

Télémétrie laser dans l'air

Développement d'un télémètre à 2 longueurs d'onde

Jean-Pierre Wallerand

Laboratoire Commun de Métrologie LNE-CNAM

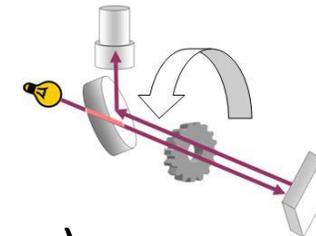
Paris, France

Plan de la présentation

1. Mesure optique de grande distance et limitations/exemple pratique
2. Compensation de l'indice par mesure de la dispersion de l'indice de l'air
3. Solution technique mise en place au LCM pour un instrument de terrain
4. Traçabilité des mesures au SI et projet européen GeoMetre
5. Conclusion

Mesurer un temps de propagation de la lumière

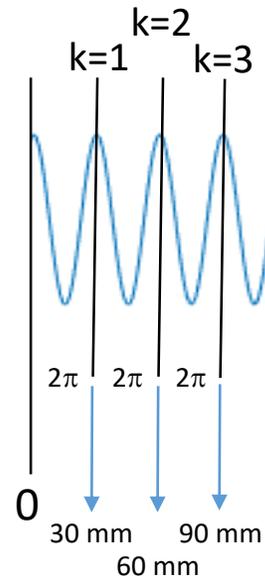
- Temps mis par une impulsion lumineuse
 - Satellite laser Ranging
 - Terre-Lune
 - Résolution 100 μm au mieux, sur 10s (Graz, 1 kHz)
 - Projet 100 kHz en cours GeoAzur, OCA
- Déphasage d'une modulation appliquée à une onde lumineuse
 - Principe de l'expérience de Fizeau (1850)
 - Principe des télémètres/tachéomètre actuels
 - Résolution 1 μm sur 10 ms (version CNAM)
- Déphasage de l'onde optique (à travers un interféromètre)
 - Principe des expériences de Michelson (1870)
 - Interféromètres commerciaux résolution nm
 - Difficultés techniques importantes dans l'air sur de grandes distances



Mesure d'une distance optique par mesure de phase

Mesure la phase optique: mesure d'une fraction de longueur d'onde optique (500 nm)

Mesure de la phase de la modulation: mesure d'une fraction de longueur d'onde synthétique (30 mm)



f_m : modulation frequency

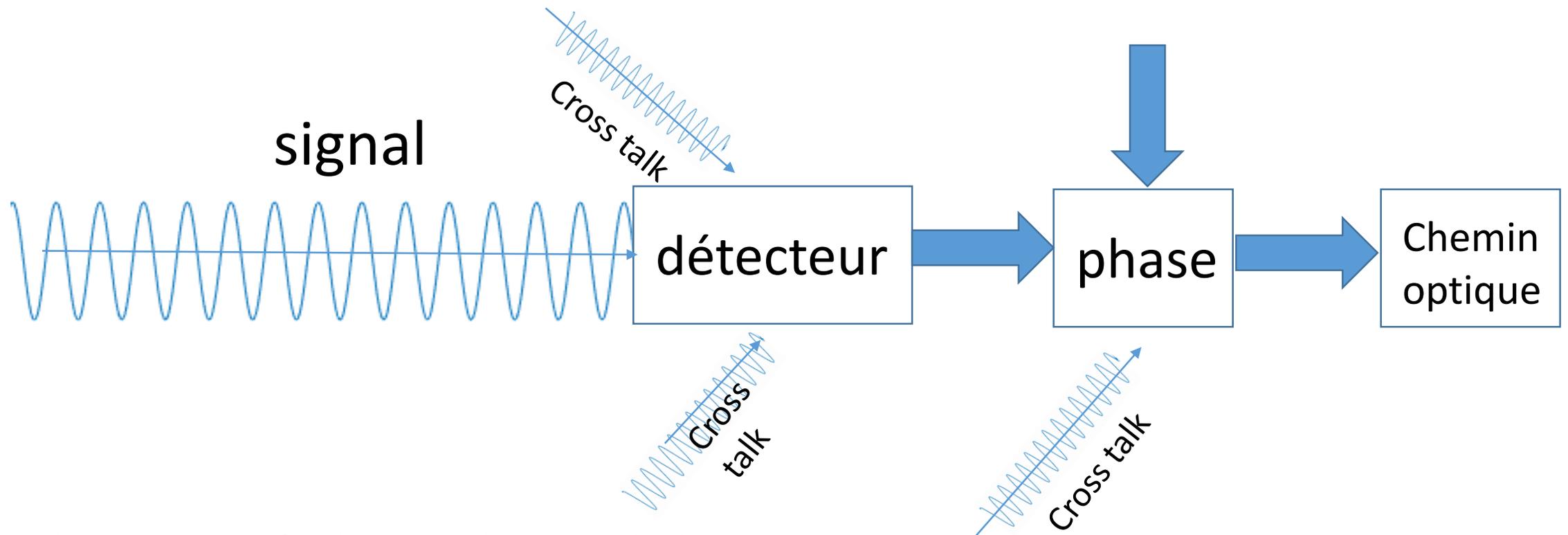
$c/f_m = \Lambda_s$: synthetic wavelength

For $f_m=10$ GHz, $\Lambda_s=30$ mm

$$L = \left(\frac{\phi}{2\pi} + k \right) \times \frac{c}{f_m}$$

Limitation technique principale de l'exactitude de la mesure de phase

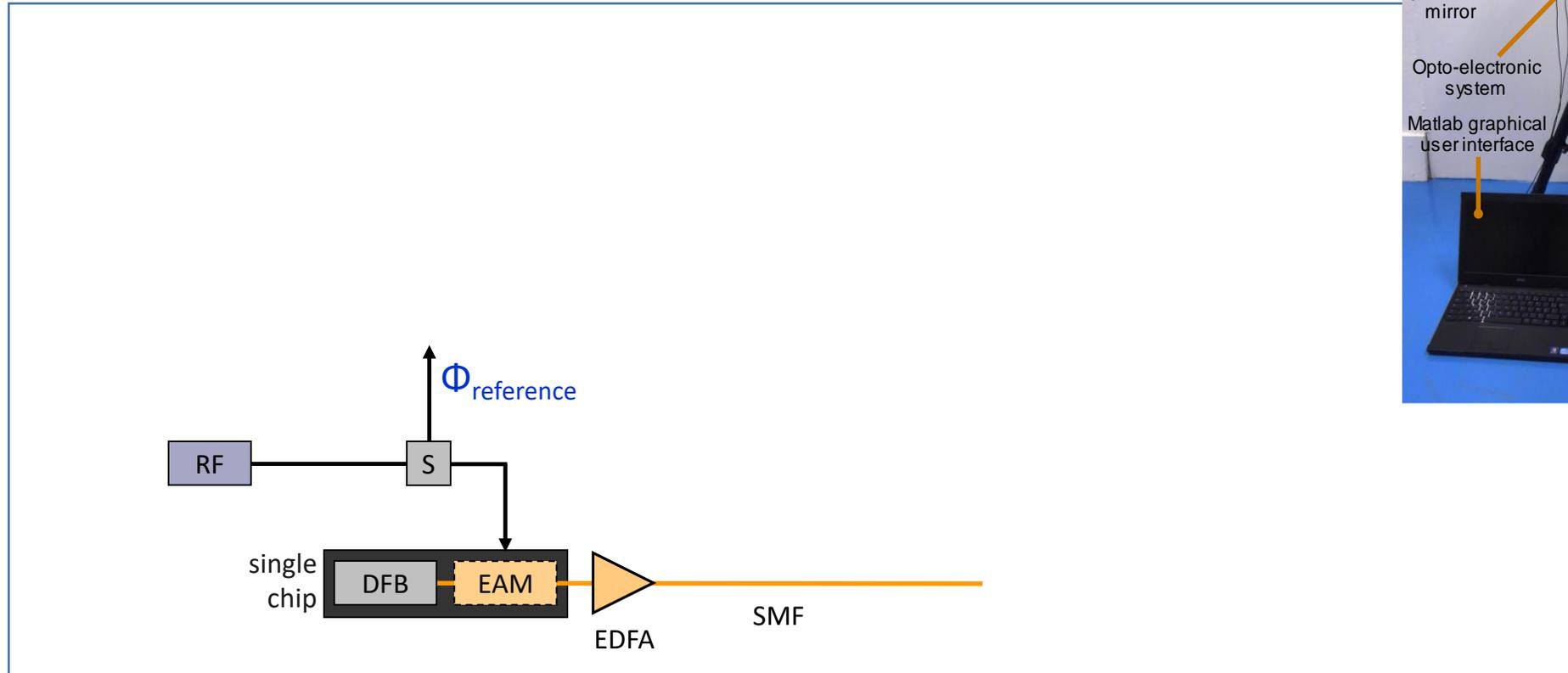
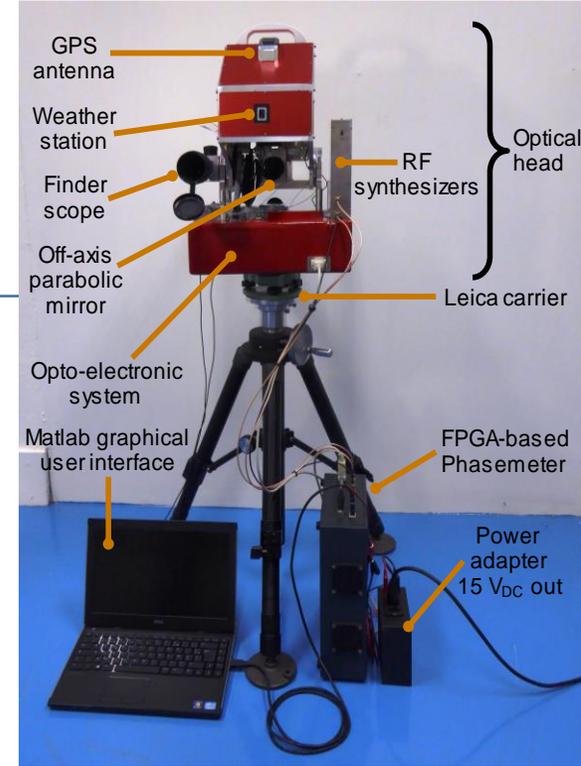
- Cross talk (diaphonie). Limite également l'exactitude des interféromètres.



Induit une erreur périodique dans la mesure du chemin optique

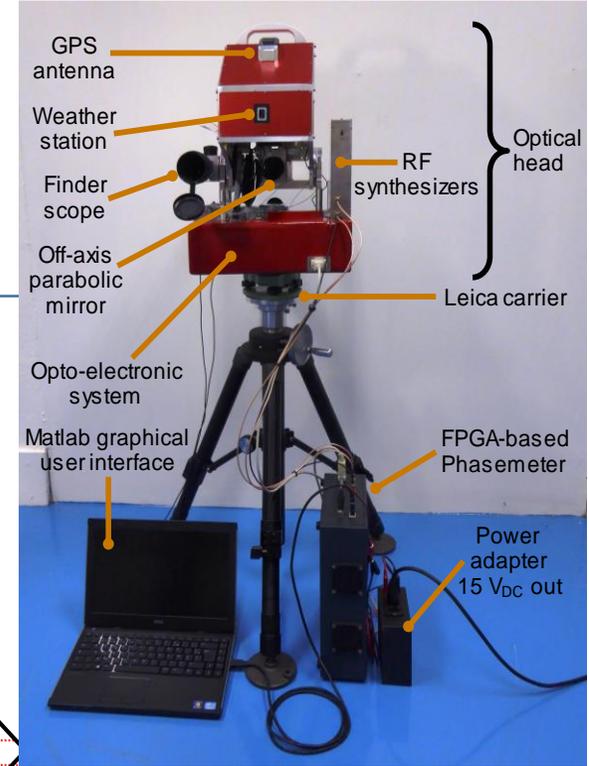
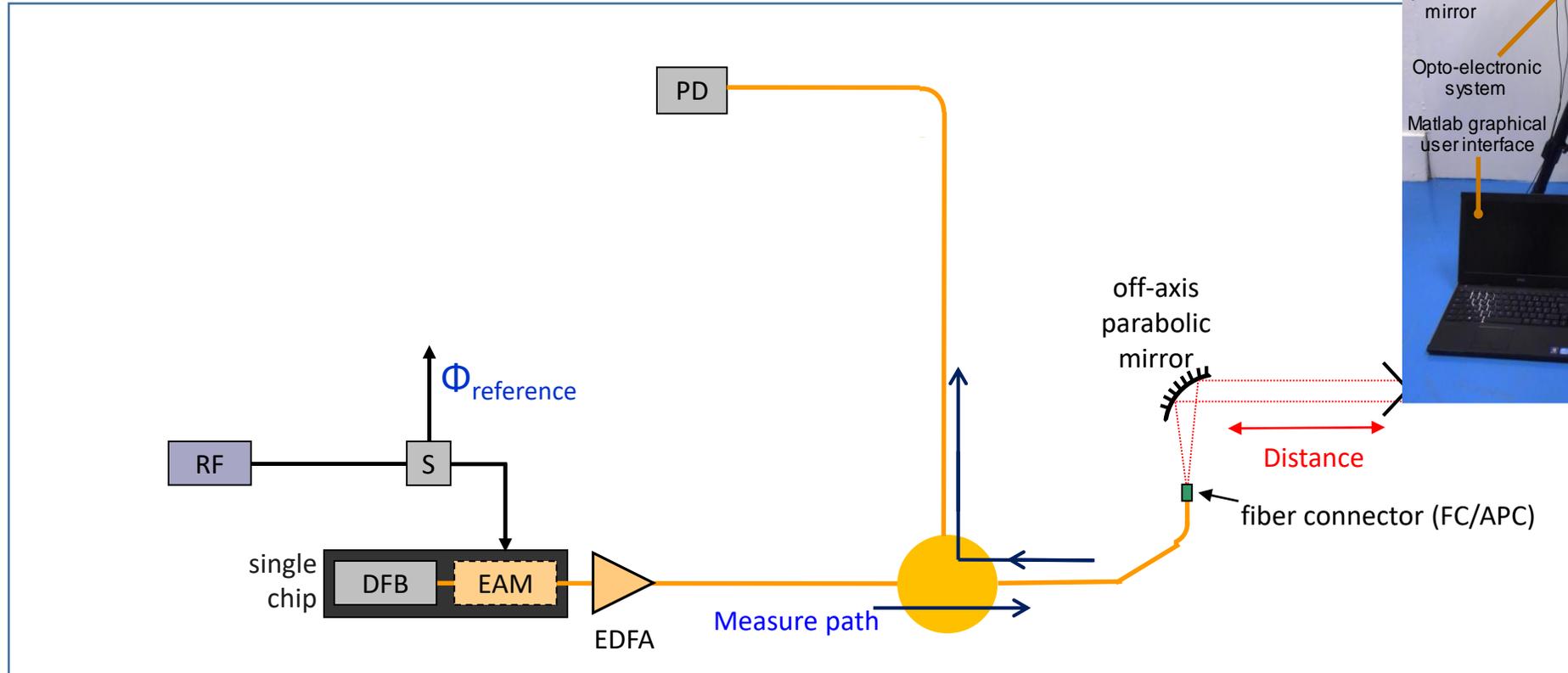
Exemple d'un télémètre optique

- S = RF splitter
- DFB = distributed feedback laser diode
- EDFA = erbium doped fiber amplifier
- SMF = single mode fiber
- EAM = electro-absorption modulator



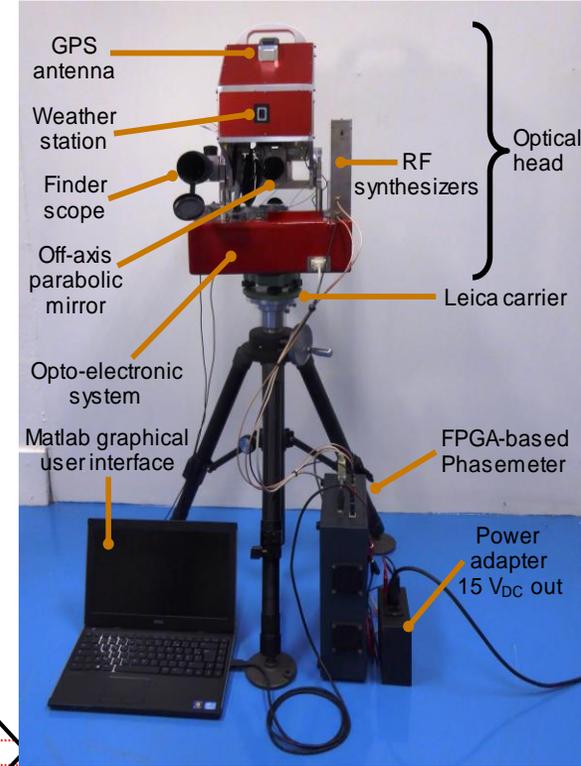
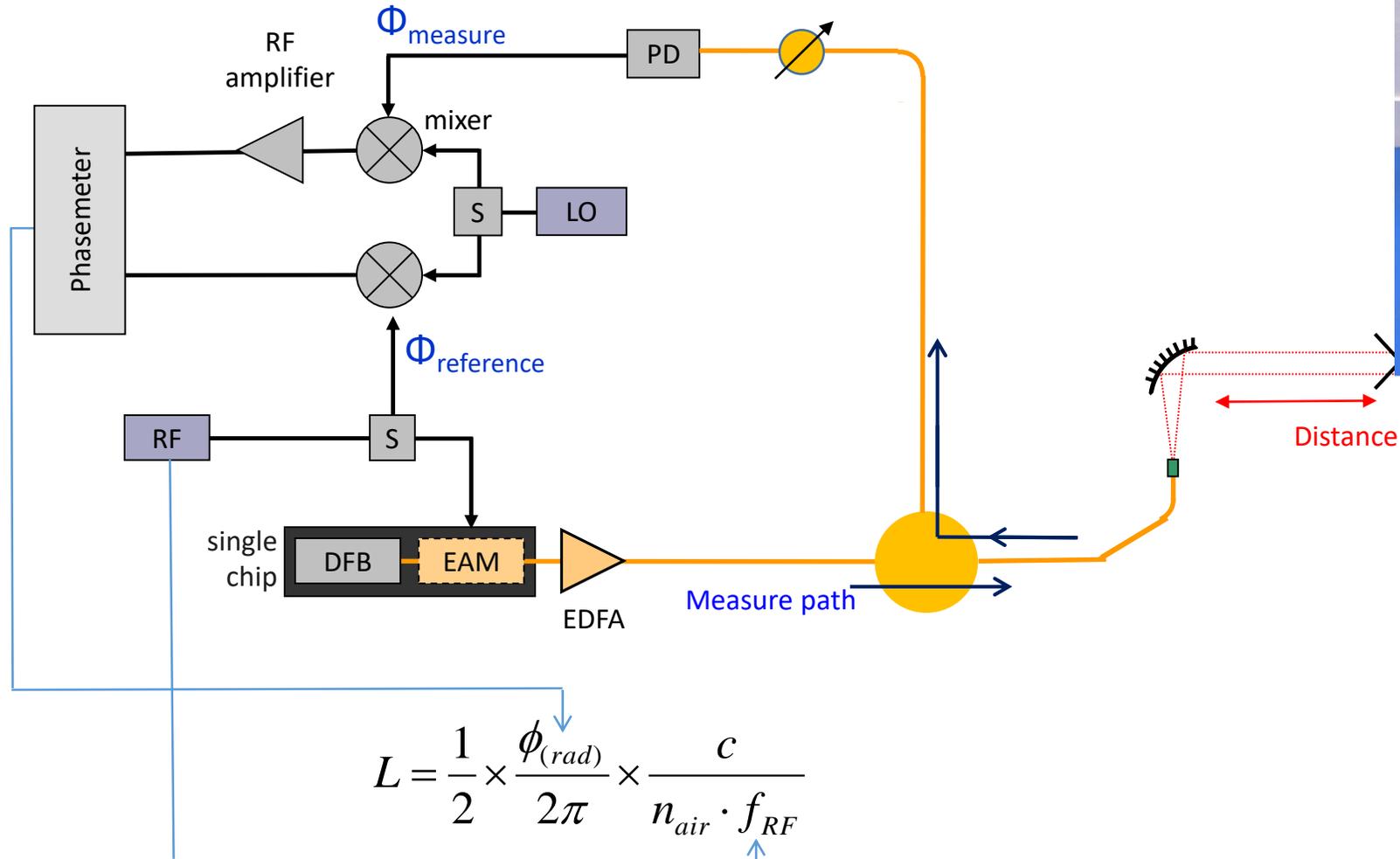
Exemple d'un télémètre optique

- S = RF splitter
- DFB = distributed feedback laser diode
- EDFA = erbium doped fiber amplifier
- SMF = single mode fiber
- EAM = electro-absorption modulator

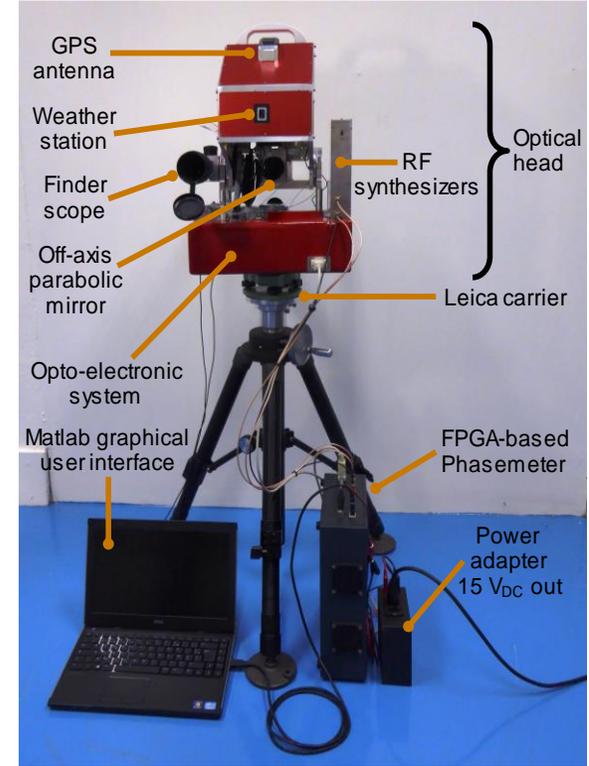
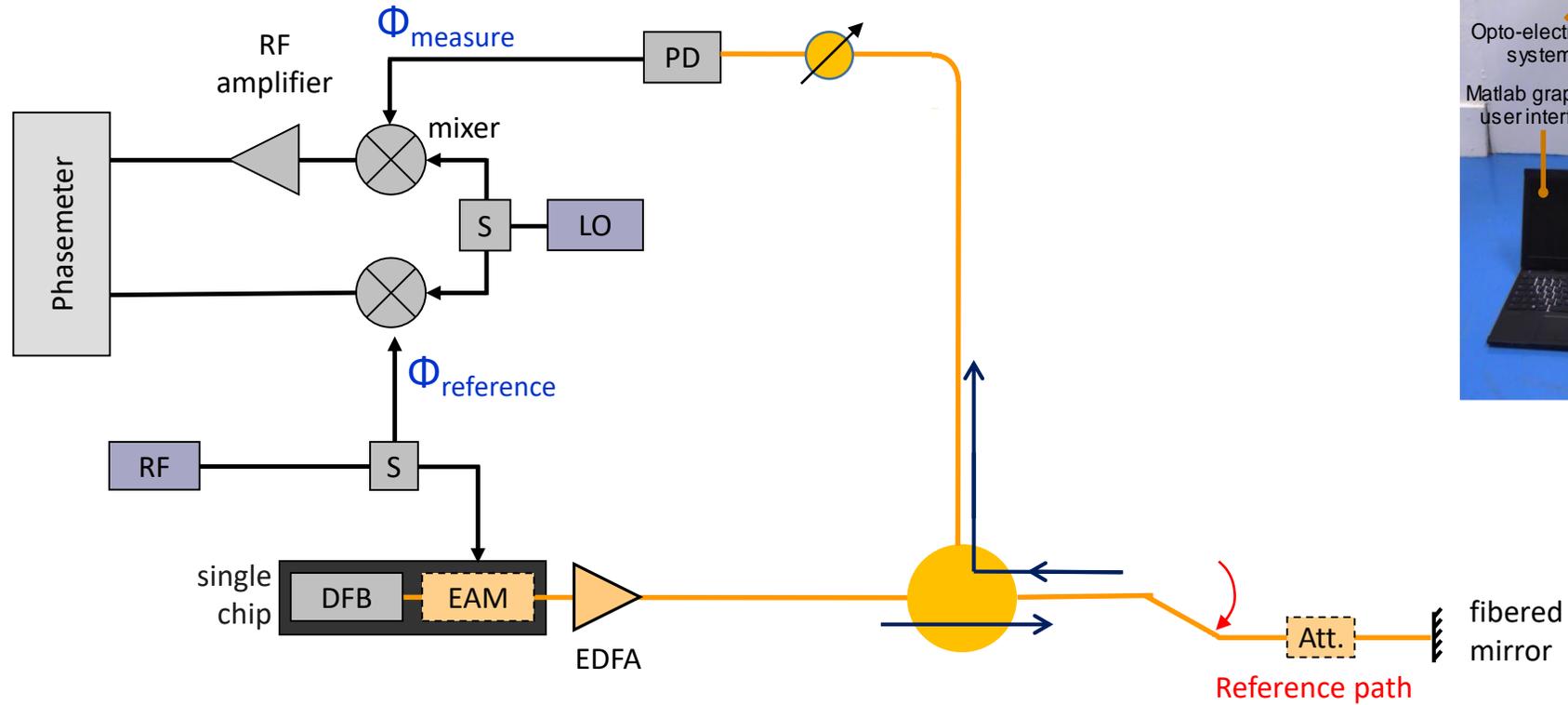


Exemple d'un télémètre optique

- S = RF splitter
- DFB = distributed feedback laser diode
- EDFA = erbium doped fiber amplifier
- SMF = single mode fiber
- EAM = electro-absorption modulator

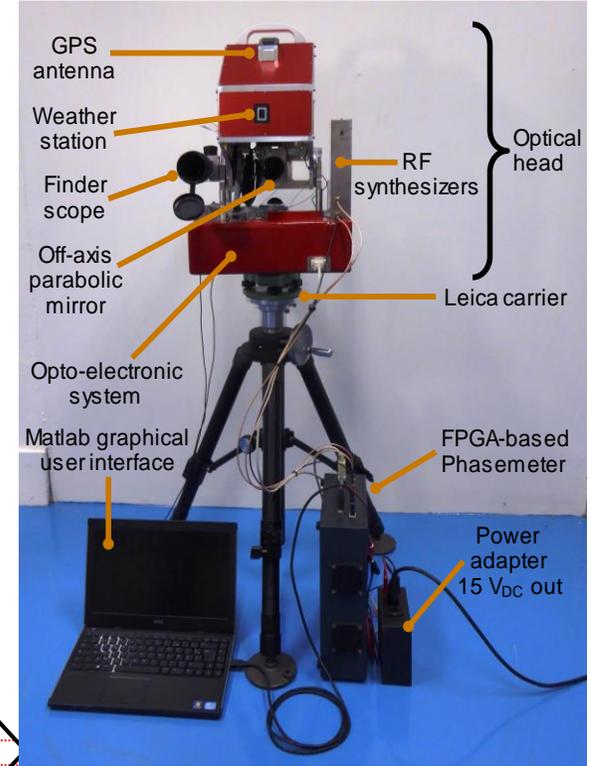
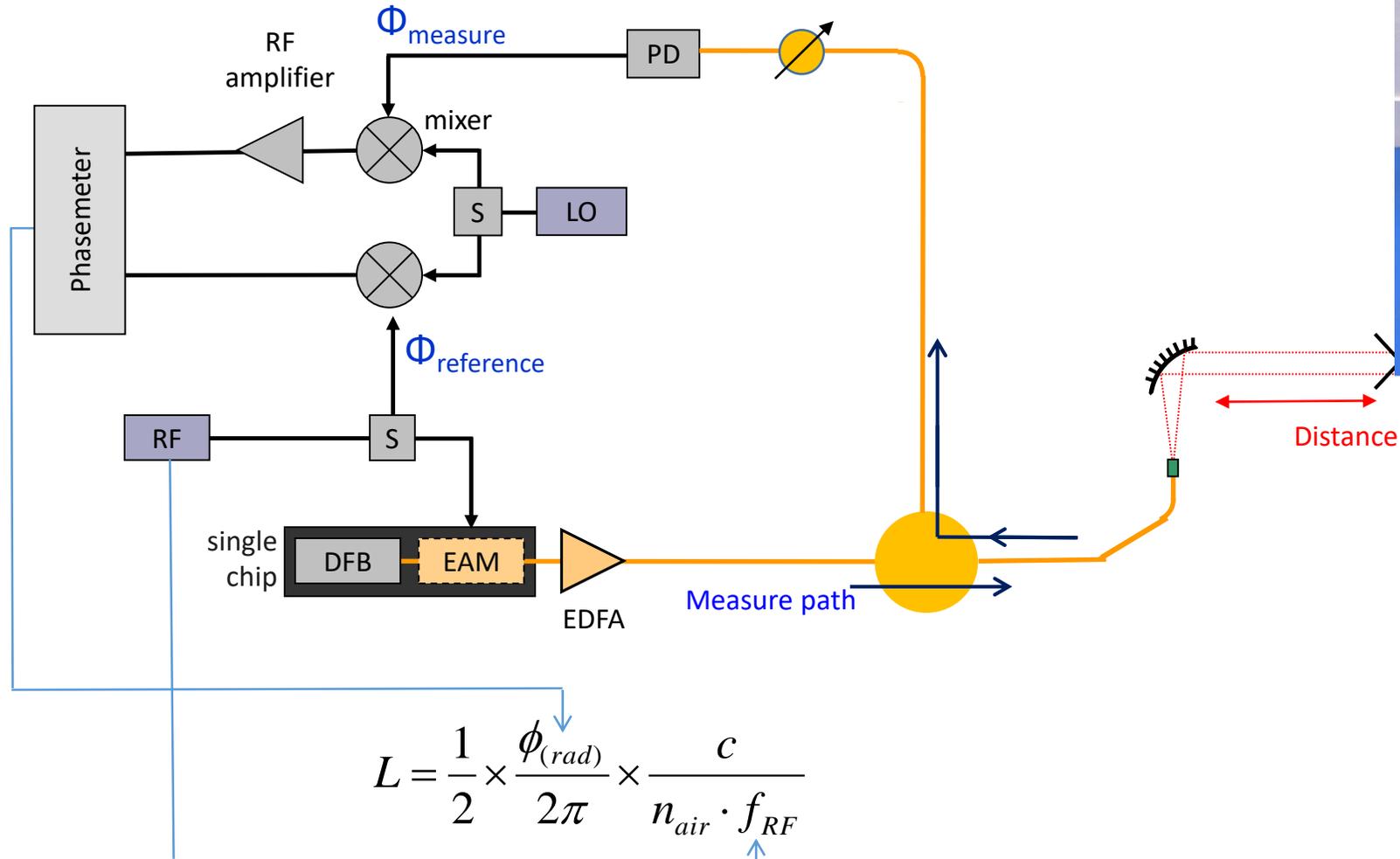


Exemple d'un télémètre optique



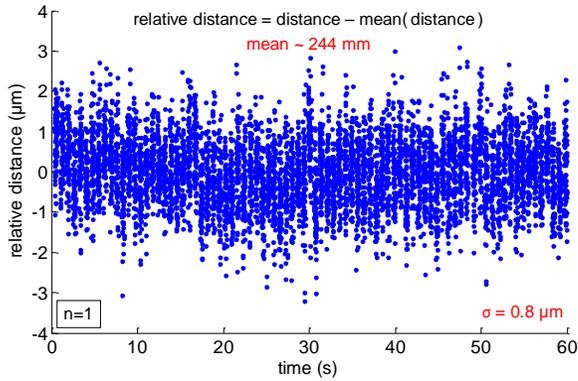
Exemple d'un télémètre optique

- S = RF splitter
- DFB = distributed feedback laser diode
- EDFA = erbium doped fiber amplifier
- SMF = single mode fiber
- EAM = electro-absorption modulator



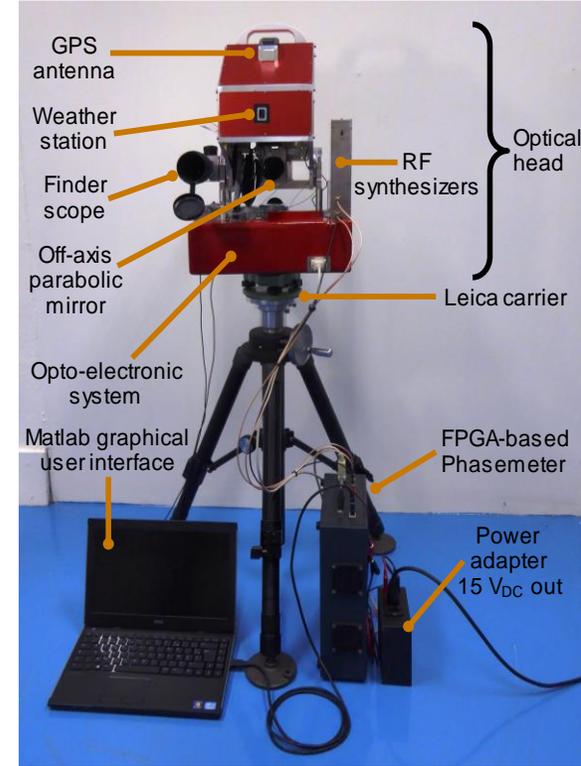
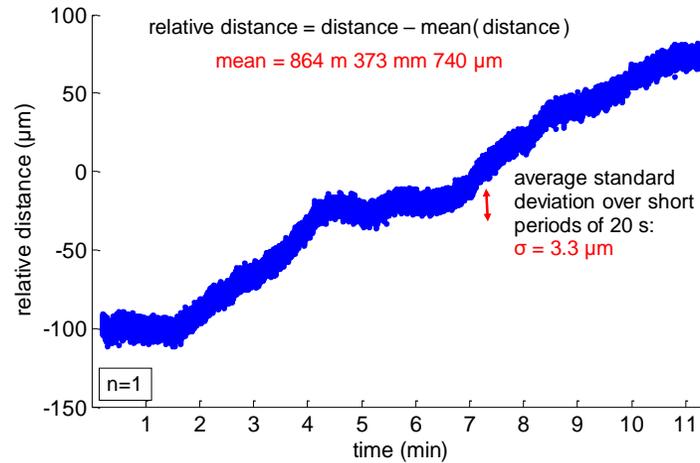
Résolution du télémètre

Résolution intrinsèque: 0,8 μm pour 10 ms d'intégration

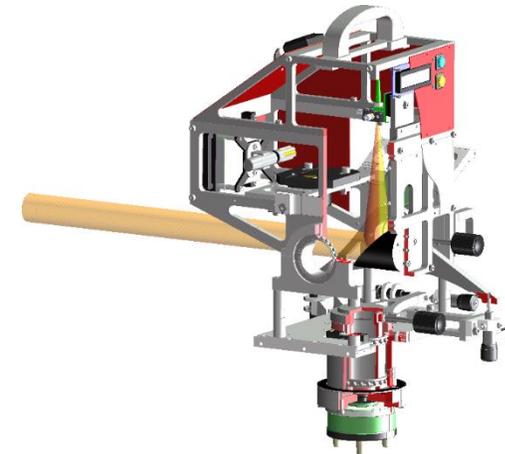
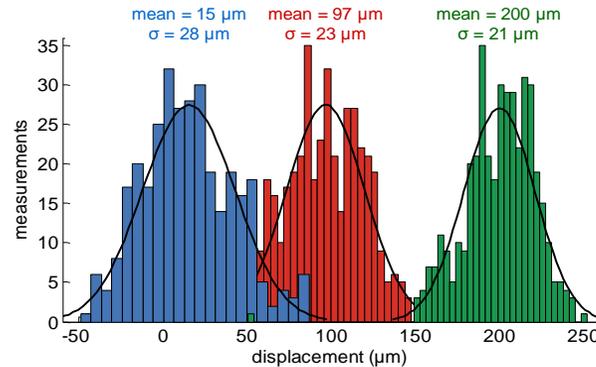
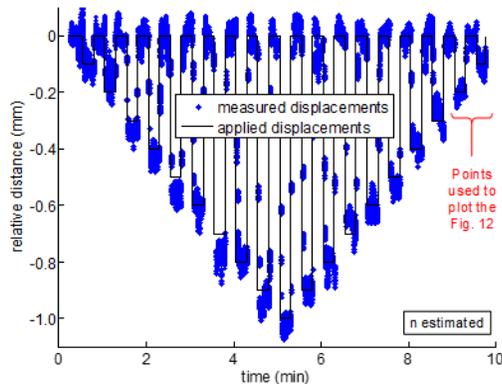


$$\approx 3 \times \frac{2\pi}{100\,000} (10\text{ ms})$$

Mesure d'une distance de 864 m avec des conditions atmosphériques favorables.
 Dispersion à court terme 3 μm

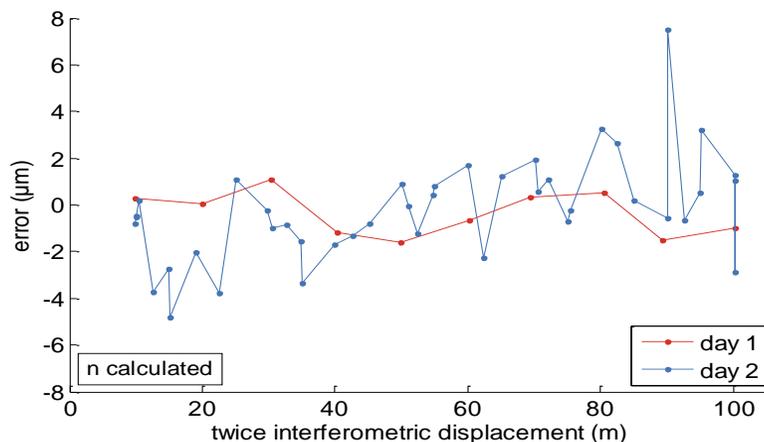
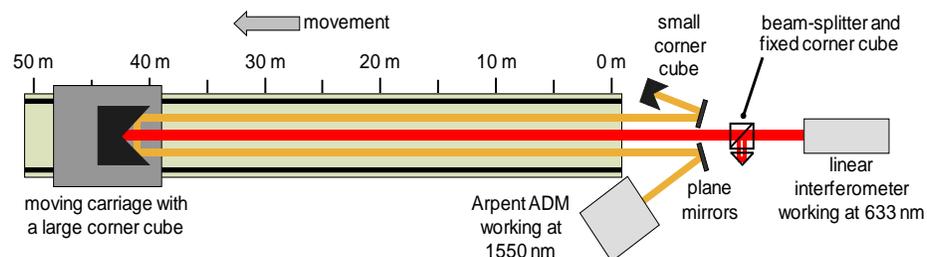


Mesure sur 5,5 km de pas de 100 μm



Validation de la mesure du chemin optique (nxL)

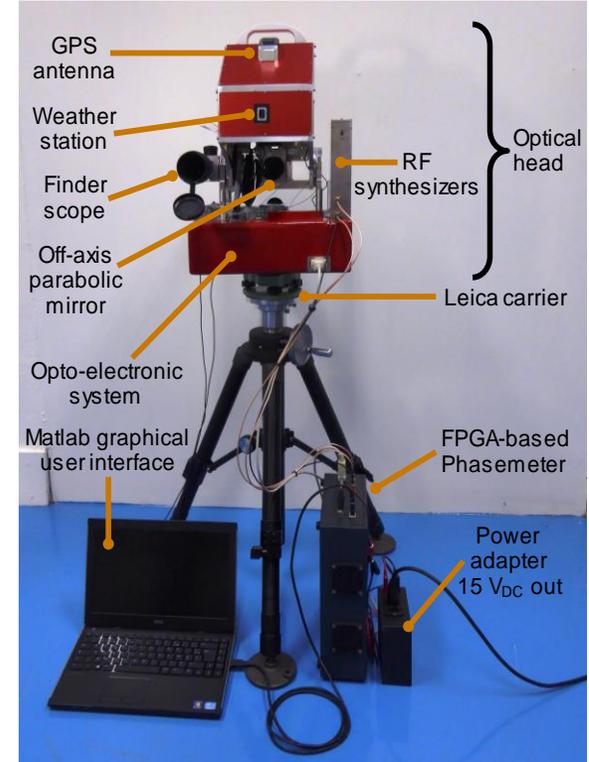
Interféromètre de 50m (ou 100 m en aller-retour) à l'ESGT au Mans



Vérification de l'amplitude de l'erreur périodique < 2-3 µm

Merci à José Cali et Stéphane Durand (ESGT)

Commission GeoPos 8 octobre 2019, observatoire de Paris



Indice de l'air

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

- Formula for air index:

$$n(\lambda, t, p, x, p_w) - 1 = \underbrace{K(\lambda) \cdot D(t, p, x)}_{\text{Air sec}} - \underbrace{p_w \cdot g(\lambda)}_{\text{Correction liée à l'eau}}$$

Bönsch G. and Potulski E. 1998 Measurement of the refractive index of air and comparison with modified Edlen's formula, *Metrologia* **35** 133–9

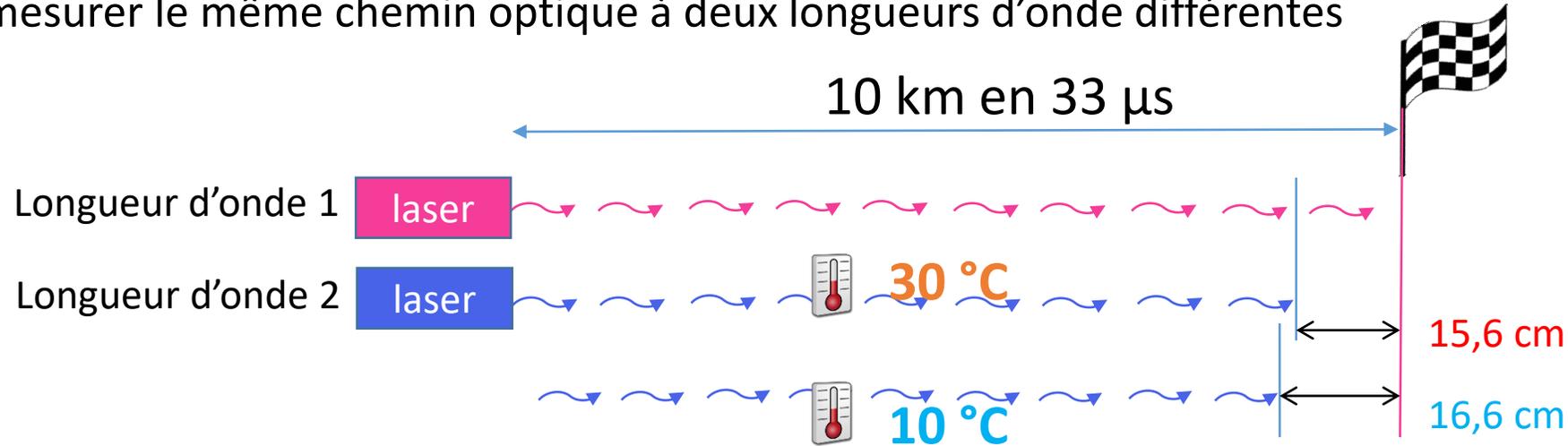
Formule validée à 10^{-8} par comparaison avec des réfractomètres

Ordre de grandeur des coefficients de sensibilité:

- $1 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$: 1mm/km/ $^\circ\text{C}$
- $3 \cdot 10^{-7} / \text{hPa}$: 300 $\mu\text{m}/\text{km}/\text{hPa}$
- $10^{-7} / 10\%\text{RH}$: 100 $\mu\text{m}/\text{km}/(10\%\text{RH})$

Compensation de l'indice de l'air

Principe: mesurer le même chemin optique à deux longueurs d'onde différentes



$$\begin{cases} L \cdot n_1 = L_1 \\ L \cdot n_2 = L_2 \end{cases} \quad \boxed{L = L_1 - A(L_2 - L_1)} \quad \text{avec} \quad A = \frac{n_1 - 1}{n_2 - n_1}$$

$$n(\lambda, t, p, x, p_w) - 1 = K(\lambda) \cdot D(t, p, x) - p_w \cdot g(\lambda)$$

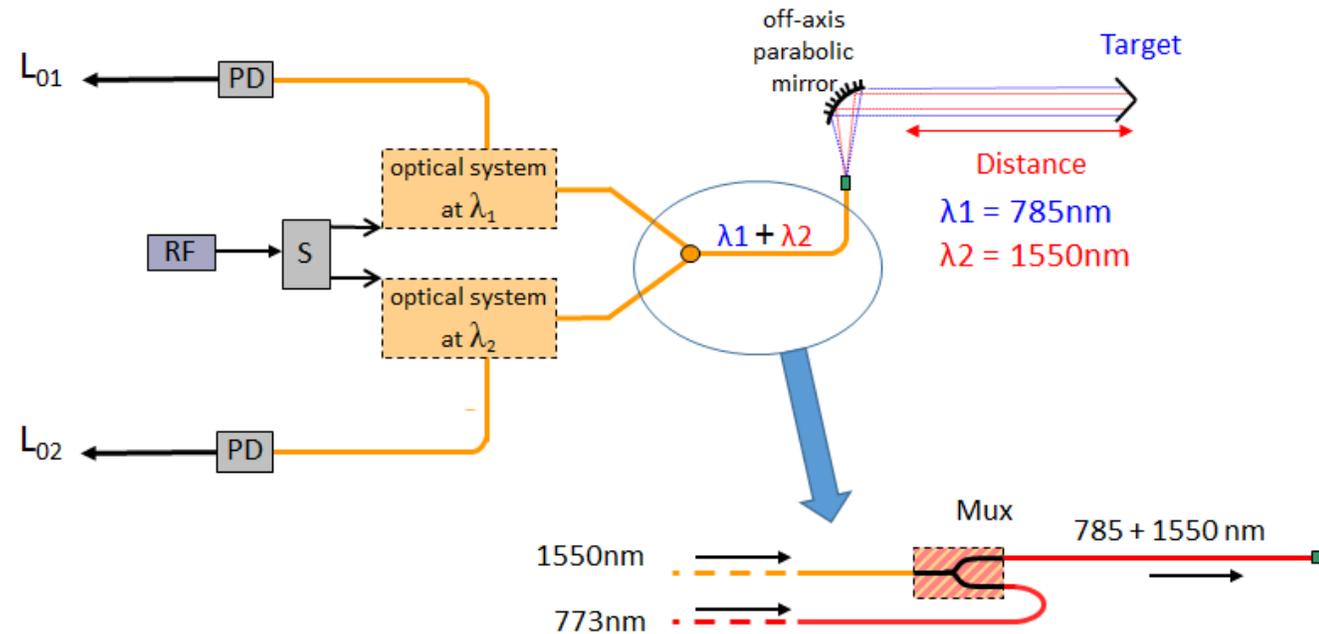
$$\text{En air sec: } n(\lambda, t, p, x, p_w = 0) - 1 = K(\lambda) \cdot D(t, p, x)$$

$$A(p_w = 0) = \frac{K(\lambda_1)}{K(\lambda_2) - K(\lambda_1)} \quad \text{Indépendant des conditions atmosphériques}$$

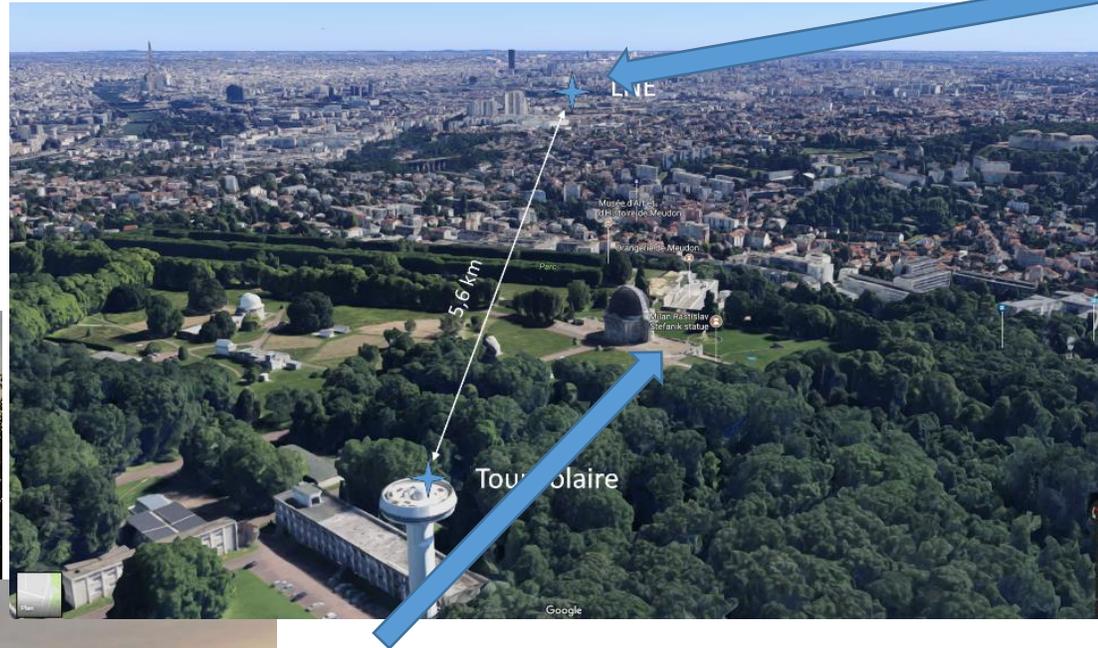
A=50 pour 1560/780 nm ; A=20 pour 1064/532 nm

Réalisation pratique du deux couleurs

- La deuxième longueur d'onde doit être la plus éloignée possible de la première, pour minimiser le facteur A
- La solution technique doit rester simple pour un instrument de terrain
- Si possible pas trop chère!
- Solution retenue: doublage de fréquence du 1550 nm



Exemple de mesure



Observatoire de Paris | PSL

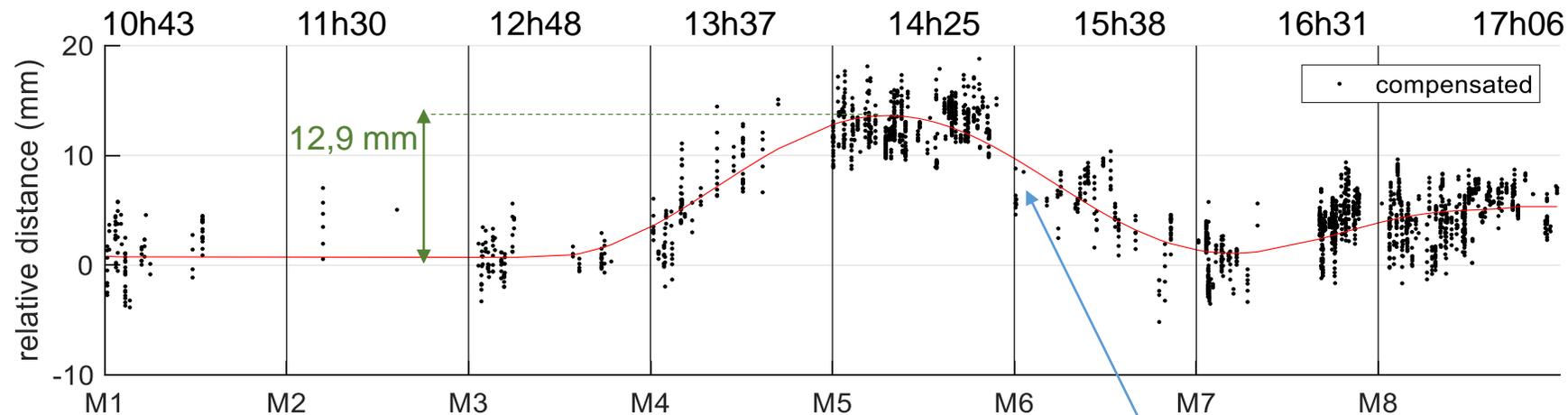
Mesure entre le toit du LNE (Paris 15) et l'observatoire de Paris/site de Meudon: 5,5 km.



Résultats des mesures du 12 octobre

Mesure de distance sans mesure de température et pression atmosphérique (60 mm de variation sans compensation)

Variation autour de $d_0 = 5 \text{ km } 428 \text{ m } 258 \text{ mm}$



Due en grande partie à un manque de signal sur la voie 780 nm.
La compensation est incorrecte pour certaines valeurs du déphasage à 780 nm.



Nouvelle version en cours de réalisation.

Traçabilité des « grandes distances » au SI

Baseline étalon de Nummela (Finlande)



Comparaison d'une ligne de 864 m avec un étalon de quartz de 1 m par une technique d'interférométrie en lumière blanche



Epoch	0 – 24 mm + 24 m	0 – 72 mm + 72 m	0 – 216 mm + 216 m	0 – 432 mm + 432 m	0 – 864 mm + 864 m
1947.7	—	—	—	95.46 ±0.04	122.78 ±0.07
1952.8	—	—	—	95.39 ±0.05	122.47 ±0.08
1955.4	—	—	—	95.31 ±0.05	122.41 ±0.09
1958.8	—	—	—	95.19 ±0.04	122.25 ±0.08
1961.8	—	—	—	95.21 ±0.04	122.33 ±0.08
1966.8	—	—	—	95.16 ±0.04	122.31 ±0.06
1968.8	—	—	—	95.18 ±0.04	122.37 ±0.07
1975.9	—	—	—	94.94 ±0.04	122.33 ±0.07
1977.8	33.28 ±0.02	15.78 ±0.02	54.31 ±0.02	95.10 ±0.05	122.70 ±0.08
1983.8	33.50 ±0.02	15.16 ±0.02	53.66 ±0.04	95.03 ±0.06	—
1984.8	33.29 ±0.03	15.01 ±0.03	53.58 ±0.05	94.93 ±0.06	122.40 ±0.09
1991.8	33.36 ±0.04	14.88 ±0.04	53.24 ±0.06	95.02 ±0.05	122.32 ±0.08
1996.9	33.41 ±0.03	14.87 ±0.04	53.21 ±0.04	95.23 ±0.04	122.75 ±0.07
2005.8	33.23 ±0.04	14.98 ±0.04	53.20 ±0.04	95.36 ±0.05	—

La ligne est connue à 200 μm après comparaison avec l'étalon de 1m.

Projet « GeoMetre »

- Projet du programme EMPIR (European Metrology Program for Innovation and Research), coordonné par PTB. Objectif global:
- Partenaires Français: CNAM, IGN, OCA, CERN
 - CNAM+IGN+UPV: comparaison GNSS/optique
 - CNAM+IGN+UPV+CERN: comparaison GNSS/optique
 - CNAM+IGN+OCA: comparaison SLR(2λ)/télémètre 2λ à Calern
- Mesures sur des sites de colocation (Wettzell, Metsahovi, Calern)
 - Mesures de déformation d'antennes VLBI (prototypes de systèmes de mesure de grands instruments par multilatération)

<https://www.euramet.org/research-innovation/search-research-projects/details/project/large-scale-dimensional-measurements-for-geodesy>

Conclusion

- La prise en compte des paramètres atmosphériques dans les mesures de grande distance dans l'air par voie optique reste la principale limitation de l'exactitude des mesures, à l'échelle du cm.
- Des systèmes à deux longueurs d'onde de terrain et pour le SLR sont en cours de développement, afin de compenser les effets de l'indice de l'air à l'échelle du mm.
- Le projet GeoMetre a pour objectif de finaliser ces systèmes et de valider leur incertitude et de les comparer avec GNSS à l'échelle du mm sur 10 km.