. Nous appellerons par la suite cet entier, l'ordre de la distance.

Dans le détail, une diode laser à rétroaction répartie (DFB), contrôlée en température par un élément Peltier, émet à une longueur d'onde de 1550 nm. Ce faisceau laser est alors modulé en intensité à 4895 MHz à l'aide d'un modulateur électro-absorbant (EAM). Après être passé par un coupleur optique 2x2 qui joue le rôle de circulateur, il est émis à l'air libre. Un miroir parabolique hors d'axe d'angle 90° permet de collimater le faisceau sur une longue distance, voir *figure 3*. Ce miroir, de 51 mm de diamètre, est placé à 152,4 mm de la sortie de la fibre (correspondant à la distance focale équivalente du miroir), ce qui permet d'obtenir une taille de spot de 28,6 mm de diamètre en sortie du miroir due à l'ouverture numérique de la fibre de 0,094 (valeur expérimentale à $\frac{1}{e^2}$ du niveau de puissance).

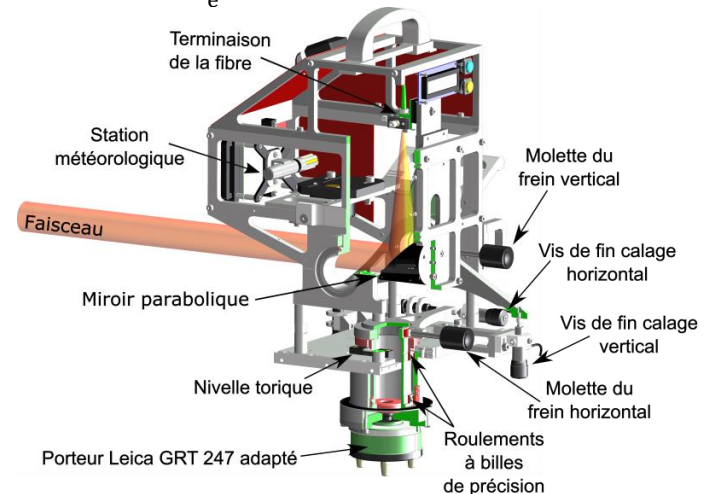


Fig. 3 Coupe du montage mécanique du télémètre

Le miroir est achromatique et peut être utilisé aussi bien avec la longueur d'onde 1550 nm qu'avec une longueur d'onde à 635 nm, une longueur d'onde visible. Ainsi, un commutateur (SWO_1) placé entre le coupleur et la sortie permet de basculer du faisceau infrarouge, permettant la mesure, au faisceau visible, permettant l'alignement. Après s'être réfléchi sur le coin de cube, le faisceau revient vers le télémètre pour se réinjecter dans la fibre optique dont il est issu. Il repasse alors par le coupleur 2x2 et arrive sur une photodiode PIN InGaAs (PD), pour être converti en photocourant. La phase de ce signal électrique doit être comparée à celle du signal issu du synthétiseur de fréquence. Ce déphasage est mesuré par un phasemètre conçu au laboratoire, basé sur un circuit FPGA (Field-Programmable Gate Area). Cependant, celui-ci ne fonctionne bien qu'avec des fréquences comprises entre 10 et 20 MHz, or celle de l'onde RF est de 4895 MHz. Pour y remédier, une descente en fréquence est effectuée au moyen d'un oscillateur local

(OL) dont la fréquence est séparée de l'onde principale de 10.75 MHz. L'exactitude de cette fréquence est assurée par une horloge atomique au rubidium miniature, à 10 MHz, qui synchronise également la fréquence RF. La descente en fréquence s'effectue simplement par un mélangeur de fréquences qui effectue le produit des deux ondes : la fréquence intermédiaire (FI) ainsi produite, à 10.75 MHz, peut enfin être traitée par le phasemètre.

L'évolution de la température dans l'optoélectronique et les composants micro-ondes, ainsi que les tensions mécaniques exercées sur la fibre optique, induisent des dérives importantes sur la phase mesurée, et donc sur la distance. Pour compenser ces variations, nous effectuons régulièrement la mesure d'un chemin optique de référence, dont la longueur est supposée fixe. Ainsi, toutes les variations observées sur ce chemin seront interprétées comme des dérives du système et soustraites à la distance mesurée. Un second commutateur (SWO₂) a donc été placé le plus proche possible de la sortie de la fibre, afin de pouvoir basculer entre la distance au coin de cube et la distance à un miroir interne fibré. Pour optimiser ce chemin de référence, nous avons fait en sorte que la sortie de la fibre, dans la branche 3 en *figure 2*, et le miroir fibré, dans la branche 3_{bis} en *figure 2*, se trouvent à la même distance du commutateur et soient dans des conditions environnementales les plus proches possibles. La distance finale est donc la différence entre la distance mesurée jusqu'au coin de cube et la longueur du chemin optique de référence :

$$L = L_{c.c.} - L_{ch. opt. ref.} \quad \{2\}$$

Principe de la mesure

En pratique, la mesure s'effectue en trois étapes. Dans un premier temps, l'ordre est déterminé. Pour cela, cinq fréquences de modulation différentes sont utilisées : 4778 MHz, 4778,01 MHz, 4778,5 MHz, 4839 MHz et 4978 MHz. Ainsi cinq mesures de distance sont effectuées séquentiellement. Pour chacune d'entre elles, la mesure de déphasage correspond à une infinité de distances selon la valeur de l'ordre k :

$$\forall i \in \llbracket 1:5 \rrbracket, \forall k \in \mathbb{N}_+$$

$$L_i(k) = \left(\frac{\Delta\Phi_i}{2\pi} + k \right) \times \frac{c}{2 \times f_i} \quad \{3\}$$

Afin de limiter cette infinité de solutions nous déclarons que la distance doit être inférieure à 8 km, valeur arbitraire qui peut évoluer par la suite. À chaque distance possible L_i , de l'équation {3}, est associée une valeur d'incertitude σ_i . Ce qui donne au final, pour une fréquence donnée, un ensemble de segments de distances possibles. Leur longueur est de $2\sigma_i$ et ils sont espacés entre eux par la demi-longueur d'onde synthétique $\frac{c}{2f_i}$. L'étude des distances possibles pour deux fréquences f_1 et f_2 , avec $f_2 > f_1$, amène à la conclusion que les zones où se recoupent les segments de la fréquence f_1 et de la

fréquence f_2 correspondent aux segments d'une mesure effectuée à la fréquence $(f_2 - f_1)$. Les cinq fréquences de modulation sont donc couplées, afin d'obtenir de faibles fréquences résultantes qui permettent une estimation grossière de la distance que l'on affine progressivement, jusqu'à obtenir une seule valeur d'ordre possible. Cette valeur sera celle pour laquelle une solution existe pour chacun des couples de fréquences.

Dans un deuxième temps, une mesure fine de la distance est effectuée. Elle est obtenue en moyennant la mesure du déphasage sur un grand nombre d'observations.

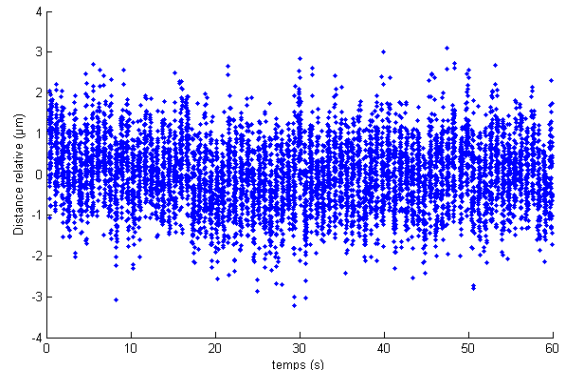


Fig. 4 Résolution du télémètre L. Écart-type des mesures d'une distance courte, sur 1 min, est de 800 nm.

La *figure 4* présente la courbe de la distance fine obtenue lors de la mesure répétée en laboratoire d'une distance de 24,4 cm pendant une minute. Chaque point représente la distance correspondant à l'intégration du déphasage pendant 10 ms. La distance est très faible et l'atmosphère très stable, les conditions sont idéales ce qui explique que l'écart-type sur la minute soit de seulement 0,8 μm . Sur des distances de quelques mètres en atmosphère stable, l'écart-type peut monter jusqu'à 3 μm . En pratique, lors de la mesure d'une telle distance, le télémètre effectue une centaine d'observations qu'il moyenne pour obtenir sur la mesure de distance finale une résolution inférieure à 3 μm .

Une fois l'ordre et la distance fine obtenus, la distance absolue est corrigée de l'indice de réfraction de l'air en utilisant les formules de Bönsch et Potulski [Bönsch (1998)].

Comparaison avec des interféromètres

Afin de nous assurer de l'exactitude de l'instrument développé, nous comparons des valeurs de déplacements mesurées par le télémètre Arpent à celles données par un interféromètre. Pour de courts déplacements, nous serons limités par le phénomène de diaphonie qui engendre une erreur périodique en fonction de la distance. Celui-ci correspond à la superposition d'un signal parasite sur le signal utile que l'on veut étudier, ce signal parasite ayant la même fréquence RF que le signal utile. Il peut venir de réflexions optiques, par exemple au niveau de la terminaison de la fibre, d'une mauvaise isolation d'un

circuit optique ou RF, ou bien encore d'un rayonnement direct du synthétiseur de fréquence sur l'étage de réception électronique. En masquant le faisceau du télémètre, nous observons une diaphonie de -70 dBm et donc un rapport signal à diaphonie d'environ -75 dB qui implique, d'après des simulations conduites sous Matlab®, une erreur périodique d'amplitude crête à crête de $3,1 \mu\text{m}$. Afin de vérifier si l'on observe ces variations sur la mesure de distance, un protocole a été mis au point à l'aide d'un interféromètre de 3 m, au Laboratoire National de métrologie et d'Essais (LNE) de Paris. La demi-longueur d'onde synthétique de l'onde RF est de $30,62$ mm. S'il y a effectivement une erreur périodique, elle aura cette période. Des mesures sur 6 cm ont donc été effectuées : la *figure 5* représente la différence entre les distances mesurées par l'interféromètre et celles mesurées par le télémètre Arpent.

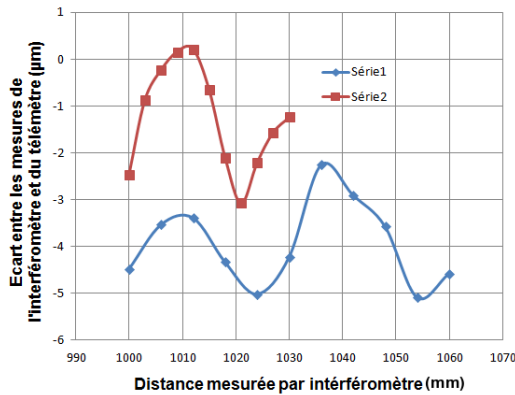


Fig. 5 Comparaison avec l'interféromètre de 3 m

Cette comparaison permet de conclure que l'erreur périodique est négligeable, car inférieure à $3 \mu\text{m}$, comme le prévoient nos simulations.

Pour de plus longs déplacements, la comparaison avec un interféromètre permet de vérifier l'erreur linéaire (proportionnelle à la distance mesurée). Celle-ci pourrait être causée soit par l'utilisation d'une fréquence RF légèrement décalée par rapport à la valeur attendue de 4895 MHz, soit par un problème dans la correction de l'indice de réfraction de l'air. L'amplitude des erreurs observées sur 3 m durant la comparaison ne dépasse pas $6 \mu\text{m}$ crête à crête et aucun facteur d'échelle n'apparaît.

Afin de mieux caractériser l'incertitude du télémètre, nous avons alors utilisé un interféromètre de 50 m, à l'École Supérieure des Géomètres et Topographes (ESGT) au Mans. La *figure 6* décrit la procédure utilisée pour que les deux appareils mesurent le déplacement du même coin de cube, en parcourant un chemin quasi similaire et en observant la même atmosphère. Pour corriger l'erreur sur la mesure d'indice, les différents paramètres météorologiques ont été relevés

régulièrement grâce à huit capteurs de température, un capteur de pression et un capteur d'humidité. Cependant, les capteurs de température sont situés au niveau du banc, à une quinzaine de centimètres du prisme. Il existe certainement une différence entre les températures mesurées et la température de l'air traversé par les faisceaux, mais cette erreur peut être négligée. En effet, lorsque les deux faisceaux parcourent un même chemin, une erreur de 1°C sur la température entraîne sur la différence des distances du télémètre et de l'interféromètre un écart de seulement $0,3 \mu\text{m}$.

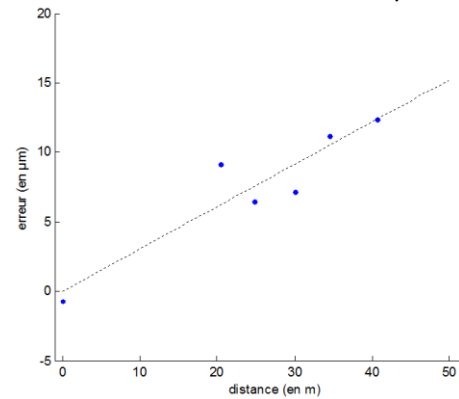


Fig. 7 Exemple d'une des courbes de comparaison avec l'interféromètre de 50 m

Sur la *figure 7*, l'erreur correspond à la différence entre les mesures du télémètre et de l'interféromètre après correction de l'indice de l'air. La pente obtenue, ici de $0,3 \mu\text{m}/\text{m}$, indique que le télémètre mesure une distance plus grande que l'interféromètre. Plusieurs courbes ont été obtenues, toujours avec une pente positive, pouvant descendre jusqu'à $0,2 \mu\text{m}/\text{m}$. La comparaison avec l'interféromètre de 50 m permet donc de conclure que le télémètre a une incertitude-type de $3 \mu\text{m} + 0,2 \text{ ppm}$. À ce jour, nous n'avons pas d'explication concernant le facteur d'échelle. En supposant qu'il provienne du télémètre, d'après l'équation {1}, une telle erreur pourrait provenir soit de la fréquence soit de l'indice de réfraction de l'air. Cependant, les fréquences RF et OL sont synchronisées sur une horloge à rubidium, d'incertitude-type 1 ppb et non $0,2 \text{ ppm}$, et grâce à la configuration utilisée, l'effet de l'indice de l'air est négligeable. Par conséquent, une nouvelle comparaison devra être menée afin de déterminer l'origine de cette pente, en prêtant cette fois attention aux erreurs de bras morts [Stone (1996)] et à la longueur d'onde de l'interféromètre.

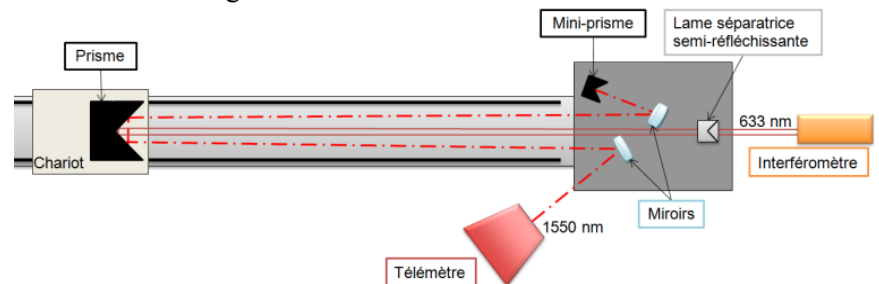


Fig. 6 Configuration de la comparaison avec un interféromètre de 50 m

Résolution sur 5 km

Le télémètre a ensuite été testé sur une distance de 5,4 km entre le bâtiment du LNE Paris et l'observatoire de Meudon. Une station météorologique a été placée à chaque extrémité de cette ligne de base. La température était de 8,2 °C et 10 °C ; la pression de 1003,6 hPa et 992,9 hPa et l'humidité relative de 57 % et 68 %, respectivement, à Paris et Meudon. Le ciel était couvert avec un vent d'environ 14 km/h. La propagation au-dessus de l'environnement urbain, induit de fortes perturbations atmosphériques. Néanmoins, l'écart-type observé sur 15 s variait entre 10 µm et 40 µm pour un temps d'intégration de 10 ms.

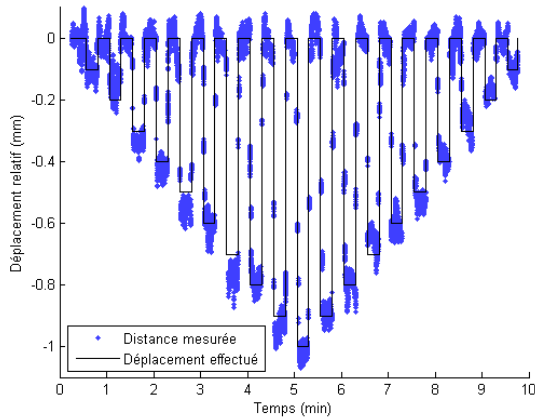


Fig. 8 Mesure des sauts de 100 µm du coin de cube situé à 5,4 km.

Le coin de cube situé à 5,4 km a été déplacé par sauts de 100 µm à l'aide d'une platine de déplacement à vis micrométrique, de 0 à -1 mm puis de -1 à 0 mm. Entre chaque saut, le coin de cube était replacé à sa position initiale afin d'estimer et de corriger la dérive de la distance sur les dix minutes de mesures. La figure 8 démontre les performances du télémètre. Finalement, il a la résolution suffisante, malgré les perturbations atmosphériques, pour discerner clairement des variations de distance de 100 µm.

Comparaison avec des appareils commerciaux

Enfin, une campagne de mesures a été menée à l'ESGT au Mans afin de comparer sur environ 4 km les mesures faites par trois appareils différents : Arpent, un tachéomètre Leica TM30 [Leica Geosystems (2013)] et un tachéomètre Trimble TS8 [Trimble (2015)]. Deux récepteurs GPS (Global Positioning System) Leica SR520 ont également été utilisés pour comparer la distance GPS à nos mesures. Les instruments ont été posés sur des piliers géodésiques qui assurent leur stabilité, tandis que le coin de cube a été placé sur un trépied, dans un champ, à 4 km. Le tachéomètre TS8

a été utilisé en mode automatique et en mode suivi ('Tracking') pour effectuer des mesures régulières. Le TM30 n'a malheureusement pas réussi à effectuer des mesures en mode automatique, certainement à cause de conditions météorologiques difficiles (fort flamboiemment), seules deux observations ont été enregistrées en mode standard. Arpent a, quant à lui, effectué six mesures en continu sur 11 min. Dans ces conditions, leur incertitude-type théorique est de 5 mm + 2 ppm pour le TS8, 1 mm + 1 ppm pour le TM30, et 3 µm + 0,2 ppm pour Arpent. Enfin, les mesures ont été corrigées de l'indice de réfraction de l'air.

Les résultats, présentés figure 9, peuvent être découpés en plusieurs étapes. De 13h30 à 15h00, le coin de cube était positionné à 4 km et a été visé avec le télémètre et les deux tachéomètres. À 15h00, une platine de déplacement a été utilisée pour éloigner ou rapprocher le coin de cube par sauts de l'ordre du dixième de millimètre. À 15h30, un coin de cube plus petit, de diamètre 63 mm, a pris la place du coin de cube de diamètre 127 mm, toujours à 4 km, afin de savoir si le télémètre Arpent permettait l'utilisation de coins de cube plus petits. De 16h00 à 17h30, deux antenne GPS Leica ont été simultanément positionnées, l'une à l'emplacement du coin de cube et l'autre sur le pilier où était Arpent. Afin d'obtenir la résolution souhaitée, les antennes ont été laissées en place pendant plus d'une heure. Enfin, de 17h30 à 18h, un levé topométrique du chantier a été effectué afin de pouvoir propager les coordonnées obtenues par GPS. Nous pouvons observer, sur la figure 9, que l'écart-type annoncé par Trimble pour les mesures du TS8, de 5 mm, est respecté. Pour une meilleure visualisation, une moyenne mobile (sur une minute) a été tracée. Il y a peu de données lors du passage au petit coin de cube, l'alignement était plus difficile et le signal reçu était beaucoup plus faible, ce qui confirme notre choix de travailler avec des coins de cube de diamètre 12,7 cm. Nous pouvons également observer que les mesures sont toutes cohérentes entre elles et que le

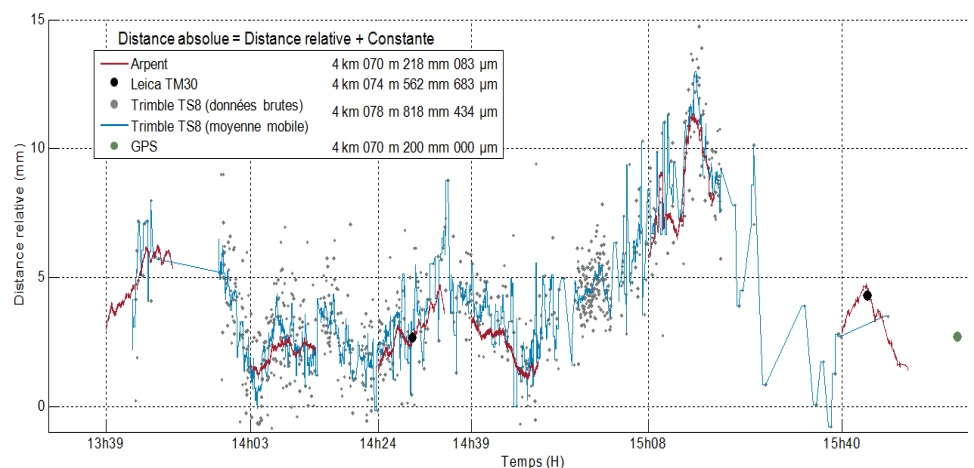


Fig. 9 Comparaison avec des appareils commerciaux, pour une meilleure visualisation, les courbes ont été recalées entre elles.

TS8 observe le décalage de la platine de déplacement mais n'a pas la résolution suffisante pour le quantifier.

Les conditions atmosphériques de ce chantier étaient extrêmement perturbées. Il y avait un flamboisement important à cause de températures avoisinant les 35 °C. De plus, la station météorologique qui devait observer les paramètres au niveau du coin de cube n'a pas fonctionné. L'indice de l'air n'était donc connu qu'au niveau de la tête du télémètre, ce qui peut impliquer une erreur importante (de l'ordre de 4 mm/°C). Malgré tout, le télémètre a été capable d'effectuer une mesure de distance en continu (sans suivi comme les autres tachéomètres). Le nombre de points obtenus en 2 h est bien plus important qu'avec les autres instruments. En effet, Arpent a effectué environ 9000 mesures à chaque observation de 11 min tandis que le TS8 n'en a effectuées que 834 sur 1h40 au lieu des 6000 prévues (une par seconde).

Les distances du chantier ont également été calculées grâce aux coordonnées obtenues par GPS, propagées par topométrie. Le tableau, *figure 10*, répertorie la différence entre les mesures observées sur le terrain et celles calculées grâce au GPS.

| | Télémètre | TS8 | TM30 |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|
| Observation (m) | 4070,2207 | 4078,8210 | 4074,5652 |
| Calcul (m) | 4070,2027 | 4078,7383 | 4074,5462 |
| Différence (mm) | 18,0 | 82,8 | 19,0 |

Fig. 10 Comparaison avec le GPS

Conclusion

L'utilisation de composants optoélectroniques et d'optique fibrée, venant de l'industrie des télécommunications, nous a permis de réaliser un prototype de télémètre compact, de portée multi-kilométriques, avec des performances supérieures aux modèles commerciaux existants, en terme d'exactitude et de nombre de données d'observation par unité de temps. D'après la comparaison à l'interféromètre de 3 m du LNE, l'erreur due au phénomène de diaphonie s'avère négligeable et l'incertitude-type sur 3 m du télémètre est de 3 µm. La comparaison avec l'interféromètre de 50 m de l'ESGT, au Mans, permet de conclure qu'Arpent a une incertitude-type meilleure que 3 µm + 0,2 ppm sur 50 m, en sachant que rien ne prouve pour l'instant que l'erreur linéaire provient du télémètre et non de la méthode de comparaison avec l'interféromètre. Les expériences en extérieur, avec deux tachéomètres commerciaux et des récepteurs GPS, ont permis de conclure que les appareils sont cohérents entre eux et que le télémètre Arpent a une résolution de l'ordre de 200 µm sur 4 km dans des conditions atmosphériques très perturbées. Par temps couvert, la résolution d'Arpent a été mesurée à 50 µm sur 5,4 km. Enfin, l'écart obtenu, de 18 mm, entre la mesure faite par GPS et celle du télémètre, est inférieur à la demi-longueur d'onde du télémètre, confirmant ainsi la

méthode de détermination de la valeur de l'ordre. Ces résultats sont la première étape vers la réalisation d'un système à deux longueurs d'onde qui devrait permettre la compensation de l'indice de l'air, et ainsi la mesure de distances absolues avec une incertitude millimétrique sur 5 km. Un montage est en cours de réalisation à 1064/532 nm.

Bibliographie

- G. Bönsch and E. Potulski.** *Measurement of the refractive index of air and comparison with modified Edlén's formulae.* IOP Metrologia, Vol. 35, No. 2, pp. 33–139, 1998.
- K. B. Earnshaw and E.N. Hernandez.** *Two-Laser Optical Distance-Measuring Instrument that Corrects for the Atmospheric Index of Refraction.* OSA Applied Optics, Vol. 11, No. 4, pp. 749-754, 1972.
- G. Beutler, J. Gervaise, W. Gurtner, M. Mayoud.** Test of global positioning system (NAVSTAR satellites) on the CERN-LEP control network, pp. 7-9, 1985.
- B. Edlén.** The Refractive Index of Air. *IOP Metrologia*, Vol. 2, No. 2, pp. 71-80, 1996.
- J. Gervaise.** *First results of the geodetic measurements carried out with the Terrameter, two-wavelength electronic distance measurement instrument.* Proc. Of Geodätischen Seminar über Electrooptics, 1983.
- J. Guillory, R. Šmíd, J. García-Márquez, D. Truong, C. Alexandre, J-P. Wallerand.** *High resolution kilometeric range optical telemetry in air by Radio Frequency phase measurement.* AIP Review of Scientific Instruments, Vol. 87, 075105, 2016.
- J. Guillory, J-P. Wallerand, D. Truong, R. Šmíd, C. Alexandre.** *Towards Kilometeric Distance Measurements with Air Refractive Index Compensation.* JISDM, Vienne, 2016.
- Leica Geosystems.** *Leica TS330/TM30 User Manual*, 2013. <http://surveyequipment.com/assets/index/download/id/220/>.
- K. Meiners-Hagen and A. Aboud-Zeid.** *Refractive index determination in length measurement by two-color interferometry.* IOP Measurement Science and Technology, Vol. 19, No. 8, 084004, 2008.
- J. M. Rieger.** *Electronic Distance Measurement: An Introduction.* Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1996.
- Trimble.** *TRIMBLE S8 TOTAL STATION datasheet*, 2015. http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-390412/022543-410H_TrimbleS8_DS_0115_LR_sec.pdf.
- J. Stone, S. D. Phillips and G. A. Mandolfo.** *Corrections for Wavelength Variations in Precision Interferometric Displacement Measurements.* Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, Vol. 101, No. 5, pp. 671-674, 1996.
- USGS Earthquake Hazards Program.** *Two-Color Electronic Distance Meter (EDM)*, <https://earthquake.usgs.gov/monitoring/deformation/edm/>.
- ## Remerciements
- Le premier design du FPGA constituant le phasemètre de l'instrument a été réalisé dans le cadre du projet 07-BLAN-0309-01 de l'Agence Nationale de la Recherche (ANR). Les auteurs remercient très chaleureusement Michel Lintz du laboratoire ARTEMIS de l'Observatoire de la côte d'Azur pour ses précieux conseils en tout début de projet.