

## Télémétrie optique à deux longueurs d'onde

Joffray Guillory, Daniel Truong, Christophe Alexandre, Sheherazade Azouigui, Jean-Pierre Wallerand  
*Laboratoire Commun de Métrologie LNE-CNAM, le Cnam, Paris*  
*Centre d'études et de recherche en informatique et communications (CEDRIC), le Cnam, Paris*

Nous développons un télémètre optique capable de mesurer des distances de plusieurs kilomètres avec une exactitude sub-millimétrique. Actuellement un premier système a été mis au point : nous avons mesuré son exactitude sur un banc interférométrique de 50 m et sa résolution en extérieur jusqu'à 1,3 km. Pour comparaison, les systèmes commerciaux actuels ont, pour les plus aboutis d'entre eux, une incertitude de l'ordre de 2 mm sur 1 km (par exemple le Leica TS30). Mais cette valeur d'incertitude ne tient pas compte de la correction d'indice de l'air en fonction des paramètres atmosphériques. Autrement dit, l'incertitude réelle des mesures de ces appareils est bien plus grande.

La plus importante source d'incertitude dans la détermination de l'indice de réfraction de l'air provient de la mesure de la température. En effet, celle-ci peut varier très rapidement avec le vent et l'ensoleillement, et de manière très locale. Il est alors très difficile de connaître la température vue par le faisceau de mesure avec une bonne exactitude. Or une erreur de 1°C sur la température moyenne de l'air sur un chemin de 1 km induit une erreur de 1 mm sur la mesure de distance. L'utilisation d'un système à deux longueurs d'onde optique rend possible la compensation des fluctuations de l'indice de réfraction de l'air avec la température [1]. En effet, la distance ne dépend alors que des distances mesurées à  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  pour un indice égal à l'unité (respectivement  $D_{\lambda_1}$  et  $D_{\lambda_2}$ ), des valeurs des longueurs d'onde, et de la pression de vapeur d'eau  $p_w$ . Le cas de l'air sec permet de mieux appréhender le problème (avec  $t$  la température,  $p$  la pression et  $x$  le taux de  $\text{CO}_2$ ) :

$$\text{distance} = D_{\lambda_1} - \frac{n(\lambda_1, t, p, x, p_w) - 1}{n(\lambda_2, t, p, x, p_w) - n(\lambda_1, t, p, x, p_w)} \times (D_{\lambda_2} - D_{\lambda_1}) = D_{\lambda_1} - A(\lambda_1, \lambda_2) \times (D_{\lambda_2} - D_{\lambda_1})$$

Pour les longueurs d'onde de notre télémètre, égales à 785 et 1550 nm, le facteur  $A$  vaut 48. Par conséquent, pour obtenir une exactitude sub-millimétrique, la mesure doit être faite simultanément à chaque longueur d'onde avec une incertitude meilleure que 20  $\mu\text{m}$ . Ce sera de même en air humide.

Dans notre système, chaque longueur d'onde est modulée en intensité par une porteuse radio fréquence à 4,2 GHz. La mesure de la phase accumulée par cette porteuse lors de sa propagation dans l'air jusqu'à une cible réfléchissante (coin de cube) nous donne alors la distance. Cette approche permet d'obtenir en atmosphère stable une résolution 7  $\mu\text{m}$  à 785 nm et de 2  $\mu\text{m}$  à 1550 nm (à  $1\sigma$ ).

Notre système a tout d'abord été comparé à un banc interférométrique de 50 m, en intérieur, dans un environnement contrôlé où l'ensemble des paramètres atmosphériques était mesuré le plus précisément possible. Les résultats sont présentés Fig. 1.

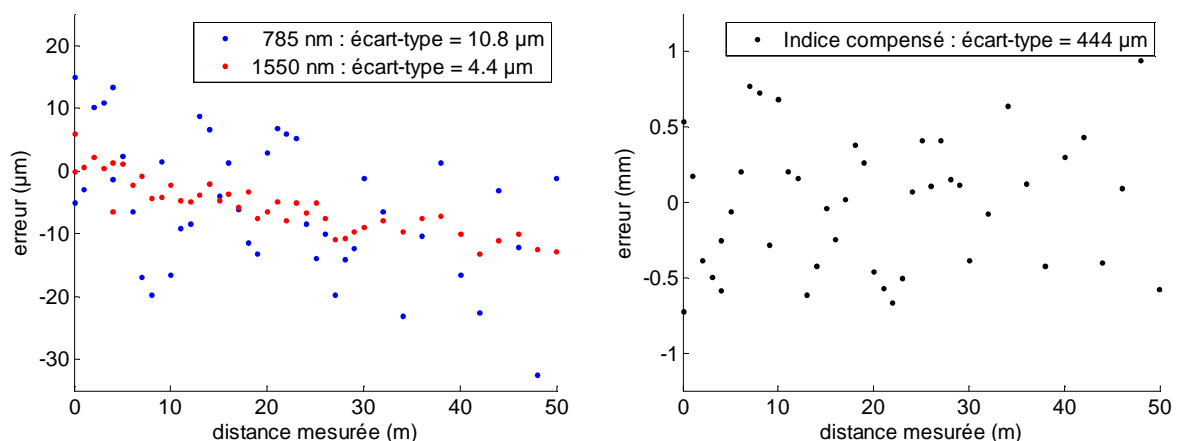


Figure 1. Résultats sur 50 m à 785 et 1550 nm (gauche) et à deux longueurs d'onde (droite).

La Fig. 1, à gauche, présente les écarts obtenus entre l'interféromètre (valeur vraie) et notre système après calcul de l'indice. Nous obtenons une exactitude de 11  $\mu\text{m}$  à 785 nm et de 4  $\mu\text{m}$  à 1550 nm (à  $1\sigma$ ). Les performances sont moindres à 785 nm à cause de l'amplificateur optique employé (un SOA). Nous observons aussi sur cette figure une légère dérive de 0,3  $\mu\text{m}/\text{m}$  dont nous n'avons pas identifié la cause. La Fig. 1, à droite, montre l'erreur lorsque la distance est mesurée avec le système à deux longueurs d'onde. La compensation d'indice est conforme à nos attentes puisque l'erreur observée est cinquante fois plus importante que le plus grand des écarts-types mesurés, en l'occurrence 10,8  $\mu\text{m}$  à 785 nm.

Nous avons ensuite testé le télémètre en extérieur, sur 1,3 km. Il s'agit d'un cas d'usage typique du télémètre où la compensation d'indice prend tout son sens. C'était une journée de beau temps, mais avec de nombreux passages nuageux et un vent modéré. La température était d'environ 17°C et le taux d'humidité autour de 40%. Le signal détecté après un aller-retour sur 1,3 km était soumis à de fortes variations d'intensité dues aux déviations du faisceau dans l'air et au phénomène de scintillation. Nous avons alors sélectionné uniquement les points dont l'amplitude était comprise entre -10 et +8 dBm, soit environ 3% des 37425 points que nous avons capturés en 145 s. Les résultats sont présentés Fig. 2.

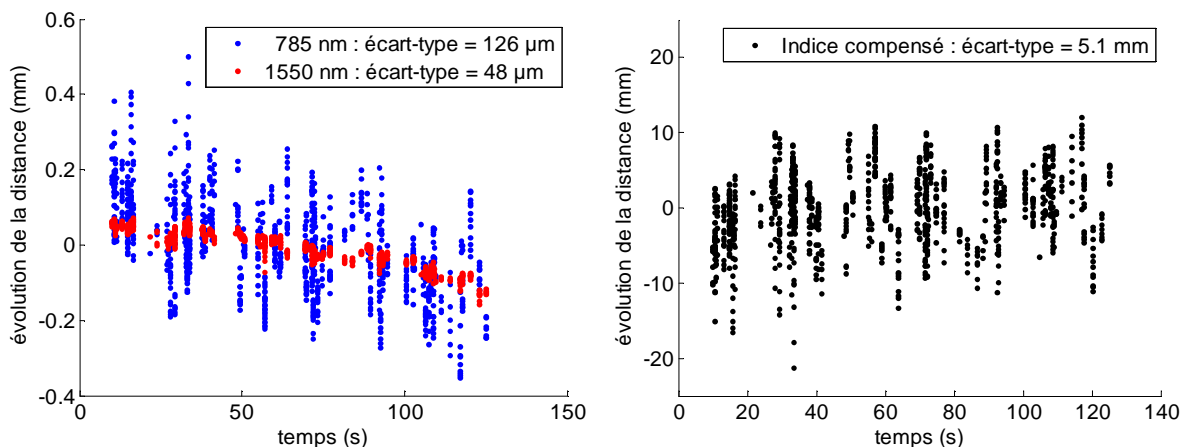


Figure 2. Résultats sur 1,3 km à 785 et 1550 nm (gauche) et à deux longueurs d'onde (droite).

Nous observons Fig. 2 une évolution de la distance de 160  $\mu\text{m}$  en deux minutes. Cette dernière, visible sur les deux longueurs d'onde, peut s'expliquer par un changement des paramètres atmosphériques, par exemple une évolution de la température moyenne de 0,12°C. Sans cette dérive (soustraction par un polynôme d'ordre 1), l'écart-type est de 105  $\mu\text{m}$  à 785 nm et de 17  $\mu\text{m}$  à 1550 nm. A deux longueurs d'onde, l'écart-type est, comme attendu, 50 fois plus grand : 50x100  $\mu\text{m}$  = 5 mm.

Le télémètre mesure à 785 nm une distance moyenne de 1 km 299 m 693 mm et 997  $\mu\text{m}$ , et à 1550 nm une distance plus petite de 7,625 mm ( $n = 1$ ). Après application de la compensation d'indice, sans connaître la température et la pression et pour  $p_w = 880.71$  Pa (station météo), nous obtenons une distance finale de 1 km 299 m 321 mm 636  $\mu\text{m}$ .

Au final, les résultats obtenus avec compensation d'indice sont très encourageants avec une exactitude meilleure que 500  $\mu\text{m}$  sur de courtes distances et une résolution de quelques millimètres sur 1 km. Mais les performances peuvent être largement améliorées en optimisant le système à 785 nm qui est actuellement 4 à 5 fois moins performant que celui à 1550 nm. A moyen terme, nous prévoyons de changer le couple de longueurs d'onde afin d'obtenir un facteur A plus petit (21 pour 532 et 1064 nm) et donc une exactitude sub-millimétrique sur plusieurs kilomètres.

#### Références :

- [1] K. Meiners-Hagen et A. Abou-Zeid. IOP Meas. Sci. Technol., Vol. 19, No. 8, 084004, 2008.
- [2] J. Guillory et al., « Télémétrie optique jusqu'à 1km par mesure de phase RF ». 19<sup>ème</sup> Journées Nationales Micro-ondes (JNM), Juin 2015, Bordeaux.